

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

NELSON WILSON PASCHOALINOTO

**Desenvolvimento e aplicação de um sistema de mínima quantidade de lubrificação no
fresamento da liga Ti-6Al-4V**

São Paulo

2022

NELSON WILSON PASCHOALINOTO

**Desenvolvimento e aplicação de um sistema de mínima quantidade de lubrificação no
fresamento da liga Ti-6Al-4V**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

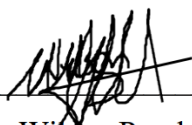
São Paulo

2022

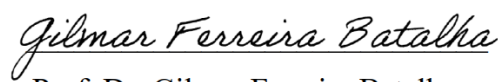
Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de dezembro de 2022.



Nelson Wilson Paschoalinoto



Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Catálogo-na-publicação

Paschoalinoto, Nelson Wilson

Desenvolvimento e aplicação de um sistema de mínima quantidade de lubrificação no fresamento da liga Ti-6Al-4V / N. W. Paschoalinoto -- São Paulo, 2022.

326 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Sustentabilidade 2.Ti-6AL-4V 3.MQL 4.Usinagem criogênica 5.Etanol e Grafite I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Nome: PASCHOALINOTO, Nelson Wilson

Título: Desenvolvimento e aplicação de um sistema de mínima quantidade de lubrificação no fresamento da liga Ti-6Al-4V

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em 03 de novembro de 2022.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - SP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Instituição: Universidade de Caxias do Sul - RS

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Amauri Hassui

Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP - SP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Instituição: FEMEC - Universidade Federal de Uberlândia - MG

Julgamento: Aprovado

Prof. Dra. Déborah de Oliveira

Instituição: Universidade de Brasília – UnB - DF

Julgamento: Aprovado

Dedico este trabalho aos meus pais e minha família,
exemplos para toda a vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, o Criador por me dar força, perseverança e fé.

Aos meus pais Wilson e Rosária (em memória), minha irmã Elza, minha esposa Giuliana, minha filha Heloísa, meu tio Wilio e toda a minha família pelo apoio e compreensão em todas as horas.

Ao meu orientador, Gilmar Ferreira Batalha por mostrar-se presente nas discussões e pelo constante aprendizado.

À Mitsy pelo companheirismo nos momentos de estudo.

Ao professor Jorge Antonio Giles Ferrer pelo auxílio na tomada dos dados. Ao professor Francisco Augusto Teixeira (em memória) pela ajuda em explorar novas ideias. Ao professor Aderval Ferreira de Lima Filho pelo auxílio com a programação da usinagem. A todos os professores da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica que me auxiliaram com alguma informação.

Ao professor Sergio Delijaicov pela ajuda com informações indispensáveis e por me inicializar nesta empreitada. Ao professor Ed Cláudio Bordinassi pelo interesse no trabalho e pela disponibilização do laboratório de usinagem da Escola de Engenharia Mauá para a usinagem de algumas peças. Ao professor Adauto de Farias pelo auxílio com o dinamômetro.

À Vera Piorno De Marcos, bibliotecária e amiga da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica pela grande ajuda.

Aos amigos Gabriel Elias Ribeiro, Marcos Maia Ribeiro e Márcio Renato da Silva do Instituto Mauá de Tecnologia.

Ao Cristiano Cardoso e à Gleicy Ribeiro do Instituto SENAI de Inovação em Manufatura Avançada e Microfabricação.

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram neste trabalho.

“Tem sempre presente que a pele se enrugam, que o cabelo se torna branco, que os dias se convertem em anos, mas o mais importante não muda: tua força interior.” (Madre Teresa de Calcutá). PENSADOR, 2020.

RESUMO

PASCHOALINOTO, Nelson Wilson. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema de mínima quantidade de lubrificação no fresamento da liga Ti-6Al-4V**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O desenvolvimento e aplicação de um dispositivo de mistura de fluidos lubrificantes para usinar uma amostra da liga Ti-6Al-4V foram o foco deste trabalho. Para a construção do dispositivo contou-se com simulações fluidodinâmicas e dados de vazão foram simulados, implementados e medidos. O dispositivo permitiu a escolha e interação de diferentes misturas de fluidos lubrificantes. Os ensaios de fresamento foram realizados de acordo com um planejamento experimental. As condições de corte (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte) utilizadas no fresamento das amostras foram definidas como variáveis independentes do planejamento fatorial e as forças de usinagem foram medidas com um dinamômetro. Um planejamento experimental completo de três variáveis e dois níveis com dois pontos centrais e uma réplica foi usado para a análise estatística de cada abordagem de lubrificação e resfriamento utilizado. Após as operações de usinagem, parâmetros de rugosidade, desgaste dos insertos de corte, dureza e deformação microestrutural a partir da superfície usinada foram medidos. As superfícies usinadas decorrentes de cada estratégia foram analisadas. As respostas em função das variáveis independentes para cada condição de lubrificação e resfriamento foram obtidas pela utilização do software Statistica. Novas concepções de misturas de fluidos para a lubrificação e resfriamento aplicadas como MQL foram propostas com a utilização de misturas de CO₂ sólido com grafite e CO₂ sólido com Etanol (hidratado e puro). Uma abordagem criogênica utilizando nitrogênio líquido por ciclos foi proposta. Redes neurais artificiais foram treinadas e testadas com o intuito de obter-se resultados semelhantes aos das variáveis dependentes medidas. O avanço e a profundidade de corte foram as variáveis mais influentes para a rugosidade e forças de usinagem. A estratégia de lubrificação e resfriamento utilizando Etanol e grafite obteve resultado próximo à abordagem criogênica quando comparadas as rugosidades e ambas propiciaram melhores acabamentos.

Palavras-chave: usinagem, fresamento, etanol e grafite, mínima quantidade de lubrificante (MQL), usinagem criogênica, dispositivo de mistura, Ti-6Al-4V.

ABSTRACT

PASCHOALINOTO, Nelson Wilson. **Development and application of a system with minimal quantity of lubrication when milling a Ti-6Al-4V alloy.** 2022. PHD Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – *Escola Politécnica. Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2022.

This work aimed to describe the development and application of a device that mixes lubricating fluids to machine a sample of Ti-6Al-4V alloy. To build the device, CFD simulations were used, and flow data were simulated, implemented, and measured. The device allowed the choice and interaction of different mixtures of lubricating fluids. The milling tests were carried out according to an experimental design. The cutting conditions (feed, cutting speed and depth of cut) used in milling the samples were defined as variables independent of the factorial design and the machining forces were measured with a dynamometer. A complete three-variable, two-level experimental design with two center points and a replica was used for the statistical analysis of each lubrication and cooling approach. After machining operations, parameters of roughness, wear of cutting inserts, hardness and microstructural deformation from the machined surface were measured. Machined surfaces resulting from each strategy were analyzed. Responses as a function of the independent variables for each lubrication and cooling condition were obtained using the Statistica software. New concepts of fluid mixtures for lubrication and cooling applied as MQL were proposed using mixtures of solid CO₂ with graphite and solid CO₂ with Ethanol (hydrated and pure). A cryogenic approach using cycled liquid nitrogen has been proposed. Artificial neural networks were trained and tested to obtain results similar to those of the measured dependent variables. Feed and depth of cut were the most influential variables for roughness and machining forces. The lubrication and cooling strategy using ethanol and graphite obtained a result close to the cryogenic approach when comparing the roughness and both provided better surface finishes.

Keywords: machining, milling, ethanol and graphite, minimum quantity of lubricant (MQL), cryogenic machining, mixing device, Ti-6Al-4V.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metais e ligas. Usinabilidade x condutividade térmica	30
Figura 1.2 - Sequência dos capítulos apresentados na tese	36
Figura 2.1 - Conceitos de manufatura ao longo dos anos.....	39
Figura 2.2 - Exemplo de fluxograma de entradas e saídas para um processo de usinagem	41
Figura 2.3 - Comparação da usinagem convencional com a usinagem criogênica	42
Figura 2.4 - Classificação dos fluidos	43
Figura 2.5 - Topografia superficial de uma gota	45
Figura 2.6 - Três sequências de gotas de nitrogênio colidindo com um prisma de safira em T_s = (a) 81,0, (b) 92,1K (c) 106,0 K obtida por imagem FTIR. A velocidade de impacto é de 1,3 m / s para todos os casos.....	46
Figura 2.7 - Diagrama de fase exibindo os diferentes regimes de ebulição observados quando variando a velocidade de impacto U e a temperatura do prisma T_s	47
Figura 2.8 - Perda por evaporação em % de diversos tipos de óleos para sistemas MQL segundo DIN51581.....	50
Figura 2.9 – Controle de tempo-MQL.....	51
Figura 2.10 – Bico UN-MQL	52
Figura 2.11 - Métodos de geração de ultrassom de gotículas. (a) Método de atomização por malha. (b) Método de atomização por cavitação. (c) Método de atomização por geração de ondas capilares.....	53
Figura 2.12 - Esquema de lubrificação por quantidade mínima de atomização eletro- hidrodinâmica.....	53
Figura 2.13 – Tipos de jatos de pulverização	56
Figura 2.14 - Mecanismos de desgaste e redução de atrito de nanopartículas durante a usinagem	58
Figura 2.15 – Mecanismos de lubrificação pela utilização de nanofluidos em usinagem.....	59
Figura 2.16 – Porta-ferramentas com circulação interna de fluidos.....	61
Figura 2.17 – Refrigeração criogênica indireta	61
Figura 2.18 – Refrigeração criogênica por jatos.....	62
Figura 2.19 - Dispositivo utilizado para lubrificação. (a) Dispositivo Cryo-tec em corte. (b) Dispositivo Cryo-tec F2334R.....	62
Figura 2.20 – Abordagem utilizada para lubrificação	63
Figura 2.21 -Montagem de refrigeração utilizada	64

Figura 2.22 – Regiões de um jato	65
Figura 2.23 – Concepção utilizada para lubrificação LN ₂ / CO ₂ / MQL.....	66
Figura 2.24 – Dispositivo para usinagem criogênica	66
Figura 2.25 – Tubos de vórtice.....	67
Figura 2.26 – Esquema de um tubo de vórtice de Ranque-Hilsch	67
Figura 2.27 - Eficácia e aplicação de vários sistemas de refrigeração e estratégias de lubrificação	68
Figura 2.28 – Estrutura cristalográfica das ligas alpha e beta	70
Figura 2.29 - Ligas de titânio no diagrama de fases CCT	71
Figura 2.30 – Microestruturas resultantes de resfriamento – Ti-6Al-4V	74
Figura 2.31 – Fresamentos concordante e discordante.....	76
Figura 2.32 – Fresamento frontal. (a) Simétrico comum. (b) Assimétrico concordante.....	76
Figura 2.33 – Fresamento ilustrando o avanço por dente.....	77
Figura 2.34 – Forças de usinagem no fresamento	78
Figura 2.35 – Desgastes nas arestas de corte (a) desgaste de flanco. (b) craterização. (c) aresta postíça de corte. (d) desgaste tipo entalhe. (e) desgaste por deformação plástica. (f) Trinca térmica. (g) lascamento.....	80
Figura 2.36 – Classificação de regiões de deformação plástica	82
Figura 2.37 – Detalhamento da camada de deformação plástica severa e visualização de maclas mecânicas nos grãos. Deformação de subsuperfície em Ti-6Al-4V recozido fresado sob resfriamento criogênico com LN ₂	83
Figura 2.38 – Rotação do reticulado cristalino no fresamento de T1-4%	83
Figura 2.39 - Representação dos níveis presentes num sistema IoT	92
Figura 3.1 - Válvula montada com conectores das mangueiras	93
Figura 3.2 - Protótipo do circuito hidráulico (nitrogênio líquido). Reservatório sob pressão atmosférica.....	94
Figura 3.3 – Circuito hidráulico e pneumático (abordagem MQL).....	95
Figura 3.4 – Abordagens possíveis.....	96
Figura 3.5 – Montagem do dispositivo utilizando válvula solenoide.....	97
Figura 3.6 – Montagem em corte do dispositivo utilizando servomotor.....	97
Figura 3.7 – Montagem em corte do dispositivo utilizando atuador pneumático	98
Figura 3.8 – Circuito pneumático. (a) Acionamento do solenoide. (b) Retorno do cilindro pela mola	98

Figura 3.9 – Circuito pneumático. (a) Acionamento do solenoide. (b) Retorno do cilindro pela mola.	99
Figura 3.10 – Domínio para a simulação com jatos	100
Figura 3.11 – Domínio 2D para a simulação entre óleo e ar comprimido	101
Figura 3.12 – Domínio e refino de malha na região de gotejamento e na região de colisão com a peça / ferramenta.....	101
Figura 3.13 - Linhas de referência para construção do gráfico de fração volumétrica de LN ₂	104
Figura 3.14 - Construção de linhas para aquisição de dados de simulação.....	104
Figura 3.15 - Diagrama elétrico da placa PCB.....	105
Figura 3.16 - Diagrama elétrico da placa PCB.....	106
Figura 3.17 – (a) Placa confeccionada. (b) Placa montada com os componentes eletrônicos	107
Figura 3.18 – Placa Blackboard Pro Mini	108
Figura 3.19 - Válvula solenoide Jefferson.....	108
Figura 3.20 - Equipamentos utilizados para o circuito de LN ₂ . (a) <i>Dewar</i> . (b) <i>Aspersor</i> . (c) Indicação de entrada de ar e saída de nitrogênio líquido.....	109
Figura 3.21 - (a) Compressor portátil. (b) <i>Aspersor</i> montado no <i>Dewar</i>	109
Figura 3.22- Abordagem MQL com Álcool Etilico Hidratado e CO ₂ sólido triturado. (a) CO ₂ sólido triturado. (b) Colocação de álcool etílico no reservatório superior. (c) Visualização do dispositivo atuando	111
Figura 3.23 – Corpo de prova (Ti-6Al-4V) com ensaios executados.....	113
Figura 3.24 - Material como recebido. (a) Ampliação 100x. (b) Ampliação 200x.....	114
Figura 3.25 – Centro de Usinagem CNC ROMI D600 – Instituto Mauá de Tecnologia	115
Figura 3.26 – Teste com nitrogênio líquido	115
Figura 3.27 – (a) Geometria do inserto e (b) Desenho do inserto	116
Figura 3.28 – Exemplo de montagem do inserto e suporte MEC10-S10-11 utilizado.....	116
Figura 3.29 - Dinamômetro de mesa	118
Figura 3.30 - Condicionador de Sinais Quantum MX840B empresa HBM.....	118
Figura 3.31 - Procedimento de medição de rugosidade. (a) Interferômetro de luz branca Talysurf CCI Lite da empresa Taylor Hobson (b) Ilustração da área de medição. (c) Medição sendo efetuada. (d) Exemplo de vista topográfica isométrica	119
Figura 3.32 - Durômetro Wizhard HR500– Mitutoyo.....	120
Figura 3.33 – Procedimento para medições de micro dureza (HV). (a) Durômetro utilizado. (b) Leitura sendo efetuada. (c) Ilustração de medições com espaçamento de 0,1mm	120

Figura 3.34 – (a) Microscópio S6D – Leica (calibração). (b) Microscópio eletrônico de varredura – TESCAN	121
Figura 3.35 – Análise EDS do inserto de corte sem uso. (a) proporção de Al. (b) proporção de N. (c) proporção de Ti. (d) elementos químicos encontrados no inserto. (e) Imagem MEV. 122	
Figura 3.36 – Placas IoT. (a) ESP32 NodeMCU8266. (b) ESP32 Dev Module.....	123
Figura 3.37 – (a) Amplificador de sinal e termopar utilizado para aquisição de temperatura. (b) Módulo relé de 4 canais conectado à placa NodeMCU.....	124
Figura 3.38 - Dashboard criado ilustrando o acionamento de relés e os sensores de nível do reservatório e termopares.....	125
Figura 3.39 – Extração das áreas de abertura da válvula.....	126
Figura 3.40 – Sensor de nível posicionado no interior do reservatório do dispositivo medindo o escoamento	128
Figura 3.41 – Modelo de nível do reservatório por meio do Simulink	129
Figura 3.42 – Modelo de nível do reservatório implementado para diferentes aberturas por meio do Simulink	129
Figura 3.43 - Esquema para obtenção da constante Kv.....	130
Figura 3.44 – Concepção de simulação consistindo de uma entrada de vazão Q_e , uma saída de vazão Q_s e duas válvulas	133
Figura 3.45 - Modelo com duas válvulas de controle.....	138
Figura 3.46 - Modelo com duas válvulas de controle e implementação do gerador de pulso	139
Figura 4.1 - Gráficos das porcentagens de aberturas mapeadas pelo sensor e respectiva regressão linear	141
Figura 4.2 – Curva característica de vazão do dispositivo de mistura fabricado	143
Figura 4.3 – (a) Curva para validação do modelo com abertura de 25% adquirido pelo sensor. (b) Regressão linear.....	144
Figura 4.4 - Esvaziamento do tanque de nitrogênio líquido sob pressão de 6 bar	145
Figura 4.5 – Interpolação linear do esvaziamento do dewar	145
Figura 4.6 – (a) Estabilização de nível em função do tempo	146
Figura 4.7 – (a) Estabilização de nível em função do tempo – MQL (Altura (m) x tempo (s))	147
Figura 4.8 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula	148
Figura 4.9 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula	149
Figura 4.10 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula	149
Figura 4.11 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula	150

Figura 4.12 –Estudo de esvaziamento do reservatório	151
Figura 4.13 – Esvaziamento do reservatório de LN ₂	151
Figura 4.14 - Estimativa da temperatura de saída do nitrogênio líquido.....	152
Figura 4.15 – Simulação CFD de jato de óleo utilizado.....	153
Figura 4.16 – Fração volumétrica de ar, óleo e ar comprimido.....	154
Figura 4.17 - Simulação da velocidade de gota de nitrogênio líquido em 0,03s.....	155
Figura 4.18 – Evolução da gota de nitrogênio ao longo do tempo.....	156
Figura 4.19 - Fração volumétrica de nitrogênio líquido em 0,03s	157
Figura 4.20 – Comportamento do nitrogênio líquido em contato com anteparo.....	158
Figura 4.21 – Perfil de temperatura com simulação com pressão inicial de 6 bar	159
Figura 4.22 – Perfil de velocidade com simulação com pressão inicial de 6 bar	159
Figura 4.23 – Mapeamento da velocidade em função da distância	160
Figura 4.24 – Mapeamento da temperatura em função da distância	160
Figura 4.25 - Concepções do dispositivo. (a) Peças para montagem servomotor. (b) Montagem da concepção utilizando o servomotor	161
Figura 4.26 – (a) Peças para montagem do atuador pneumático. (b) Montagem da concepção utilizando cilindro pneumático	162
Figura 4.27 - Circuito MQL	163
Figura 4.28 – Circuito pneumático para acionamento da válvula 5/2 vias.....	163
Figura 4.29 – Aplicação da válvula de mistura. (a) MQL. (b) Nitrogênio líquido.....	164
Figura 4.30 – Montagem da válvula no cabeçote da máquina. (a) Antes da usinagem. (b) Durante a usinagem	165
Figura 4.31 – Medição de ângulo em diferentes alturas. (a) Altura de 35 mm. (b) Altura de 55 mm. (c) Altura de 75 mm. (d) Altura de 150 mm	166
Figura 4.32 – Jatos – área de abrangência utilizando estratégia MQL.....	168
Figura 4.33 – Jatos. (a) Válvula industrial com sistema de ciclagem desenvolvido. (b) Dispositivo desenvolvido	169
Figura 4.34 – Área da abrangência do fluido. (a) Área molhada e efeito de Leidenfrost. (b) Área molhada antes do início de nova injeção	169
Figura 4.35 – Observação de área de cobertura do jato de nitrogênio líquido (1,0s) – Dispositivo desenvolvido.....	170
Figura 4.36 – Observação da área de cobertura do jato de nitrogênio líquido (0,6s) – Válvula industrial	170

Figura 4.37 – Medição de área de cobertura do jato de nitrogênio líquido – Dispositivo desenvolvido.....	171
Figura 4.38 – Medição de área de cobertura da área molhada de nitrogênio líquido – Dispositivo desenvolvido.....	171
Figura 4.39 – Medição de área de cobertura da área do jato de nitrogênio líquido– Válvula industrial.....	172
Figura 4.40 – Medição de área de cobertura da área molhada de nitrogênio líquido – Válvula industrial.....	172
Figura 4.41 – Área molhada x área de injeção. (a) dispositivo desenvolvido. (b) Válvula industrial.....	173
Figura 4.42 - Gráficos de Pareto para a estratégia sem lubrificação. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	176
Figura 4.43 - Superfícies de resposta para a estratégia sem lubrificação. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).....	177
Figura 4.44 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.....	179
Figura 4.45 – Deformação na superfície usinada	180
Figura 4.46 – Medições de dureza (HV) – Sem lubrificação	180
Figura 4.47 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia sem lubrificação. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5$ mm / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,57$; $S_{sk}=-0,13$; $S_{ku}=3,95$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0$ mm / $f_z = 0,1$ mm/rev ($S_q=1,14$; $S_{sk}=-0,05$; $S_{ku}=3,59$)	181
Figura 4.48 – Desgastes nos insertos sem lubrificação	182
Figura 4.49 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte sem lubrificação. (a) Elementos encontrados. (b) Distribuição de Titânio (c) Distribuição de Nitrogênio.....	183
Figura 4.50 - Gráficos de Pareto para a condição de usinagem com óleo. (a) Força F_x . (b) Força F_y . (c) Força F_z . (d) Torque M_z . (e) Rugosidade S_q . (f)Parâmetro S_{sk}	184
Figura 4.51 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando óleo. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).	185
Figura 4.52 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.....	186
Figura 4.53 – Deformação na superfície usinada	187
Figura 4.54 – Medições de dureza (HV) - Óleo	188

Figura 4.55 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando óleo. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5$ mm / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,68$; $S_{sk}=0,49$; $S_{ku}=5,71$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0$ mm / $f_z = 0,1$ mm/rev ($S_q=0,60$; $S_{sk}=-0,16$; $S_{ku}=3,32$).....	188
Figura 4.56 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com óleo ...	189
Figura 4.57 – Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com óleo. (a) Distribuição de Titânio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados.....	190
Figura 4.58 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando óleo e grafite. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	192
Figura 4.59 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando óleo e grafite. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).....	193
Figura 4.60 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.....	194
Figura 4.61 – Deformação na superfície usinada	195
Figura 4.62 – Medições de dureza (HV) – Óleo + Grafite.....	196
Figura 4.63 – Distribuição de partículas de grafite na superfície usinada.....	196
Figura 4.64 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando óleo e grafite. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5$ mm / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,45$; $S_{sk}=-1,05$; $S_{ku}=15,30$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0$ mm / $f_z = 0,1$ mm/rev ($S_q=0,57$; $S_{sk}=-0,13$; $S_{ku}=3,33$).....	197
Figura 4.65 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição óleo e grafite.....	198
Figura 4.66 – Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com óleo e grafite. (a) Elementos encontrados (b) Distribuição de Carbono. (c) Distribuição de Vanádio	199
Figura 4.67 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	201
Figura 4.68 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).....	202
Figura 4.69 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.....	203
Figura 4.70 – Deformação na superfície usinada.....	204
Figura 4.71 – Medições de dureza (HV) - Óleo.....	205

Figura 4.72 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5$ mm / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,30$; $S_{sk}=-0,50$; $S_{ku}=4,65$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0$ mm / $f_z = 0,1$ mm/rev ($S_q=0,26$; $S_{sk}=0,16$; $S_{ku}=3,42$).	206
Figura 4.73 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com nitrogênio líquido.....	207
Figura 4.74 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.	207
Figura 4.75 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando Álcool Etílico + CO ₂ Sólido. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	209
Figura 4.76 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando Álcool Etílico + CO ₂ Sólido. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).	210
Figura 4.77 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.	211
Figura 4.78 – Deformação na superfície usinada	212
Figura 4.79 – Medições de dureza (HV) – Álcool Etílico Hidratado.....	213
Figura 4.80 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando álcool etílico hidratado. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5$ mm / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,29$; $S_{sk}=0,21$; $S_{ku}=4,38$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0$ mm / $f_z = 0,1$ mm/rev ($S_q=0,43$; $S_{sk}=0,30$; $S_{ku}=4,45$).	214
Figura 4.81 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição sem lubrificação -150x.....	215
Figura 4.82 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com álcool etílico hidratado e CO ₂ sólido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Carbono (d) (d) Elementos encontrados. (e) Distribuição de Vanádio. (f) Distribuição de Titânio.	216
Figura 4.83 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando CO ₂ sólido com Etanol (100%). (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	218
Figura 4.84 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando CO ₂ sólido com Etanol (100%). (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).	219
Figura 4.85 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.	220
Figura 4.86– Deformação na superfície usinada	221

Figura 4.87 – Medições de dureza (HV) – Etanol (100%) +CO ₂	222
Figura 4.88 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando Etanol (100%) + CO ₂ . (a) $v_c=80\text{m/min} / a_p=0,5 \text{ mm} / f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,57; S_{sk}=-0,59; S_{ku}=2,99$). (b) $v_c=100\text{m/min} / a_p=1,0 \text{ mm} / f_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ($S_q=0,82; S_{sk}=-0,90; S_{ku}=4,66$).	223
Figura 4.89 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição sem lubrificação -150x.....	224
Figura 4.90 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.	224
Figura 4.91 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando Etanol (100%) + Grafite. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a	226
Figura 4.92 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando Etanol (100%) + Grafite. (a) $F_x (a_p \times f)$. (b) $F_y (a_p \times f)$. (c) $F_z (a_p \times f)$. (d) $M_z (a_p \times f)$. (e) $S_a (a_p \times f)$	227
Figura 4.93 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.....	228
Figura 4.94 – Superfície usinada.	229
Figura 4.95 – Medições de dureza (HV) – Etanol + Grafite.	230
Figura 4.96 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando Etanol + Grafite. (a) $v_c=80\text{m/min} / a_p=0,5 \text{ mm} / f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,42; S_{sk}=-0,57; S_{ku}=5,27$). (b) $v_c=100\text{m/min} / a_p=1,0 \text{ mm} / f_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ($S_q=0,38; S_{sk}=0,79; S_{ku}=6,34$).	231
Figura 4.97 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com Etanol e Grafite.....	232
Figura 4.98 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.	233
Figura 4.99 – Treinamento das redes neurais artificiais. (a) F_x x amostras treinadas. (b) F_y x amostras treinadas. (c) F_z x amostras treinadas. (d) M_z x amostras treinadas. (e) S_a x amostras treinadas.....	235
Figura 4.100 – Comparação entre Entradas e Saídas dos testes das redes neurais artificiais. (a) F_x x amostras testadas. (b) F_y x amostras testadas. (c) F_z x amostras testadas. (d) M_z x amostras testadas. (e) S_a x amostras testadas.....	236

Figura 4.101 - Diferenças entre os pares de média. (a) F_x (b) F_y . (c) F_z . (d) Torque M_z . (e) S_q . (f) S_{sk} . (g) S_{ku}	238
Figura 5.1 – Deformação lateral a partir da superfície usinada.....	240
Figura 5.2 – Rugosidade S_a	241
Figura 5.3 – Superfícies obtidas das diferentes estratégias de lubrificação e resfriamento. ..	244
Figura 5.4 – Forças de Usinagem	245
Figura 5.5 - Desgaste V_b dos insertos de corte.....	248
Figura 5.6 – Variação de micro dureza Vickers a partir da superfície usinada.	250
Figura 5.7 - Análise SWOT	251

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades das ligas alfa, alfa + beta e beta. (+) Melhores propriedades. (-) Piores propriedades.....	73
Tabela 3.1 – Domínio - CFX.....	102
Tabela 3.2 – Condições de contorno - CFX	102
Tabela 3.3 - Lista de componentes para a placa PCB do sistema de gotejamento.....	106
Tabela 3.4 -Planejamento fatorial seguido para a usinagem	112
Tabela 3.5 - Composição química do material utilizado neste trabalho.....	113
Tabela 3.6 – Informações do inserto de corte.....	116
Tabela 3.7 - Propriedades principais do óleo Superfluido 3 utilizado na abordagem MQL ..	117
Tabela 3.8 – Variáveis utilizadas na simulação do modelo de tanque	134
Tabela 4.1 – Medições de área de abertura e dados de tempo de esvaziamento teóricos calculados	140
Tabela 4.2 - Valores experimentais de esvaziamento do reservatório	141
Tabela 4.3 - Dados experimentais do escoamento de fluido	143
Tabela 4.4 – Estabilização para diferentes aberturas.....	146
Tabela 4.5 – Procedimento para análise dos resultados	174
Tabela 4.6 – Planejamento fatorial dos ensaios sem lubrificação	175
Tabela 4.7 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	178
Tabela 4.8 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de óleo.....	183
Tabela 4.9 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	186
Tabela 4.10 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de óleo e grafite.....	191
Tabela 4.11 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	194
Tabela 4.12 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de nitrogênio líquido.....	200
Tabela 4.13 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	203
Tabela 4.14 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Álcool Etilico + CO ₂ Sólido.....	208
Tabela 4.15 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	211

Tabela 4.16 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Etanol (100%) + CO ₂ sólido.	217
Tabela 4.17 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	220
Tabela 4.18 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Etanol (100%) + Grafite.	225
Tabela 4.19 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.....	228
Tabela 4.20 - Amostras escolhidas aleatoriamente para testes dos treinamentos das ANNs criadas.....	234
Tabela 4.21 - Arquitetura das redes neurais artificiais.	235
Tabela 5.1 - Estatística descritiva – Deformação subsuperficial.....	240
Tabela 5.2 - Estatística descritiva – parâmetros de rugosidade para a mínima e máxima condição de corte.	242
Tabela 5.3 - Estatística descritiva – rugosidade S _a	243
Tabela 5.4 - Estatística descritiva – Forças de usinagem e torque.	247
Tabela 5.5. Desgastes encontrados nos insertos utilizados	250

LISTA DE SIGLAS

ANN – Artificial Neural Network (Redes Neurais Artificiais)

CFD – Computational Fluid Dynamics

CPS – Sistema Cyber Físico

DOE – Design of experiments

EDS - Espectroscopia de raios X por dispersão de energia

GHS – Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de produtos químicos

IoT – Internet das coisas

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MQCL – Mínima quantidade de resfriamento e lubrificação

MQL – Mínima quantidade de lubrificação

SMED – Single Minute Exchange Die

SPD – Deformação Plástica Severa

STP – Sistema Toyota de Produção

RNA – Redes Neurais Artificiais

TI – Tecnologia da informação

LISTA DE SÍMBOLOS

k - equação da conservação de massa

ε_k - fração volumétrica referente à fase k

ρ_k - densidade referente à fase k

\vec{V}_k - velocidade referente à fase k

∇ - derivada parcial de quantidade

\vec{R}_{jk} - a interação entre as fases j com a fase k

\dot{m}_{jk} - transferência de massa entre as n fases j com a fase k

\vec{V}_{jk} - velocidade interfacial entre cada fase j com a fase k

\vec{F}_k - forças externas de campo

\vec{F}_{sustk} - força de sustentação

$\vec{F}_{mv,k}$ - força de massa virtual

τ_k - tensor das tensões cisalhantes para a fase k

C_{jk} - coeficiente de troca de quantidade de movimento na interface entre as fases j e k
(velocidade relativa entre estas)

$A_{\alpha\beta}$ - área interfacial entre as fases α e β

ε_α - fração volumétricas da fase α

ε_β - fração volumétricas da fase β

$d_{\alpha\beta}$ - escala do comprimento interfacial

ρ_m - densidade da mistura para cada volume de controle

k_{eff} - condutividade térmica efetiva

E - energia

S_h - contribuições de radiação e quaisquer outras fontes de calor

$k-\varepsilon \rightarrow k$ - energia cinética turbulenta

$k-\varepsilon \rightarrow \varepsilon$ - taxa de dissipação de flutuações de velocidade

S_M - somatória de forças no corpo

p' - pressão modificada

μ_t - viscosidade turbulenta

μ_{eff} - viscosidade efetiva

P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ - forças de flutuação

P_k - turbulência em razão das forças viscosas

t - tempo de esvaziamento

g - ação do campo gravitacional da Terra [m/s^2]

h - altura da coluna do fluido

Q - vazão [l/min]

dv - variação do volume

dh - variação da altura

A - área da secção transversal da tubulação

a - área do orifício

v - velocidade

h - altura da coluna do fluido

Δh - variação de altura de coluna de fluido

h_{L-T} - perda de carga total

K - coeficiente de carga localizada

\underline{V} - velocidade média do escoamento

m - massa

ΔP - variação de pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Justificativa	31
1.2	Objetivos da pesquisa	33
	<i>1.2.1 Objetivos Gerais</i>	<i>33</i>
	<i>1.2.2 Objetivos específicos</i>	<i>34</i>
1.3	Estratégia da tese e organização do texto	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	Produção sustentável e a usinagem criogênica	37
	<i>2.1.1 Comportamento do nitrogênio líquido</i>	<i>45</i>
2.2	Abordagem MQL	47
	<i>2.2.1 Lubrificantes sólidos</i>	<i>57</i>
2.3	Resfriamento criogênico na usinagem de metais	59
2.4	O titânio e suas ligas	69
2.5	Fresamento	75
2.6	Desgaste e vida da ferramenta	78
2.7	Acabamento Superficial	81
2.8	Análise CFD	84
2.9	Redes neurais artificiais	88
2.10	Internet das coisas	90
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	93
3.1	Teste do protótipo de aplicação de fluidos MQL	93
	<i>3.1.1 Montagem dos circuitos hidráulicos e pneumáticos</i>	<i>94</i>
3.2	Projeto e utilização dos dispositivos de mistura para aplicação de fluidos de corte 96	
3.3	Simulações CFD	99
3.4	Sistema de injeção por ciclos	105
3.5	Estratégias de usinagem	110
	<i>3.5.1 Corpo de Prova</i>	<i>113</i>
	<i>3.5.2 Máquina operatriz</i>	<i>114</i>
	<i>3.5.3 Inserto de corte</i>	<i>115</i>
	<i>3.5.4 Óleo lubrificante</i>	<i>117</i>
3.6	Variáveis de saída	117

3.6.1	<i>Medições de forças de usinagem</i>	117
3.6.1.2	<i>Medições de forças de usinagem</i>	117
3.6.2	<i>Medições de rugosidade</i>	119
3.6.3	<i>Medições de Dureza (HRC e HV)</i>	119
3.6.4	<i>Medições do desgaste dos insertos de corte</i>	121
3.6.5	<i>Módulo IoT</i>	122
3.7	Curvas características do dispositivo de mistura e obtenção da função de transferência	125
3.7.1	<i>Escoamento de fluido do reservatório do dispositivo de mistura sob ação do campo gravitacional.</i>	125
3.7.2	<i>Escoamento de LN₂ do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento</i> 128	
3.7.3	<i>Escoamento do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento - MQL</i> 130	
3.7.4	<i>Determinação da constante Kv do dispositivo de mistura</i>	130
3.7.5	<i>Preenchimento do reservatório com atuação de duas válvulas</i>	132
3.8	Redes neurais artificiais	139
4	RESULTADOS	140
4.1	Dispositivo de mistura: concepção e comportamento	140
4.1.1	<i>Curva característica da vazão do dispositivo de mistura</i>	140
4.1.2	<i>Escoamento de fluido do reservatório do dispositivo de mistura sob ação do campo gravitacional.</i>	141
4.1.3	<i>Escoamento de LN₂ do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento</i> 144	
4.1.4	<i>Escoamento do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento - MQL</i> 146	
4.1.5	<i>Determinação da constante Kv do dispositivo de mistura</i>	147
4.1.6	<i>Preenchimento do reservatório com atuação de duas válvulas</i>	148
4.2	Simulações CFD	150
4.2.1	<i>Simulação 1 – Esvaziamento do reservatório</i>	150
4.2.2	<i>Simulação 2 – Jato sob pressão</i>	153
4.2.3	<i>Simulação 3 – Mistura MQL</i>	153
4.2.4	<i>Simulação 4 -Gota de nitrogênio sob ação gravitacional</i>	155
4.2.5	<i>Simulação 5 - Análise CFD para jato de nitrogênio com a válvula de mistura.</i>	159

4.3	Construção e montagem dos dispositivos de mistura	161
4.4	Medições e análise dos jatos	165
4.4.1	<i>Jato MQL</i>	165
4.4.2	<i>Jato – Nitrogênio líquido</i>.....	168
4.5	Abordagens utilizadas no fresamento da liga Ti-6Al-4V	174
4.5.1	<i>Usinagem sem lubrificação</i>	174
4.5.1.1	Planejamento fatorial	174
4.5.1.2	Superfície usinada.....	178
4.5.1.3	Rugosidade.....	180
4.5.1.4	Desgaste do inserto de corte	181
4.5.2	<i>Usinagem utilizando lubrificação com Óleo</i>	183
4.5.2.1	Planejamento fatorial	183
4.5.2.2	Superfície usinada.....	186
4.5.2.3	Rugosidade.....	188
4.5.2.4	Desgaste do inserto de corte	189
4.5.3	<i>Usinagem utilizando lubrificação com Óleo + Grafite</i>	191
4.5.3.1	Planejamento fatorial	191
4.5.3.2	Superfície usinada.....	194
4.5.3.3	Rugosidade.....	197
4.5.3.4	Desgaste do inserto de corte	198
4.5.4	<i>Usinagem utilizando lubrificação intermitente com Nitrogênio Líquido</i>	199
4.5.4.1	Planejamento fatorial	199
4.5.4.2	Superfície usinada.....	203
4.5.4.3	Rugosidade.....	205
4.5.4.4	Desgaste do inserto de corte	206
4.5.5	<i>Usinagem utilizando lubrificação com Álcool Etílico + CO₂ Sólido</i>.....	208
4.5.5.1	Planejamento fatorial	208
4.5.5.2	Superfície usinada.....	211
4.5.5.3	Rugosidade.....	213
4.5.5.4	Desgaste do inserto de corte	214
4.5.6	<i>Usinagem utilizando CO₂ sólido com Etanol (100%)</i>	217
4.5.6.1	Planejamento fatorial	217
4.5.6.2	Superfície usinada.....	220
4.5.6.3	Rugosidade.....	222

4.5.6.4	Desgaste do inserto de corte	223
4.5.7	<i>Usinagem utilizando Grafite com Etanol (100%)</i>	225
4.5.7.1	Planejamento fatorial	225
4.5.7.2	Superfície usinada	228
4.5.7.3	Rugosidade.....	230
4.5.7.4	Desgaste do inserto de corte	231
4.6	Predições dos resultados pelas redes neurais artificiais (RNAs)	233
4.7	Análise comparativa das predições.....	237
5	DISCUSSÃO.....	239
5.1	Deformação subsuperficial.....	239
5.2	Resultados estatísticos das medições de rugosidade	240
5.3	Acabamento superficial	243
5.4	Análise dos esforços de corte.....	244
5.5	Análise do desgaste da ferramenta de corte	247
5.6	Análise de dureza Vickers	250
5.7	Matriz SWOT	251
6	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	252
7	CONCLUSÕES	253
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	255
9	PUBLICAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DESTE ESTUDO.....	256
	REFERÊNCIAS	258
	APÊNDICE A – Desenhos do dispositivo	273
	APÊNDICE B – Programação	280
	APÊNDICE C – PANORAMA DE PESQUISA	288
	APÊNDICE D - Sistemas MQL.....	290
	ANEXO A – Propriedades - N₂ e CO₂	325

1 INTRODUÇÃO

O titânio e suas ligas são amplamente utilizados devido a sua alta resistência à corrosão, excelente resistência mecânica, baixa densidade e elevada biocompatibilidade. No entanto, a usinagem é difícil porque possui alta resistência ao desgaste e reage quimicamente com muitos materiais das ferramentas de corte, provocando um desgaste acelerado (BALDO, 2013).

O monitoramento das forças de corte é importante para prever o desempenho do processo de usinagem. O material a ser usinado, os parâmetros de entrada como o avanço, a velocidade de corte e a profundidade de penetração, a geometria do inserto de corte, o desgaste da ferramenta e o atrito afetam as forças de usinagem (RIBEIRO; ABRÃO; SALES, 2006). Uma atenção especial deve ser dada para a seleção dos parâmetros de usinagem empregados (BALDO, 2013).

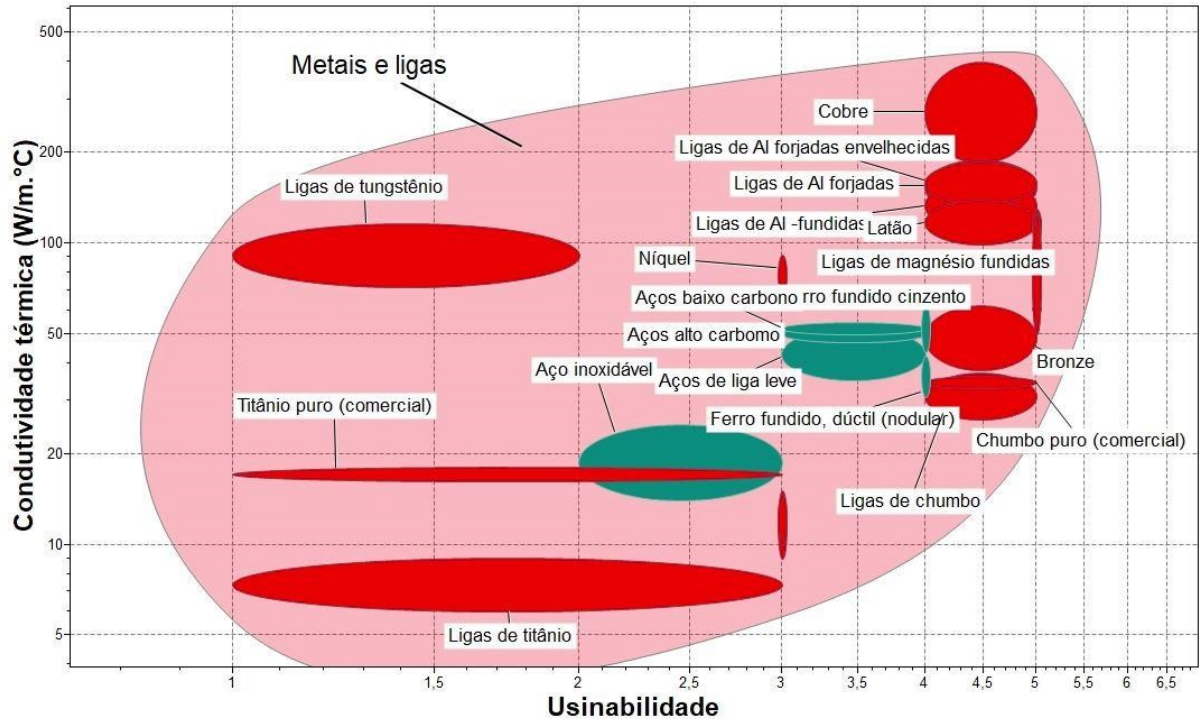
A liga de titânio Ti-6Al-4V é uma das mais importantes na indústria. Pesquisas demonstram que 80% deste material são utilizados na indústria aeroespacial. As ligas de titânio também são materiais notoriamente difíceis de serem usinados perante suas propriedades materiais únicas, impondo um grande gargalo em sistemas de manufatura. O resfriamento criogênico foi reconhecido como uma técnica alternativa de refrigeração para melhorar a usinagem de diferentes materiais. Embora o fresamento seja considerada a principal operação de usinagem para a fabricação de componentes de titânio em indústrias aeroespaciais, estudos em usinagem de ligas de titânio são predominantemente concentradas em operações de torneamento (SHOKRANI, DHOKIA, NEWMAN, 2016).

A alta reatividade química das ligas de titânio durante a usinagem e a baixa condutividade térmica levam ao acúmulo de calor na zona de corte durante a usinagem dessas ligas em altas velocidades de corte. O aumento da temperatura devido ao acúmulo de calor propicia o desgaste da ferramenta de corte, a má qualidade da superfície usinada e, portanto, a baixa eficiência da usinagem. O uso de parâmetros de corte e ferramenta de corte apropriados, mínima quantidade de lubrificação (MQL), fluido de resfriamento convencional, ar com alta pressão e resfriamento criogênico melhoram a produtividade na usinagem dessas ligas (BAYRAKTAR, 2020).

A Figura 1.1 criada por meio do software GRANTA Edupack 2020, ilustra o comportamento dos metais e ligas em decorrência da usinabilidade frente à condutividade térmica. Nesta pode-se observar a baixa condutividade térmica das ligas de titânio e a difícil usinabilidade. Na escala a usinabilidade é caracterizada usando uma escala de 1 a 5 (péssima - excelente usinabilidade). A usinabilidade é aqui caracterizada pela facilidade ou dificuldade

com a qual o material pode ser usinado. Um material tem boa usinabilidade se o desgaste da ferramenta e as forças de corte forem baixas, a velocidade de corte for alta e o acabamento superficial for bom (GRANTA Edupack, 2020).

Figura 1.1 - Metais e ligas. Usinabilidade x condutividade térmica



Fonte: Dados do autor.

Nos processos de usinagem, o uso de forma incorreta de fluidos de corte é uma grande preocupação de sustentabilidade. Além de ser um dos principais contribuintes de custo para o processo de usinagem, o uso do fluido de corte causa enormes impactos ambientais e sociais, envolvendo efeitos para a saúde e para o chão-de-fábrica. Por outro lado, a aplicação adequada de fluidos de corte tem um significativo impacto no desempenho da usinagem. O esforço contínuo para melhorar o desempenho de corte levou ao desenvolvimento de soluções alternativas, tais como a, usinagem com quantidade mínima de lubrificação (MQL) e usinagem criogênica (LU, 2014).

Na prática, se utiliza também óleo emulsionável com pressão para a usinagem das ligas de titânio. No aspecto funcional estes métodos não são considerados eficientes. Além disso, os fluidos de corte têm alta toxicidade humana (operadores de máquinas) e não são ambientalmente amigáveis. O contato direto com fluidos de corte pode causar doenças de pele, doenças respiratórias e alérgicas. Além disso, a qualidade do fluido de corte se deteriora com o

uso. Os fluidos de corte requerem manutenção pois fornecem um ambiente rico para bactérias e crescimento de fungos. Novas formas de injeção destes fluidos estão sendo estudadas. Bicos dosadores e mangueiras estão sendo experimentados (ARAMCHAROEN, 2016).

O tema proposto neste trabalho se refere ao estudo de um dispositivo de mistura de fluidos de corte por ciclos de injeção de nitrogênio líquido e abordagem MQL para usinagem envolvendo duas vertentes. A primeira possibilita a aplicação de dispositivos de lubrificação e mistura de fluidos lubrificantes de baixo custo em condições de usinagem distintas em pequenas quantidades. A segunda vertente baseia-se em um planejamento fatorial com base nos resultados da usinagem. Predições de variáveis dependentes por meio de um planejamento fatorial e redes neurais artificiais foram executadas. O trabalho tem como uma das premissas pesquisar condições ideais de usinagem visando à melhoria da qualidade dos produtos obtidos.

1.1 Justificativa

A usinagem criogênica é uma tecnologia ambientalmente correta sendo estudada em laboratório nas últimas décadas. No entanto, um desafio é como implementar essa tecnologia no chão de fábrica. É difícil integrar meios criogênicos com a máquina-ferramenta devido ao ponto de ebulição negativo do nitrogênio líquido que poderia instantaneamente congelar o sistema de usinagem. A prática existente é voltada principalmente para explorar bicos dosadores e mangueiras. Essas configurações de bicos são difíceis de ajustar especialmente quando o bico fica congelado. Por isso, as questões mencionadas limitam a implementação da usinagem criogênica e mesmo com toda a vantagem de utilizá-la ainda não está difundida (ARAMCHAROEN, 2016). Segundo Musfirah et al. (2015) a fim de aumentar o desempenho de usinagem de superligas, diversos métodos de refrigeração / lubrificação estão sendo promovidos e uma das técnicas mais recentes é a utilização de métodos criogênicos. No entanto, existem ainda muita incerteza sobre a ação do fluido criogênico e, especialmente, sobre suas capacidades de refrigeração e / ou lubrificação no desempenho da ferramenta. Dhar et al. (2006a) comentam que o descarte dos fluidos de corte pode possibilitar a poluição da água e contaminação do solo. A reciclagem e reutilização de fluidos de corte convencionais são problemas.

O efeito criogênico no desempenho da usinagem foi estudado extensivamente para vários materiais de trabalho, como Inconel 718, Ti-6Al-4V, aços, metais refratários, biomateriais, entre outros. Em muitos estudos foram relatados que a usinagem propicia melhor desempenho com base nas forças de corte e desgaste da ferramenta. Por outro lado, do ponto

de vista do produto, na integridade superficial das peças usinadas, os estudos estão começando. Além disso, alguns resultados são conflitantes como o aumento das forças de corte, fratura prematura dos insertos (JAWAHIR et al., 2016a).

Existem muitos estudos voltados para a influência da usinagem criogênica no desgaste da ferramenta. No entanto, ainda não é claro se esta abordagem pode aumentar a resistência da ferramenta por um resfriamento levando em conta todos os componentes envolvidos (inserto, cavaco e material da peça) ou por uma abordagem na qual o fluido somente atua na interface local, como o atrito na interação do material de trabalho da ferramenta (JAWAHIR et al., 2016a). O atrito na interface entre peça e ferramenta foi estudado por Hong e Ding (2001) entre outros. Os autores usinaram ligas de titânio. Este estudo mostrou que o coeficiente de atrito depende fortemente do posicionamento do bico de lubrificação e do quebra-cavaco, podendo levar a valores inconsistentes.

A usinagem criogênica geralmente é acompanhada por mudanças nas propriedades da peça de trabalho e pode afetar também os materiais da ferramenta de corte. As temperaturas baixas podem aumentar a resistência e a dureza e diminuir a porcentagem de alongamento e tenacidade à fratura dos materiais. Resfriamento criogênico pode ser benéfico para a usinagem dos materiais que na temperatura ambiente tem grandes alongamentos, baixo módulo de elasticidade e são muito dúcteis, como os elastômeros. Além disso, aumenta a dureza da ferramenta de corte melhorando a resistência ao desgaste e a vida da ferramenta (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012). A aplicação com criogenia mostrou melhor produtividade e qualidade do produto, apesar do alto custo. Apesar da redução de desgaste dos insertos, a pressão do nitrogênio líquido e a busca por um fluxo contínuo são fatores críticos (LAWAL; CHOIDHURY; NUKMAN, 2013).

Deshpande e Deshpande (2019), dizem que os estudos na área de lubrificação englobam diferentes técnicas e que nenhum método garante o sucesso em termos de resfriamento significativo nas operações de usinagem. Além da lubrificação por métodos convencionais são utilizadas técnicas como resfriamento à base de gás, de água, MQL, nano-fluido e técnicas criogênicas. O corte a seco (alta temperatura) é a maior causa do desgaste dos insertos de corte. Na abordagem utilizando lubrificação a base da água ou gás a temperatura é minimizada, mas existem impactos ambientais negativos. Na usinagem com nanofluidos partículas de tamanho na ordem de nano estão dispersas em um fluido base e possui excepcional desempenho na transferência de calor, lubrificação e desgaste. A seleção do sistema de refrigeração adequado é muito difícil, especialmente nos materiais difíceis de cortar.

Shokrani e Newman (2019) comentam que a usinagem utilizando nitrogênio líquido mostrou vantagens promissoras no aumento da vida da ferramenta, na taxa de remoção de material e na integridade superficial e que até a data de publicação do trabalho, não havia estudo sobre a geometria de corte da ferramenta e seu desempenho na usinagem criogênica. Seu trabalho apresentou a primeira investigação sobre geometrias de ferramentas de corte para o fresamento criogênico da liga Ti-6Al-4V.

Ahmad-Yazid; Taha e Almanary (2010) expõem que o futuro da usinagem de alta velocidade utilizando resfriamento criogênico em moldes e matrizes precisa adotar simulações dos dispositivos de resfriamento na fase inicial da investigação, a fim de identificar a melhor localização e direção do jato de ar criogênico. Os experimentos de corte podem ser baseados na vida da ferramenta e para reduzir o número de experimentos, planejamento experimental e otimizações podem ser adotados. Para melhor comparação, diferentes modos de método de aplicação de resfriamento criogênico também devem ser explorados. Tahri et al. (2017) comentam que a usinagem criogênica é vista como uma possível solução para aumentar a vida da ferramenta e melhorar a integridade da superfície dos componentes usinados removendo o calor da zona de corte. Em seu estudo, também comentam que a maioria das publicações não investiga de forma adequada os fenômenos físicos que ocorrem dentro do tubo que liga o tanque criogênico até as ferramentas de corte e o bico injetor. Desenvolveram um modelo CFD para investigar o fluxo de nitrogênio líquido no interior da respectiva tubulação. O trabalho mostra que a eficácia do processo de resfriamento não depende apenas da pressão, velocidade, temperatura e fração gás/líquido, mas também da geometria do tubo.

Além da abordagem criogênica, novas abordagens de lubrificação foram testadas com o intuito de buscar melhores acabamentos da superfície e menores desgastes do inserto de corte.

Desta forma este trabalho visa contribuir com o estudo e aplicação de fluidos de corte no processo de fresamento da liga Ti-6Al-4V, propiciando condição alternativa de mistura de fluidos e melhores resultados do fresamento quanto à rugosidade e vida da ferramenta.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivo projetar, construir e aplicar um dispositivo dosador de fluido de corte de baixo custo para usinagem além de testes e aplicação de novas abordagens de lubrificação e resfriamento no fresamento da liga Ti-6Al-4V utilizando Nitrogênio líquido,

Álcool Etílico Hidratado e CO₂ sólido, Álcool Etílico (100%) + CO₂ sólido e mistura de Álcool Etílico (100%) e grafite.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Construção de um protótipo de dispositivo MQL com atuação cíclica e ensaios preliminares;
- Realização de simulações por dinâmica de fluidos computacional (CFD) do dispositivo projetado;
- Construção e ensaios de funcionamento do dispositivo de lubrificação;
- Aplicação de um sistema eletrônico dosador de nitrogênio líquido;
- Levantamento de curvas de vazão e modelagem do dispositivo projetado;
- Usinagem e utilização do aparato em condições distintas de lubrificação na usinagem da liga Ti-6Al-4V seguindo um planejamento experimental pela:
 - a) utilização de uma mistura ar comprimido + nitrogênio líquido como fluido de corte;
 - b) utilização de uma mistura ar comprimido + óleo como fluido de corte (abordagem MQL);
 - c) utilização de uma mistura de ar comprimido + óleo + grafite como fluido de corte (abordagem MQL);
 - d) utilização de uma mistura de ar comprimido + CO₂ sólido + álcool etílico hidratado como fluido de corte (abordagem MQL);
 - e) utilização de uma mistura ar comprimido + CO₂ sólido + álcool etílico (100%) como fluido de corte (abordagem MQL);
 - f) utilização de uma mistura ar + grafite + álcool etílico como fluido de corte.
- Medições de forças de usinagem e rugosidade;
- Análise de desgaste dos insertos de corte;
- Análise da micro deformação subsuperficial oriundas das diferentes estratégias de lubrificação;
- Criação de redes neurais artificiais. O número de trabalhos de análise comparativa entre as abordagens de delineamento experimental (DOE) e redes neurais artificiais (ANN) é ainda limitado. Este trabalho contempla o treinamento e testes de 20000 redes neurais artificiais, com o intuito de minimizar a sistemática “tentativa e erro” no fresamento de topo da liga Ti-6Al-4V;

- Comparação entre resultados estatísticos x redes neurais artificiais. O planejamento fatorial de usinagem propiciou previsões estatísticas das forças de usinagem, torque e rugosidade. Estas previsões levam a melhorias de processos antes que eles ocorram. A abordagem DOE clássica e sua comparação com um número elevado de diferentes arquiteturas de redes neurais ainda não foi estudado.

1.3 Estratégia da tese e organização do texto

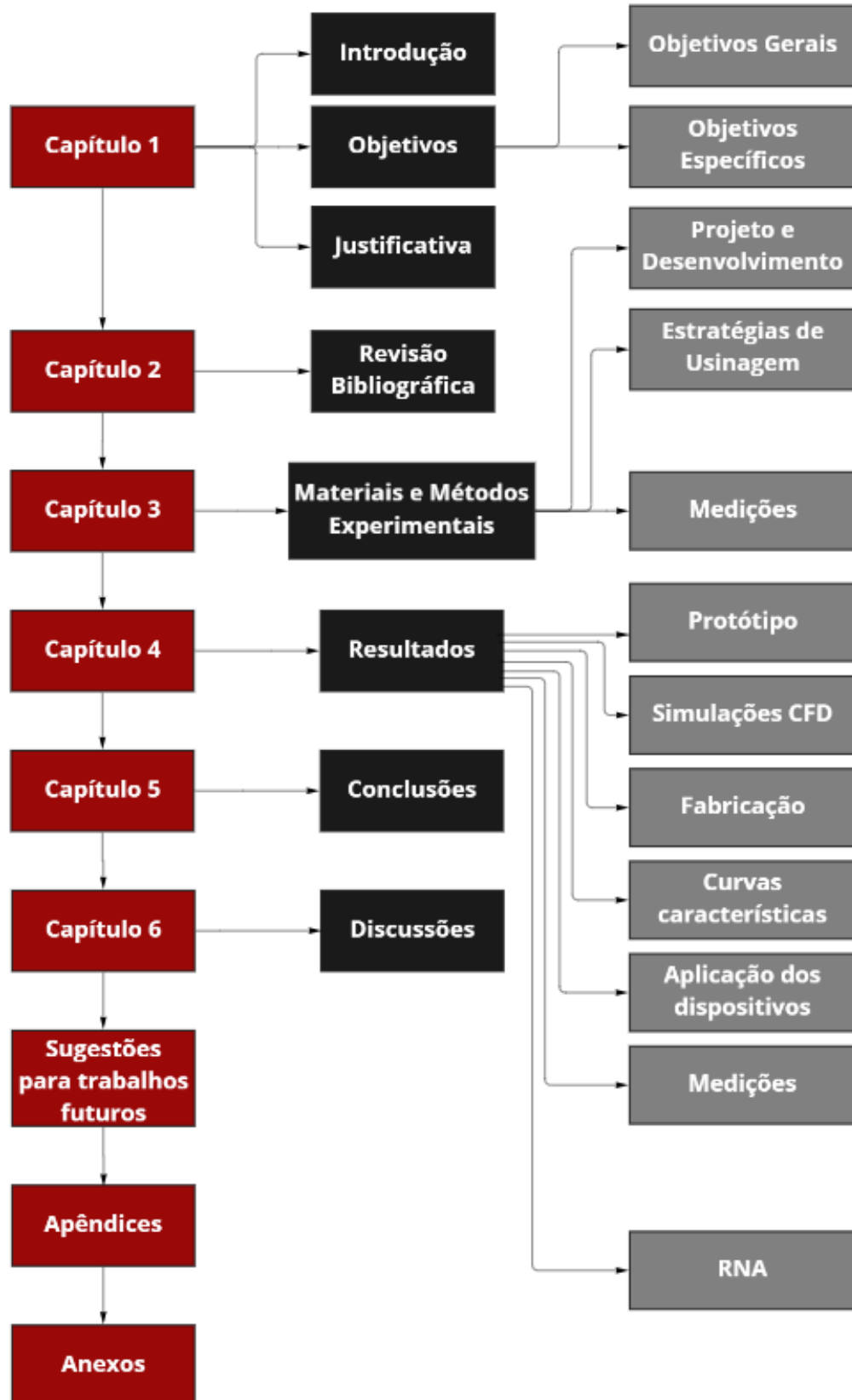
A estratégia inicial desta tese tem como preceito uma abordagem de estudo e construção de um dispositivo de mistura para refrigeração e lubrificação em usinagem. A partir da construção de um protótipo e ensaios experimentais um produto foi fabricado. Uma implementação de um circuito eletrônico para controle de injeção por ciclos de nitrogênio líquido foi aplicada a uma válvula industrial. Na segunda etapa foram realizadas simulações CFD com os dados e geometrias do dispositivo recém projetado.

Na terceira etapa, ensaios experimentais de usinagem foram feitos seguindo um planejamento experimental para verificar o comportamento do dispositivo de mistura e da aplicação de lubrificação por ciclos. Para os ensaios de usinagem com nitrogênio líquido foi escolhida a abordagem com maior eficiência. Superfícies de respostas foram criadas. Medições de rugosidade, análise das superfícies usinadas, deformação microestrutural a partir da superfície e micro dureza foram efetuadas.

Na quarta etapa, insertos de corte provenientes das diferentes estratégias de lubrificação foram analisados.

Na última etapa, redes neurais artificiais foram criadas com o intuito de previsão das variáveis dependentes e os resultados são comparados com os resultados do planejamento fatorial. De forma sucinta, a Figura 1.2 ilustra a sequência dos capítulos apresentados neste estudo.

Figura 1.2 - Sequência dos capítulos apresentados na tese



Fonte: Dados do autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção sustentável e a usinagem criogênica

O desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que “atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades” (UNWCED¹, 1987 apud LU, 2014, tradução nossa).

Chetan e Venkateswara (2015) comentam que a manufatura sustentável é a tendência mais recente no ambiente industrial atualmente e possui benefícios financeiros e ambientais. O resfriamento criogênico é uma técnica que pode aumentar a eficiência da operação e não causa mal à saúde. Existe um alto custo em comparação com outras técnicas além de não ser recomendado para a retificação. A limitação na usinagem consiste em obter meios para fornecer o refrigerante criogênico para a zona de corte. A utilização de técnicas utilizando gás também requer sistema especial para a lubrificação e a sustentabilidade ainda é questionada. A lubrificação sólida é um método mais barato em comparação à refrigeração criogênica. A desvantagem é o custo na produção dos lubrificantes. Já a abordagem MQL é a técnica mais promissora relacionada às questões ambientais e econômicas porque a quantidade de fluido utilizada é bem menor, reduz o custo do processo e pode ser melhorada utilizando óleos vegetais.

Ao considerar o fluxo de material para um ciclo de vida de produto sustentável, os "3Rs", que formam a base para a fabricação verde que são Reduzir, Reutilizar e Reciclar, têm sido muitas vezes considerados como referência. No entanto, Jawahir, 2006 comenta sobre “3Rs” adicionais: Recuperar, Redesenhar e Remanufaturar. Esta nova abordagem permite passar de um único ciclo de vida para múltiplos ciclos de vida, economizando custos e aperfeiçoando usos. O fluxo de material quase perpétuo conecta todos os 6Rs começando na etapa de pré-fabricação até o estágio de pós-uso, permitindo ao ecossistema utilizar um nível ideal de matérias-primas e energia, produzindo menores quantidades de resíduos e emissões. Assim, ao avaliar um processo de fabricação com relação à sustentabilidade, cada entrada e a produção precisa considerar a abordagem do ciclo de vida total.

¹ United Nations World Commission on Environment and Development (UNWCED), 1987. Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations.

Os 3R's da sustentabilidade são meios para contribuir com o consumo consciente. Esta política surgiu após a Conferência de Terra em 1992 e após o 5º Programa Europeu para Ambiente e Desenvolvimento em 1993. A partir deles, determinaram-se práticas para Reduzir, Reutilizar e Reciclar (RCR AMBIENTAL, 2021).

A concepção inicial trata de alternativas para o gerenciamento de resíduos, visto que o consumo global vem aumentando a muito tempo e o aumento no consumo, leva ao aumento de produção de resíduos. A sociedade gera cada vez mais lixo e não está sabendo o que fazer com ele, promovendo descarte ineficaz, representando risco para a saúde pública. Embora a reciclagem seja uma das melhores e mais conhecidas maneiras de gerenciar resíduos, uma abordagem mais abrangente é resumida pelos “3R's” (MOVIMENTO VERDADES SUSTENTÁVEIS, 2021). Na prática isto pode ser entendido respectivamente como:

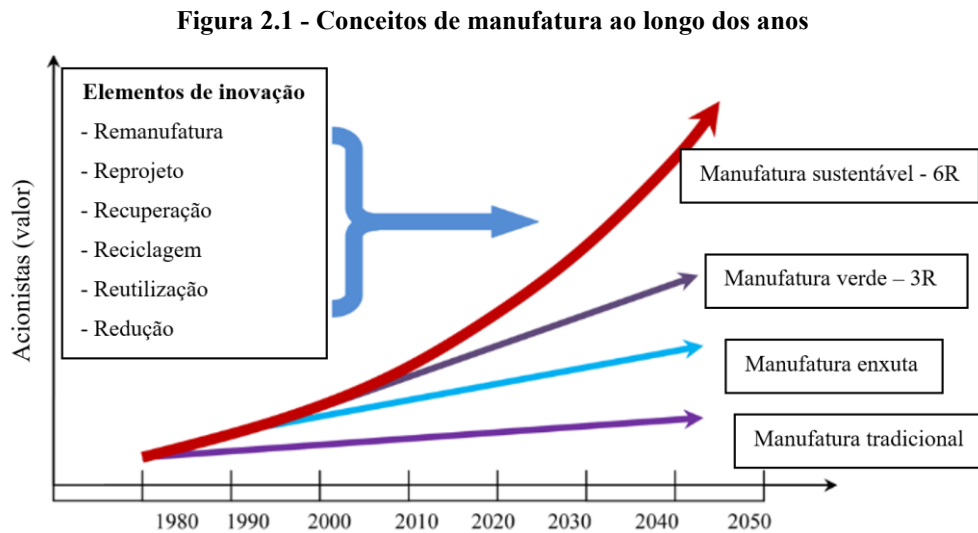
- a) comprar apenas o necessário. A melhor maneira de reduzir o desperdício é não o criar. Segundo a Eco-UNIFESP (2021) é a etapa principal, pois promove a diminuição de gastos com o gerenciamento e pode ser aplicado a diferentes grupos de resíduos.
- b) obter produtos usados ou substitutos. Reutilizar é diferente de reciclar. Neste tópico a menção se faz em usar várias vezes o mesmo produto de forma criativa e funcional;
- c) ao descartar o lixo, encontrar maneiras de reciclar em vez de descartar. A ideia é transformar os resíduos em novos produtos. Como exemplo, pode-se citar a reciclagem de alimentos.

Os 6R's da sustentabilidade (manufatura sustentável) fazem parte de um processo educativo que tem o intuito de promover e incentivar mudanças nas ações do dia a dia. Apesar de se ouvir muito falar dos 3R's (manufatura verde) é importante acoplar mais três tópicos. Desta forma, os 6R's da sustentabilidade ajudarão a tomar decisões mais conscientes, substituindo velhos hábitos por novos mais sustentáveis (EURECICLO, 2021). Podem ser definidos como:

- a) reduzir;
- b) reutilizar;
- c) reciclar;
- d) repensar: maior aliado em direção ao consumo consciente. É o tópico que antecede todos os outros. A temática se alinha ao fato de questionar se o produto é mesmo necessário;
- e) recuperar: esta concepção vem antes da reciclagem. Separação e envio para indústria específica;

f) recusar: se refere a não tomar posse do que não irá utilizar.

A Figura 2.1 ilustra o desenvolvimento dos processos de manufatura ao longo do tempo, começando a partir da década de 70.



Fonte: Adaptado de Departamento de Comércio dos EUA², 2004 apud BI, 2011).

Pode-se ainda aliar os conceitos de sustentabilidade às perdas de um processo produtivo. As empresas buscam a minimização das perdas e desperdícios e uma das ferramentas utilizadas é o *Lean Manufacturing*. Desenvolvido primeiramente no Japão, o Sistema Toyota de Produção (STP) foi a base da manufatura enxuta.

A metodologia sistêmica do método é focada na redução dos desperdícios. Com a eliminação das perdas, é possível aumentar a competitividade. Como perdas pode-se citar (VOITTO, 2021):

- a) excesso de transporte: visa a busca pela otimização de percurso, fluxo e custos totais. A implementação da ferramenta 5S possibilita a identificação de problemas e oportunidades de melhorias;
- b) processamento impróprio: este desperdício compreende a falta de cumprimento de uma sequência lógica de funcionamento do processo, além daquele solicitado pelo cliente, não agregando valor. Falta de padronização;

²U.S. Department of Commerce. Manufacturing in America. Department of Commerce: Washington, USA, 2004. Available online: <https://www.armysbir.army.mil/docs/pdf/sbir/manuam0104final.pdf>.

- c) movimentos desnecessários: movimentação desnecessária dos equipamentos e funcionários. São estudados para minimizar este desperdício otimizações de *layouts*. Busca-se o estudo de movimentos que agreguem valor;
- d) excesso de produção: o foco é debater sobre qualidade ou quantidade. Produção em excesso com saídas de materiais ou informações desnecessárias. Para combate à produção excessiva, é utilizada uma ferramenta de troca rápida de ferramentas conhecida como SMED (*Single Minute Exchange Die*), que consiste em reduzir o tempo gasto com *setups*. Em processos com *setups* muito demorados, existe a tendência de produzir o máximo possível de um dado produto ou processo antes de iniciar a produção de outro diferente. A ideia é tornar os processos mais flexíveis, com empresas mais competitivas;
- e) defeitos e retrabalho: geração de tempo desnecessário propiciando novos gastos;
- f) espera: máquinas, funcionários e outros recursos parados em um processo produtivo. O Just in Time possibilita estudo de melhorias nesse quesito;
- g) estoque: armazenamento excessivo de insumos, matérias-primas e produtos. O estoque submete a afirmação de que estoque é dinheiro parado. Neste aspecto a ferramenta KANBAN é indicada para gerenciamento destes estoques, além do Just in Time, caracterizado pela produção sob demanda, produzindo o que é de fato necessário;
- h) habilidades / Intelectuais: desperdício das habilidades de funcionários.

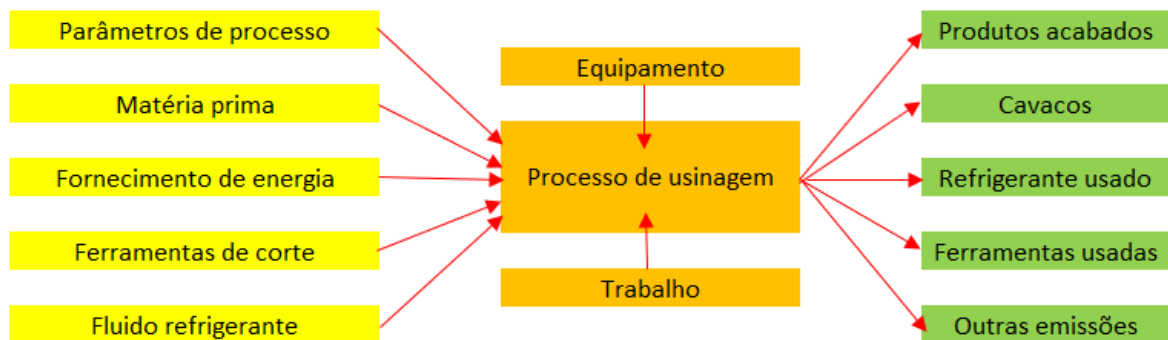
É importante comentar neste trabalho sobre produtividade. Esta informa a competitividade dos custos da empresa. Quanto maior a produtividade, maior será a competitividade dos custos. Trata-se de um indicador que informa a eficácia dos *outputs* (produtos certos na quantidade certa, na qualidade certa, no momento certo e no preço justo) e a eficiência da empresa em gerenciar os *inputs* empregados (materiais, mão-de-obra, insumos, equipamentos etc.). Incrementar a produtividade é o grande desafio a ser enfrentado pelas empresas. O conceito de incremento de produtividade está associado a ideia de produzir (*output*) o “mesmo” com emprego de menor volume de insumos (*input*). Introduzindo-se um ciclo de melhoria, a meta do incremento de produtividade passa a ser produzir mais com menos (COELHO, 2017).

O estudo da abordagem de lubrificação neste trabalho passa por estas premissas. Pode-se atrelar os conceitos de desperdícios e perdas ao contexto de lubrificação e melhora de produtividade atrelado a uma manufatura enxuta. Com uma menor quantidade de fluido de corte, a economia é visível. O estoque é minimizado, já que a abordagem utiliza menor

quantidade de fluido quando comparados ao processo de lubrificação convencional. As movimentações, transportes e *setups* são reduzidos. Na proposta de injeção de lubrificantes por ciclos uma padronização é realizada, evitando possíveis retrabalhos e condições impróprias de lubrificação.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de entradas e saídas pensando-se em um processo de usinagem.

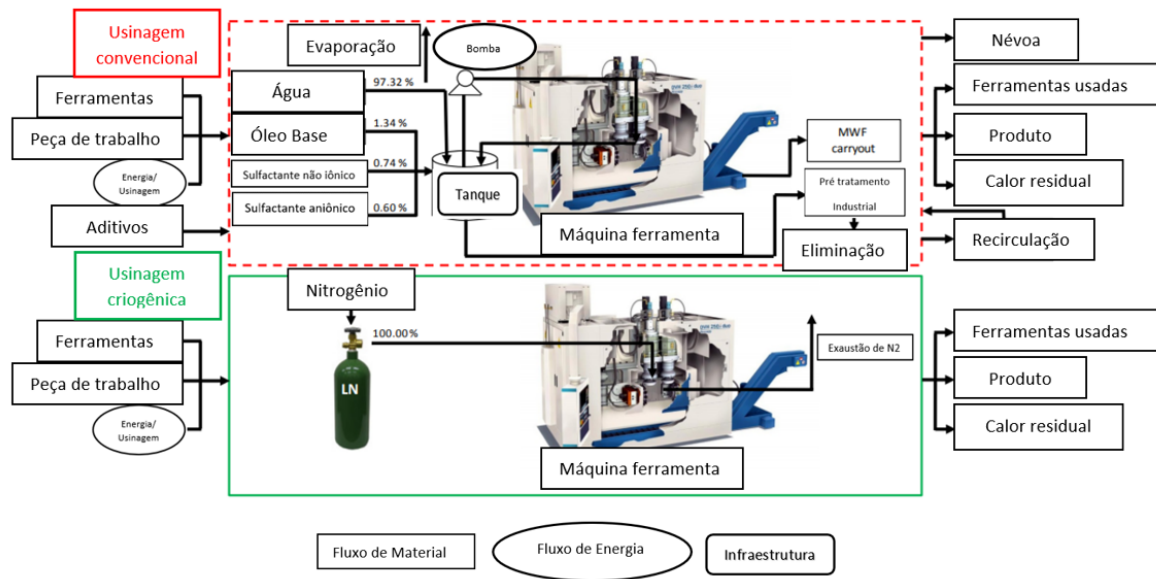
Figura 2.2 - Exemplo de fluxograma de entradas e saídas para um processo de usinagem



Fonte: Adaptado de Lu (2014).

A tecnologia de usinagem criogênica sustentável tem um alto potencial para cortar custos de produção e melhorar a competitividade reduzindo o consumo de recursos e criando menos desperdício. As questões de sustentabilidade no chão de fábrica apontam que o futuro da produção sustentável implica na utilização de usinagem criogênica para reduzir os encargos ambientais e os riscos para a saúde, aumentando simultaneamente o desempenho de usinagem e rentabilidade. Estudos mostram que a usinagem criogênica oferece um custo-benefício limpo e melhora o desempenho focado em sustentabilidade em comparação com a usinagem convencional (PUŠAVEC; KOPAČ, 2011). A Figura 2.3 mostra um comparativo entre a usinagem convencional e a usinagem criogênica para a usinagem de Inconel.

Figura 2.3 - Comparação da usinagem convencional com a usinagem criogênica



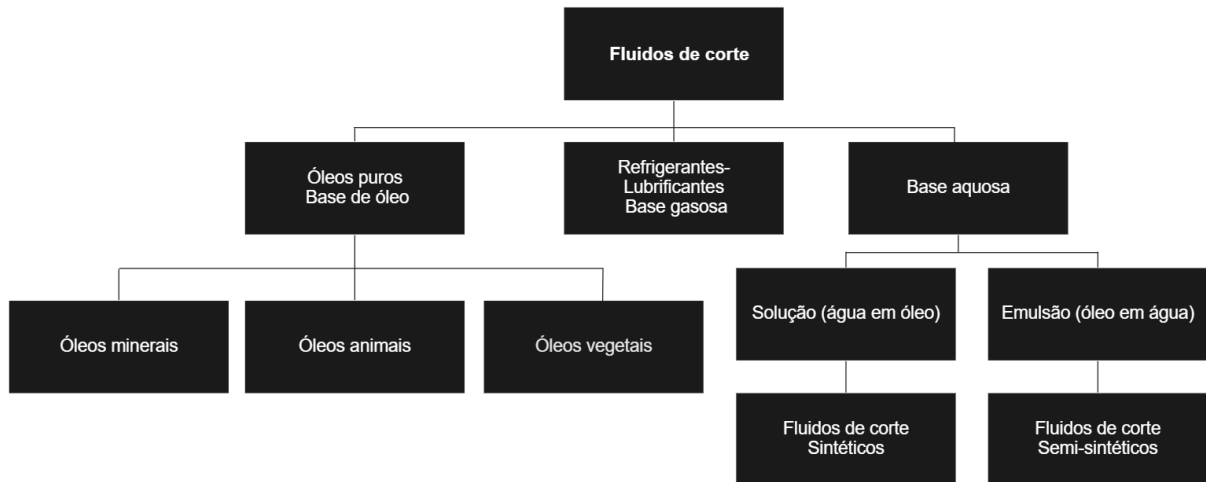
Fonte: Adaptado de Pušavec e Kopač (2011).

Pušavec e Kopač (2011) comentam que as diferenças entre os sistemas podem ser percebidas em muitos aspectos. No entanto, uma grande diferença é que na usinagem convencional o óleo recircula, enquanto na usinagem criogênica é dissipado para a atmosfera e é entregue apenas uma vez devido a evaporação imediata na entrega. Por outro lado, em sistemas convencionais de lubrificação a taxa de consumo é determinada pelo volume de óleo por máquina ferramenta e pelo intervalo de descarte. Assim sendo, o conceito de consumo assume diferentes significados nestes sistemas. Os fatores que devem ser considerados devem ser o uso da água, a produção de resíduos sólidos, uso da terra, uso de energia, aquecimento global e acidificação.

Pensando no meio ambiente, percebe-se que a utilização de energias limpas e renováveis contribuem e muito para o futuro do planeta e que a usinagem criogênica é apresentada como uma tecnologia viável e sustentável em comparação à usinagem convencional. A outra vertente utiliza menores quantidades de fluido de corte. A abordagem MQL permite redução de custo, fornecendo quantidades precisas de fluido de corte misturado com o ar. As taxas de fluxo são tipicamente da ordem de 50 a 500 ml/ hora (GIASIN; AYVAR-SOBERANIS; HODZIC, 2016). Geralmente os fluidos podem ser divididos em fluidos à base de óleo, a base de água e a base de gás, conforme Figura 2.4. Os primeiros são utilizados onde se deseja uma boa propriedade lubrificante. Os fluidos com base de água são usados quando refrigeração e lubrificação são essenciais e os fluidos a base de gás são considerados fluidos ecológicos. Os lubrificantes à

base de gás têm alta resistência à corrosão e evitam que a ferramenta de corte e a superfície usinada oxidem em altas temperaturas de corte (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Figura 2.4 - Classificação dos fluidos



Fonte: Adaptado de DEBNATH; REDDY; YI, 2014.

Shokrani; Dhokia e Newman (2012) comentam que os riscos ambientais e de saúde relacionados à utilização de fluidos de corte convencionais e o desenvolvimento de políticas governamentais promovem aumento de custos na usinagem. Lawal, Choudhury e Nukman (2013) expõem em seu trabalho que embora seja impossível classificar o desempenho de técnicas de lubrificação por causa das diferenças entre o tipo de processo de usinagem, material da peça e da ferramenta de corte, a abordagem MQL se destaca. O lubrificante à base de óleo vegetal é utilizado quando os requisitos são custo, desempenho e questões ambientais.

Debnath; Reddy e Yi (2014) expõem que as preocupações ambientais e a demanda por fluidos de corte renováveis estão aumentando. O ideal seria utilizar a usinagem sem fluidos de corte. No entanto, esta abordagem não é aplicada em todas as operações de usinagem devido ao desgaste excessivo da ferramenta e/ou qualidade ruim da superfície. Para melhorar a usinabilidade pode-se utilizar a abordagem MQL ou refrigerante criogênico. Embora o consumo seja reduzido pela estratégia MQL, ainda são questionados os riscos para a saúde dos operadores devido à névoa de lubrificante formada. Com relação à abordagem utilizando fluidos criogênicos, a abordagem melhora a usinabilidade pela mudança nas propriedades da ferramenta e peça (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

Com relação a saúde dos funcionários e poluição ambiental o fluido de corte é problemático. No entanto, a lubrificação por estes fluidos causa economia de ferramentas e as tolerâncias mais apertadas são mais fáceis de se conseguir com um melhor acabamento. A

abordagem MQL é utilizada como alternativa quando a usinagem a seco não é aplicada e a eficiência é o fator desejado (DHAR et al., 2006b). Lawal, Choudhury e Nukman (2013) apresentam um estudo envolvendo lubrificação MQL utilizando lubrificante à base de óleo vegetal. O trabalho aborda processos diferentes de usinagem e coloca em pauta questões de saúde ambiental e os custos envolvidos na aplicação de lubrificantes. Além de minimizar os problemas ambientais, foi estabelecido pelos autores que a técnica MQL usando lubrificante de óleo vegetal apresenta melhor desempenho de usinagem e que muito ainda precisa ser feito para a aplicação da técnica MQL utilizando esta abordagem.

Accu-Lube, Bielomatik GmbH, MAG, Menzel Metallchemie GmbH são exemplos de empresas envolvidas na produção de sofisticados sistemas MQL para operações de usinagem. A empresa UNIST afirma que seu primeiro sistema MQL foi projetado e patenteado em 1957 em Michigan. A maioria dos produtos comerciais possuem compressor de ar, recipientes, tubos, sistema de controle de fluxo e bicos de pulverização. Geralmente o refrigerante e o ar comprimido são misturados e a mistura é fornecida por meio de tubos e um bocal (interno ou externo) para a região de corte (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

Sayuti; Sarhan e Salen (2014b) expõem que com o avanço da tecnologia é possível hoje utilizar nano-lubrificantes. Estes consistem de partículas nanométricas dispersas em um óleo. A análise física demonstrou que as nanopartículas podem penetrar na interface peça/ ferramenta de corte possuindo um grande efeito de lubrificação.

Shokoohi; Khosrojerdi; Shiadhi (2015) em seu trabalho combinaram o pré-resfriamento da peça de aço AISI 1045 endurecido junto com um novo fluido de corte desenvolvido. Pela busca do corte ecologicamente correto, o óleo vegetal misturado com água foi combinado com uma pequena quantidade de agente antibacteriano e uma essência. Este foi aplicado pela abordagem de mínima quantidade de resfriamento e lubrificação (MQCL). A técnica MQCL é aplicada com CO₂ como agente criogênico. Os autores comentam sobre a obtenção de cavacos menores e maior vida da ferramenta, além de outros benefícios como limpeza, ambiente de trabalho perfumado e redução de problemas ecológicos.

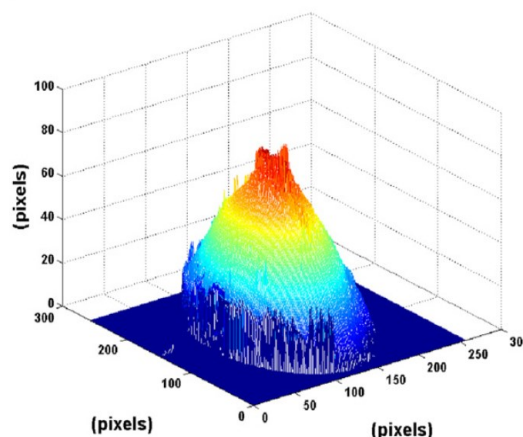
Tazehkandi; Shabgard; Pilehvarian (2015) estudaram o torneamento do Inconel 740 por dois modos de aplicação de fluido de corte. Trabalharam com óleo solúvel e em outra vertente, com a utilização de combinação de nitrogênio líquido com fluido de corte vegetal biodegradável e ar pressurizado, visando a redução do consumo de fluido de corte. Os autores perceberam que é possível diminuir o consumo como também atingir altas velocidades de corte e avanços.

2.1.1 *Comportamento do nitrogênio líquido*

Park et al. (2010) apresentam um estudo com técnicas de processamento de imagem incluindo a transformação Wavelet para a determinação de tamanhos das gotas e a distribuição destas após pulverização por meio de uma abordagem MQL. O estudo pautou-se em determinar a distância ideal do bico injetor para a peça, variando-se também a pressão. Com um algoritmo de detecção de borda, foi identificada a ocorrência das gotas, como o diâmetro e fração de área relacionadas à distância e pressão de trabalho. Os autores observaram que as pressões maiores proveram maior quantidade de gotas. No entanto, as menores gotas foram obtidas em menor quantidade com uma maior distância do bico injetor. Os autores observaram que a alta pressão do ar não fornece condição de molhar a zona de corte com uma distância do bico injetor acima de 50 milímetros. A abordagem das informações infere não somente na avaliação da capacidade de penetração do lubrificante na zona de corte, mas também para determinar os riscos à saúde do operador, levando-se em consideração o tamanho de gotas muito pequenas. A Figura 2.5 mostra a topografia superficial de uma condição de gota estudada.

De acordo com Connor (2019) o efeito Leidenfrost é um fenômeno físico que ocorre quando um líquido, em contato com uma massa mais quente do que o ponto de ebulição do líquido, produz uma camada de vapor isolante que impede que o líquido ferva rapidamente.

Figura 2.5 - Topografia superficial de uma gota

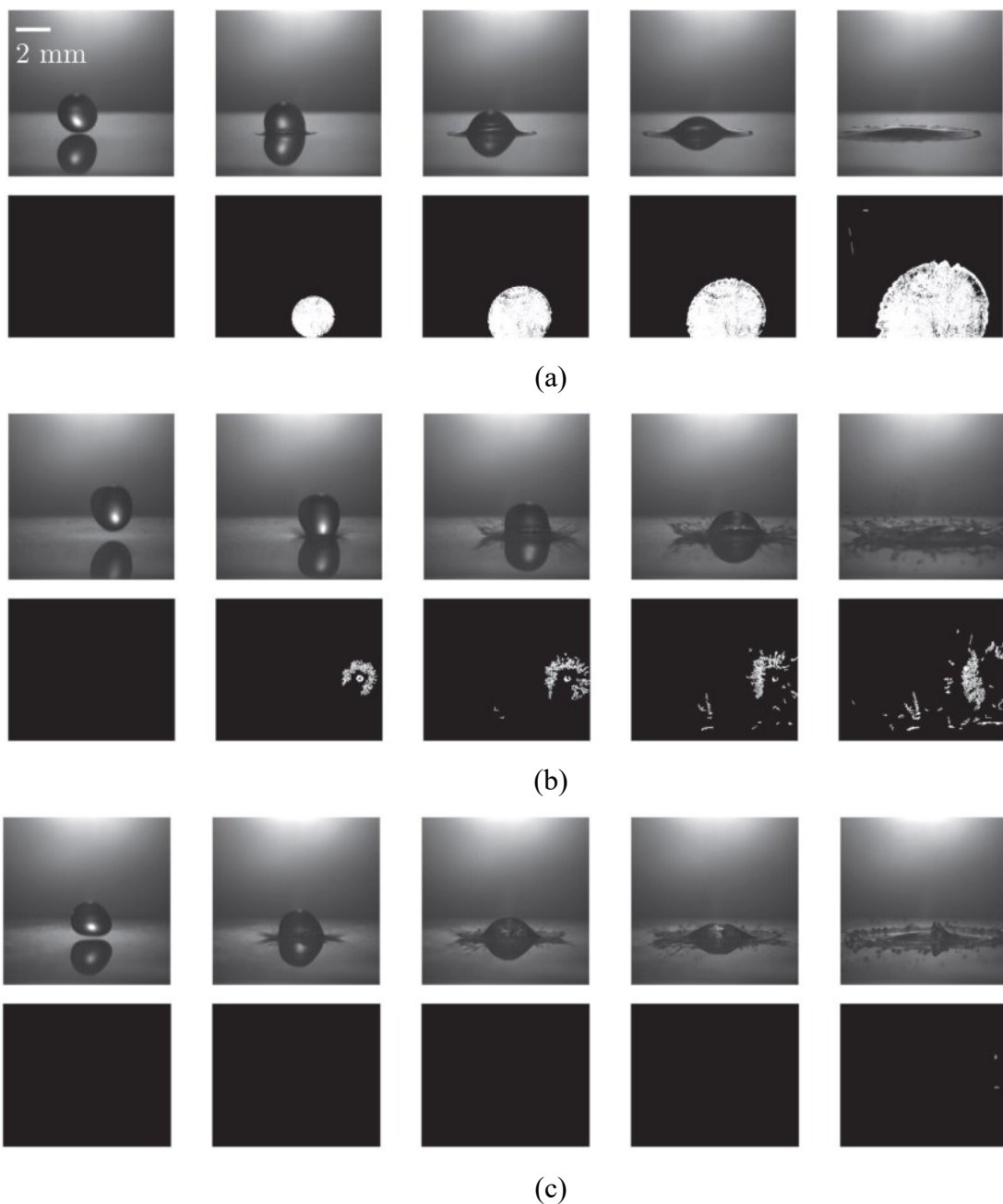


Fonte: Park et al. (2010).

Van Limbeek; Nes e Vanapalli (2020) comentam sobre o resfriamento por spray, onde se usa gotas impactantes para resfriar o sólido. Este efeito é muito indesejável pois a camada de vapor forma uma camada isolante e impede transferência de calor efetiva entre a gota e o sólido. Os autores realizaram um estudo de queda de uma gota de nitrogênio líquido em um

anteparo de safira. Este prisma de safira comporta-se como um condutor térmico e sua transparência permite visualizar o comportamento do contato durante o impacto da gota. Com a variação da temperatura do prisma e velocidade de impacto da gota obteve-se um diagrama característico de impacto. Os autores concluíram que o poder de resfriamento de uma gota está relacionado ao comportamento de umedecimento das gotas impactantes e que a transferência de calor é dominada pela condução sendo a evaporação evidenciada nas linhas de contato. A Figura 2.6 mostra uma série de imagens instantâneas da gota em diferentes espaços de tempo.

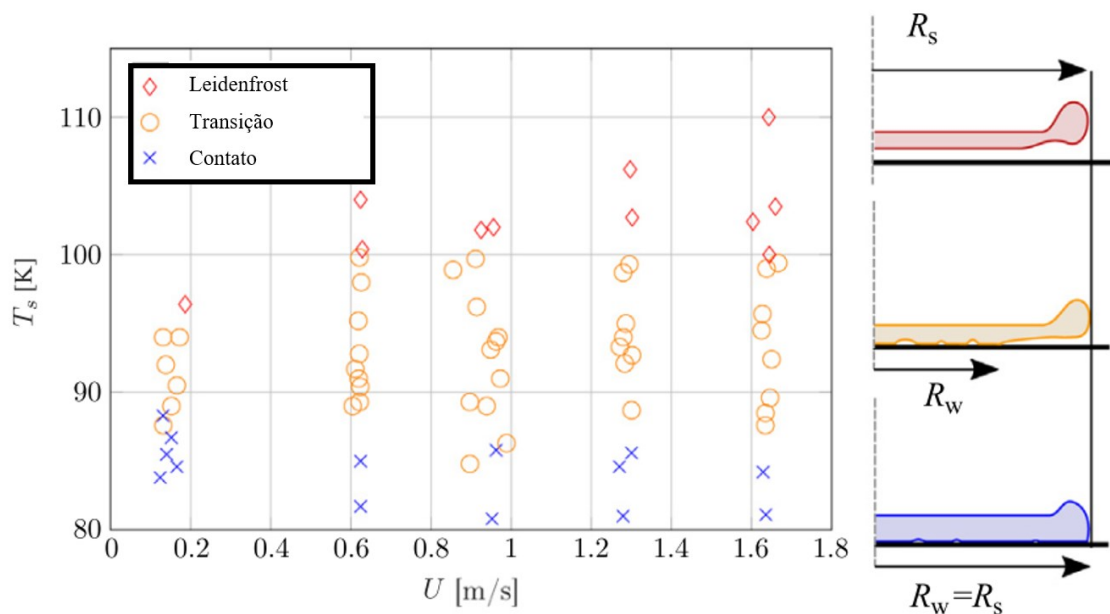
Figura 2.6 - Três seqüências de gotas de nitrogênio colidindo com um prisma de safira em $T_s =$ (a) 81,0, (b) 92,1K (c) 106,0 K obtida por imagem FTIR. A velocidade de impacto é de 1,3 m / s para todos os casos



Fonte: Adaptada de Van Limbeek; Nes e Vanapalli (2020).

Para a temperatura de 81K (-192,15°C) visualizada na Figura 2.6 a gota molha a superfície completamente. Esse comportamento é conhecido como ebulição por contato. Quando a temperatura aumenta, esta relação é perdida e o raio de umedecimento é reduzido como resultado da evaporação na periferia da gota. Nos casos em que a área molhada é menor que a raio de espalhamento são conhecidas como ebulição de transição. Com o aumento da temperatura esta área molhada é diminuída ainda mais. Nota-se que nenhum contato é observado devido a camada de vapor formada (Efeito de Leidenfrost). A Figura 2.7 demonstra a construção do diagrama de fases pelos autores. A direita pode-se perceber o comportamento do nitrogênio líquido sob diferentes condições.

Figura 2.7 - Diagrama de fase exibindo os diferentes regimes de ebulição observados quando variando a velocidade de impacto U e a temperatura do prisma T_s .



Fonte: Van Limbeek; Nes e Vanapalli (2020).

2.2 Abordagem MQL

A utilização de lubrificação MQL tem sido utilizada como meio de economizar fluidos de corte e também como uma alternativa sustentável para a minimização de danos causados pelo descarte inadequado dos óleos utilizados em usinagem. Os sistemas de lubrificação MQL, representam uma estratégia ecológica e econômica nos processos de usinagem. O sistema consome menos de 50 ml/hora de lubrificante, o qual se evapora quase que totalmente na aresta de corte, por esse motivo, tanto a peça quanto a ferramenta permanecem praticamente secos.

De acordo com a Bielomatik (2012) o custo de sistemas de refrigeração chega a comprometer aproximadamente até 15% do custo de operação num processo de usinagem. Por

outro lado, é importante destacar que o custo do descarte do fluido refrigerante, considerando tempo de parada e mão de obra, geralmente é superior ao custo do fluido novo. Por esses motivos, a utilização de sistemas MQL vem ganhando grande aceitação como uma opção viável para reduzir os custos de fabricação e proteger o meio ambiente. Estudos indicam que os sistemas MQL permitem reduções significativas nos custos relacionados a sistemas de refrigeração, protegem a saúde dos trabalhadores e preservam o meio ambiente, além de possibilitar uma melhora na vida da ferramenta e bons resultados em termos de qualidade superficial das peças usinadas. A vida da ferramenta aumenta especialmente devido a que para cada operação específica de usinagem pode ser adotada uma condição ótima da quantidade do lubrificante a ser usado no sistema MQL. Por exemplo, no processo de fresamento de uma superfície é requerida uma mínima quantidade de fluido lubrificante, por outro lado, o processo de furação precisa de uma quantidade maior, e finalmente o processo de rosqueamento requer uma quantidade diferente devido à elevada pressão superficial característica do processo. Em máquinas projetadas para uso de sistemas MQL, o efeito lubrificante pode ser controlado mediante um parâmetro dentro do programa CNC. Este parâmetro varia o valor da vazão e a duração. Um exemplo é o sistema MQL instalado nos centros de usinagem MAG da série SPECHT®. O equipamento possui um sistema de dosagem de alta precisão integrado dentro da carcaça do eixo-árvore (MAG, 2018).

Xu (2010) comenta em seu trabalho que os sistemas MQL podem ser diferenciados pelo tipo de alimentação e pelo número de canais de fluido (um ou dois canais). Com relação à alimentação, os sistemas podem ser classificados em internos e externos. O suprimento de fluidos internos ocorre por meio de canais da própria ferramenta, enquanto o fornecimento externo ocorre por meio de acoplamento dos bicos de pulverização no cabeçote da máquina buscando otimizar os pontos de aplicação. O fornecimento externo tem estrutura mais simples e tem aplicação facilitada nas máquinas, sendo por isso, o sistema de alimentação preferido. Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens. Como vantagens do sistema de lubrificação externo podem-se citar a adaptação simples, a possibilidade de instalação em todas as máquinas e a resposta rápida. Como desvantagens estão listados a perda do lubrificante por dispersão e dificuldade para lubrificação em usinagens profundas. Para o sistema de lubrificação interno, elencam-se como vantagens a lubrificação com maior precisão, sem dispersão ou perda de *spray*, além de quantidades ajustáveis de lubrificante. Como desvantagens da lubrificação interna citam-se o investimento de alto custo, além de requisitos específicos para ferramentas e máquinas-ferramentas.

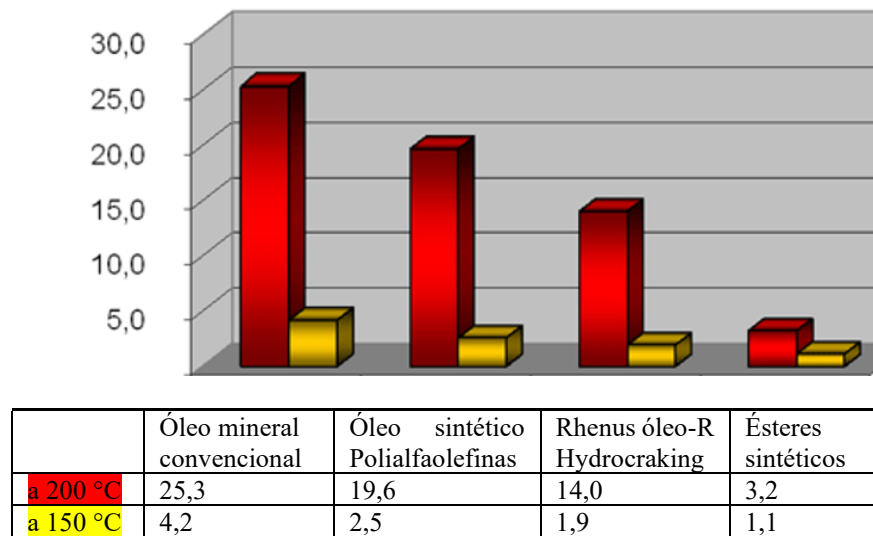
O sistema MQL possibilita vantagens como a eliminação da refrigeração líquida, reduz os custos de investimento acima de 15%, possibilita a eliminação de bombas, filtros e motores permitindo uma economia de energia de aproximadamente 30%; elimina o problema de descarte de resíduos perigosos; envolve menores custos de manutenção; permite uma melhoria das condições ambientais; garante mínima contaminação e ambiente de trabalho limpo; garante maior segurança para o operador com diminuição de problemas cutâneos e das vias respiratórias. Os cavacos são facilmente recicláveis por conterem no máximo 0,3% de impurezas. Uma preocupação frequente dos usuários do sistema MQL é em relação ao grau de contaminação do ambiente em torno ao equipamento, o que afetaria as condições de segurança operacional devido às partículas em suspensão que podem ficar no ambiente após a aplicação. Ensaio realizados em diferentes laboratórios, mostram que o risco de contaminação para o operador é mínimo. Os resultados das medições realizadas mostram que são inferiores a 25% do valor limite estabelecido. Além disso, os óleos utilizados no sistema MQL são toxicológica e dermatologicamente seguros e estão classificados com risco hídrico de classe 1, sendo que os fluidos utilizados na refrigeração líquida atingem riscos de classe 2 ou 3 (CALZADO, 2012).

Calle et al. (2020) realizaram ensaios de usinagem com sistema MQL no fresamento do aço AISI 4140 usando azeite vegetal e óleo sintético. O azeite vegetal usado foi o azeite de oliva conforme análise realizada pela empresa CHEM-SUPPLY PTY LTD (CSA SCIENTIFIC, 2019). A escolha foi justificada pelo fluido ter propriedades como ponto de fusão, ponto de ebulição, viscosidade e gravidade específica semelhantes aos encontrados nos fluidos de corte industriais com base vegetal desenvolvidos pelas empresas Renewable Lubricants (RENEWABLE LUBRICANTS, 2019) e Accu-Lube Manufacturing GmbH (ACCU-LUBE MANUFACTURING, 2019). O azeite de oliva é de fácil aquisição e custo baixo em relação aos fluidos de corte mencionados e é classificado como não perigoso segundo o sistema globalmente harmonizado de classificação e rotulagem de produtos químicos (GHS). O fluido sintético selecionado para os testes de usinagem foi o Multi-WFC que segundo o fabricante é indicado para usinagem de aços de elevada dureza (WÜRTH, 2019). Os ensaios realizados mostram que a melhor qualidade superficial foi obtida com o azeite vegetal usando fluxo volumétrico de 50 [ml/h]. Foi obtida uma rugosidade de 0,856 μm .

A escolha entre um óleo sintético e um éster de óleo vegetal (azeite vegetal modificado quimicamente) depende de diversas características como material a ser usinado, tipo de operação de usinagem, fases de acabamento posteriores (tratamento térmico, revestimentos, pintura). O éster de óleo vegetal tem um maior efeito de lubrificação, menor viscosidade, maior faixa de ebulição e temperatura de inflamação. Esses óleos se evaporam mais lentamente que

um óleo sintético, como mostrado na Figura 2.8, e geram uma fina película de óleo sobre a peça o que permite minimizar o atrito e aderência entre a ferramenta de corte e o cavaco. Especialmente indicados para usinagem de aços e ligas de alumínio. Como são fluidos baseados em ésteres de origem vegetal são biodegradáveis, não tóxicos nem irritantes.

Figura 2.8 - Perda por evaporação em % de diversos tipos de óleos para sistemas MQL segundo DIN51581.



Fonte: Adaptado de Calzado (2012).

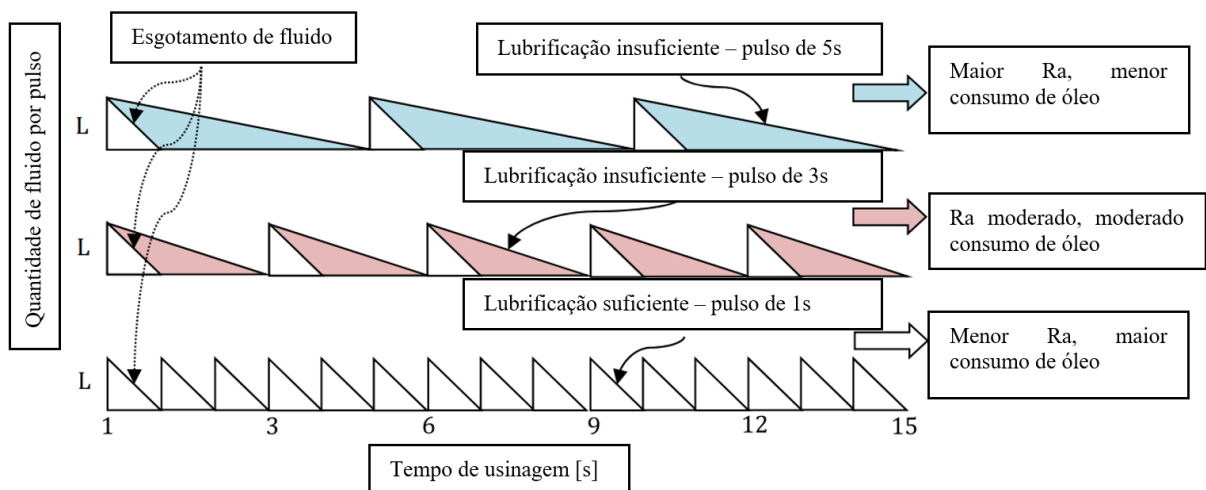
Em seu estudo de revisão, Sharma; Tiwari e Dixit (2016) comentam que devido à penetração eficiente de névoa de óleo na zona de contato a abordagem MQL reduziu o atrito e a temperatura da zona de corte. O fresamento com MQL propiciou melhor desempenho de corte com alta velocidade, registrando o menor desgaste de flanco sob três condições de resfriamento (MQL, emulsão e estratégia sem lubrificante). Davis; Schueller e Huang (2015) investigaram a utilização de um líquido iônico na usinagem de titânio. Este fluido consiste em um sal de baixo ponto de fusão, como aditivo lubrificante para implementação de lubrificação por MQL. Neste estudo utilizou-se o hexafluorofosfato de 1-butil-3-metilimidazólio (BMIM-PF6). Verificou-se que o MQL baseado em líquido iônico reduziu o desgaste da ferramenta em 60% quando comparado ao corte a seco e 15% mais do que o MQL sem BMIM-PF6. Sua utilização resultou nas menores forças de corte e melhor acabamento de superfície.

Abele; Hasenfratz e Heep (2016) realizaram experimentos para verificar possíveis diferenças entre fresas inteiriças de metal duro no fresamento da liga Ti-6Al-4V. Foram testados diferentes processos de refrigeração: por jorro, MQL e CO₂. Os autores constataram que com o

resfriamento criogênico as ferramentas utilizadas não alcançaram as taxas de usinagem que haviam sido obtidas sob as outras duas abordagens. Constataram ainda que o processo de refrigeração com CO₂ propiciou uma evolução mais rápida do desgaste das fresas.

Mia et al. (2017) modificou a tecnologia tradicional de MQL e propôs a lubrificação por pulsos controlados por tempo. O efeito do controle de tempo na abordagem MQL sob a rugosidade é ilustrado na Figura 2.9. Um intervalo de tempo maior, pode ocasionar a lubrificação insuficiente na zona de corte. Com um intervalo de pulsos menor, o resfriamento e lubrificação são mais adequados. O melhor parâmetro de rugosidade foi conseguido no intervalo de tempo de 1s.

Figura 2.9 – Controle de tempo-MQL

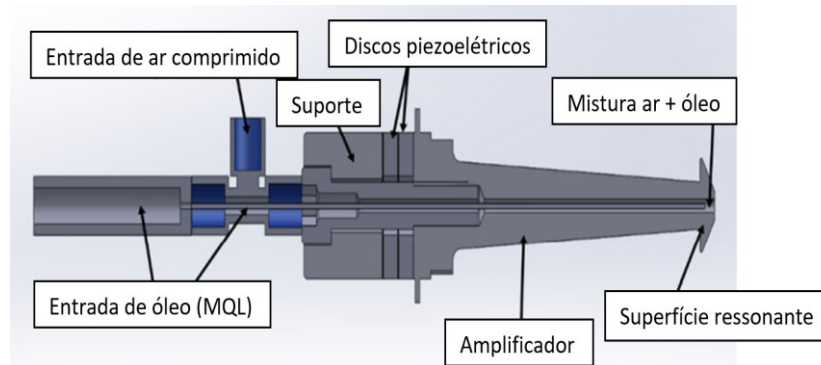


Fonte: Adaptado de Mia et al., 2017.

Grguraš et al. (2019) propuseram um novo fornecimento MQL com um único canal com pré-mistura de dióxido de carbono líquido e óleo. Segundo os autores, esta técnica permite a introdução de qualquer meio de lubrificação líquido em um fluxo de CO₂ líquido sem a exigência de pré preparação adicional de CO₂.

Hadad e Beigi (2021) propuseram um bico MQL aplicando vibrações ultrassônicas usando discos piezoelétricos em um torneamento do aço inoxidável AISI 304. As vibrações ultrassônicas foram usadas para atomizar o fluido de corte em gotas finas e uniformes com um ângulo de pulverização menor e uma distância de deposição de pulverização maior. O aparato denominado UN-MQL, ilustrado pela Figura 2.10, gera uma pulverização uniforme semelhante a uma névoa.

Figura 2.10 – Bico UN-MQL

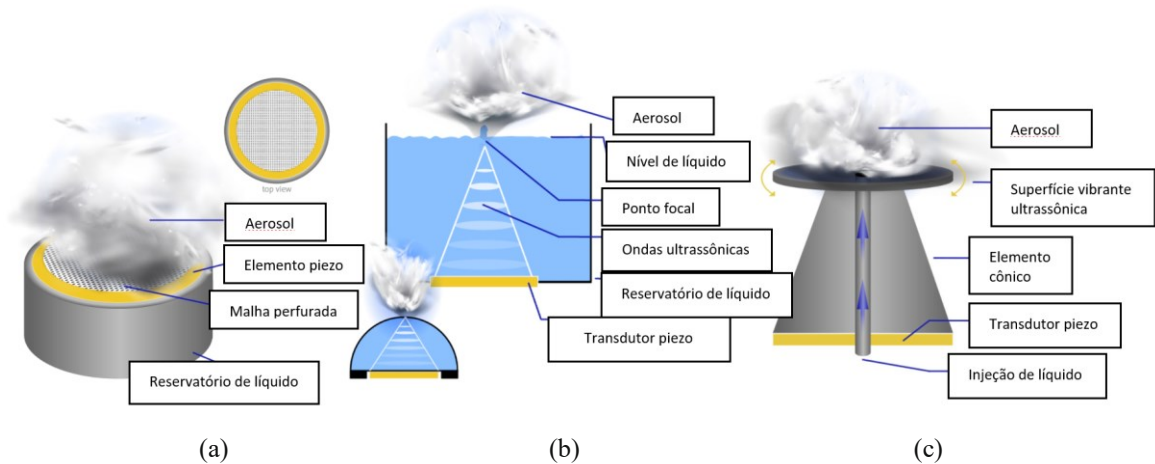


Fonte: Adaptado de HADAD; BEIGI, 2021.

Os resultados foram comparados com os processos de torneamento MQL a seco, úmido e convencional. Os autores constataram que as finas gotículas produzidas pelo sistema desenvolvido penetram efetivamente na zona de usinagem e, conseqüentemente, melhora a característica de refrigeração-lubrificação na zona de corte. Constataram ainda que a rugosidade da superfície foi melhorada em comparação com os processos de torneamento MQL a seco, por inundação e convencional. A proposta baseou-se nos atomizadores ultrassônicos piezoelétricos da empresa Johnson Matthey Piezo Products (2021). A empresa fornece três métodos diferentes para a geração de ultrassom de gotículas sem introdução de calor. A Figura 2.11 ilustra os métodos para a geração de ultrassom de gotículas de baixa velocidade a partir de líquidos de baixa viscosidade. A Figura 2.11a ilustra o processo do atomizador de malha. Na Figura 2.11b é mostrado o processo de geração de ultrassom por cavitação e na Figura 2.11c é mostrado o processo de geração de ondas capilares.

No processo do atomizador de malha, o reservatório líquido é colocado ao lado de um disco perfurado. Este disco com milhares de furos é cercado por um material piezoelétrico. Devido à rápida vibração do elemento piezo cerâmico, o fluido é puxado através dos furos do disco e é atomizado. No método por cavitação o componente piezoelétrico é inserido na base de um reservatório em que o nível de líquido deve ser mantido constante. O piezo transdutor é acionado por uma fonte de alimentação de corrente alternada de alta frequência e emite ondas ultrassônicas focadas na superfície do líquido, produzindo um bico e gotículas muito pequenas são emitidas. O terceiro método cria as ondas capilares que são impulsionadas por uma placa cerâmica piezoelétrica montada sob uma caixa cônica. O líquido é transportado para uma superfície que vibra devido ao elemento piezo oscilante, emitindo um aerossol.

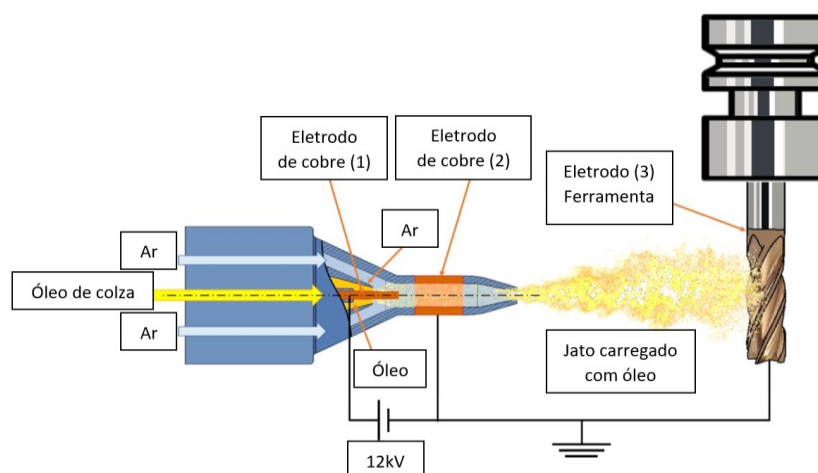
Figura 2.11 - Métodos de geração de ultrassom de gotículas. (a) Método de atomização por malha. (b) Método de atomização por cavitação. (c) Método de atomização por geração de ondas capilares



Fonte: Adaptado de Johnson Matthey Piezo Products, 2021.

Bartolomeis e Shokrani (2020) comentam que a usinagem de titânio é associada a uma vida da ferramenta de corte curta e à baixa produtividade. Em seu estudo propuseram um novo sistema de refrigeração-lubrificação baseado em atomização eletro-hidrodinâmica. O sistema foi comparado com a estratégia de resfriamento por inundação, MQL e usinagem com ar comprimido. Os autores atestam que o sistema pode aumentar a vida da ferramenta de 6 a 22 vezes quando comparado à abordagem MQL e resfriamento por inundação respectivamente, mantendo uma rugosidade semelhante. O sistema é ilustrado pela Figura 2.12.

Figura 2.12 - Esquema de lubrificação por quantidade mínima de atomização eletro-hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de Bartolomeis e Shokrani, 2020.

A configuração utiliza três eletrodos. Dois eletrodos de cobre foram inseridos dentro do bico e a ferramenta de corte atua como o terceiro. O catodo e o ânodo foram conectados a uma

alta corrente contínua fornecida por uma fonte de alimentação DC com tensão de saída máxima de 15 kV. Uma bomba foi utilizada para o fornecimento do óleo através de um bico central interno em contato com um eletrodo de cobre onde é misturado com ar pressurizado em um canal interno de mistura, resultando na formação atomizada de gotículas dentro do bico. O óleo é carregado em contato com o eletrodo de cobre e passa pelo campo elétrico entre o eletrodo 1 e 2. O óleo é acelerado em direção à saída do bico devido à força de arrasto pelo ar pressurizado e pela força eletrostática imposta às gotas.

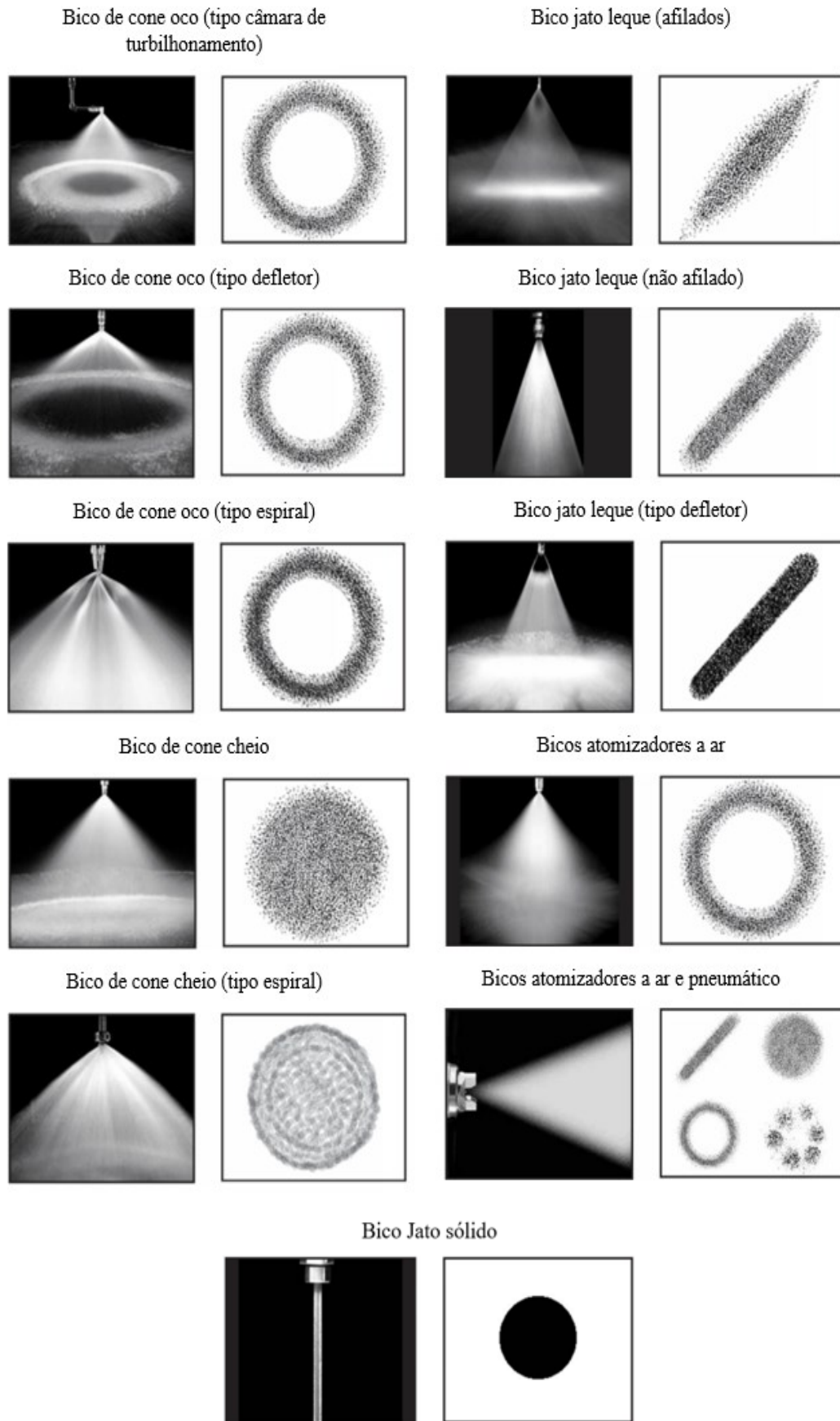
Existem no mercado, bicos específicos de pulverização para a realização de diversas tarefas. Muitos estudos têm sido efetuados para melhorar o desempenho, conforme condições específicas. A Figura 2.13 mostra as principais características dos tipos de jatos de pulverização.

A empresa Spraying Systems Co. (2021a) inseriu em seu catálogo industrial de produtos os tipos e suas respectivas aplicações:

- a) o bico de cone oco (tipo câmara de turbilhamento) é utilizado quando é necessária uma combinação de vazão e tamanho de gota pequena. São aplicados em resfriamento de ar, gás e água, controle de poeira, aeração de água;
- b) o bico de cone oco (tipo defletor) é utilizado quando se deseja obter este padrão de cone oco com formato de guarda-chuva com gotas pequenas. Podem ser utilizados para limpeza de interiores de tubos e canos, além de pequenos tanques. Aplicados como spray decorativo, supressão de poeira, proteção contrafogo, cortina de água e lavagem direta de tubos (interiores);
- c) o bico de cone oco (tipo espiral) proporciona um padrão cone oco com gotas mais grossas, além de altas taxas de vazão em um tamanho compacto. Utilizados para supressão de poeira, proteção contrafogo e dessulfurização de gases de combustão (DGC);
- d) o bico cone cheio permite um padrão de pulverização uniforme, redondo e com gotas médias a grandes. São aplicados em injeção química, supressão de poeira, proteção contrafogo, resfriamento de metal e para lavagem e enxágue;
- e) o bico cone cheio tipo espiral promove um padrão de cone cheio com gotas mais grossas. Nota-se que a cobertura de pulverização não é tão uniforme. São aplicados em supressão de poeira, proteção contrafogo, têmpera, dessulfurização de gases de combustão;
- f) o bico jato leque (afilados) é utilizado quando se deseja um leque de borda cônica com gotas de tamanho médio. São ideais quando se deseja cobertura completa por toda a área de impacto. Utilizados em limpeza de alta pressão;

- g) o bico jato leque (não afilados) produz um padrão retangular fino com gotas de tamanho médio. Ideal quando necessário impacto alto e uniforme de pulverização. Utilizados para revestimento, resfriamento, hidratante e lavagem;
- h) o bico jato leque (defletor) reduz o entupimento e produz gotas de tamanho médio. Os ângulos de pulverização fechados propiciam impacto mais alto, enquanto os ângulos abertos proporcionam menores impactos. São utilizados em chuveiros para a fabricação de papel e lavagem;
- i) os bicos atomizadores a ar são utilizados em pulverizações de baixa vazão, com pequenas gotas e com padrão cone oco. Utilizados quando não for desejado ar comprimido. Utilizados para a supressão de poeira, resfriamento evaporativo, hidratante e spray de secagem;
- j) os bicos atomizadores a ar e comando pneumático produz pequenas gotas utilizando a combinação de pressões de ar e líquido. São mais utilizados quando se deseja pulverizações finamente atomizadas. São aplicados para revestimentos, resfriamento evaporativo, umidificação e hidratante;
- k) os bicos jato sólido promovem jatos de líquido puro. São ideais quando for preciso um impacto de pulverização muito alto. São utilizados quando a remoção de sujeira e detritos é necessária, pulverização decorativa e em operações de fluxo laminar.

Figura 2.13 – Tipos de jatos de pulverização



2.2.1 *Lubrificantes sólidos*

Lawal, Choudhury e Nukman (2013) comentam que a usinagem com lubrificantes sólidos é uma tentativa de evitar o uso de fluido de corte e que o grafite e dissulfeto de molibdênio (MoS₂) são os materiais predominantes. Esses materiais estão na forma de pó e são aditivos lubrificantes eficazes. Os autores comentam que a seleção do correto lubrificante para uma aplicação específica é um método complexo e que é utilizado quando os lubrificantes líquidos não atendem aos requisitos da tecnologia em uso. Comentam ainda que poucos estudos estão disponíveis sobre esta técnica.

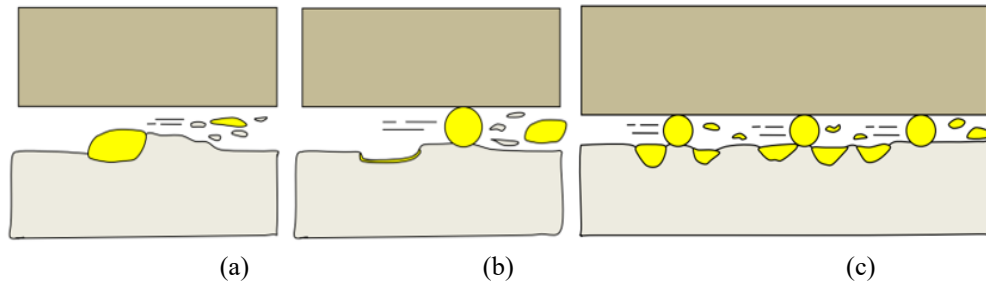
Sarhan; Sayuti e Hamdi, (2012) realizaram um estudo de utilização de grafite no fresamento do alumínio AA6061-T6 visando menor consumo de energia e de poluição referentes aos fluidos de corte comparando usinagem utilizando SiO₂ com usinagem com óleo lubrificante comum. Os autores notaram que as nanopartículas de SiO₂ suspensas em óleo reduziram o atrito e as forças de corte.

Sayuti et al, (2014a) estudaram o fresamento da liga de alumínio 6061-T6 e atentaram para o fato de que apesar do óleo lubrificante ser introduzido na zona de corte, em temperatura e pressão mais altas perde sua função devido a sua evaporação. A introdução de SiO₂ produziu menor atrito na interface cavaco-ferramenta, suportando estas condições e propiciando uma qualidade superficial melhor, além de reduzir o consumo de óleo. A concentração do nano lubrificante em 0,2% propiciou a criação de uma película fina protetora, contendo grande quantidade de nanopartículas, diminuindo a deformação térmica entre a peça-ferramenta. Os autores demonstram em seu estudo que o mecanismo de nanopartículas durante a usinagem pode ser dividido em três níveis:

- a) polimento e cisalhamento parcial das partículas;
- b) polimento, rolamento e cisalhamento parcial das partículas;
- c) impregnação das partículas nos poros e cisalhamento das partículas parcialmente alojadas.

A Figura 2.14 ilustra os mecanismos. A Figura 2.14(a) mostra as partículas incorporadas parcialmente na superfície devido ao atrito e alta pressão na zona de corte. As partículas são cisalhadas e mudam de forma devido à compressão. A Figura 2.14(b) demonstra que partículas parcialmente incorporadas na superfície são removidas por outras nanopartículas, continuando o polimento da superfície. As partículas arrancadas deixam uma fina película na área de contato devido à carga elevada. Na Figura 2.14(c) nota-se a incrustação das partículas nos vales e cisalhamento parcial das mesmas.

Figura 2.14 - Mecanismos de desgaste e redução de atrito de nanopartículas durante a usinagem



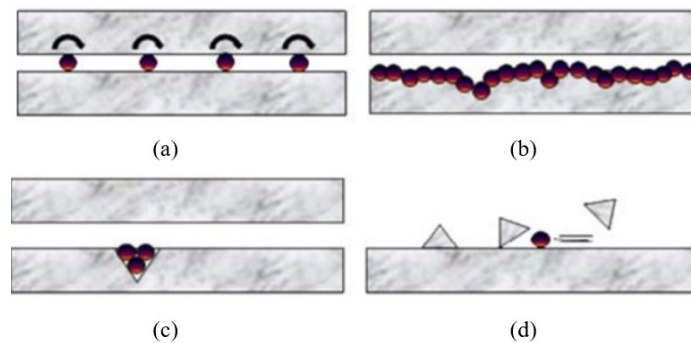
Fonte: Adaptado de Sayuti et al. (2014a).

Rahmati; Sarhan e Sayuti, (2014) utilizaram em seu trabalho nano lubrificantes contendo MoS_2 para fresamento da liga Al6061-T6. Os nano lubrificantes foram preparados pela adição de nanopartículas a um óleo base (ECOCUT HSG 905S) e misturadas por 48 horas por um sistema de ultrassom utilizando um sistema MQL para o fornecimento do fluido. Constataram que as nanopartículas melhoraram a qualidade da superfície usinada devido à ação de laminação, enchimento e polimento na interface ferramenta-peça e sugeriram investigação de trabalhos em indústrias aeroespaciais.

Lee et al. (2009) expõem os efeitos anti desgaste e de redução de atrito com a presença de nanopartículas. A Figura 2.15 mostra suas concepções. A Figura 2.15(a) e 2.15(b) mostra o efeito direto das nanopartículas na lubrificação, desempenhando um papel de rolamento de esferas entre as superfícies de atrito além de realizar também o papel de uma película protetora. A Figura 2.15(c) e 2.15(d) demonstram o efeito secundário da presença de nanopartículas. Estas se depositam nos vales de rugosidades além de fazer o papel de polimento.

Moura et al. (2015) estudaram a utilização de lubrificantes sólidos no torneamento de Ti-6Al-4V. Os resultados mostraram a superioridade do dissulfeto de molibdênio em relação ao grafite no processo de torneamento pela redução do desgaste da ferramenta e aumento da vida útil. Segundo os autores, o lubrificante sólido pode ser uma alternativa para torneamento seco e úmido e a adição de lubrificantes sólidos no fluido de corte melhora significativamente sua lubrificação e eficiência de resfriamento. Comentam que a vida do inserto de corte melhora devido ao fato de que o lubrificante sólido é capaz de penetrar na interface cavaco-ferramenta e realizar lubrificação e resfriamento e que os lubrificantes sólidos reduzem as forças de corte, quando comparado com a usinagem sem lubrificação e convencional.

Figura 2.15 – Mecanismos de lubrificação pela utilização de nanofluidos em usinagem



Fonte: Lee et al. (2009).

Baldin et al. (2021) investigaram o desempenho de três fluidos de corte diferentes com adição de grafeno aplicado via MQL. A usinagem a seco foi a condição de usinagem mais crítica, com maiores desgastes e menor vida da ferramenta. Os autores notaram que a temperatura propiciou o desgaste por adesão, que danificou as arestas e superfícies de corte pela abrasão de partículas duras desprendidas da ferramenta de corte. Os autores notaram a presença de trincas térmicas, indicadas pelas flutuações na temperatura e tensões superficiais nas ferramentas de corte. Para a abordagem utilizando óleo com a adição de plaquetas de grafeno, os mecanismos de desgaste foram maiores, reduzindo a vida da ferramenta. Segundo os autores, as plaquetas de grafeno atuaram como corpos estranhos entre a ferramenta e a peça/cavaco, e junto com o desbloqueio de partículas duras do revestimento e substrato da ferramenta intensificou o desgaste por abrasão. Na abordagem com a utilização de óleo com base vegetal, a adição de grafeno aumentou as propriedades lubrificantes, reduzindo o desgaste.

2.3 Resfriamento criogênico na usinagem de metais

A utilização cada vez mais de menores quantidades de fluidos lubrificantes em usinagens vem de encontro a um futuro sustentável. A conscientização por parte dos indivíduos surge da necessidade e da percepção de um futuro degradante caso medidas não sejam tomadas na atualidade. Legislações tem sido estudadas e aplicadas com rigor em forma de multas. O descarte desses fluidos utilizados, caso não feita de forma correta, prejudica muito o meio ambiente com a poluição de rios e mananciais. Desta forma, ações estão sendo tomadas e inúmeras pesquisas nesta área estão sendo executadas. A minimização da utilização dos fluidos vem de encontro a esta premissa. Conceitos como usinagem ecológica e usinagem sustentável estão em voga.

Shokrani; Dhokia e Newman, (2012) apresentaram um estudo sobre o fresamento criogênico de Inconel 718. Neste trabalho, comentam que usinagens em ligas resistentes ao calor, como titânio e ligas à base de níquel são melhores com uma pequena quantidade de fluido criogênico na região de corte com o intuito de diminuir a temperatura e alterar o atrito. O trabalho demonstrou uma diminuição de rugosidade R_a na peça em comparação com a usinagem sem lubrificação.

Nos campos automotivo, aeroespacial e da engenharia biomédica, onde materiais difíceis de usar são rotineiramente empregados para fabricar produtos de alto desempenho, a usinagem criogênica é particularmente relevante e pode ser usada como um meio de obter melhor desempenho funcional (JAWAHIR, 2016b).

Na pressão atmosférica, as temperaturas de ebulição de LN_2 e CO_2 são -196 °C e -78 °C respectivamente. Os benefícios de usar o LN_2 em comparação com fluidos de trabalho de metais a base de óleo refrigerante implica que os primeiros são limpos, incolores, inodoros, insípidos, não-tóxicos, não-combustíveis e não-corrosivos. Quando o LN_2 é aplicado na zona de corte, vai evaporar e voltar para a atmosfera, não deixando nenhum resíduo e contaminação na ferramenta de corte, peça de trabalho, cavaco e área de usinagem. Portanto, não há necessidade de descarte de refrigerante e limpeza pós-processo devido a contaminação. O processo é ambientalmente amigável em comparação com fluidos de refrigeração convencionais (ARAMCHAROEN, 2016).

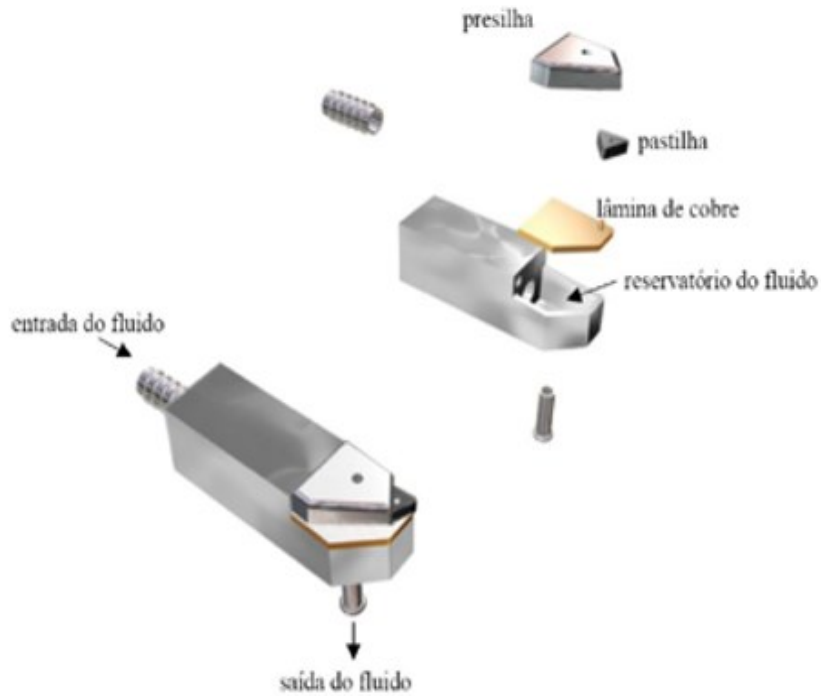
Existem diferentes estratégias em termos da aplicação do refrigerante como o pré-resfriamento da peça, o resfriamento da ferramenta, o resfriamento do porta-ferramenta e a escolha do próprio refrigerante (por ex. dióxido de carbono líquido, nitrogênio líquido, ar frio comprimido). Uma variedade de materiais foi estudada na usinagem criogênica: aço, ligas de níquel, ligas de titânio e matriz de metal compósitos. No entanto, a maior parte da pesquisa foi focada em operações de torneamento (SADIK et al. 2016).

Segundo Yildiz e Nalbant (2008) há 4 formas de resfriamento criogênico praticadas pelos pesquisadores. São elas:

- a) pré-resfriamento da peça;
- b) refrigeração criogênica indireta (ou resfriamento atrás da ferramenta);
- c) pulverização criogênica com jatos;
- d) tratamento criogênico do inserto de corte.

Vicentin (2009) propôs a construção de um porta-ferramentas com circulação interna de fluido refrigerante (circuito fechado) sem perdas para o meio-ambiente e sem custos excessivos. Seu aparato pode ser visto na Figura 2.16.

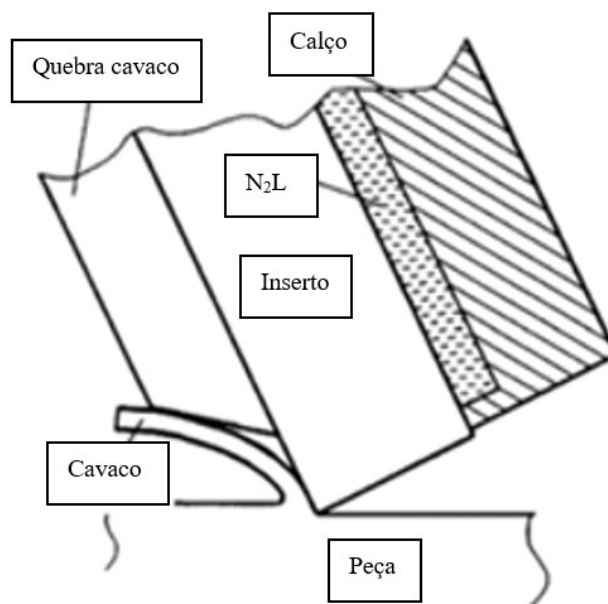
Figura 2.16 – Porta-ferramentas com circulação interna de fluidos



Fonte: Vicentin (2009).

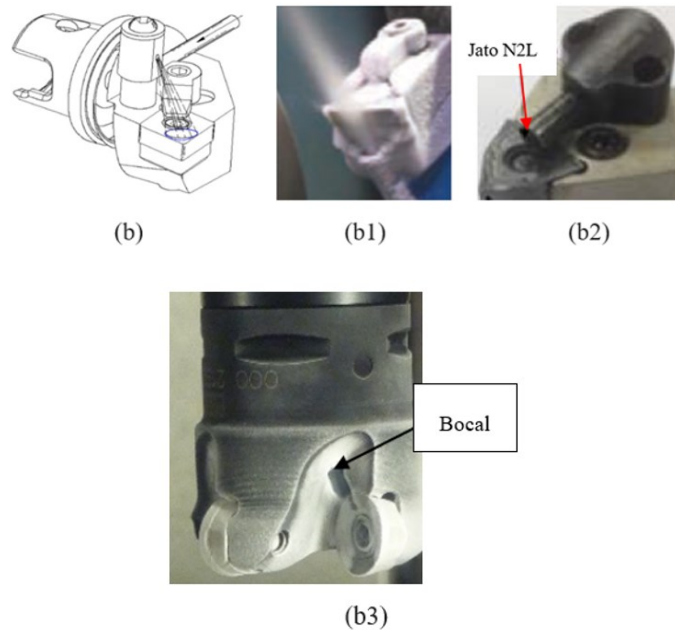
As Figuras 2.17 e 2.18 mostram exemplos de processos de resfriamento criogênico. Na Figura 2.17 ilustra-se a refrigeração criogênica indireta. Na Figura 2.18 ilustra-se a pulverização criogênica por jatos.

Figura 2.17 – Refrigeração criogênica indireta



Fonte: Yildiz e Nalbant (2008).

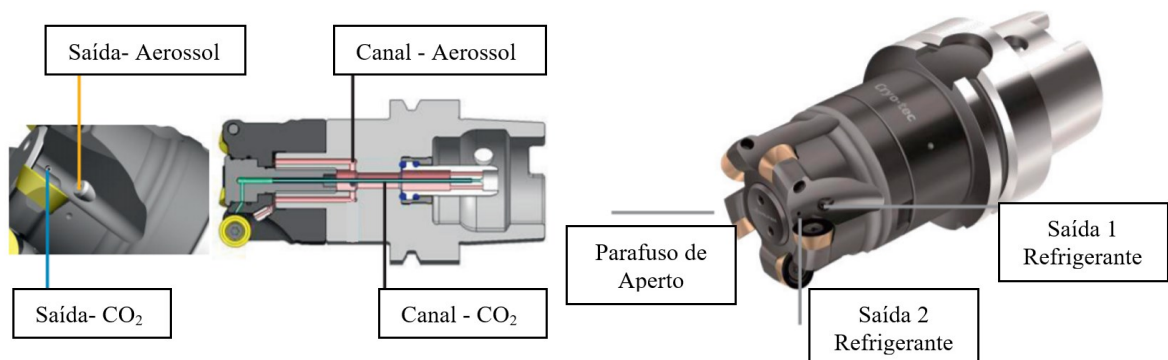
Figura 2.18 – Refrigeração criogênica por jatos



Fonte: (b) Yildiz e Nalbant (2008); (b1) Jawahir, 2016b; (b2) He, 2016; (b3) Sadik, 2016.

Uma abordagem chamada de Cryo·tec™ foi utilizada no trabalho de Cordes; Hübner e Schaarschmidt (2014). O trabalho estudou o fresamento de aços inoxidáveis utilizando CO₂ por meio de uma abordagem multicanal. Os testes foram realizados com diferentes estratégias de lubrificação e resfriamento. A Figura 2.19 ilustra o dispositivo utilizado. Os autores concluíram que os maiores efeitos do resfriamento criogênico é a redução do desgaste da ferramenta.

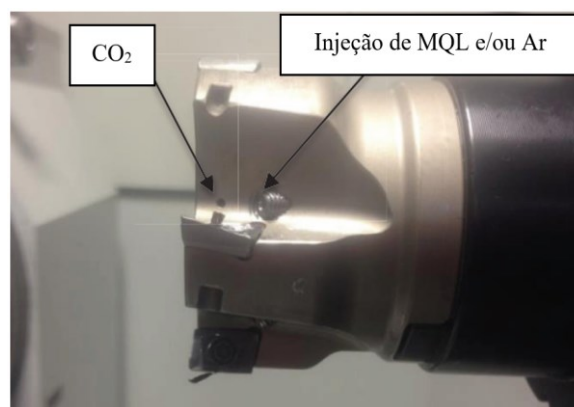
Figura 2.19 - Dispositivo utilizado para lubrificação. (a) Dispositivo Cryo-tec em corte. (b) Dispositivo Cryo-tec F2334R



Fonte: Cordes; Hübner e Schaarschmidt (2014).

Tapoglou et al. (2017) utilizaram CO₂, emulsão, CO₂ combinado com ar ou MQL e somente MQL na refrigeração e lubrificação do fresamento da liga Ti-6Al-4V. Os autores comentam que os fluidos criogênicos podem ser utilizados com outras opções de refrigeração e entregas de diversas formas. A ideia da lubrificação é de auxiliar na dissipação de calor na zona de corte e prolongar a vida da ferramenta. A Figura 2.20 mostra a abordagem utilizada. A melhor técnica criogênica apontou a utilização da mistura CO₂ com MQL. O trabalho enfatiza que o sucesso na usinagem criogênica depende de muitos fatores como o material da peça e o processo de usinagem.

Figura 2.20 – Abordagem utilizada para lubrificação



Fonte: Tapoglou et al. (2017).

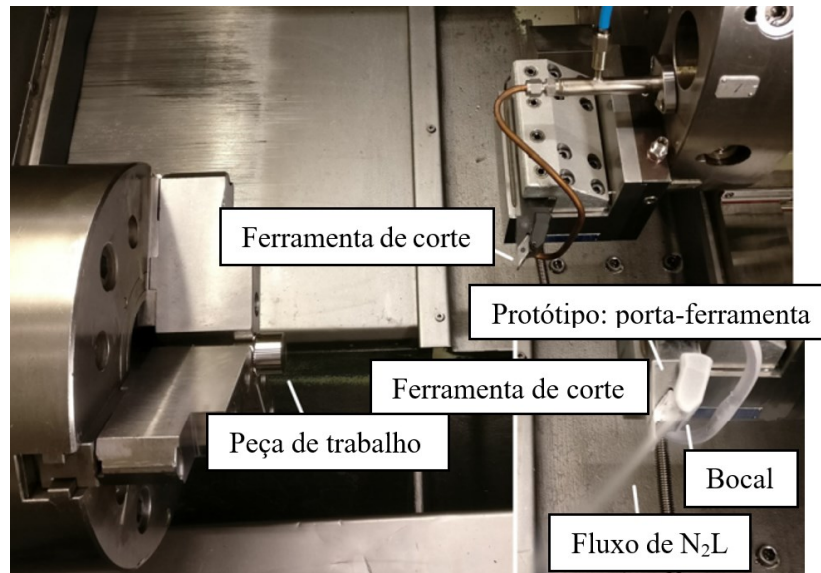
Isakson et al. (2018) investigaram o desgaste de flanco dos insertos de corte no torneamento de titânio Ti-6Al-4V sob refrigeração com nitrogênio líquido e fluido de corte (emulsão). Observou-se que o desgaste é mais rápido para resfriamento criogênico do que no resfriamento por inundação utilizando emulsão. No entanto, verificou-se que a utilização de nitrogênio líquido mostrou poucas diferenças nas tensões residuais verificadas e comparadas com a utilização de emulsão. A Figura 2.21 mostra a montagem do sistema de refrigeração utilizado.

Os autores comentam que a possibilidade de trocar o sistema de fluido de corte por LN₂ foi possível sem alterar a integridade de superfície como tensões residuais e rugosidade e que o fornecimento de nitrogênio líquido pode ser reduzido diminuindo o diâmetro do bico de fornecimento.

Kummamkandath et al. (2020) estudaram diferentes abordagens de lubrificação, como MQL, CO₂ líquido e lubrificação convencional no fresamento da liga Ti-6Al-4V e suas correlações com tensões residuais. Uma alteração foi feita em uma ferramenta comercial pela

criação de canais internos na ferramenta com o intuito de lubrificação. O estudo revelou que a abordagem utilizando CO₂ propiciou maiores tensões residuais de compressão na superfície.

Figura 2.21 -Montagem de refrigeração utilizada



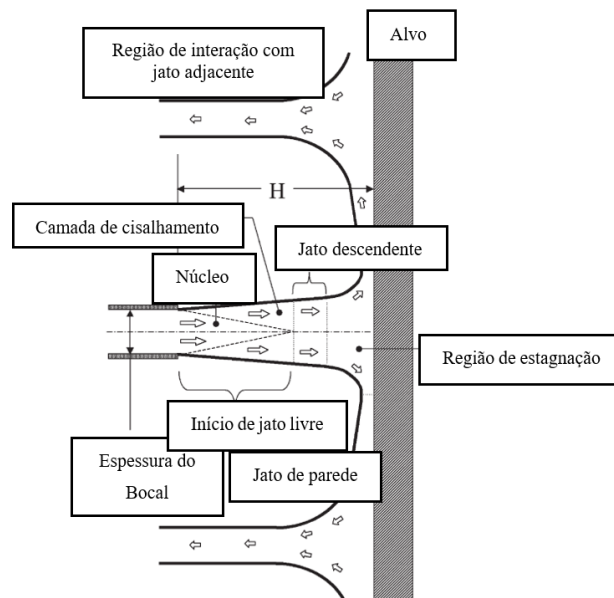
Fonte: Isakson et al. (2018).

Existem estudos que apontam vantagens e desvantagens em cada uma das aplicações. Xavier (2010) em seu estudo reúne informações de alguns pesquisadores. É demonstrado que:

- a) o método de pré-resfriamento da peça pode ser impraticável em larga escala devido ao fato de propiciar variações dimensionais na peça e consumir muito nitrogênio líquido, encarecendo o processo;
- b) na refrigeração criogênica indireta o desempenho de usinagem pode ser melhorado, porque o resfriamento é restrito apenas ao corte da pastilha, porque o LN₂ não entra em contato com o inserto de corte e mantém o resfriamento estável, dependendo da condutividade térmica dos materiais;
- c) na pulverização por jatos, o nitrogênio líquido também pode levar ao resfriamento indesejado a outras partes. Este resfriamento criogênico localizado na face da ferramenta reduz a temperatura, aumentando a dureza da ferramenta, e reduz a sua taxa de desgaste. Esta abordagem também fragiliza o cavaco pela temperatura fria, facilitando a sua quebra pelo quebra-cavaco.

O fluxo de um jato colidindo é caracterizado por três regiões. São conhecidas por região de jato livre, região de estagnação e região de jato de parede. A Figura 2.22 ilustra as regiões.

Figura 2.22 – Regiões de um jato



Fonte: Zuckerman e Lior (2006).

Na usinagem criogênica o jato está na saída na fase líquida e é injetado para uma região de pressão subcrítica, mas com temperatura ambiente supercrítica. Dependendo da temperatura do jato, o comprimento do núcleo do jato tem cerca de 10 vezes o diâmetro do bico injetor (JAWAHIR, 2016a).

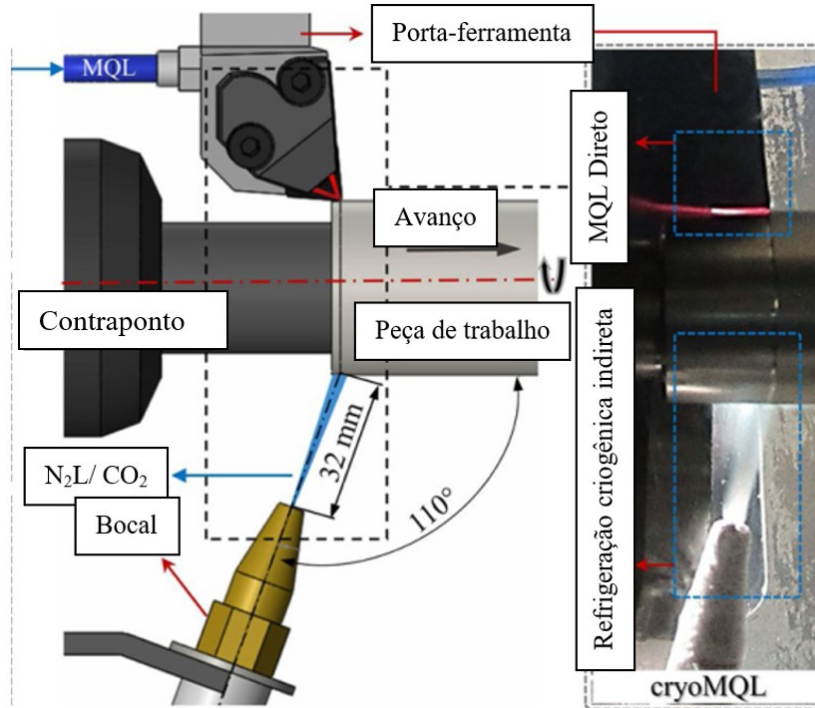
Neste aspecto as aplicações devem estar dentro da região do núcleo, onde a capacidade de resfriamento é máxima. Estima-se que quando a peça está a uma distância de 40 vezes o diâmetro do jato, o nitrogênio está 50% líquido no momento de interação com o alvo (JAWAHIR, 2016a e ZELINSKI, 2011).

Çetindağ; Çiçek e Uçak, (2020) estudaram uma técnica denominada CryoMQL no torneamento de AISI 52100 utilizado em rolamentos. A técnica consiste em aplicação simultânea de criogenia (CO_2 e LN_2) e lubrificação pela abordagem MQL. As misturas MQL + CO_2 e MQL + LN_2 foram comparadas com fluido de corte convencional e usinagem a seco e MQL e o desgaste das condições foram medidos. A Figura 2.23 ilustra a concepção utilizada. Os valores mínimos de desgaste de flanco foram encontrados sob a condição MQL+ CO_2 , devido ao efeito combinado de MQL e criogenia.

Shokrani e Newman (2019) desenvolveram um aparato para o fornecimento de nitrogênio líquido no fresamento da liga Ti-6Al-4V. O estudo propôs uma nova geometria de ferramenta de corte circular. A Figura 2.24 mostra o dispositivo. Mostraram em seu estudo que as propriedades do material da peça e da ferramenta de corte são influenciadas pelo resfriamento

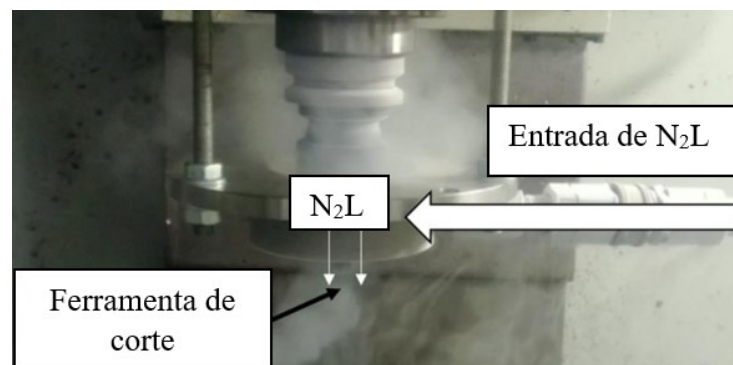
criogênico. Para este estudo fabricou-se ferramentas com deposição física a vapor (PVD) de TiSiN-TiN, recomendado para usinagem de titânio e ligas de níquel.

Figura 2.23 – Concepção utilizada para lubrificação LN₂ / CO₂ / MQL



Fonte: Çetindağ; Çiçek e Uçak, (2020).

Figura 2.24 – Dispositivo para usinagem criogênica



Fonte: Adaptada de Shokrani e Newman (2019).

Ahmad-Yazid; Taha e Almanary (2010) comentam que o corte de metal gera calor e influencia a qualidade do produto final, além de limitar a vida da ferramenta de corte. Muitas tentativas com o objetivo de entender o mecanismo e teoria por trás do aumento de temperatura durante a usinagem foram realizadas. Uma destas é o resfriamento por meio da utilização de ar

resfriado por meio de um tubo de vórtice Ranque-Hilsch. A Figura 2.25 ilustra tubos de vórtices da empresa Nex Flow.

Figura 2.25 – Tubos de vórtice

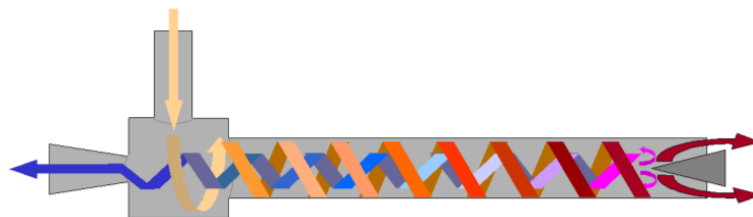


Fonte: Nex Flow (2020).

O tubo de vórtice de Ranque-Hilsch consiste em um aparato em que um compressor pressuriza o ar que passa internamente no tubo por uma região chamada de câmara de giro, se deslocando pela parede interna do tubo em direção a uma saída que possui uma válvula de controle. A velocidade de rotação se mantém constante, mas há uma perda de energia devido ao momento angular. Esta perda libera calor que aumenta a temperatura e velocidade de saída do ar. Nem todo o ar que entra no tubo sai pela válvula de controle. A válvula de controle força o ar retido a voltar pelo centro do vórtice, gerando ar frio na direção oposta (BUHELDT et al., 2016).

Ramos, Lima e Pádua (2015) relatam que o fenômeno físico que ocorre no tubo pode ser visualizado na Figura 2.26, embora não exista uma teoria suficientemente satisfatória para explicá-lo com precisão. A separação de temperatura radial que ocorre no tubo é chamada de efeito Ranque-Hilsch em homenagem aos pioneiros no estudo desse dispositivo.

Figura 2.26 – Esquema de um tubo de vórtice de Ranque-Hilsch



Fonte: Ramos, Lima e Pádua (2015).

Em baixas temperaturas as propriedades de muitos materiais metálicos como o limite de escoamento e resistência à tração, dureza, desgaste e resistência à fadiga são todos melhorados em comparação com propriedades à temperatura ambiente. Em geral, materiais com uma estrutura cúbica de face centrada tendem a manter sua ductilidade em temperaturas criogênicas, enquanto o cúbico de corpo centrado e hexagonais tornam-se frágeis (PATEL; PATEL, 2017). A Figura 2.27 ilustra a eficácia de várias estratégias de refrigeração e lubrificação.

Patel e Patel (2017) em seu artigo ilustra que Sartori; Ghiotti e Bruschi (2017), trabalharam na implementação de diferentes estratégias de lubrificação / resfriamento durante operações de usinagem, a fim de melhorar a usinabilidade bem como aumentar a vida da ferramenta. O Ti-6Al-4V foi utilizado na investigação experimental. Eles fixaram os valores para velocidade de corte, avanço e profundidade de corte e aplicaram diferentes estratégias para resfriamento como LN₂, CO₂, a seco, realizaram misturas destas condições e analisaram o desgaste da ferramenta. Concluíram que ao aplicar refrigeração com baixa temperatura, o desgaste de cratera foi drasticamente reduzido, preservando a aresta de corte com uma melhora da rugosidade. As estratégias híbridas combinando LN₂/MQL e CO₂/MQL garantiram vantagens ao fenômeno de formação de crateras e desgaste de flanco.

Figura 2.27 - Eficácia e aplicação de vários sistemas de refrigeração e estratégias de lubrificação

Efeitos do resfriamento e estratégia de lubrificação		Jorro (emulsão / óleo)	Seco (Ar comprimido)	MQL (Óleo)	Criogênico (N ₂ L)	Híbrido (N ₂ L+MQL)
Primário	Refrigeração	Bom	Ruim	Limitado	Excelente	Excelente
	Lubrificação	Excelente	Ruim	Excelente	Limitado	Excelente
	Remoção de cavaco	Bom	Bom	Limitado	Bom	Bom
Secundário	Resfriamento de máquina	Bom	Ruim	Ruim	Limitado	Limitado
	Resfriamento da peça	Bom	Ruim	Ruim	Bom	Bom
	Controle de partículas/ poeira	Bom	Ruim	Limitado	Limitado	Bom
	Qualidade do produto (Integridade superficial)	Bom	Ruim	Limitado	Excelente	Excelente
Preocupação Sustentável		Poluição da água, infestação microbiana e alto custo	Integridade superficial ruim devido ao dano térmico	Vapor de óleo prejudicial	Custo inicial	Custo inicial e vapor de óleo

Fonte: Adaptado de Patel e Patel (2017).

Schoop, Sales e Jawahir (2017) usinaram a liga Ti-6Al-4V utilizando ferramenta de diamante policristalino (PCD) sob três condições de resfriamento/ lubrificação: resfriamento criogênico (nitrogênio líquido a $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), refrigeração / lubrificação híbrida (LN_2 e MQL à base de óleo) e resfriamento convencional (emulsão). Notou que o desgaste do inserto foi de 4 a 5 vezes maior em comparação às condições criogênicas e híbridas.

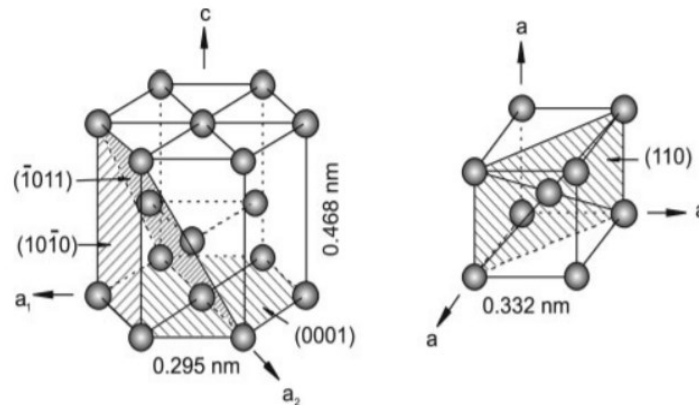
2.4 O titânio e suas ligas

Em 1791, William Gregor, o reverendo, mineralogista e químico britânico, descobriu o titânio. Após a Segunda Guerra Mundial, as ligas à base de titânio foram logo consideradas materiais chave para motores de aeronaves. Em 1948, a DuPont Company foi a primeira a produzir titânio comercialmente. O setor aeroespacial ainda é o principal consumidor de titânio e suas ligas, mas outros mercados, como arquitetura, processamento químico, medicina, geração de energia, marinha e offshore, esportes e lazer e o transporte estão ganhando maior aceitação (LEYENS; PETERS, 2003). “As principais razões de o titânio ser tão utilizado pelo mercado é devido a excelente resistência à corrosão e a combinação de uma baixa densidade ($4,5\text{ g/cm}^3$) associada à alta resistência mecânica” (MELO,2007). “O elemento titânio é um metal de transição e na natureza suas principais fontes são os minerais rutilo e ilmenita.” (MORCELLI, 2009). “A resistência mecânica varia entre 480 MPa e 1180 MPa em casos de ligas de uso estrutural, chegando até superar valores 1725 MPa em outras formas especiais, como fios e molas” (MELO, 2007).

As principais propriedades das ligas de titânio são elevadas temperaturas de fusão; alta dureza a quente; excelentes propriedades mecânicas; alta resistência à corrosão; ótima razão resistência/peso e biocompatibilidade (CAMPOS, 2014).

As ligas de titânio podem ser divididas em 4 grupos principais: o titânio puro, a liga alfa (α), a liga beta (β) e a liga alfa + beta ($\alpha + \beta$). Nestas ligas as características se diferenciam pela resistência mecânica, pela temperatura à que podem ser submetidas em trabalho, pela resistência à corrosão e pela densidade (ZEILMANN, 2003). A Figura 2.28 ilustra a estrutura cristalográfica das fases alpha e beta.

Figura 2.28 – Estrutura cristalográfica das ligas alpha e beta



Fonte: LEYENS E PETERS (2003).

Os elementos químicos como Al, O, N e C quando dissolvidos no titânio produzem pequeno aumento na temperatura de transformação de fase e são denominados “estabilizadores α ” ou “alfa gênicos” (metais simples ou elementos intersticiais). Os elementos de liga como Mo, V, Nb, Cu e Si (elementos de transição ou metais nobres) diminuem a temperatura de transformação de fase e são conhecidos como “estabilizadores β ” (BOYER³; WELSCH; COLLINGS, 1994 apud KULL NETO, 2013). Elementos de liga podem aumentar ou diminuir a temperatura de transformação com a adição de elementos de liga. As temperaturas Alfa transus (abaixo da qual a liga é totalmente alpha) e Beta transus (acima da qual a liga é totalmente beta) são importantes. Entre as duas temperaturas as ligas são ($\alpha + \beta$). A uma temperatura de aproximadamente 882°C o titânio puro se transforma na fase β , que possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) (Tschiptschin, 2018).

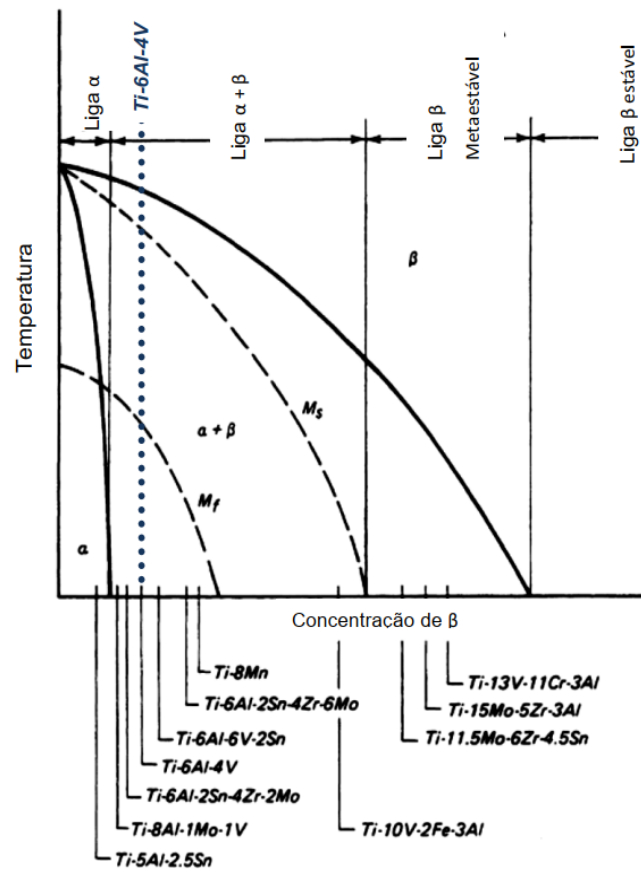
O titânio não ligado e ligas de titânio com elementos α -estabilizadores ou alfa gênicos (que elevam a temperatura de transformação β transus) em teores relevantes, tais quais alumínio, gálio e estanho, apresentam estrutura hexagonal compacta à temperatura ambiente e, por isso, são classificados como ligas alfa. Estas ligas apresentam resistência mecânica e resistência à fluência satisfatórias, altas tenacidade e resistência à corrosão e ainda excelente soldabilidade. Além disso, estas ligas são a primeira escolha para aplicações em altas temperaturas (BOYER⁴, 1996 ANTONIALLI, 2009).

A Figura 2.29 mostra as composições de algumas ligas comerciais no diagrama de fase CCT (Concentração de Beta x temperatura). As curvas tracejadas indicam respectivamente a região de início (Ms) e final de transformação martensítica (Mf). As curvas contínuas indicam o limite de região das fases.

³ BOYER, R. R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. 1 ed. Materials Park: ASM International, 1994. 1176 p.

⁴ BOYER, R. R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science & Engineering*, v. A213, n. 1-2, p. 103-114, 1996.

Figura 2.29 - Ligas de titânio no diagrama de fases CCT



Fonte: (DONACHIE JR., 2000 apud FARIAS, 2015).

A uma temperatura de aproximadamente 882°C o titânio puro se transforma na fase β , que possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC).

A liga alfa (α) tem uma microestrutura com fase- α , modificada pela adição de elementos como o alumínio, o estanho e o zircônio e possuem excelentes propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão, sendo usadas na fabricação de componentes que trabalham a elevadas temperaturas (ZEILMANN, 2003). Estas ligas possuem boas propriedades em temperaturas altas (FARIAS, 2015).

As ligas quase- α possuem pequenas adições de 1 a 2% de estabilizadores garantindo uma boa relação entre a maior resistência das ligas alfa + beta e a resistência de fluência das ligas alpha. Pertencem a esta classe as ligas utilizadas em altas temperaturas para aplicação em motores aeronáuticos (FARIAS, 2015).

As ligas beta contêm em sua composição metais de transição como Vanádio, Nióbio, Tântalo e Molibdênio, podendo reduzir a temperatura β transus propiciando o crescimento da

fase beta (CCC) (BOYER⁵; WELSCH; COLLINGS, 1994 apud ANTONIALLI, 2009). Este grupo de ligas apresenta elevada dureza, respondendo satisfatoriamente ao tratamento térmico mesmo em peças de grandes dimensões (ANTONIALLI, 2009). As ligas beta apresentam excelente forjabilidade a quente, podendo ainda ser forjadas a frio quando na condição solubilizada (KUHLMAN⁶, 1998 apud ANTONIALLI, 2009).

As ligas de titânio da classe $\alpha + \beta$ são as mais comuns entre as várias ligas de titânio. A liga Ti-6Al-4V possui estruturas cristalinas hexagonais compactas (fase alfa) e cúbica de corpo centrado (fase beta) presentes a temperatura ambiente, conciliando resistência mecânica, resistência a corrosão, conformabilidade e usinabilidade. As ligas de titânio possuem excelentes combinações de resistência / peso e ótima resistência à corrosão e por isso são utilizadas nas indústrias aeronáutica e automobilística e na fabricação de próteses ortopédicas (JESUÍNO, 2001). A tabela 2.1 ilustra as propriedades essenciais divididas pelas fases das ligas de titânio.

Dependendo da velocidade de resfriamento, as lamelas são finas ou grosseiras. O resfriamento lento da fase beta resulta em puras microestruturas lamelares (Fig. 2.30(a)), com as lamelas se tornando mais grossas com a velocidade de resfriamento reduzida. Têmpera rápida conduz a uma transformação martensítica de fase beta, proporcionando uma microestrutura em forma de agulha (Fig. 2.30(b)).

As Figuras 2.30(a), 2.30(c) e 2.30(d) foram lentamente resfriadas e apresentam a fase beta em torno das lamelas claras (alpha). Com elevadas taxas de resfriamento com temperaturas acima de Ms (Fig. 2.30(d)) a fase beta se transforma em martensita. Para temperaturas mais baixas, a fração de volume da fase beta diminui ainda mais e não se transformam em martensita a temperaturas inferiores a Ms (Fig. 2.30(f)) (MOURA, 2017).

⁵ Ibid., [s.p.].

⁶ KUHLMAN, G. W. Forging of Titanium Alloys. In: **Metals Handbook**, v. 14 – Forming and Forging, 9 ed. Materials Park: ASM International, 1988. p. 267-287.

Tabela 2.1 – Propriedades das ligas alfa, alfa + beta e beta. (+) Melhores propriedades. (-) Piores propriedades.

	α	$\alpha+\beta$	β
Densidade	+	+	-
Força	-	+	++
Ductilidade	-/+	+	+/-
Tenacidade à fratura	+	-/+	+/-
Fluência	+	+/-	-
Corrosão	++	+	+/-
Oxidação	++	+/-	-
Soldabilidade	+	+/-	-
Conformação à frio	--	-	-/+

Fonte: Leyens e Peters (2003).

Atualmente, mais de 100 ligas de titânio são conhecidas, das quais, no entanto, apenas 20 a 30 atingiram status comercial. Destes, a liga clássica Ti-6Al-4V cobre mais de 50% de uso (LEYENS; PETERS, 2003).

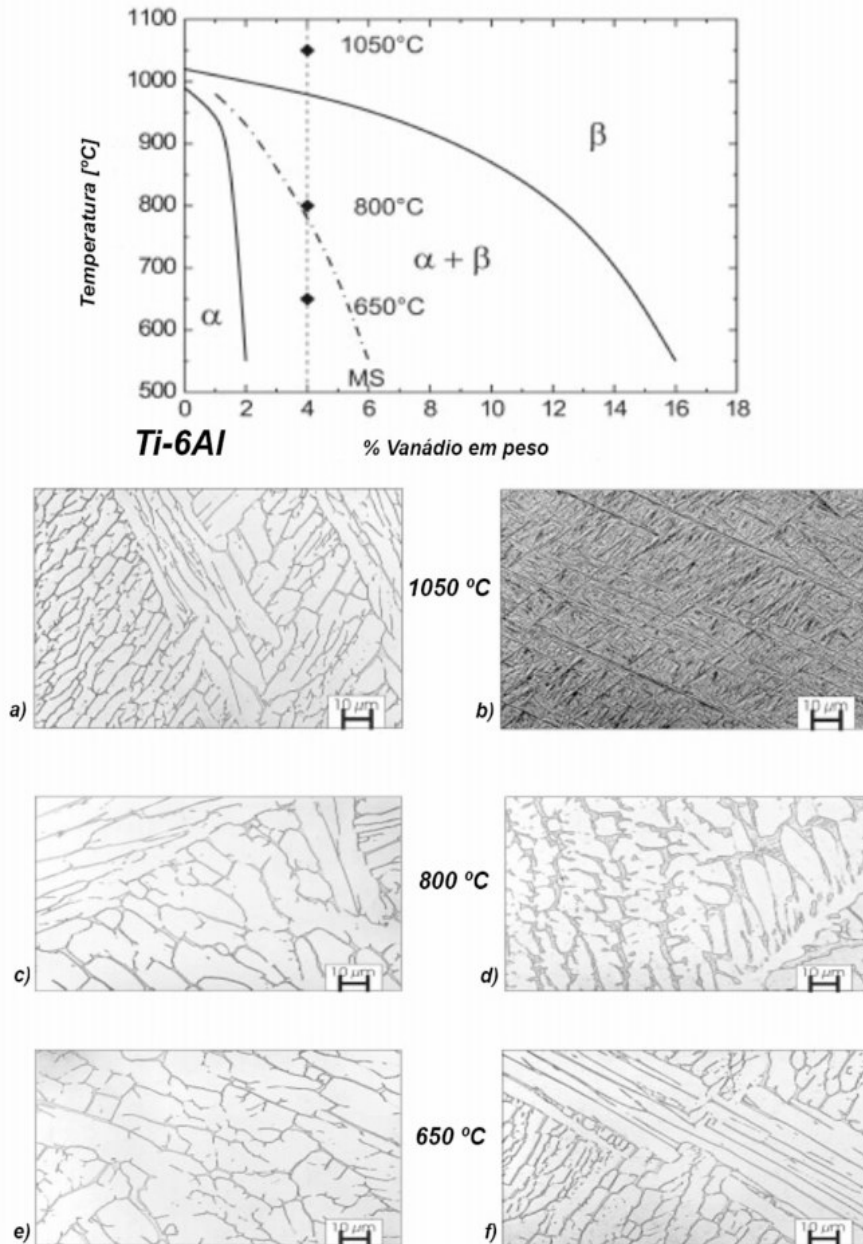
A liga Ti-6Al-4V é a mais importante das ligas de titânio e é utilizada na indústria em aplicações que requerem resistência em altas temperaturas. O entendimento de seu comportamento em deformação com temperaturas elevadas é extremamente importante (BRIGUENTE et al. 2013).

As propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V dependem da sua microestrutura e variam suas propriedades em função da direção de análise. Processamentos termomecânicos ou termoquímicos têm sido realizados buscando-se aumentar a resistência e a tenacidade de ligas de titânio (COUTO, 2006).

A formação microestrutural da liga Ti-6Al-4V está relacionada com o tamanho e o arranjo das fases α e β . As propriedades têm por base o refinamento dos grãos após o resfriamento da região β . Caso haja um resfriamento direto da fase β , a estrutura formada pode ser lamelar ou, se houver recristalização, uma estrutura equiaxial será formada. Ambos os tipos de microestrutura podem ter variações de arranjos mais refinados ou grosseiros. Além das estruturas citadas, uma terceira formação pode aparecer, a qual é chamada de bimodal ou duplex, composta por uma fase α equiaxial inserida em uma matriz $\alpha+\beta$ lamelar (LÜTJERING; WILLIAMS⁷, 2007 apud ALVES, 2020).

⁷ LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. **Titanium**. 2. ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

Figura 2.30 – Microestruturas resultantes de resfriamento – Ti-6Al-4V



Fonte: LEYENS; PETERS, 2003 apud MOURA, 2017.

As ligas Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo e Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo são indicadas para turbinas de jatos e na estrutura de aeronaves. As ligas Ti-6Al-4V, Ti-3Al-2,5V, Ti-662 (Ti-6Al-6V-2Sn-0,5Cu-0,5Fe) são indicadas para temperatura de trabalho de 150°C a 500°C.

O uso das ligas de titânio como biomaterial para implante tem aumentado nas últimas duas décadas devido ao seu menor módulo de elasticidade, elevada resistência à corrosão e melhor biocompatibilidade quando comparadas com os aços inoxidáveis e ligas a base de cobalto. Comparando-se a segunda geração de ligas de titânio (fase β) com as ligas $\alpha + \beta$ e titânio comercialmente puro, a ligas de fase β possuem um módulo de elasticidade reduzido e melhor

resistência à fadiga. Entretanto, a baixa resistência às solicitações por flexão das ligas $\alpha+\beta$ e a resistência ao desgaste comprometida das ligas de fase β tem dificultado suas aplicações como materiais para implantes em substituições artificiais de articulações (LANDUCI, 2016).

O trabalho fundamental para a utilização de titânio na implantologia dentária foi realizado por Brånemark, que inseriu o primeiro implante de titânio dental em 1965. O principal benefício das ligas de titânio e titânio como materiais para odontologia é devido à sua resistência à corrosão e biocompatibilidade na cavidade oral em comparação com outros materiais metálicos. É utilizado em implantes, próteses e ortodontia (LEYENS; PETERS 2003).

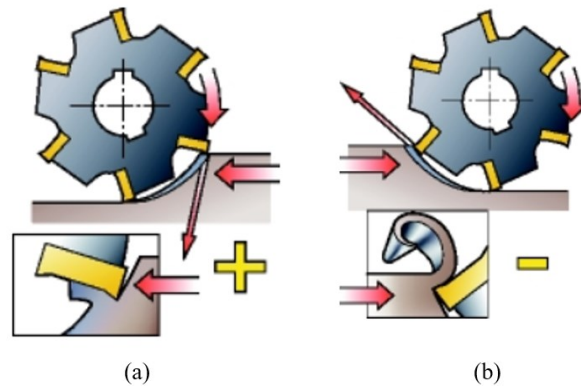
2.5 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem que possui ferramentas de corte com geometria definida e corte interrompido. A aresta de corte da fresa entra e sai da peça a cada rotação da ferramenta sujeitando a ferramenta a uma repetição de forças de impactos e cargas térmicas a cada rotação, necessitando de ferramentas com características adequadas e específicas para condição de corte (GUENZA, 2008). Dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais versátil na geração de superfícies planas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

O processo de fresamento pode ser classificado de várias formas. Na posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta tem-se o fresamento horizontal, vertical ou inclinado. Existem dois tipos básicos de fresamento, segundo a disposição dos dentes da fresa. Trata-se do fresamento cilíndrico tangencial e frontal. O fresamento tangencial é voltado para a obtenção de superfícies planas paralelas ao eixo de rotação da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

O fresamento tangencial pode ser classificado como concordante quando o sentido do movimento de avanço é o mesmo do sentido do movimento de rotação da fresa, conforme mostrado na Figura 2.31(a) e como discordante quando o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido de rotação da fresa, ilustrado pela Figura 2.31(b). As fresas são chamadas de cilíndricas ou tangenciais (SILVA, 2014).

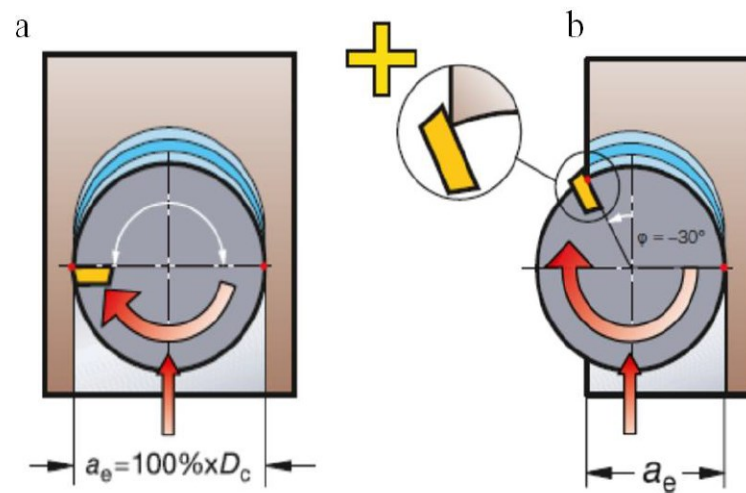
Figura 2.31 – Fresamentos concordante e discordante



Fonte: Sandvik Coromant (2018c).

A Figura 2.32(a) mostra o fresamento frontal e a Figura 2.32(b) mostra um fresamento assimétrico concordante.

Figura 2.32 – Fresamento frontal. (a) Simétrico comum. (b) Assimétrico concordante



Fonte: Silva (2014).

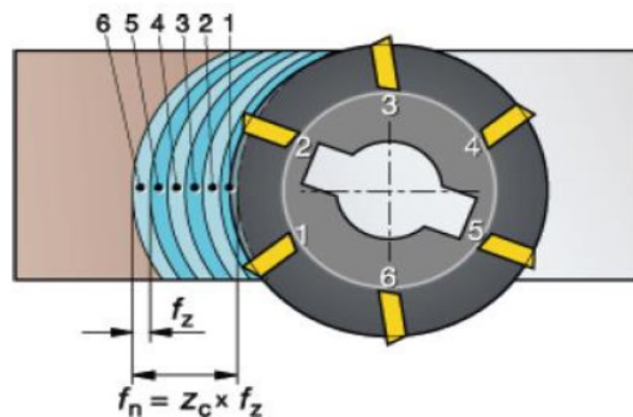
Algumas definições usadas para o processo de fresamento são comentadas. Saber como calcular a velocidade de corte, o avanço ou a taxa de remoção de forma correta possibilita bons resultados de qualquer operação de fresamento.

Para facilitar o entendimento as variáveis foram divididas em alíneas (SANDVIK COROMANT, 2018b):

- a) velocidade de corte (v_c): indica a velocidade de contato na qual a aresta usina a peça;

- b) velocidade de corte efetiva ou real (v_e): indica a velocidade de contato no diâmetro efetivo. Este valor é necessário para determinar os dados de corte reais na profundidade do corte efetiva (a_p). Este é um valor particularmente importante ao usar as fresas de pastilha redonda e todas as fresas com raios de canto maiores, bem como fresas com um ângulo de posição menor que 90 graus;
- c) velocidade de fuso (n): número de rotações que a ferramenta de fresamento realiza por minuto no fuso. Este é um valor é calculado a partir do valor de velocidade de corte recomendada para uma operação;
- d) avanço por dente (f_z): o valor de avanço por dente é calculado a partir da espessura máxima do cavaco recomendada. A Figura 2.33 ilustra esta variável;

Figura 2.33 – Fresamento ilustrando o avanço por dente



Fonte: Sandvik Coromant (2018b).

- e) avanço por rotação (f_n): indica a distância que a ferramenta se move durante uma rotação completa. É usado para cálculos de avanço e costuma determinar a capacidade de acabamento de uma fresa;
- f) velocidade de avanço (v_f): avanço da mesa, avanço da máquina ou velocidade de avanço. É o avanço da ferramenta em relação à peça em distância por unidade de tempo em relação ao avanço por dente e ao número de dentes na fresa;
- g) número de insertos (z_n): quantidade de insertos em um cabeçote de fresamento ou fresa.

O estudo das forças de usinagem permite otimizar parâmetros de corte permitindo custos menores com energia, melhor acabamento e maior vida de ferramenta. As forças de usinagem influem na qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada (RIBEIRO, 2021).

As forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. A força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante este processo é chamada de força de usinagem (F_u ; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

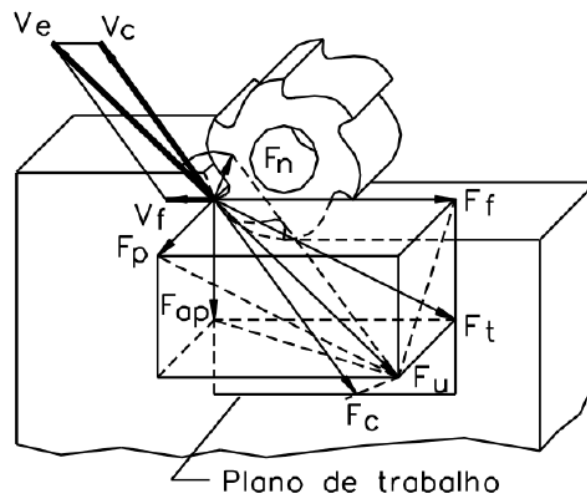
As componentes das forças atuantes no processo de usinagem podem ser classificadas em força ativa (F_t) e força passiva (F_p). A força ativa é a componente de F_u no plano de trabalho e a força passiva a componente de F_u na direção perpendicular ao plano de trabalho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Diniz; Marcondes e Coppini (2006) dizem que a força ativa (F_t) pode ser decomposta ainda nas seguintes componentes:

- a) F_f – Força de avanço, é a projeção de F_u sobre a direção de avanço;
- b) F_c – Força de corte, é a projeção de F_u sobre a direção de corte;
- c) F_{ap} – Força de apoio, é a projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

A Figura 2.34 mostra os vetores das forças de usinagem no fresamento.

Figura 2.34 – Forças de usinagem no fresamento



Fonte: Adaptado de FERRARESI (1977).

2.6 Desgaste e vida da ferramenta

Conforme Diniz (2015a) “a vida de uma ferramenta de corte pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida previamente estabelecido”. Este pode ser definido pelo grau de desgaste

estabelecido. O desgaste da ferramenta afeta a precisão do corte, a qualidade do acabamento superficial e aumenta as forças envolvidas no corte (OLIVEIRA, 2015b). A aresta da ferramenta se desgasta com maior facilidade na superfície de saída e no flanco, dependente da forma e da solitação térmica, mecânica e química da região. O motivo do desgaste está na combinação de altas temperaturas de usinagem e fortes carregamentos mecânicos (MACHADO et al.; 2015).

As medições são geralmente realizadas por meio de lupas, microscópios e não são tão simples devido às mudanças de tonalidades na área de contato da peça com a ferramenta.

No entanto, existem mecanismos específicos para a formação destes. Para entendê-los é importante ter algum conhecimento dos mecanismos de desgaste aos quais as ferramentas de corte estão sujeitas (SANDVIK COROMANT, 2018a). A Figura 2.35 ilustra tipos de desgaste ocorridos nas arestas de corte.

A letra (a) ilustra o desgaste de flanco, estudado neste trabalho. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) “é o tipo mais comum de desgaste e o tipo preferido, pois oferece uma vida da ferramenta previsível e estável. O desgaste de flanco ocorre devido à abrasão, causada por constituintes duros no material da peça”.

A letra (b) ilustra a craterização. É localizada na superfície de saída da pastilha. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) “ocorre devido à reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte e é aumentada pela velocidade de corte. A craterização excessiva enfraquece a aresta de corte e pode levar à quebra”.

A letra (c) mostra a aresta postiça de corte. Conforme a Sandvik Coromant (2018a) este tipo de desgaste é mais comum na usinagem de materiais pastosos, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio. Baixa velocidade de corte aumenta a formação de aresta postiça”.

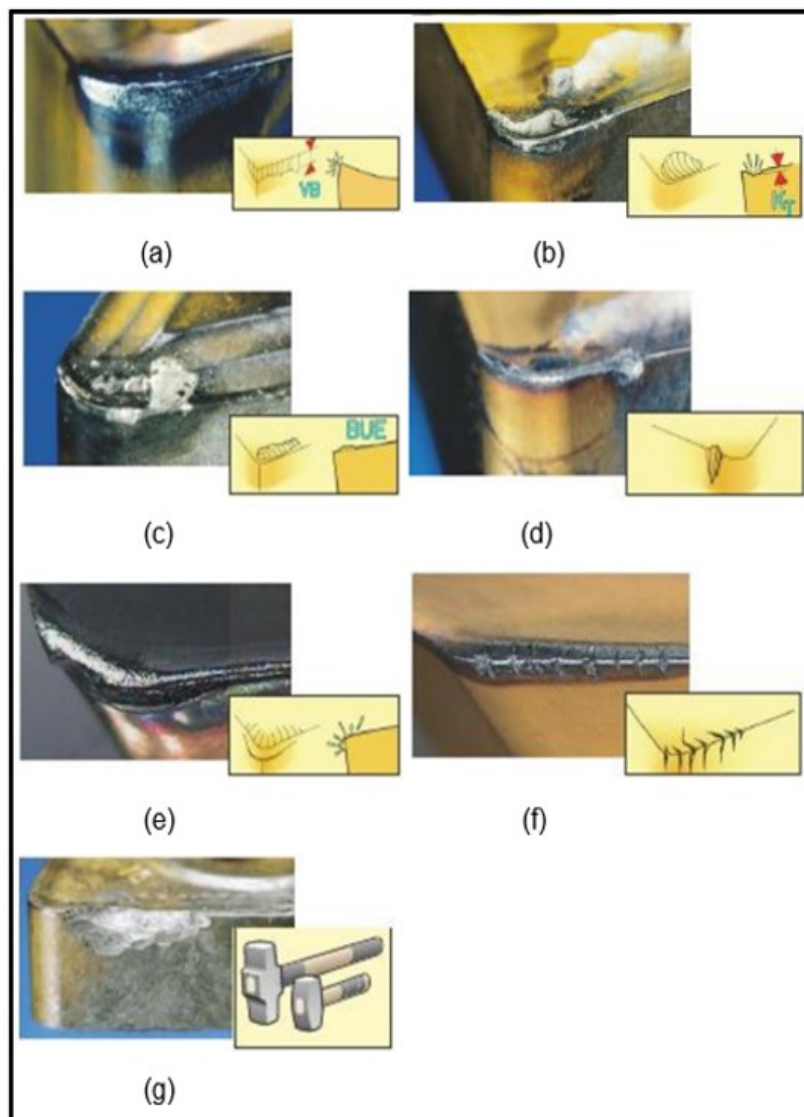
A letra (d) mostra o desgaste do tipo entalhe. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) “é o desgaste caracterizado por dano excessivo localizado na face de saída e no flanco da pastilha na linha da profundidade de corte. Causado pela oxidação.

A letra (e) mostra o desgaste por deformação plástica. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) “a deformação plástica ocorre quando o material da ferramenta é amolecido. Isto acontece quando a temperatura de corte está muito alta para uma determinada classe”.

A letra (f) ilustra a formação de trincas térmicas. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) “quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente, várias trincas podem surgir perpendiculares à aresta de corte. Trincas térmicas são relativas a cortes interrompidos, agravadas pelo uso de refrigerante”.

A letra (g) trata do lascamento ou quebra da aresta. Segundo a Sandvik Coromant (2018a) o lascamento ou a quebra ocorre quando há “sobrecarga das tensões de tração que podem ocorrer por martelamento de cavacos, uma profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de areia no material da peça, aresta postiça, vibração ou desgaste excessivo na pastilha”.

Figura 2.35 – Desgastes nas arestas de corte (a) desgaste de flanco. (b) craterização. (c) aresta postiça de corte. (d) desgaste tipo entalhe. (e) desgaste por deformação plástica. (f) Trinca térmica. (g) lascamento.



Fonte: Sandvik Coromant (2018a).

Nas ferramentas de metal duro com cobertura, segundo Diniz et. al. (2010) “o desgaste de flanco V_b cresce lentamente em virtude da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta até atingir valores na ordem de 0,3 a 0,4 mm, enquanto o desgaste de

cratera é muito pequeno ou inexistente”. Depois deste valor, o corte passa “a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que possui menor resistência ao desgaste fazendo V_b crescer mais rapidamente, atingindo valores da ordem de 0,8 a 1,0 mm em um tempo muito curto”.

O desgaste de flanco e o desgaste de ponta (ocorre na ponta da ferramenta) são observados na usinagem de Ti-6Al-4V com ferramentas de metal duro. A taxa de desgaste do flanco é geralmente menor do que as taxas de desgaste da ponta da ferramenta (SILVA, 2006).

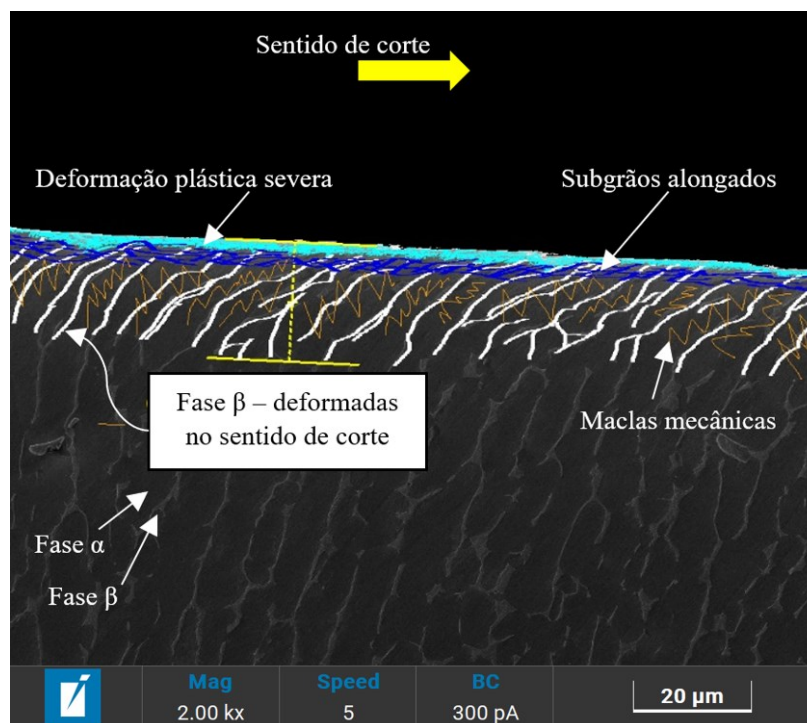
Os processos de adesão e difusão seguidos pelo processo de retirada do revestimento foram os principais mecanismos de desgaste na usinagem da liga Ti-6Al-4V. A análise da microestrutura confirmou a deformação intensa da superfície usinada e apresentou uma modificação de textura (NOUARI e MAKICH, 2013). Krishnamurthy et al. (2017) estudaram a quantidade de material aderido na superfície dos insertos de corte utilizados na usinagem da liga Ti-6Al-4V. Na usinagem criogênica, a quantidade de material foi menor que nos ensaios sem lubrificação. A usinagem com lubrificação convencional com fluidos de corte reduziu ainda mais a quantidade de material transferido para a face do flanco e ainda foi menor quando se utilizou a mistura de fluido de corte com etanol. O desgaste por abrasão ocorre de forma primária, suspeito de ocorrer na maioria dos casos antes que a falha plástica ocorra. O desgaste por abrasão em ferramentas revestidas resultou na retirada do revestimento destas. Assim, minimizar ou controlar o desgaste por abrasão pode reduzir outras formas de desgaste da ferramenta e aumentar a vida da ferramenta. Em outro estudo, Nouari e Hamid (2014) comentam que os mecanismos de adesão, difusão e retirada do revestimento da ferramenta são os principais modos de desgaste para a liga Ti-6Al-4V. Pimenov et al., 2021 comentam que a evaporação dos agentes MQL em alta temperatura causa a remoção do revestimento externo da ferramenta e que a usinagem a seco é útil para a promoção da sustentabilidade e fabricação limpa, pois tem impacto ambiental mínimo. Na estratégia MQL as partículas de óleo aderem na interface peça - ferramenta promovendo deslizamento, reduzindo o atrito e aumentando a vida da ferramenta. Na usinagem sem lubrificação o atrito é maior sendo o mecanismo de desgaste abrasivo dominante neste processo. O desgaste de cratera aparece na face de saída e é notório em altos níveis de tensão e temperatura, além da afinidade química entre os materiais (UCUN, ASLANTAS, BEDIR, 2015).

2.7 Acabamento Superficial

Durante a usinagem, uma modificação microestrutural de subsuperfície graduada é gerada na peça de trabalho. Aceves (2018) classificou as regiões de subsuperfície em 4 áreas.

A primeira área é tratada como SPD (Deformação plástica severa). Esta camada pertence a uma região instável ocasionada por amolecimento térmico e localização de tensões. A segunda corresponde à deformação plástica grosseira, influenciada pela ferramenta de corte, gerando uma estrutura desordenada, também correspondendo a uma área endurecida por deformação. A terceira região é a área de maclação mecânica, em que os grãos se subdividem e se reorientam e a quarta área é a microestrutura não distorcida. A Figura 2.36 mostra a definição das regiões. A visualização da deformação plástica severa é possível por meio do microscópio eletrônico de transmissão (ACEVES, 2018).

Figura 2.36 – Classificação de regiões de deformação plástica

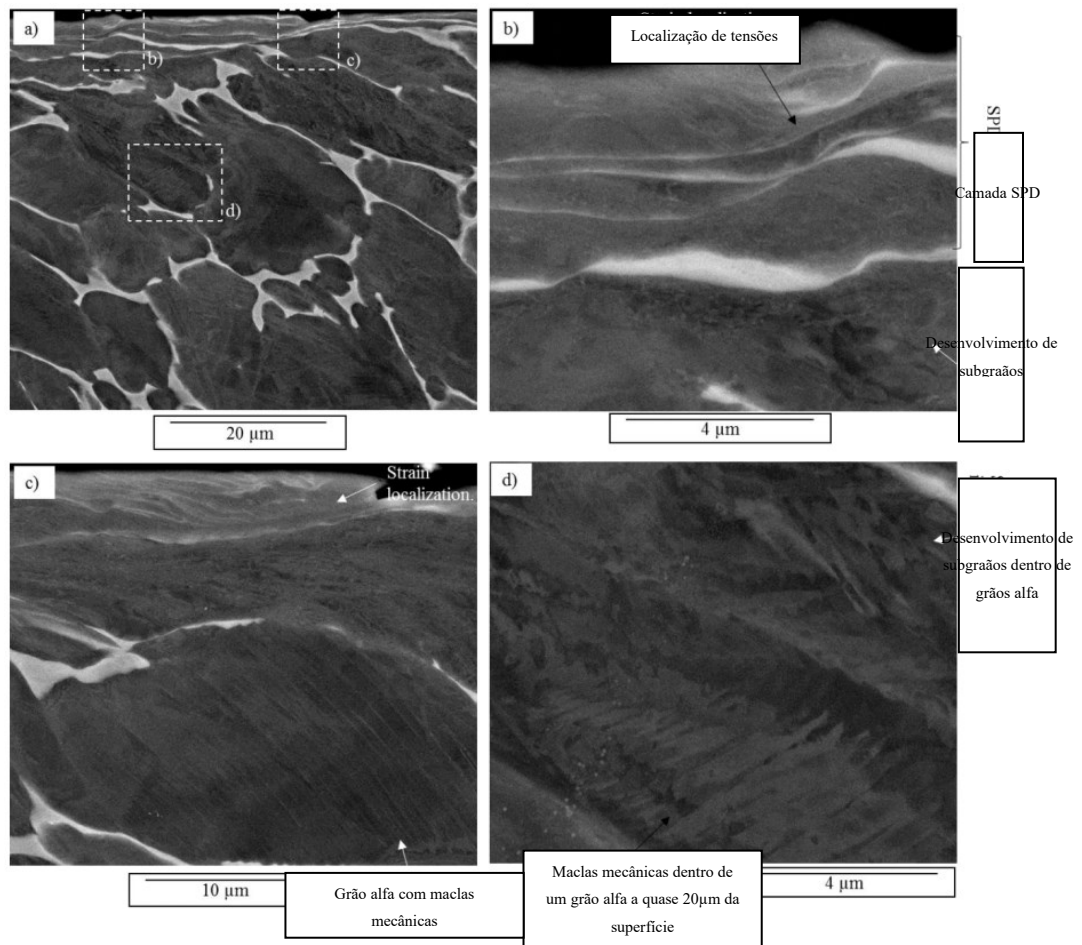


Fonte: Adaptado de MARSHALL, 2014. MEV - Ataque Kroll (10ml HF + 5ml HNO₃ + 100ml H₂O₂).

A Figura 2.37 mostra a deformação de superfície por microscopia de varredura BSE da liga Ti-6Al-4V recozido sob resfriamento criogênico com nitrogênio líquido (ACEVES, 2018).

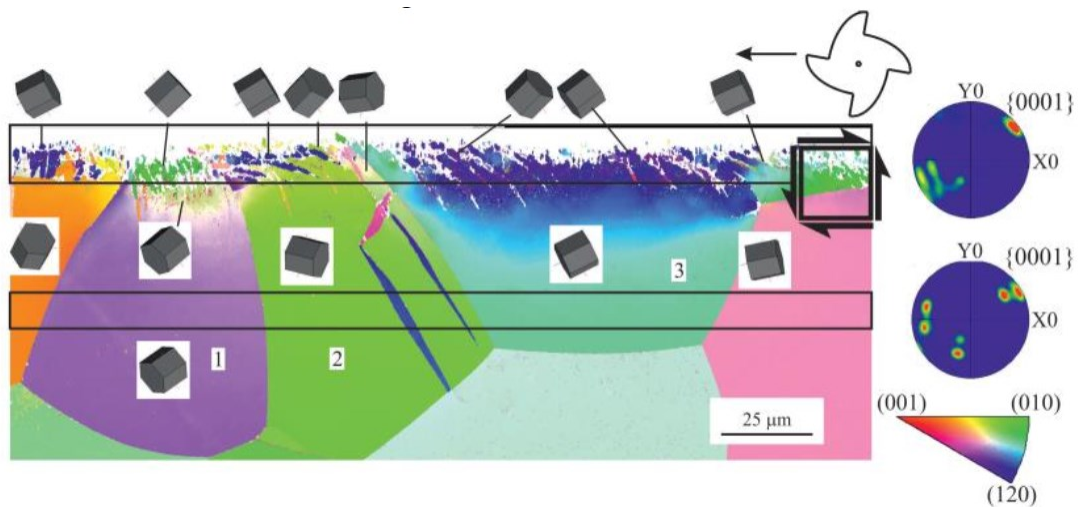
A rotação do reticulado cristalino no fresamento concordante da liga Ti-4% foi estudado. A rede cristalográfica próxima à superfície sofre uma reorientação. Na superfície superior, maclas aparecem na direção do corte da ferramenta. Isso compõe a formação de uma região endurecida por deformação e a introdução de defeitos cristalinos na rede. O nível da reorientação das maclas mecânicas é muito maior do que a reorientação da matriz. A Figura 2.38 ilustra a rotação da rede no fresamento da liga Ti-4%.

Figura 2.37 – Detalhamento da camada de deformação plástica severa e visualização de maclas mecânicas nos grãos. Deformação de subsuperfície em Ti-6Al-4V recozido fresado sob resfriamento criogênico com LN₂.



Fonte: Adaptado de ACEVES (2018).

Figura 2.38 – Rotação do reticulado cristalino no fresamento de T1-4%



Fonte: MARSHALL, 2014 Apud ACEVES, 2018.

A deformação plástica em temperaturas mais baixas gera uma maior densidade de discordâncias, o que fornece mais material para a formação de novos grãos de alto ângulo. Este pode ser o motivo para a geração de uma camada SPD na camada superior. O uso de um raio de aresta de ferramenta de corte menor gerou uma camada SPD menor. Isso pode ser porque a deformação se concentra em uma região menor em comparação com um raio de aresta de ferramenta maior (ACEVES, 2019).

2.8 Análise CFD

O escoamento multifásico é comum em muitos processos industriais, sobretudo na indústria de petróleo e gás. Devido à sua complexidade, o desenvolvimento de ferramentas de análise confiável é difícil e a dinâmica de fluidos computacional vem se tornando uma importante ferramenta de investigação. As equações nas quais os escoamentos multifásicos são modelados matematicamente estão fundamentadas nas leis de equação de massa, da quantidade de movimento e da energia (ÁVILA, 2016).

Em escoamentos multifásicos a equação da conservação de massa, para uma dada fase k é dada pela equação 1.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_k \rho_k) + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k) = \sum \dot{m}_k \quad (1)$$

onde ε_k , ρ_k e \vec{V}_k são respectivamente a fração volumétrica, a densidade e a velocidade referentes à fase k . O operador ∇ (nabla) representa a derivada parcial de quantidade para todas as direções no sistema de coordenadas escolhido. Em coordenadas cartesianas, ∇ é definido pela equação 2 (ANSYS, 2013).

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (2)$$

A equação da conservação da quantidade de movimento é definida para escoamento multifásico pela Equação 3. \vec{R}_{jk} é a interação entre as fases j com a fase k . A parcela \dot{m}_{jk} é a transferência de massa entre as n fases j com a fase k . \vec{V}_{jk} é a velocidade interfacial entre cada fase j com a fase k e assume o valor da velocidade da fase a partir da qual a massa está sendo transferida. \vec{F}_k , \vec{F}_{sustk} e $\vec{F}_{mv,k}$ são as forças externas de campo, a força de sustentação e a força de massa virtual. τ_k é o tensor das tensões cisalhantes para a fase k . A interação entre as fases

dada por \vec{R}_{jk} é dada pela equação 4, onde C_{jk} é um coeficiente de troca de quantidade de movimento na interface entre as fases j e k (velocidade relativa entre estas). Os modelos inseridos no software ANSYS-CFX podem ser classificados em não homogêneos e homogêneos. O primeiro refere-se como exemplo aos modelos de partículas e de mistura. Os modelos homogêneos referem-se aos casos líquido-líquido de fases imiscíveis (ÁVILA, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k) + \nabla * (\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k \vec{V}_k) = -\varepsilon_k \nabla_p + \varepsilon_k \nabla * \tau_k + \varepsilon_k \rho_k \vec{g}_k + \sum_{j=1}^n (\vec{R}_{jk} + \dot{m}_{jk} \vec{V}_{jk}) + \varepsilon_k \rho_k (\vec{F}_k + \vec{F}_{sustk} + \vec{F}_{mv,k}) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n (\vec{R}_{jk}) = \sum_{j=1}^n (C_{jk} (\vec{V}_j - \vec{V}_k)) \quad (4)$$

No software as fases são tratadas separadamente e um conjunto de equações de conservação é resolvido para cada fase. As equações para um modelo de mais de um fluido com k fases contínuas são 5, 6 e 7 (ÁVILA, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_k \rho_k) + \nabla * (\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k) + \nabla * (\varepsilon_k \rho_k \vec{V}_k \vec{V}_k) = -\varepsilon_k \nabla_p + \varepsilon_k \nabla * \tau_k + \varepsilon_k \rho_k \vec{g}_k + \vec{S}_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + \nabla * (\varepsilon_k \vec{V}_k) = 0 \quad (7)$$

A área interfacial $A_{\alpha\beta}$ entre as fases α e β é calculada por 8.

$$A_{\alpha\beta} = \frac{\varepsilon_\alpha \varepsilon_\beta}{d_{\alpha\beta}} \quad (8)$$

onde ε_α e ε_β são frações volumétricas das respectivas fases e $d_{\alpha\beta}$ a escala do comprimento interfacial que deve ser especificada.

Na abordagem Euleriana (Euler-Euler) as fases são consideradas como fases contínuas, possuem propriedades diferentes na mesma posição espaço-tempo e cada fase dispersa é caracterizada por um único diâmetro (IESSS, 2019). No modelo de trajetória (abordagem Lagrangeana Euler-Lagrange) as fases interagem entre si com a fase contínua por meio de forças de interação, como o arrasto, não levando em consideração efeitos de colisão e cada trajetória é calculada de forma isolada. Nesta abordagem é necessária uma grande quantidade de pontos de injeção de partículas para a representatividade do padrão de escoamento (IESSS, 2019).

Na abordagem Euler-Euler, no modelo *Volume of Fluid* (VOF) as fases não são Interpenetrantes e são tratadas como fases contínuas. Neste modelo as equações de transporte são resolvidas para as propriedades da mistura, sem velocidade de deslizamento. Neste aspecto, todas as variáveis de campo são compartilhadas entre as fases. Este método utiliza uma função indicadora de fase que varia de zero a um para controle da interface entre duas ou mais fases, tendo as propriedades de fração volumétrica. As equações de conservação de massa e de momento e a indicação de fase para o modelo estão representadas pelas equações 9, 10 e 11 (ÁVILA, 2016). O modelo VOF pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis e rastrear a fração volumétrica de cada um dos fluidos em todo o domínio. As aplicações típicas incluem a previsão da ruptura de jato, o movimento de grandes bolhas em um líquido, o movimento do líquido após uma quebra de barragem e o rastreamento estável ou transiente de qualquer interface líquido-gás. Uma única equação do momento é resolvida em todo o domínio e o campo de velocidade resultante é compartilhado entre as fases. A equação do momento é dependente das frações volumétricas de todas as fases (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla^* (\rho_m \vec{V}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{V}) + \nabla^* (\rho_m \vec{V} \vec{V}) = - \nabla_p + \nabla^* \tau + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla^* (\varepsilon \vec{V}) = 0 \quad (11)$$

sendo $\rho_m = \sum \varepsilon_k \rho_k$ a densidade da mistura para cada volume de controle. A equação de energia compartilhada entre as fases é mostrada na equação 12 (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (12)$$

onde E é dada pela equação 13.

$$E = \frac{\sum_q^n = 1^{\alpha_q} \rho_q E_q}{\sum_q^n = 1^{\alpha_q} \rho_q} \quad (13)$$

onde E_q para cada fase é baseada no calor específico desta fase e na temperatura compartilhada. As propriedades ρ e k_{eff} (condutividade térmica efetiva) são compartilhadas pelas fases. O termo S_h contém contribuições de radiação e quaisquer outras fontes de calor.

No modelo k- ε de turbulência k refere-se à energia cinética turbulenta (variação das flutuações na velocidade) e ε é a taxa na qual as flutuações de velocidade são dissipadas. As equações da conservação de massa e de quantidade de movimento são dadas por 14 e 15. S_M corresponde a somatória de forças no corpo e a pressão modificada p' é calculada conforme Equação 16. A viscosidade turbulenta μ_t é mostrada na equação 17. A viscosidade efetiva μ_{eff} está ilustrada na equação 18. C_μ é uma constante a ser atribuída. Os valores da energia cinética turbulenta k e da dissipação turbulenta ε estão exemplificadas nas equações diferenciais de transporte 19 e 20 (ÁVILA, 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho V_j) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho V_i V_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (15)$$

onde,

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \quad (16)$$

$$\mu_t = C_{\mu\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho V_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho V_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (20)$$

onde σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ constantes pré-estabelecidas na literatura e definidas no software com os valores respectivos de 1,0; 1,31; 1,44 e 1,92. P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ representam as forças de flutuação e P_k representa a produção de turbulência em razão das forças viscosas (Equação 21) (ÁVILA, 2016).

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_k}{\partial k} \left(3\mu_t \frac{\partial V_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (21)$$

2.9 Redes neurais artificiais

Demonstrado pelo crescente número de artigos publicados na última década, muitos pesquisadores da área de manufatura exploram formas de aplicação de redes neurais artificiais para controlar ou realizar uma previsão com qualidade crítica de produtos e para otimizar processos de produção (PONTES et. al, 2016). Neste aspecto, muitos autores utilizam técnicas de *Design of Experiments* (DOE) para implementar e otimizar parâmetros de *Artificial Neural Networks* (ANNs). Kumar; Chandna e Pal (2018) comentam que é preciso uma eficiente metodologia para obter valores ótimos para vários parâmetros de redes neurais artificiais. Em seu trabalho os autores usaram o método de Gray-Taguchi para determinar o valor ótimo de vários parâmetros de entrada do modelo ANN, treinados por diferentes algoritmos em uma modelagem de processo de fresamento 2.5D. Os resultados demonstraram que a combinação com RNA apresentou melhor desempenho. Na busca por melhores valores de predições, alguns trabalhos comparam metodologias estatísticas e ANNs. Morales Tamayo et. al (2018) estudaram a predição da rugosidade do torneamento a seco do aço AISI316L por meio da comparação entre ANNs e Método de Regressão Múltipla (*Multiple Regression Methods*). Os resultados encontrados pelos métodos indicam uma melhor precisão das redes neurais artificiais. Um trabalho envolvendo a previsão de rugosidade de superfície em torneamento de latão foi desenvolvido utilizando uma comparação entre um planejamento fatorial completo e RNA. A constatação foi que, baseando-se no erro percentual da ANN e do modelo de regressão,

a rede neural artificial foi considerada mais precisa do que o modelo de regressão (HANIEF e WANI, 2016). Hanief e Wani (2017) desenvolveram um modelo para investigar os efeitos dos parâmetros de corte no torneamento de C23000. Redes neurais artificiais e modelos de regressão múltipla foram utilizados para a modelagem das forças de corte baseando-se nos parâmetros de corte, utilizando a análise de variância. Conclui-se que o modelo ANN foi mais preciso do que o modelo de regressão. Outro trabalho comparou a regressão matemática com ANN com o intuito de predição do desgaste da ferramenta no fresamento do aço AISI 304. O planejamento contempla quatro fatores em cinco níveis como planejamento experimental. Segundo os autores, o modelo de rede neural artificial foi capaz de melhores previsões de desgaste da ferramenta (KALIDASS, PALANISAMY e MUTHUKUMARAN, 2012). A predição do desgaste de ferramenta por redes neurais artificiais no fresamento do Alumínio 7075 foi proposta por Khorasani,; Yazdi,; Safizadeh (2011). Os autores subdividiram a pesquisa utilizando o modelo Taguchi e ANNs. Verificou-se que a predição por RNA se correlaciona muito bem com os resultados experimentais. Em um trabalho de torneamento, o DOE foi empregado para selecionar níveis de fatores que beneficiam habilidades de previsão de rede, concluindo que a metodologia DOE constitui uma melhor abordagem para o projeto de redes RBF para previsão de rugosidade do que a maioria abordagem comum de tentativa e erro. No entanto, uma desvantagem frequentemente citada das ANNs é a falta de uma forma sistemática para o projeto de redes de alto desempenho (PONTES et al., 2010a). O trabalho de Sahoo; Rout e Das (2015) trata do desenvolvimento de previsão utilizando superfícies de resposta e ANNs da usinagem do aço AISI1040. Segundo os autores, ambas abordagens predizem a rugosidade da superfície com precisão.

Pontes et. al (2010b) fizeram uma revisão de várias publicações que tratam de modelagem e rugosidade por ANNs em processos de usinagem. A revisão mostrou que a maior parte do trabalho era a predição de rugosidade média (R_a) e que pouca atenção era dada a eficiência do treinamento. Os pesquisadores apontam como principal problema na modelagem da rugosidade a definição da topologia da rede ideal. Os esforços de otimização são detectados em um pequeno número de publicações e que comparações entre abordagens de definição de topologia podem não ser encontradas. Além disso, com relação à validação, a maioria das publicações negligenciam ou deixam pouco clara esta capacidade. A utilização do terceiro conjunto de dados para a validação pode ser encontrada em apenas alguns estudos. A utilização de avaliação estatística para comparar redes treinadas pode ser encontrado em apenas um quinto das obras revisadas e há também falta de avaliação estatística nas comparações entre modelos baseados em ANN e modelos obtidos por outros métodos. Segundo os autores, a precisão dos

modelos de ANNs são pontos que requerem mais atenção e muitos trabalhos são apresentados somente por formas gráficas, faltando informações para a reprodução dos resultados. Não existe um procedimento padrão para a escolha de configurações de ANN mais adequadas sendo uma tarefa muito difícil que depende de muitas variáveis. O método de tentativa e erro é o procedimento mais comumente usado para identificar as melhores configurações (KECHAGIAS, 2018). Com base na literatura revisada, algumas áreas de melhoria são sugeridas como a não necessidade de transformar ou alterar dados que revelam movimento periódico não regular e a determinação de entradas do modelo apropriadas e a escolha da geometria da rede. Além disso, os trabalhos podem se concentrar nas características da rede na fase de especificação, com a realização de testes para a determinação do erro e necessidade de validação do modelo para a otimização de desempenho (KARKALOS; GALANIS e MARKOPOULOS, 2016).

O tipo de ANN mais utilizado é do tipo *feedforward*, com camadas de entrada, ocultas e de saída. Os dados da rede são introduzidos pela camada de entrada e cada neurônio desta camada relaciona-se com cada variável de entrada. As camadas ocultas transmitem os dados da entrada para a saída simulando com precisão a função do sistema original. A camada de saída está relacionada aos resultados da rede, baseando-se nos erros dos resultados previstos e os valores dos pesos das conexões entre os neurônios. A função de cada neurônio contém sinapses, função de soma e função de transferência. Por meio de conexões os neurônios se comunicam, multiplicando o valor de entrada com os coeficientes de peso. Estes sinais são transformados por uma função de ativação, gerando o resultado da saída da rede (KARKALOS; GALANIS; MARKOPOULOS, 2016). A arquitetura MLP utilizada neste trabalho possui característica *feedforward* com sequência unidirecional entre as camadas. Os neurônios possuem funções de ativação que utilizam os sinais de entrada da camada anterior em uma função matemática e a escolha da função de ativação influencia o comportamento da rede neural.

2.10 Internet das coisas

Em tecnologia da informação (TI), a IoT é a conexão de duas palavras, ou seja, “Internet” e “coisas”. A Internet é definida como a rede das redes. Um sistema mundial, que atende usuários em todo o mundo com computadores interconectados nas redes usando o protocolo padrão da Internet (TCP/IP). Como individualmente distinguíveis pelo mundo real, as "coisas" podem ser qualquer coisa como um objeto ou uma pessoa. Hoje, a IoT é amplamente usada, por exemplo, em transporte, assistência médica ou serviços públicos. Coisa-Coisa, coisa

a humano e humano a humano formam uma rede dentro da IoT, conectado à Internet. Objetos identificáveis individualmente trocam informações dentro desta rede.

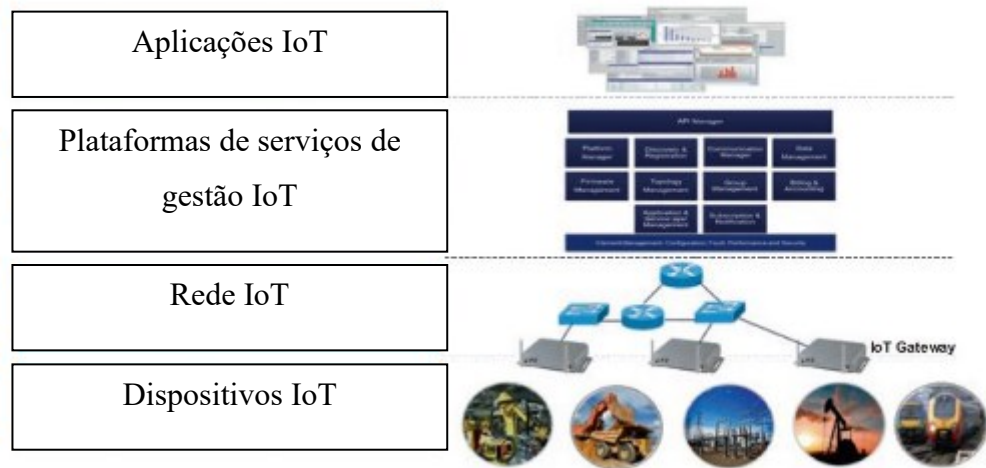
A IoT aumentou com o avanço dos dispositivos móveis. A IoT pode ser definida como a rede de coisas, com identificação de elemento claro, integrado com inteligência de software, sensores e conectividade onipresente com a Internet. A IoT é capacitada por quatro principais elementos: sensores para coletar informações, identificadores para identificar a fonte de dados, software para analisar os dados e conectividade com a Internet para se comunicar e permitir notificações. Os sensores podem ser físicos (por exemplo, sensores que capturam a temperatura) ou lógico (por exemplo, medições de software incorporado, como utilização de CPU). A IoT tem por objetivo criar um ambiente melhor para a humanidade, onde os objetos ao nosso redor sabem o que os indivíduos gostam, querem e o que precisam e age de acordo sem instruções explícitas. Uma definição simples de IoT descrita por Sezer et al. (2016) é: “A IoT permite que pessoas e coisas sejam conectadas a qualquer hora, em qualquer lugar, com qualquer coisa e qualquer pessoa, idealmente usando qualquer caminho/rede e qualquer serviço”. Em outras palavras, Bortolini et al. (2017) definiram a IoT como onipresente presença para um propósito comum de várias coisas ou objetos interagindo e cooperando entre si, digitalizando todos os aspectos físicos dos sistemas. Para diferentes objetivos, as informações digitalizadas podem ser usadas para ajustar padrões de produção, com o uso de uma cópia virtual do mundo físico e usando dados de sensores. Todo sistema de produção como máquinas e recursos relacionados podem ser as "Coisas" gerenciadas e virtualizadas pela indústria. A natureza da IoT é descentralizada e heterogênea. Em relação à arquitetura de design da IoT, Trappey et al. (2017) estabeleceu uma estrutura lógica por camadas para classificar a tecnologia IoT para caracterizar e identificar o Sistema Cyber Físico (CPS). De acordo com vários autores, a arquitetura da Internet das Coisas mais comum é atribuída por camadas típicas, incluindo quatro camadas principais, como representado da seguinte maneira:

- a) *Sensing Layer*: para detectar o status de “coisas” com uma única identidade e integrar, por exemplo, atuadores, sensores, etiquetas RFID como vários tipos de "coisas";
- b) *Network Layer*: para suportar as informações transferidas através de rede com ou sem fio para a "Camada de serviço", sendo a infraestrutura do suporte. A camada determina e mapeia "coisas" automaticamente na rede que permite conectar todas as "coisas" para compartilhar e trocar dados;
- c) *Services Layer*: utiliza uma tecnologia de *middleware* compatível com serviços e aplicativos, exigidos pelos usuários ou formulários. A interoperabilidade entre os

dispositivos é garantida por essa camada, executando serviços úteis, como por exemplo, mecanismos de busca de informações e comunicação, dados armazenamento, troca e gerenciamento de dados, bem como o banco de dados;

- d) Camada de Interface: para fazer a interconexão e gerenciamento das "coisas" mais fáceis de se exibir informações que permitem uma interação clara e compreensível do usuário com o sistema. Na Figura 2.39 tem-se a representação dos níveis presentes num sistema IoT.

Figura 2.39 - Representação dos níveis presentes num sistema IoT



Fonte: Rayes e Salam (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é tratado sobre os métodos empregados e materiais utilizados para o desenvolvimento, fabricação e uso dos dispositivos de lubrificação, para os ensaios de fresamento, análise dos desgastes dos insertos de corte, modelagem e simulações fluidodinâmicas.

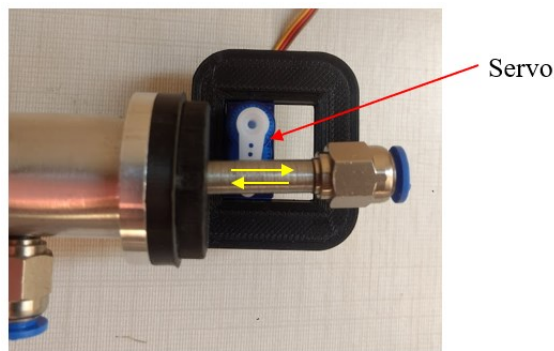
3.1 Teste do protótipo de aplicação de fluidos MQL

A Figura 3.1(a) mostra o protótipo montado. O corpo de alumínio foi torneado e as tampas prototipadas com ABS. A agulha (êmbolo) foi confeccionada em aço ABNT 1045. Os conectores possuem saídas com diâmetro de 6mm. Um servo foi montado na parte superior da agulha com o intuito de tornar o movimento de abertura e fechamento da agulha intermitente. A Figura 3.1(b) ilustra a montagem e funcionamento.

Figura 3.1 - Válvula montada com conectores das mangueiras



(a)



(b)

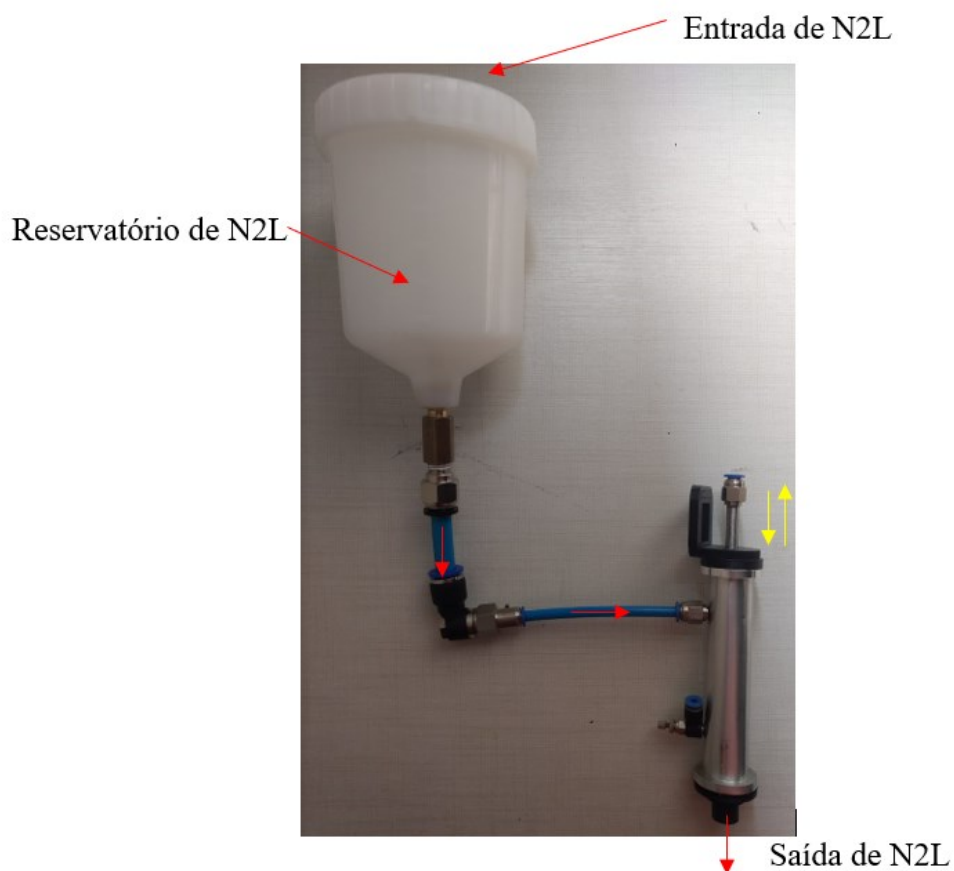
Fonte: Dados do autor.

3.1.1 Montagem dos circuitos hidráulicos e pneumáticos

Como o reservatório do dispositivo possui duas vias de entrada, foram montados dois circuitos: um voltado para a lubrificação utilizando nitrogênio líquido e outro para a abordagem MQL.

Uma mostra do protótipo do circuito montado para LN₂ é ilustrado na Figura 3.2. A alimentação neste caso é feita por gravidade.

Figura 3.2 - Protótipo do circuito hidráulico (nitrogênio líquido). Reservatório sob pressão atmosférica.



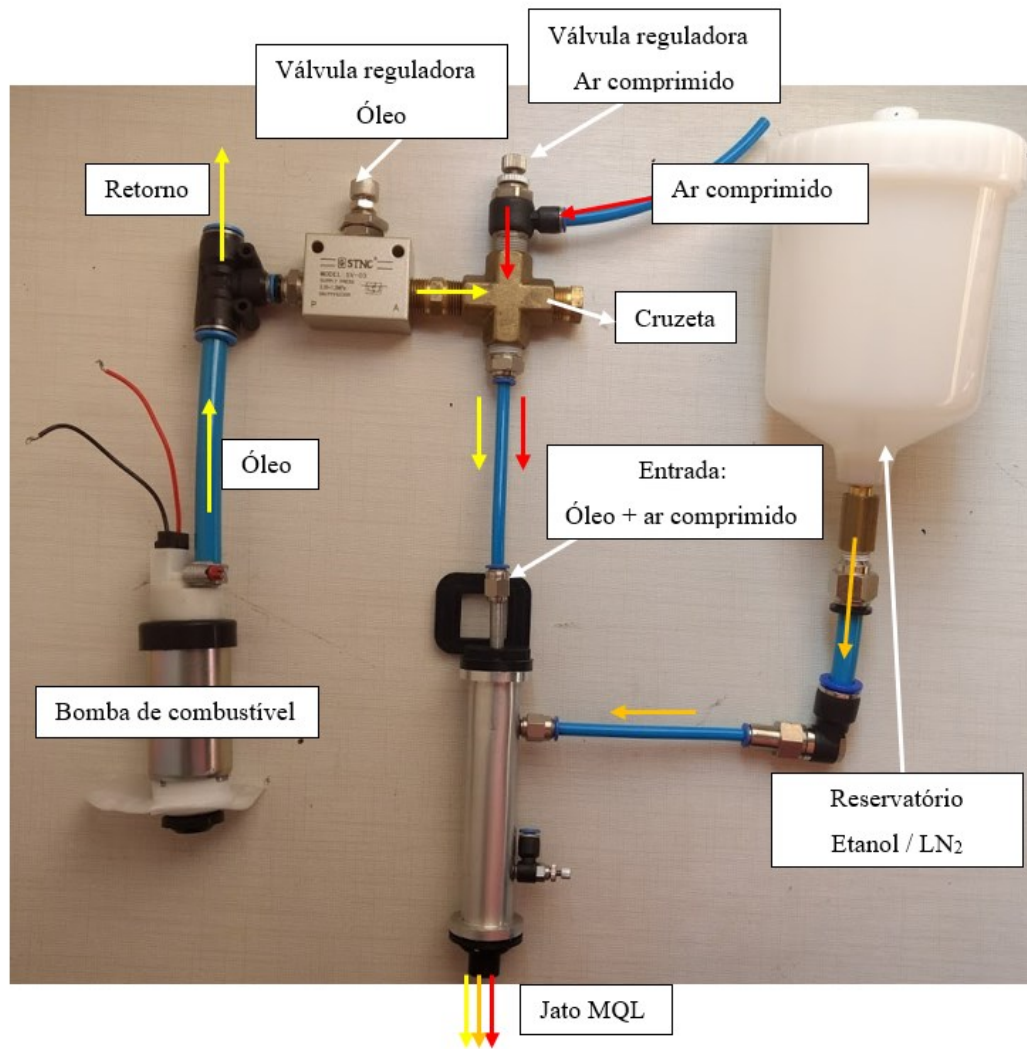
Fonte: Dados do autor.

O circuito desenvolvido para a mistura óleo + ar é mostrado na Figura 3.3.

A Figura 3.3(a) mostra o circuito hidráulico montado com a abordagem MQL. A Figura 3.3(b) mostra o teste real executado. O fluido foi bombeado por uma bomba automotiva elétrica Magneti Marelli MAM00103, com pressão de trabalho de 6 bar e vazão de 110 l/h conectada a um reservatório de 20 litros e com um circuito de retorno do óleo. A regulação da vazão foi realizada por uma válvula de controle manual resultando em 464,17 mL/h. A pressão de ar

comprimido foi mantida em 6 bar. Uma válvula de retenção tornou-se necessária para evitar refluxo.

Figura 3.3 – Circuito hidráulico e pneumático (abordagem MQL)



(a)



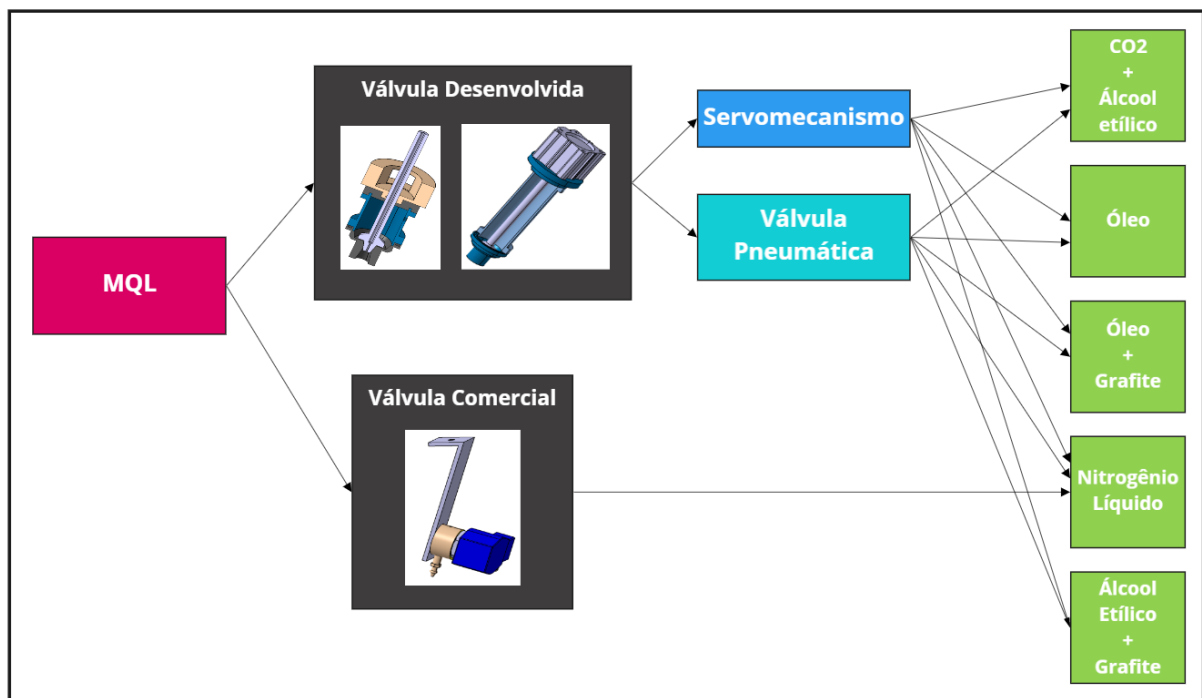
(b)

Fonte: Dados do autor.

3.2 Projeto e utilização dos dispositivos de mistura para aplicação de fluidos de corte

O projeto foi dividido em duas vertentes: a primeira aplicação utiliza uma válvula solenoide comercial aliada a um circuito eletrônico desenvolvido de controle de abertura e fechamento. A segunda opção trata de um projeto de um mecanismo controlado por um atuador pneumático ou servo mecânico utilizando também um sistema eletrônico. A Figura 3.4 apresenta uma visão geral das possibilidades de abordagens.

Figura 3.4 – Abordagens possíveis



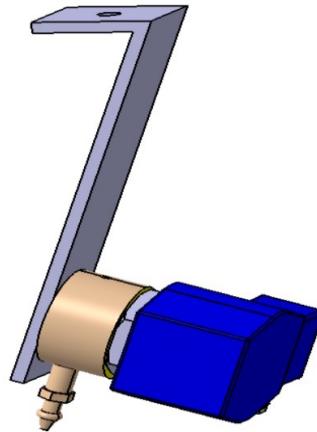
Fonte: Dados do autor.

O dispositivo projetado tem disponibilidade de realizar a lubrificação na ferramenta de corte por duas entradas (vias) ou pela junção destas. O envase pode ser feito por gravidade ou por bombeamento. A opção por ciclos é realizada pela abertura e fechamento do sistema de lubrificação. A utilização deste procedimento evita o congelamento do bocal de fornecimento de nitrogênio líquido quando utilizado. O funcionamento do aparato realizando uma mistura dos fluidos como óleo / ar / lubrificante sólido / Álcool Etílico baseia-se na proposta MQL. Uma agulha vazada (êmbolo) atende a este propósito.

Os detalhes das peças podem ser vistos no Apêndice A. Na Figura 3.5 visualiza-se a implementação com a válvula solenoide industrial. Na Figura 3.6 está ilustrada a implementação utilizando um servomotor e na Figura 3.7 ilustra-se a montagem utilizando um

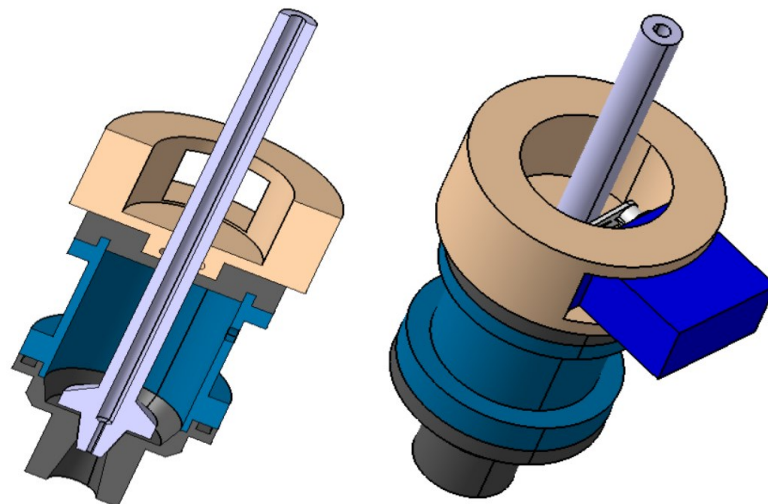
cilindro pneumático. A simulação pneumática é uma variação da montagem utilizando o servo mecanismo. Observa-se que o controle dos dispositivos é realizado por um circuito eletrônico. Na concepção utilizando a abordagem com servomotor e na abordagem utilizando o atuador pneumático, pela agulha central pode ocorrer a mistura dos fluidos, se desejável. No aparato desenvolvido o nitrogênio líquido entra no reservatório do dispositivo por uma entrada lateral.

Figura 3.5 – Montagem do dispositivo utilizando válvula solenoide



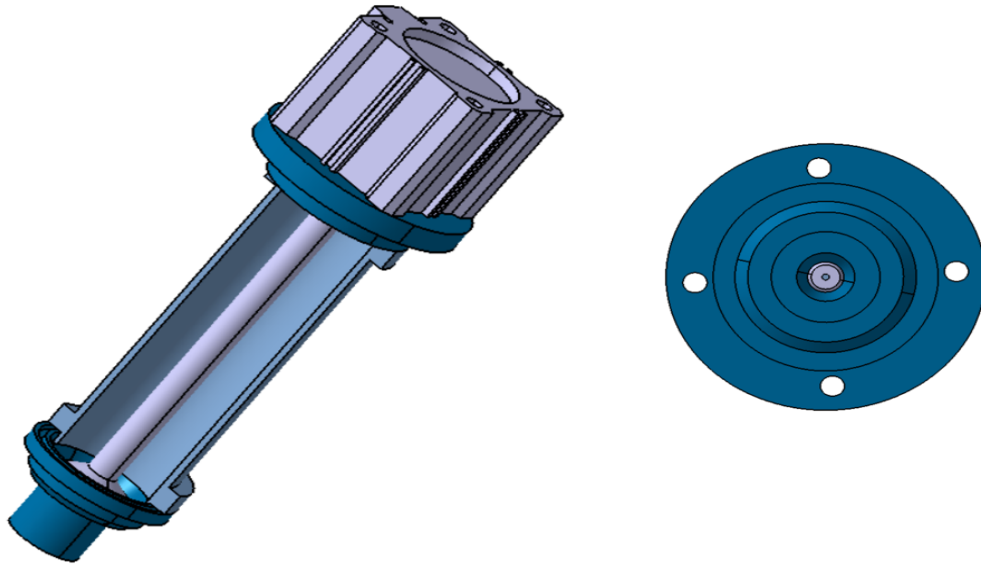
Fonte: Dados do autor.

Figura 3.6 – Montagem em corte do dispositivo utilizando servomotor



Fonte: Dados do autor.

Figura 3.7 – Montagem em corte do dispositivo utilizando atuador pneumático



Fonte: Dados do autor.

Para a simulação pneumática executou-se primeiramente uma simulação no software FluidSIM 5. Para sua aplicação estipulou-se a utilização de uma alimentação de 6 bar, uma válvula pneumática 5/2 vias com atuador solenoide e retorno por mola e um cilindro hidráulico compacto da empresa Miapro. A Figura 3.8 mostra o circuito montado para a utilização do ar comprimido para atuar na abertura e fechamento da válvula. A Figura 3.9(a) e 3.9(b) mostram a simulação do cilindro executando a função do atuador da válvula.

Figura 3.8 – Circuito pneumático. (a) Acionamento do solenoide. (b) Retorno do cilindro pela mola

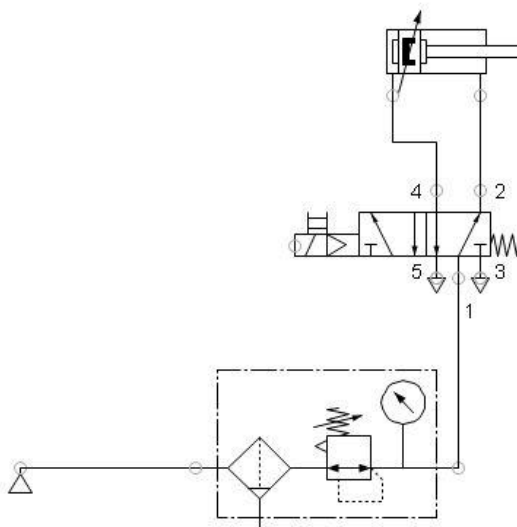
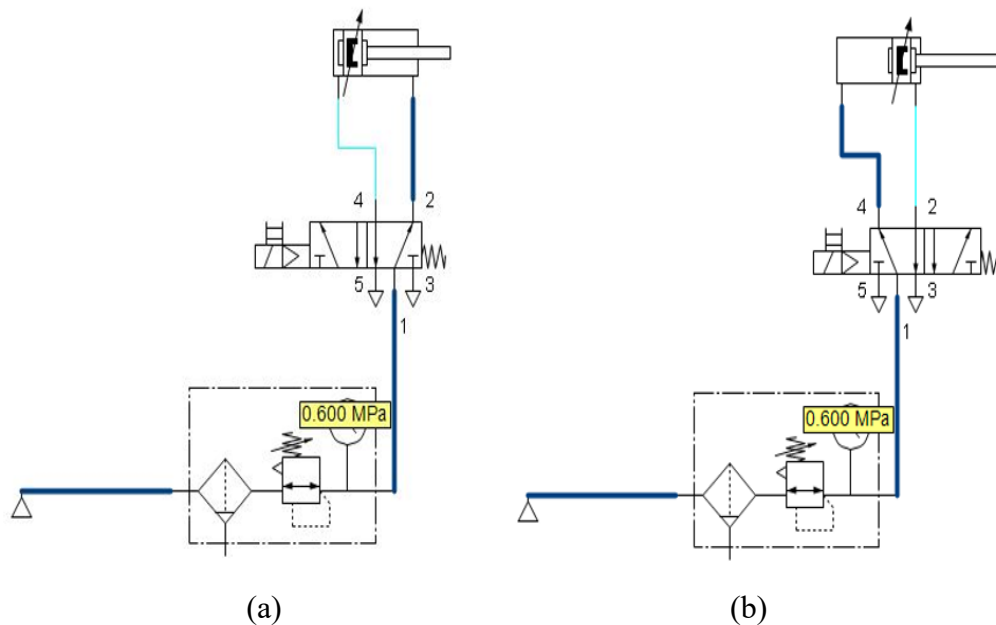


Figura 3.9 – Circuito pneumático. (a) Acionamento do solenoide. (b) Retorno do cilindro pela mola.



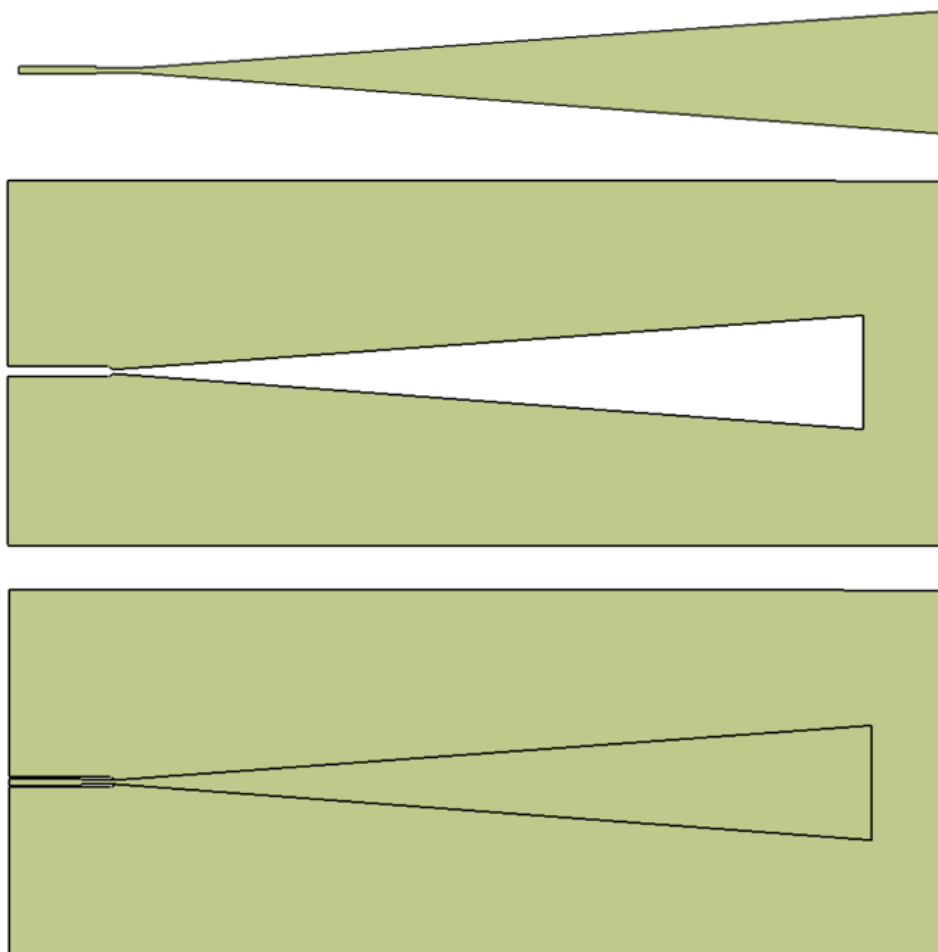
Fonte: Dados do autor.

3.3 Simulações CFD

Objetivou-se a criação e aplicação de simulações CFD multifásicas das condições de lubrificação utilizadas na usinagem da liga em estudo utilizando como parâmetros as dimensões do dispositivo projetado. As simulações CFD foram feitas por meio do software ANSYS R3 19 e R20 versão acadêmica, utilizando o *workbench CFX e FLUENT*:

- a) simulação 1 - tempo de esvaziamento para a abertura de 100% do sistema utilizando o circuito do nitrogênio líquido e verificação do comportamento do fluido relacionado à temperatura na saída do bocal;
- b) simulação 2 - análise CFD para o jato MQL. O fluxo de óleo foi simulado. Nesta análise utilizou-se o software Ansys R3 2019 versão acadêmica com o módulo Fluent. A modelagem CAD foi realizada no software CATIA V5 R20. Trabalhou-se com o modelo “Viscous” (Standard k-e, Scalable Wall Fn). As velocidades foram medidas com o *probe* do software Ansys R3 2019. A Figura 3.10 ilustra a concepção do domínio para a criação da malha e simulação;

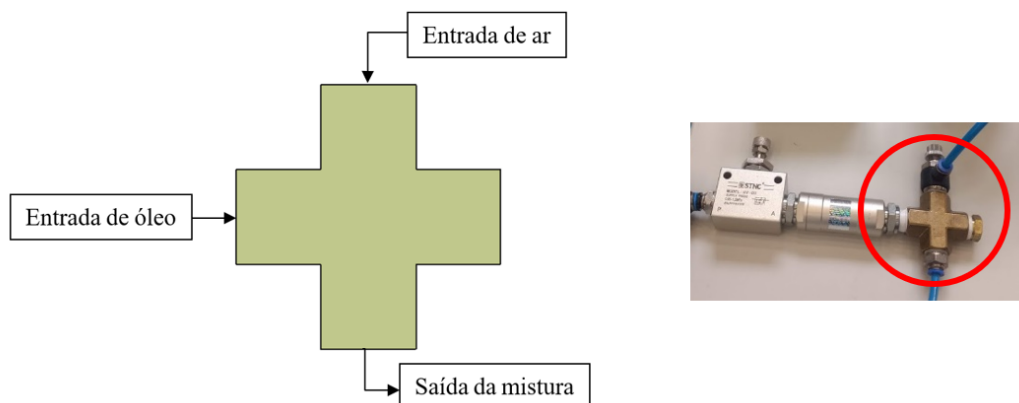
Figura 3.10 – Domínio para a simulação com jatos



Fonte: Dados do autor.

- c) simulação 3 - análise para mistura de óleo e ar comprimido. Para a simulação com ar comprimido e óleo na junção da mistura um domínio fluídico de duas dimensões foi considerado devido a simetria do estudo. A abordagem multifásica VOF foi utilizada no domínio da cruzeta por se tratar da região de encontro e mistura das fases. O estudo contou com a inserção das propriedades do Superfluido 3 para a modelagem do sistema. Considerou-se para a simulação o valor real de 6 bar de pressão e que o óleo não retorna devido à válvula de retenção. A Figura 3.11 mostra o domínio 2D criado para a simulação e a cruzeta real utilizada para a extração da geometria;

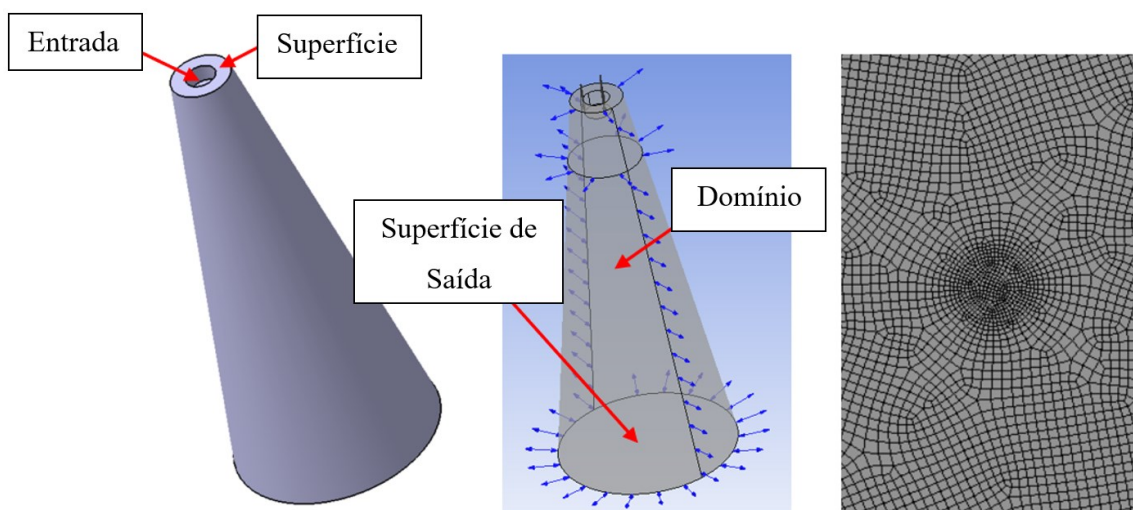
Figura 3.11 – Domínio 2D para a simulação entre óleo e ar comprimido



Fonte: Dados do autor.

- d) simulação 4 - injeção cíclica de nitrogênio líquido. Para a simulação CFD do comportamento do nitrogênio sob fornecimento cíclico, partiu-se de uma distância fixa da válvula em relação à peça/ ferramenta. Como há repetição do processo, modelou-se a situação mais crítica: uma gota caindo por gravidade. A condição de contorno foi definida em uma forma cônica com ar e um pequeno orifício na parte superior, definido como “*inlet*” de nitrogênio líquido. Nesta análise utilizou-se o módulo CFX do software Ansys 2019 R3. A malha foi refinada na posição de entrada do nitrogênio líquido e na região de impacto da gota conforme a Figura 3.12. Os dados de análise estão inseridos na Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Figura 3.12 – Domínio e refino de malha na região de gotejamento e na região de colisão com a peça / ferramenta



Fonte: Dados do autor.

Tabela 3.1 – Domínio - CFX

Domínio – Características	
Tipo	Fluido - Transiente
Materiais	
LN ₂	
Fluido	Biblioteca de materiais
Morfologia	Fluido contínuo
Ar a 25°C	
Fluido	Biblioteca de materiais
Morfologia	Fluido contínuo
Características	
Movimentação de domínio	Estacionário
Pressão de referência	1.0 [atm]
Modelo de transferência de calor	Energia Térmica
Modelo de turbulência	K epsilon
Função - domínio turbulento	Escalável

Fonte: Dados do autor.

Tabela 3.2 – Condições de contorno - CFX

Domínio	Condições de contorno
Domínio padrão	Condição de contorno - Entrada
	Características
	Regime de fluxo
	Subsônico
	Transferência de calor
	Temperatura estática
	Temperatura estática
	77 [K]
	Massa e Momento
	Velocidade normal
	Turbulência
	Intensidade média e viscosidade turbulenta
	Fluido
	Nitrogênio líquido
	Fração volumétrica
	Valor [1]
	Fluido
	Ar
	Fração volumétrica
	Valor [0]
	Condição de contorno - Domínio Cônico
	Características
	Direção do fluxo
	Normal à condição de contorno
	Regime do fluxo
	Subsônico

(Continua)

(Conclusão)

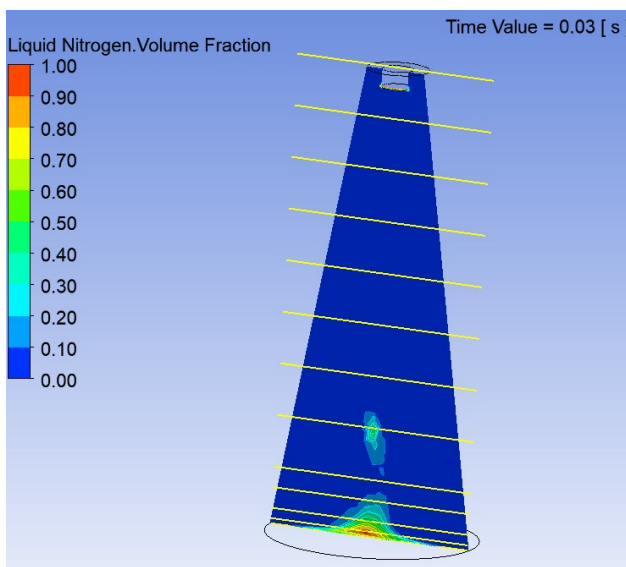
Domínio	Condições de contorno
Transferência de calor	Temperatura do domínio cônico
Temperatura do domínio cônico	295 [K]
Massa e momento	Pressão e direção do domínio cônico
Pressão relativa	1.0 [atm]
Turbulência	Intensidade média e viscosidade turbulenta
Fluído	Nitrogênio líquido
Fração volumétrica	Valor [0]
Fluído	Ar
Fração volumétrica	Valor [1]
Condição de contorno - Superfície de saída	
Características	
Massa e Momento	Sem deslizamento na parede de domínio
Rugosidade da parede	Parede lisa
Mistura	Nitrogênio líquido ar
Condição de contorno - Superfície	
Características	
Massa e Momento	Sem deslizamento na parede de domínio
Rugosidade da parede	Parede lisa
Mistura	Nitrogênio líquido ar

Fonte: Dados do autor.

Com os dados de entrada atribuídos, analisou-se o comportamento da velocidade de uma gota de nitrogênio líquido partindo de uma altura de 45,5mm. Esta altura corresponde à altura de fixação do dispositivo MQL. O diâmetro de injeção foi simulado com 3 milímetros. Esta simulação retrata a situação real de posicionamento do dispositivo durante a usinagem.

Um gráfico foi gerado para avaliar o comportamento do nitrogênio líquido em 0,03s. A Figura 3.13 mostra as linhas de referência para a construção deste. A linha superior foi determinada como 0 mm, e por sequência, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm, 40mm, 42mm, 44mm, 45mm e 45,5mm.

Figura 3.13 - Linhas de referência para construção do gráfico de fração volumétrica de LN₂

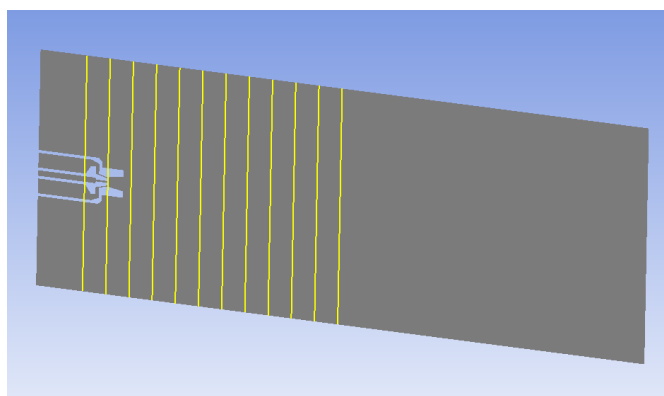


Fonte: Dados do autor.

e) simulação 5 - Análise CFD para jato de nitrogênio com a válvula de mistura. Após a criação das superfícies escolheu-se os modelos K- ϵ realizável, Modelo da equação da energia e *Species* para a realização da simulação. A entrada de ar baseou-se no bocal central enquanto o nitrogênio líquido entrou pela parte superior do corpo conforme a situação real de trabalho do dispositivo de mistura. A pressão de entrada foi simulada com o valor de 6 bar.

Para a construção dos gráficos criaram-se linhas paralelas com distanciamento de 0,025m partindo de 0,1m. A Figura 3.14 mostra as linhas construídas para posterior correlação com os dados da simulação.

Figura 3.14 - Construção de linhas para aquisição de dados de simulação

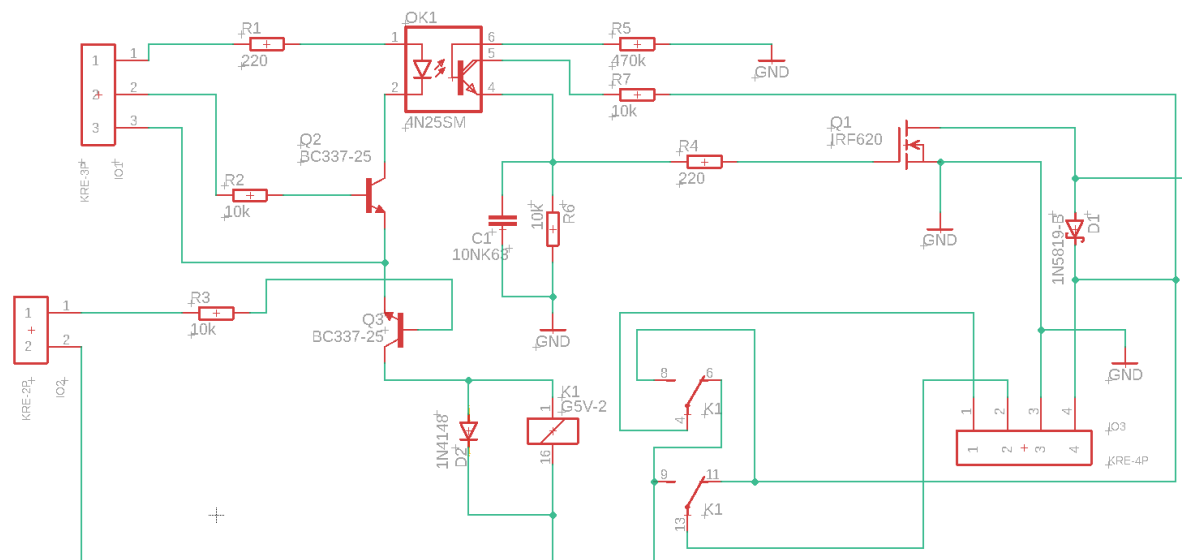


Fonte: Dados do autor.

3.4 Sistema de injeção por ciclos

Na automação muitas vezes há a necessidade de compatibilizar sinais entre dispositivos para concretizar uma ação de controle, seja com realimentação ou não. As interfaces exercem este papel, podendo ser constituída por um relé, quando não se necessita de tempos da ordem de milissegundos. Em se tratando de dispositivos que respondem a sinais em frequência, pode-se contar com os transistores de baixo sinal, os transistores bipolares de junção ou também dos transistores de efeito de campo para potência, os “power *mosfet*”. Estes necessitam de baixíssima corrente de *gate*, porém chegando a chavear correntes de algumas dezenas de amperes. No caso da interface adotada, o sinal de entrada liga o *led* do fotoacoplador 4N25, com sinal de 5V, consumindo uma corrente pequena, em torno de 20mA. Existe também a possibilidade de se inverter a tensão da saída de 24V. O sinal de saída do fotoacoplador servirá para excitar o *gate* do transistor *power mosfet* IRF620 chaveando a tensão sobre a bobina da válvula. A Figura 3.15 ilustra o diagrama elétrico da placa PCB para o sistema de controle de abertura da válvula. Os componentes estão listados na Tabela 3.3. e a Figura 3.16 mostra o circuito esquemático para a prototipagem. Na Figura 3.16 (a) mostra-se a vista inferior e a vista superior está ilustrada na Figura 3.16 (b). A Figura 3.17a mostra a placa confeccionada e a Figura 3.17b mostra a placa montada com os componentes eletrônicos.

Figura 3.15 - Diagrama elétrico da placa PCB



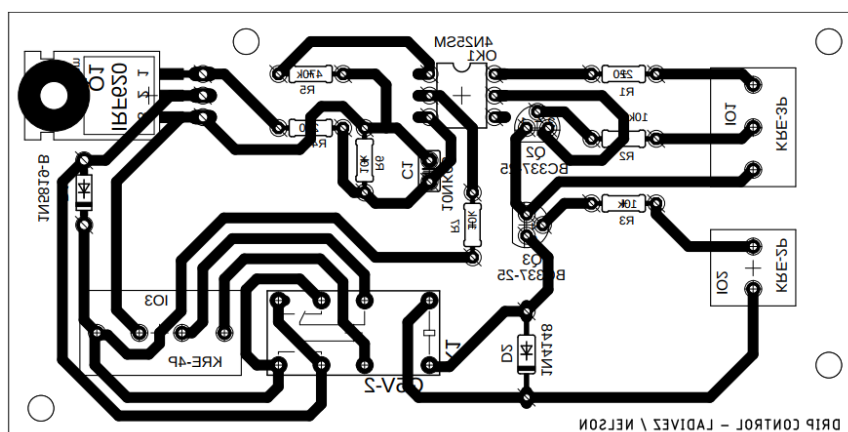
Fonte: Dados do autor.

Tabela 3.3 - Lista de componentes para a placa PCB do sistema de gotejamento

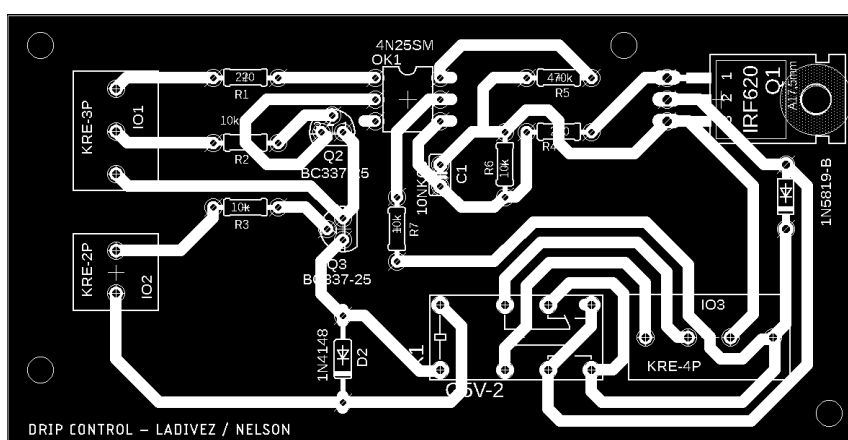
Componente	Qtde	Valor	Dispositivo	Especif.	Nome
Capacitor	1	10NK63	C2.5/2	C2.5/2	C1
Resistor	4	10k	R-EU_0204/7	0204/7	R2, R3, R6, R7
Diodo	1	1N4148	1N4148D035-10	DO35-10	D2
Diodo	1	1N5819-B	1N5819-B	DO41-7.6	D1
Resistor	2	220	R-EU_0204/7	0204/7	R1, R4
Resistor	1	470k	R-EU_0204/7	0204/7	R5
Opto acoplador	1	4N25SM	4N33	DIL06	OK1
NPN Transistor	2	BC337-25	BC337-25	TO92	Q2, Q3
Relé	1	G5V-2	G5V-2	G5V-2	K1
MOSFET (HEXFET);	1	IRF620	IRF620	TO220	Q1
KRE Conector 2P	1	KRE-2P	KRE-2P	KRE-2P	IO2
KRE Conector 3P	1	KRE-3P	KRE-3P	KRE-3P	IO1
KRE Conector 4P	1	KRE-4P	KRE-4P	KRE-4P	IO3

Fonte: Dados do autor.

Figura 3.16 - Diagrama elétrico da placa PCB



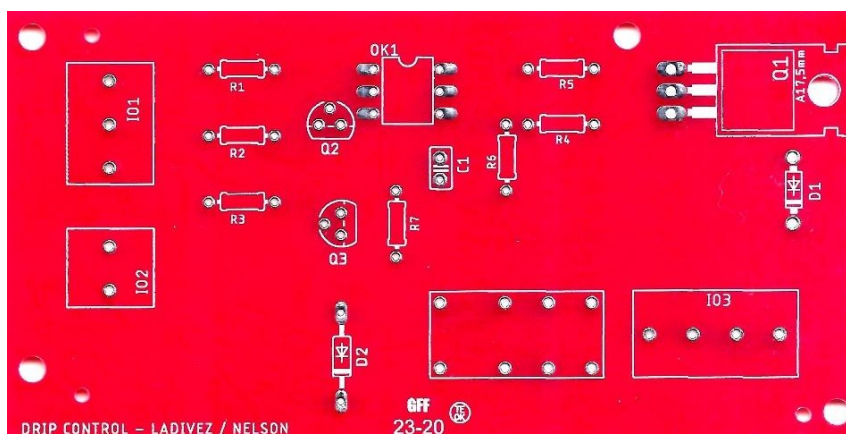
(a)



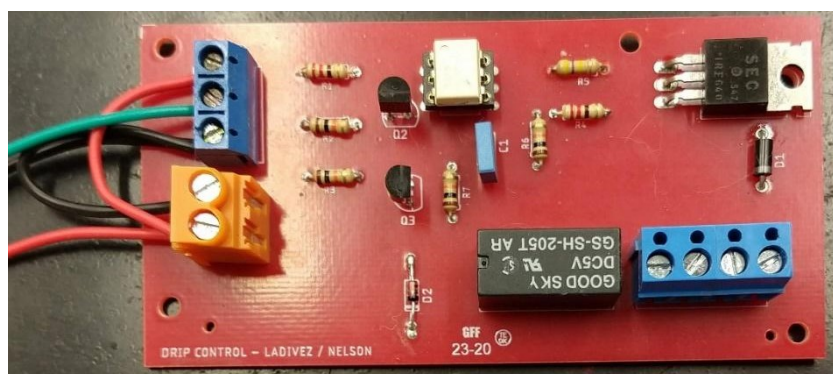
(b)

Fonte: Dados do autor.

Figura 3.17 – (a) Placa confeccionada. (b) Placa montada com os componentes eletrônicos



(a)



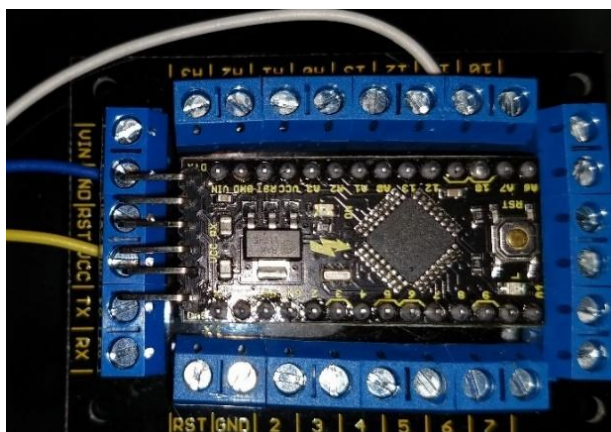
(b)

Fonte: Dados do autor.

Para o envio de sinal do ciclo foram utilizadas uma placa Blackboard Pro Mini – 5V/16MHz e uma placa RC FTDI V1.1 acoplada a um *shield* ilustrada pela Figura 3.18. O Apêndice B mostra o programa para envio de sinal de 5 volts para a placa de controle desenvolvida, além das demais programações desenvolvidas.

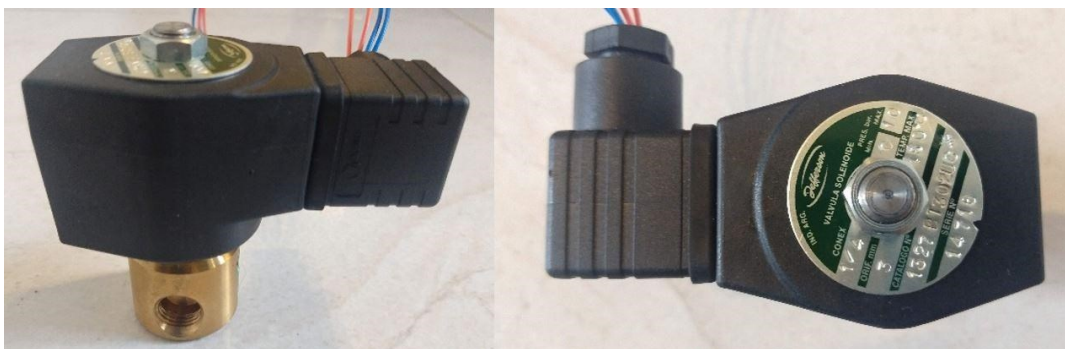
O sistema de abertura e fechamento do sistema fluídico desenvolvido contempla a utilização da válvula solenoide 1327BT302UC da empresa Jefferson. A Figura 3.19 mostra a válvula.

Figura 3.18 – Placa Blackboard Pro Mini



Fonte: Dados do autor.

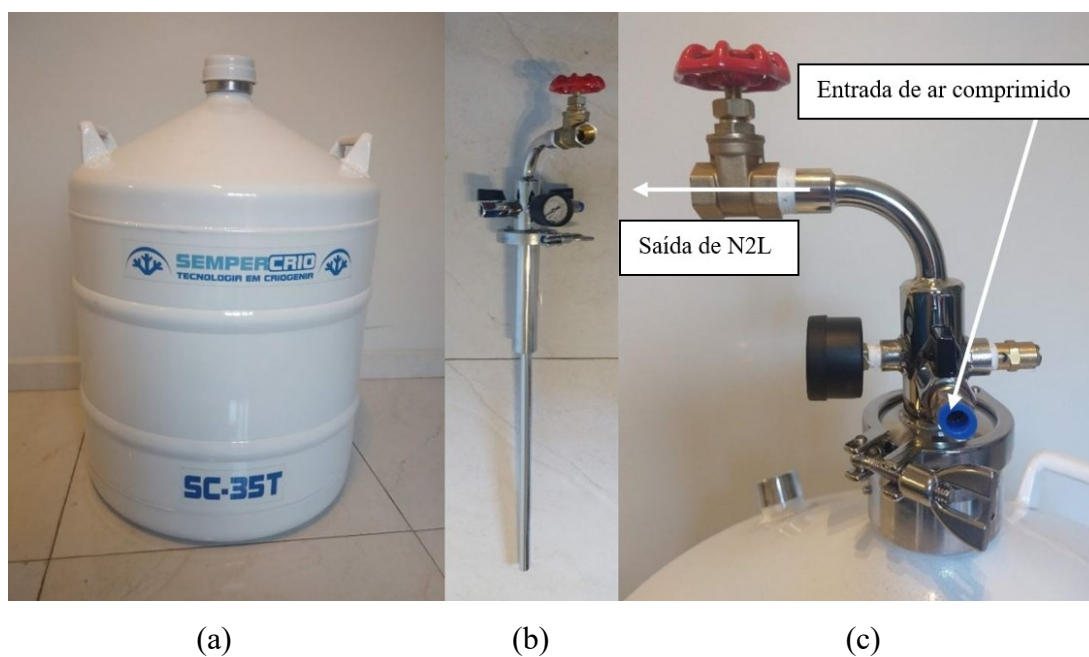
Figura 3.19 - Válvula solenoide Jefferson



Fonte: Dados do autor.

Foram adquiridos da empresa Sempercrio um *dewar* de 35 litros (SC-35T) e um aspersor. Este foi ligado a um compressor portátil Air Plus Duo da empresa Schulz. A Figura 3.20(a) a ilustra o *dewar* e a Figura 3.20(b) mostra o aspersor. A montagem pode ser visualizada na Figura 3.20(c). A Figura 3.21 mostra o aspersor montado adaptado no compressor portátil. O uso do compressor portátil facilita o transporte e manuseio ao lado da máquina.

Figura 3.20 - Equipamentos utilizados para o circuito de LN₂. (a) Dewar. (b) Aspensor. (c) Indicação de entrada de ar e saída de nitrogênio líquido



Fonte: Dados do autor.

Na saída de nitrogênio líquido existem duas opções:

- a) ligação com a válvula solenoide 1327BT302UC da empresa Jefferson;
- b) ligação com o mecanismo projetado.

Figura 3.21 - (a) Compressor portátil. (b) Aspensor montado no Dewar



Fonte: Dados do autor.

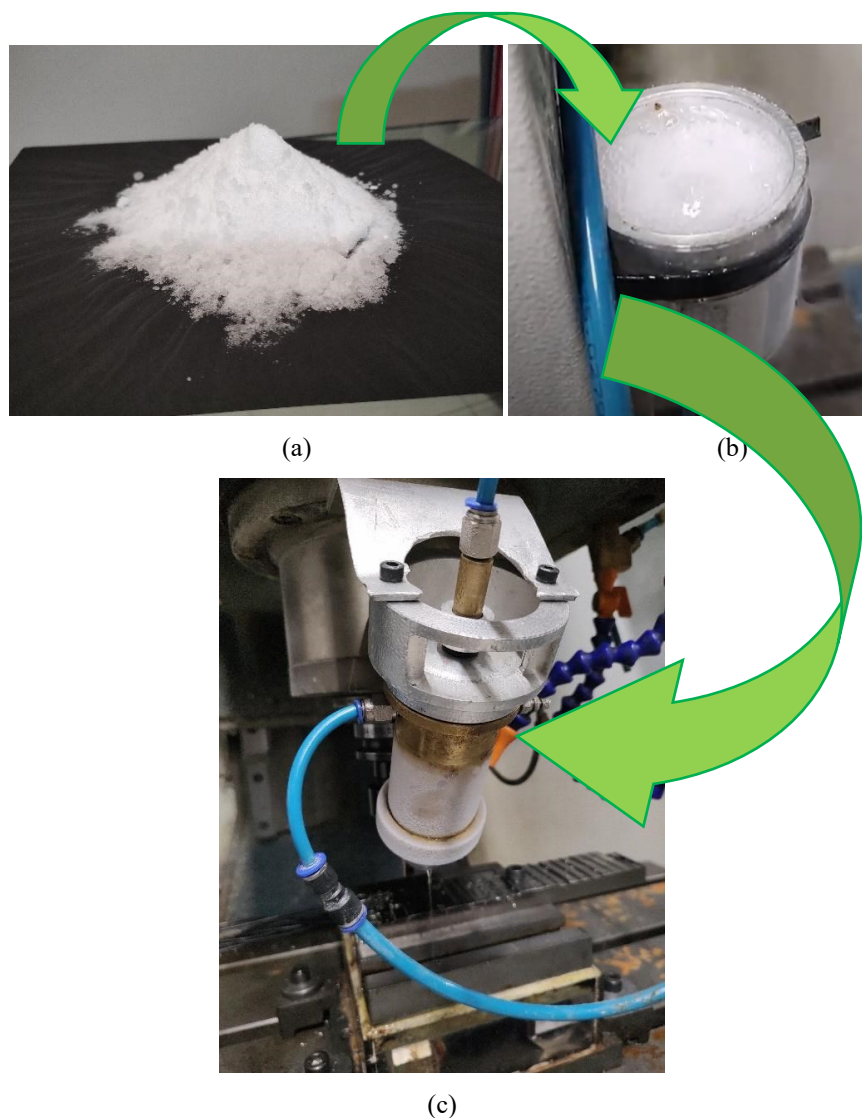
3.5 Estratégias de usinagem

Os ensaios de usinagem seguiram o planejamento fatorial de três fatores e dois níveis com a adição de dois pontos centrais, previamente definidos e foram planejados para serem executados da seguinte forma:

- a) ensaio sem lubrificação (Abordagem 1);
- b) ensaio com a utilização da válvula projetada com óleo + ar como lubrificantes (Abordagem 2);
- c) ensaio com a utilização da válvula projetada com óleo + grafite como lubrificantes (Abordagem 3). O lubrificante sólido neste trabalho foi misturado ao Superfluido 3 na proporção de 30%;
- d) ensaio com a utilização da válvula projetada e válvula industrial com nitrogênio líquido como refrigerante (Abordagem 4). O Anexo A ilustra as propriedades do nitrogênio;
- e) ensaio com a utilização da válvula projetada com uma nova mistura proposta de Álcool Etílico Hidratado com CO₂ sólido (Abordagem 5);
- f) ensaio com a utilização da válvula projetada com uma nova mistura proposta de Etanol 100% com CO₂ sólido (Abordagem 6);
- g) ensaio com a utilização da válvula projetada com uma nova mistura proposta de Etanol 100% com grafite - 5% (Abordagem 7).

Para as abordagens 5 e 6 o CO₂ sólido triturado (Figura 3.22) foi incorporado no dispositivo MQL desenvolvido e refrigerado por Álcool Etílico Hidratado (98,8 INPM) e Etanol (100%) respectivamente. O Álcool etílico é também conhecido como Etanol. Neste trabalho o nome álcool Etílico faz jus ao hidratado com 98 INPM e o Etanol refere-se àquele adquirido em postos de combustível. A nomenclatura foi feita desta forma para não haver confusões. No êmbolo central do dispositivo MQL a pressão do ar comprimido foi estabelecida em 6 bar.

Figura 3.22- Abordagem MQL com Álcool Etilico Hidratado e CO₂ sólido triturado. (a) CO₂ sólido triturado. (b) Colocação de álcool etílico no reservatório superior. (c) Visualização do dispositivo atuando



Fonte: Dados do autor.

Adotou-se o procedimento de utilizar uma pastilha sem desgaste para cada ensaio do planejamento fatorial. Um inserto de corte foi reservado com o intuito de desbastar antes do início do planejamento propriamente dito. Utilizou-se então dois suportes para isso. Um deles montado com uma pastilha só utilizada no desbaste e outro suporte instrumentado para fazer as medições das forças de usinagem.

A tabela 3.4 indica o planejamento fatorial usado na execução do experimento. Os dados de v_c , foram recomendados pelo fabricante dos insertos e o comprimento usinado por corpo de prova foi de 50mm. A réplica é representada pela letra R.

Tabela 3.4 -Planejamento fatorial seguido para a usinagem

Testes	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)
1	80	0.06	0.5
2	100	0.06	0.5
3	80	0.1	0.5
4	100	0.1	0.5
5	80	0.06	1.0
6	100	0.06	1.0
7	80	0.1	1.0
8	100	0.1	1.0
9	90	0.08	0.75
10 R	90	0.08	0.75
11 R	80	0.06	0.5
12 R	100	0.06	0.5
13 R	80	0.1	0.5
14 R	100	0.1	0.5
15 R	80	0.06	1.0
16 R	100	0.06	1.0
17 R	80	0.1	1.0
18 R	100	0.1	1.0
19 R	90	0.08	0.75
20 R	90	0.08	0.75

Fonte: Dados do autor.

As configurações utilizadas para os ensaios de usinagem estão listadas:

I – Condições Fixas:

- a) geometria do corpo de prova;
- b) material do corpo de prova: liga Ti-6Al-4V Grau 5;
- c) dureza do corpo de prova: 32,4 HRC;
- d) geometria do inserto.

II – Variáveis Independentes:

- a) velocidade de corte (v_c): 80/ 90/ 100 m/min;
- b) avanço (f): 0,06/ 0,08/ 0,10 mm/volta;
- c) profundidade de penetração (a_p): 0,5/ 0,75/ 1,0 mm.

III – Variáveis Dependentes:

- a) rugosidade;
- b) forças de usinagem: força na direção x, força na direção y, força na direção z e torque.

3.5.1 *Corpo de Prova*

Para a usinagem foi utilizada 1 barra de titânio liga Ti-6Al-4V (Grau 5), com comprimento de 500 mm x 50 mm x 17mm, apresentando uma dureza média de 32,4 HRC. A Figura 3.23 mostra alguns testes já executados.

Figura 3.23 – Corpo de prova (Ti-6Al-4V) com ensaios executados



Fonte: Dados do autor.

A composição química do material utilizado no presente trabalho está listada na Tabela 3.5.

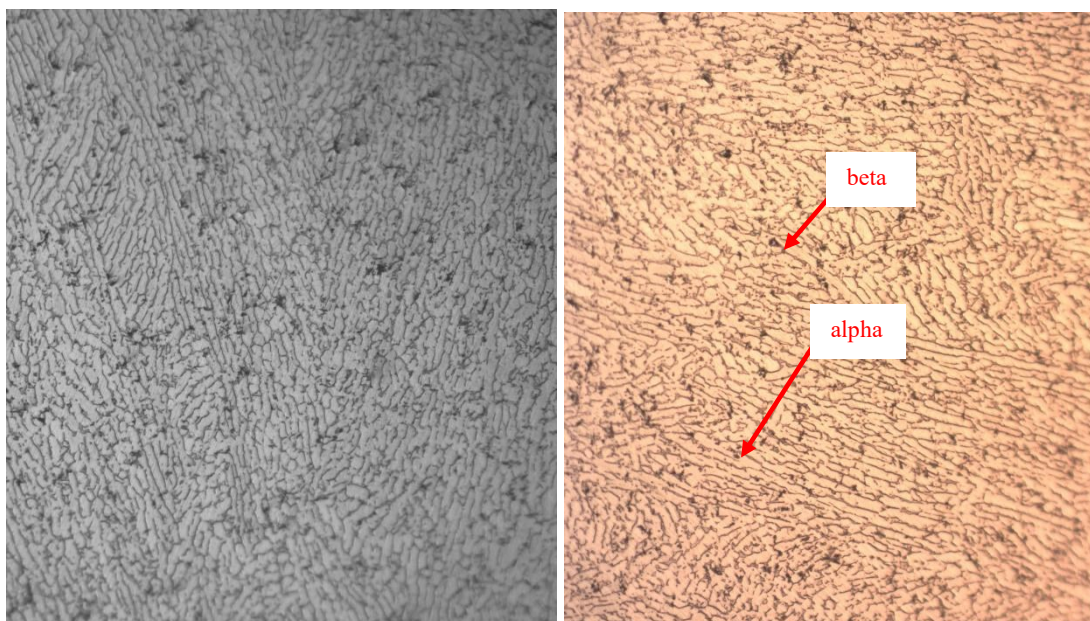
Tabela 3.5 - Composição química do material utilizado neste trabalho

Elemento	Percentual (%)
Ti	Bal
Al	6.49-6.56
V	4.03-4.14
Fe	0.16-0.19
H	0.002-0.003
N	0.003-0.004
O	0.192-0.196
C	0.024-0.028
Y	<0.001

Fonte: Viner Brasil Tecnologia Ltda., 2018.

A condição inicial do corpo de prova foi verificada. A Figura 3.24 ilustra a microestrutura do material utilizado. Observa-se a fase alpha com grãos alongados circundados pela fase beta.

Figura 3.24 - Material como recebido. (a) Ampliação 100x. (b) Ampliação 200x



Fonte: Dados do autor.

3.5.2 Máquina operatriz

Para os ensaios utilizou-se o centro de usinagem ROMI D560. A Figura 3.25 mostra o centro de usinagem com a válvula acoplada ao cabeçote. Esta máquina apresenta como características principais:

- a) cone do eixo árvore: ISO 40;
- b) faixa de velocidades: 8 a 7500 rpm;
- c) avanço rápido (eixos x /y): 30 m/min;
- d) avanço rápido (eixo z): 30 m/min;
- e) avanço de corte programável: 15 m/min;
- f) curso da mesa superior (eixo x): 560 mm;
- g) curso da mesa inferior (eixo y): 406 mm;
- h) curso do cabeçote (eixo z): 508 mm;
- i) distância entre o nariz do eixo árvore e a mesa; 125 a 633;
- j) superfície da mesa: 840 x 360 mm;
- k) CNC modelo: SIEMENS;
- l) motor principal: 11 cv;
- m) Potência total instalada: 20 kVA.

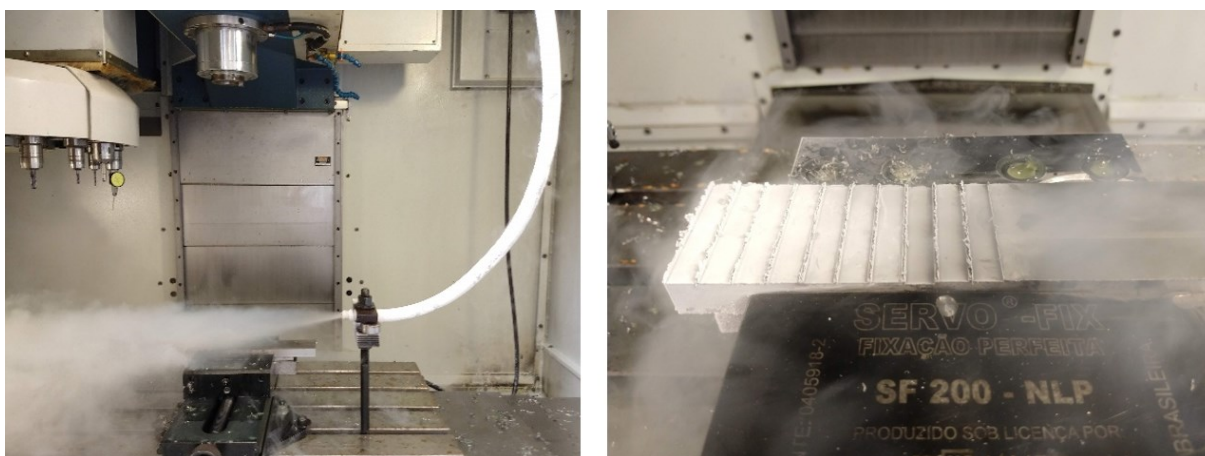
Figura 3.25 – Centro de Usinagem CNC ROMI D600 – Instituto Mauá de Tecnologia



Fonte: Dados do autor

A Figura 3.26 mostra o teste da estratégia utilizando nitrogênio líquido sem o dispositivo desenvolvido acoplado.

Figura 3.26 – Teste com nitrogênio líquido



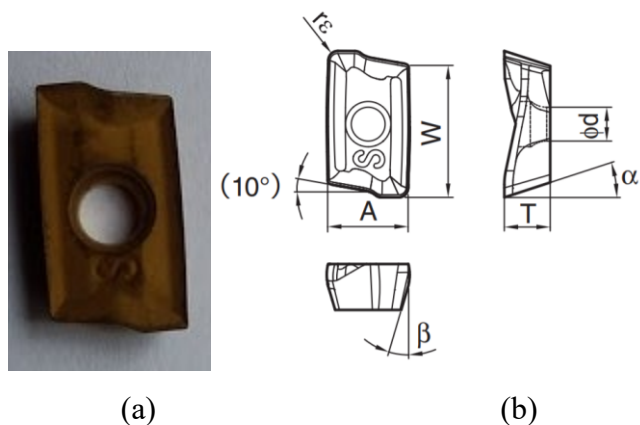
Fonte: Dados do autor.

3.5.3 *Inserto de corte*

Foram disponibilizados um tipo de inserto, fabricado pela empresa KYOCERA. O fornecedor desta o recomendou para o presente trabalho, mesmo possuindo revestimento de Titânio. A Figura 3.27 mostra o inserto de corte e a Tabela 3.6 indica as informações do inserto de corte.

Utilizou-se um inserto do Tipo S. Sua nomenclatura é dada por: BDMT 11 03 02 ER-JS (CVD) - CA6535 (TiCN+Al₂O₃+TiN).

Figura 3.27 – (a) Geometria do inserto e (b) Desenho do inserto



Fonte: – (a) Dados do autor e (b) KYOCERA Componentes industriais LTDA., 2018.

Tabela 3.6 – Informações do inserto de corte

Parâmetros	Valores
A	6,3 mm
T	3,0 mm
Ød	2,8 mm
W	11 mm
rε	0,2 mm
α	18°
β	15°

Fonte: KYOCERA Componentes industriais LTDA., 2018.

A Figura 3.28 ilustra a montagem no inserto no suporte (10mm de diâmetro).

Figura 3.28 – Exemplo de montagem do inserto e suporte MEC10-S10-11 utilizado



Fonte: Dados do autor.

3.5.4 Óleo lubrificante

Para a abordagem MQL (sob pressão de 6 bar) utilizou-se o óleo Superfluido 3 da empresa Quimatic/ Tapmatic. Este óleo é um fluido sintético, ecológico e biodegradável. Não contém solventes voláteis; portanto, não evapora contaminando o ambiente. É constituído por uma combinação de lubrificantes sintéticos e aditivos que garantem alta lubricidade à operação com baixa taxa de evaporação. Pode ser aplicado por gotejamento, borrifamento ou névoa. A tabela 3.7 mostra suas propriedades principais (QUIMATIC/TAPMATIC, 2018). Para a abordagem com adição de grafite, este foi misturado ao fluido na proporção de 30%.

Tabela 3.7 - Propriedades principais do óleo Superfluido 3 utilizado na abordagem MQL

Parâmetros	Propriedades
Aspecto	Líquido viscoso límpido verde
Odor	Característico, leve
Densidade at 25°C (g/mL)	0.88-0.91
Teste de corrosão em cavacos de ferro	Sem corrosão após 2 horas
Viscosidade cSt, 25°C	20-35
Índice de acidez	10-20

Fonte: Dados do autor.

3.6 Variáveis de saída

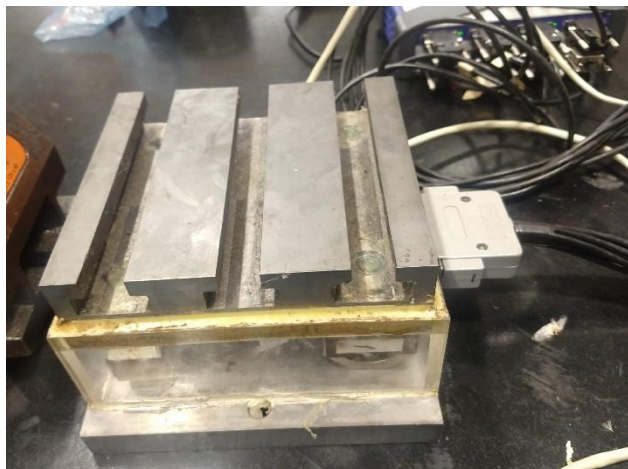
No estudo preliminar foram medidas durante a usinagem as Forças na direção x, Forças na direção y, Forças na direção z e torque, utilizando-se um transdutor de forças calibrado acoplado ao cabeçote do centro de usinagem. Para obtenção dos dados finais, utilizou-se um dinamômetro de mesa, também calibrado. Após a usinagem e o registro dos dados das forças, foram efetuadas medições de rugosidade, micro dureza e desgaste dos insertos. O desgaste dos insertos de corte foi medido no decorrer dos ensaios.

3.6.1 Medições de forças de usinagem

3.6.1.2 Medições de forças de usinagem

Para as medições de forças de usinagem utilizou-se um dinamômetro de mesa (Figura 3.29), possibilitando medir as forças nas coordenadas x (F_x), y (F_y) e z (F_z) e o torque (M_z).

Figura 3.29 - Dinamômetro de mesa



Fonte: Dados do autor.

Para a aquisição dos sinais foi utilizado o módulo de aquisição de dados universais e amplificador de sinais Quantum MX840B. Com este equipamento e com o software de aquisição de dados “CATMAN” da mesma empresa, foi possível controlar e visualizar os dados medidos. Adotou-se por configuração uma frequência para aquisição dos dados de 100 kHz. Os canais de 1 a 3 foram utilizados para os sinais F_x , F_y , F_z respectivamente. A Figura 3.30 mostra o módulo Quantum.

Figura 3.30 - Condicionador de Sinais Quantum MX840B empresa HBM

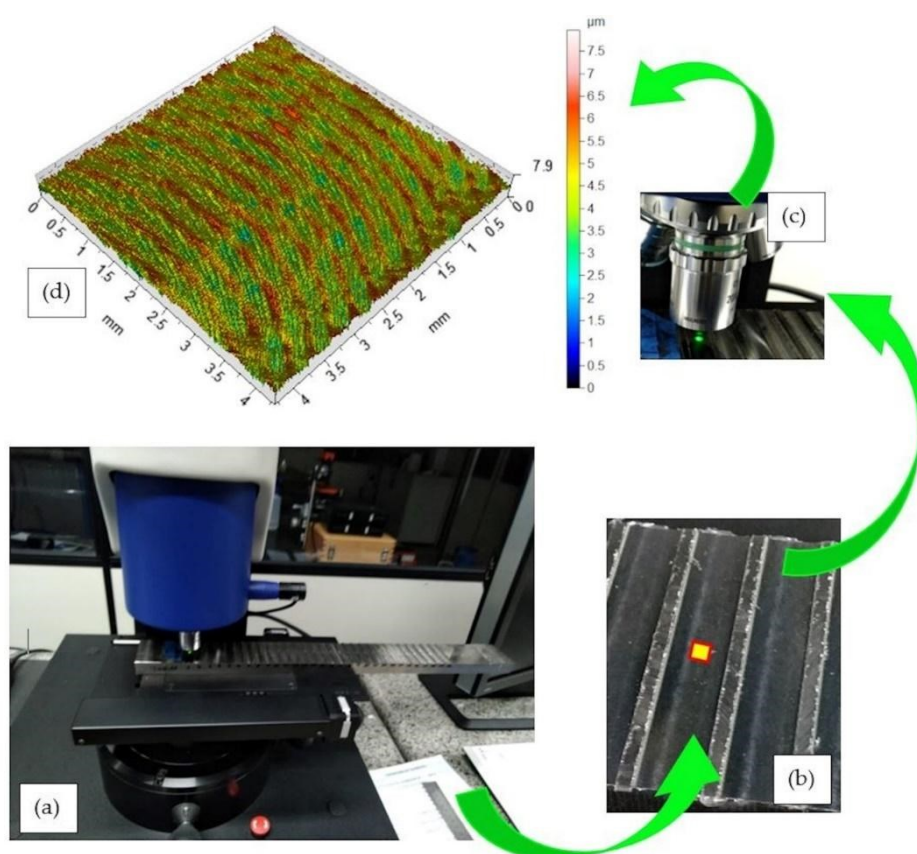


Fonte: Dados do autor.

3.6.2 Medições de rugosidade

Para as medições de rugosidade utilizou-se o interferômetro de luz branca Talysurf CCI Lite da empresa Taylor Hobson com o software TalyMap Gold 6.2. As medições foram efetuadas com um *cut-off* de 0.8mm em uma área de 4.3 mm² com 1 réplica. A tomada dos dados foi realizada no centro do corpo de prova. A Figura 3.31 ilustra o procedimento de medição. Para todos os ensaios mediu-se o parâmetro S_a. A norma utilizada foi a ISO 25178.

Figura 3.31 - Procedimento de medição de rugosidade. (a) Interferômetro de luz branca Talysurf CCI Lite da empresa Taylor Hobson (b) Ilustração da área de medição. (c) Medição sendo efetuada. (d) Exemplo de vista topográfica isométrica



Fonte: Dados do autor.

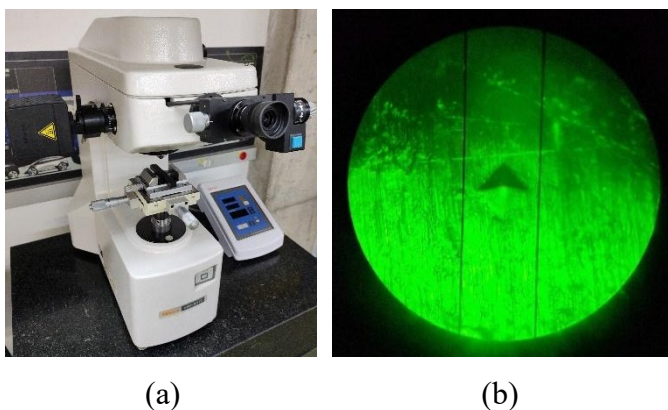
3.6.3 Medições de Dureza (HRC e HV)

Para a medida das durezas HRC do material bruto foi utilizado o durômetro Wizarhard HR500 da Mitutoyo (Figura 3. 32).

Figura 3.32 - Durômetro Wizhard HR500– Mitutoyo

Fonte: Dados do autor.

Com o intuito de verificar possíveis mudanças microestruturais decorrentes da usinagem, escolheu-se avaliar a condição mais crítica de parâmetros de corte para cada abordagem utilizada (Ensaio 8). As amostras foram submetidas às medições de micro dureza a partir da superfície com espaçamento de 0,1mm. O microdurômetro utilizado foi o HM-100 da empresa Mitutoyo com a norma ASTM E384 como referência. Mediu-se primeiramente a superfície no estado não usinado. A maior e menor medida encontrada foram utilizadas como intervalo de referência e a média foi extraída. Posteriormente mediu-se a micro dureza a partir da superfície espaçadas em 0,1 mm até 1,5mm com pré-carga de 0,5kg. A Figura 3.33 mostra o equipamento. As figuras 3.33(b) e 3.38(c) ilustram as medições efetuadas.

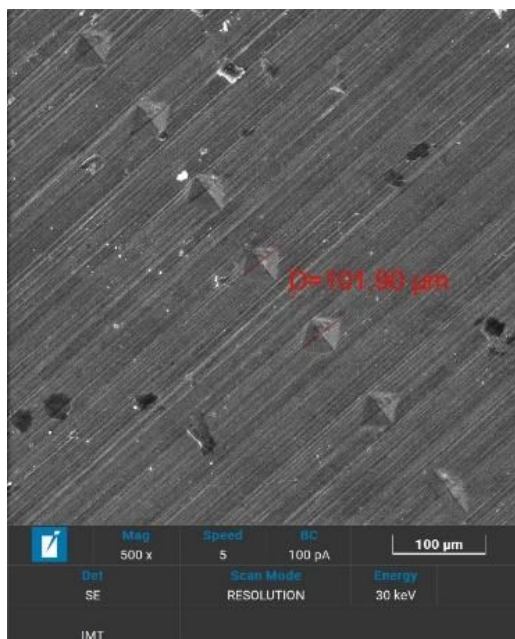
Figura 3.33 – Procedimento para medições de micro dureza (HV). (a) Durômetro utilizado. (b) Leitura sendo efetuada. (c) Ilustração de medições com espaçamento de 0,1mm

(a)

(b)

(continua)

(conclusão)



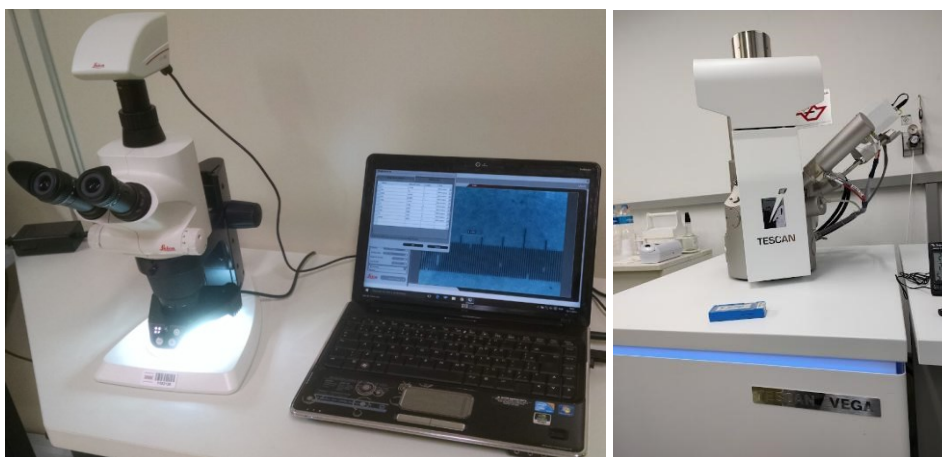
(c)

Fonte: Dados do autor.

3.6.4 Medições do desgaste dos insertos de corte

Para a verificação da existência de desgaste nos corpos de prova após a usinagem contou-se com o microscópio S6D da empresa Leica (Figura 3.34a) e de um microscópio eletrônico de varredura da empresa TESCAN (Figura 3.34b).

Figura 3.34 – (a) Microscópio S6D – Leica (calibração). (b) Microscópio eletrônico de varredura – TESCAN



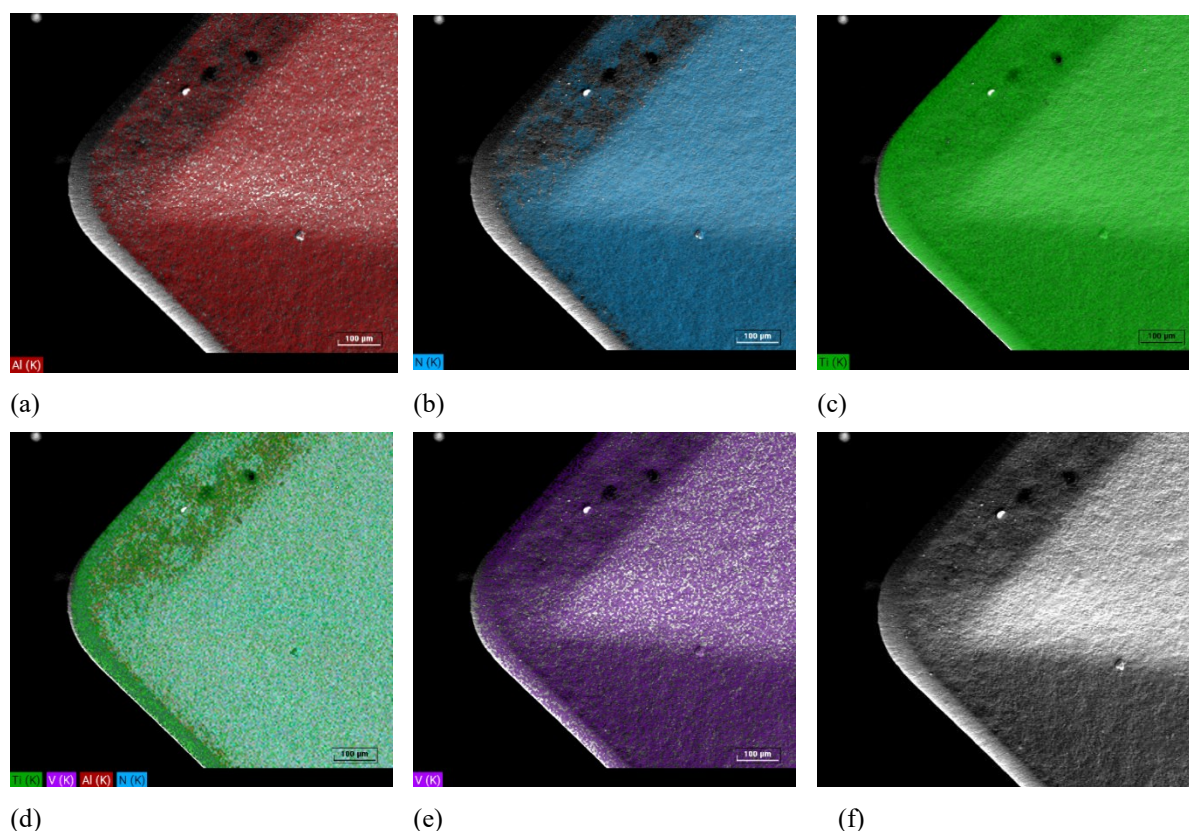
(a)

(b)

Fonte: Dados do autor.

Para a análise do desgaste dos insertos de corte foram realizadas medições considerando o limite de 0,2mm. Um inserto utilizado no ensaio mais crítico de cada estratégia, escolhido aleatoriamente foi observado no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os insertos observados possuem o mesmo tempo de vida e mesmas condições de corte. O microscópio eletrônico de varredura foi utilizado para visualizar os desgastes e para realizar comparações entre as estratégias de corte efetuadas. Análises por Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) foram realizadas para verificar a distribuição dos elementos químicos nos insertos de corte para cada abordagem utilizada na usinagem e também no inserto novo para fins de comparação. A Figura 3.35 mostra a obtenção da análise EDS do inserto novo.

Figura 3.35 – Análise EDS do inserto de corte sem uso. (a) proporção de Al. (b) proporção de N. (c) proporção de Ti. (d) elementos químicos encontrados no inserto. (e) Imagem MEV.



Fonte: Dados do autor.

3.6.5 Módulo IoT

Com o intuito de permitir o mapeamento dos sensores e acesso remoto do sistema foram utilizadas placas de desenvolvimento para *Internet of Things* (IoT) conceituadas no mercado.

A plataforma Arduino foi utilizada como interface de programação. A placa ESP32 NodeMCU da empresa Espressif Systems foi utilizada para o acionamento remoto do compressor de ar, da bomba de óleo e da válvula pneumática por meio de um módulo relé de 4 canais. A placa ESP32 Dev Module da mesma empresa foi utilizada para aquisição de sinais provenientes dos sensores. Um sensor de nível e dois termopares foram inseridos no sistema. A Figura 3.36 (a) e 3.36(b) ilustram as placas utilizadas.

Figura 3.36 – Placas IoT. (a) ESP32 NodeMCU8266. (b) ESP32 Dev Module



(a)



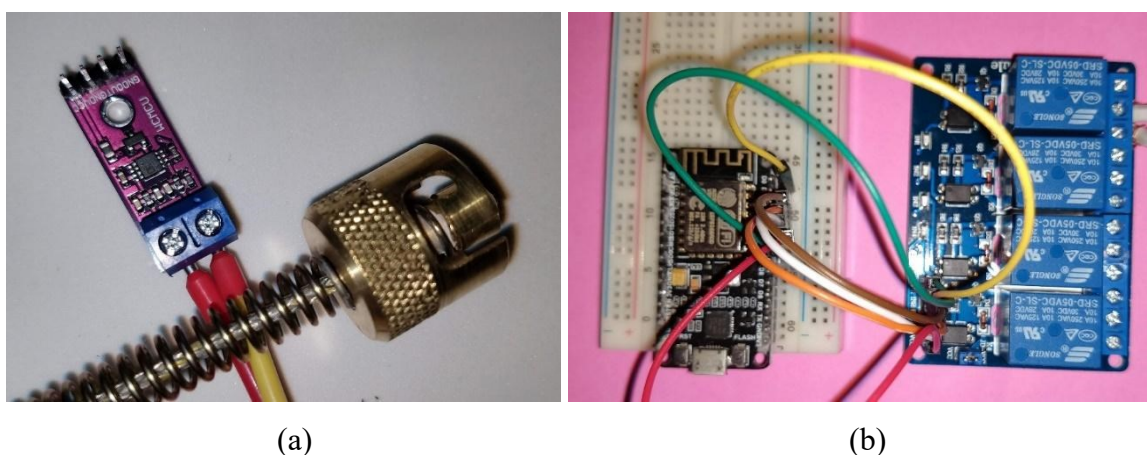
(b)

Fonte: Dados do autor.

Termopares foram utilizados para fazer a aquisição de temperatura do fluido de corte no momento da usinagem. O termopar utilizado foi o modelo KCF-903776 da empresa Fraellio com intervalo de medição de -200 a 1260°C . Foi utilizado um amplificador para termopar tipo K modelo CJMCU com saída analógica $0-5\text{V} / 0^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$. A Figura 3.37 (a) ilustra o amplificador e o termopar utilizado. Um módulo relé de 4 canais foi utilizado para a ligação da

bomba de óleo, do compressor, do sistema de ciclagem e do módulo adicional de aquecimento. A Figura 3.37(b) ilustra o módulo relé acoplado a placa NodeMCU8266.

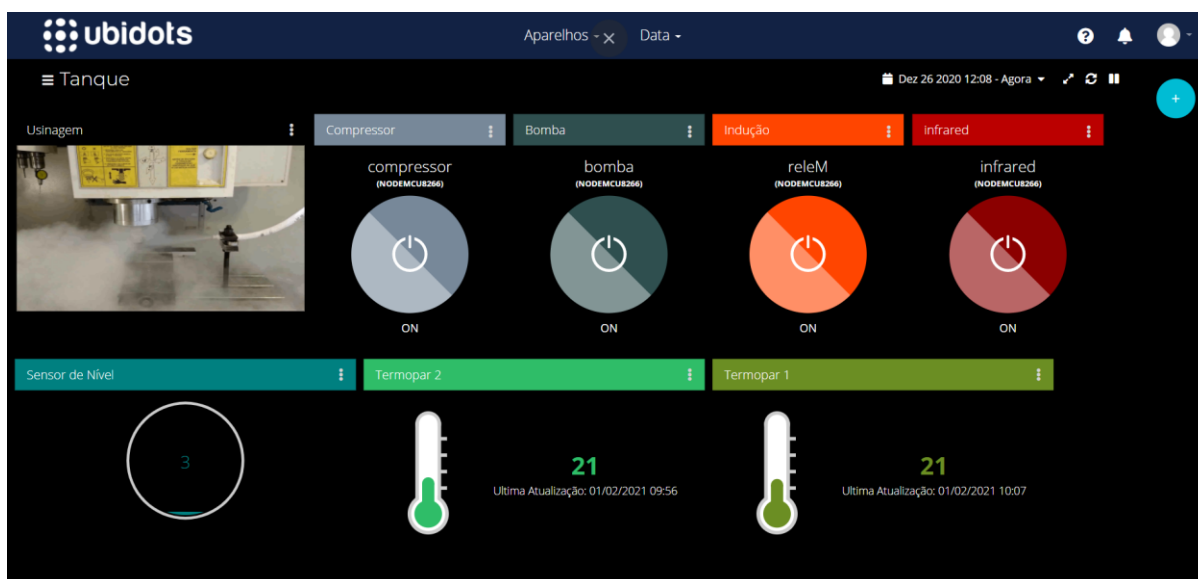
Figura 3.37 – (a) Amplificador de sinal e termopar utilizado para aquisição de temperatura. (b) Módulo relé de 4 canais conectado à placa NodeMCU



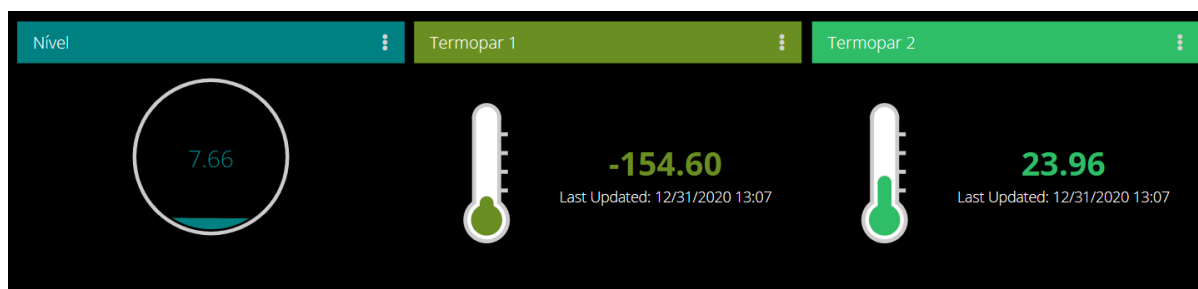
Fonte: Dados do autor.

A plataforma industrial Ubidots foi escolhida para realizar a conexão dos hardwares à nuvem. Os protocolos HTTP e MQTT foram utilizados. Um dashboard foi criado e está ilustrado na Figura 3.38(a). Nesta pode-se visualizar os botões de acionamento do compressor e da bomba de óleo. Na Figura 3.38(b) é possível visualizar o funcionamento do termopar durante a usinagem utilizando nitrogênio líquido. Para acesso ao dashboard é necessário um link gerado pelo proprietário. Já prevendo trabalhos futuros, implementou-se nos canais 3 e 4 uma interface para ligação com sistemas de aquecimento utilizando indução e infravermelho.

Figura 3.38 - Dashboard criado ilustrando o acionamento de relés e os sensores de nível do reservatório e termopares



(a)



(b)

Fonte: Dados do autor.

3.7 Curvas características do dispositivo de mistura e obtenção da função de transferência

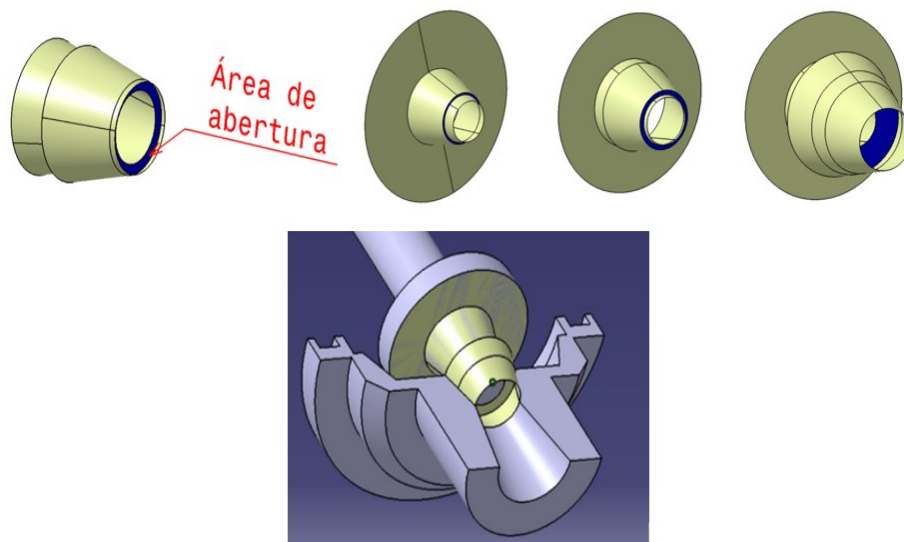
Curvas características que correspondem ao funcionamento do dispositivo de mistura foram mapeadas e os procedimentos para suas obtenções foram detalhados.

3.7.1 *Escoamento de fluido do reservatório do dispositivo de mistura sob ação do campo gravitacional.*

O levantamento do tempo teórico de esvaziamento do reservatório pela ação da gravidade foi fundamentado na divisão de sua saída em intervalos iguais. A medição de área de

abertura foi realizada com o auxílio do software CATIA V5 R20 por meio do *workbench* “*Generative Shape Design*”. O processo de leitura das áreas pode ser visualizado na Figura 3.39

Figura 3.39 – Extração das áreas de abertura da válvula



Fonte: Dados do autor.

Para o dimensionamento do reservatório do dispositivo de mistura destinado ao preenchimento de fluido, partiu-se da Lei de Torricelli, em que a velocidade é definida pela Equação 22:

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (22)$$

onde g é ação do campo gravitacional da Terra e h é a altura da coluna do fluido. A vazão é definida pela função da derivada do volume em relação ao tempo (23). A vazão é também definida pela área do orifício de saída a multiplicado pela velocidade v (24).

$$Q = \frac{dv}{dt} \quad (23)$$

$$Q = a * v \quad (24)$$

Substituindo (22) em (24) têm-se (25):

$$Q = a * \sqrt{2 * g * h} \quad (25)$$

Igualando-se os fluxos instantâneos Q, têm-se (26):

$$\frac{dv}{dt} = a * \sqrt{2 * g * h} \quad (26)$$

Como o volume pode ser escrito como mudança na altura em uma dada área, têm-se (27).

$$dv = dh * A \quad (27)$$

Assim, substituindo (26) em (25) têm-se (27):

$$\frac{A * dh}{dt} = a * \sqrt{2 * g * h} \quad (28)$$

Integrando-se as duas parcelas e isolando-se dt, têm-se (29):

$$\int_{h_0}^{h_1} dt = \int_{h_0}^{h_1} \frac{A * dh}{a * \sqrt{2 * g * h}} \quad (29)$$

Assim, o tempo de esvaziamento é definido por (30):

$$t = \frac{A}{a} * (\sqrt{h_0} - \sqrt{h_1}) * \sqrt{\frac{2}{g}} \quad (30)$$

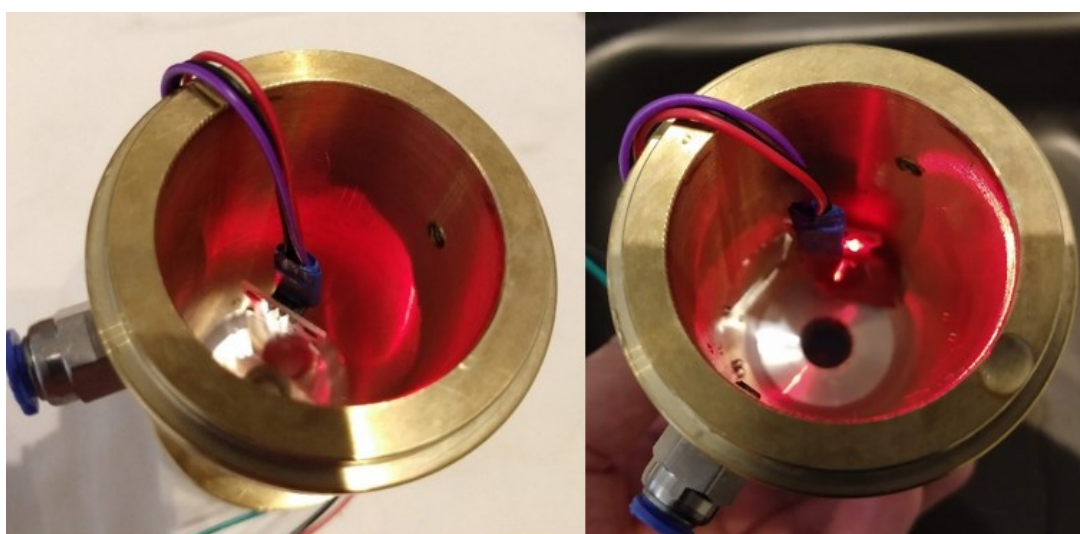
A medição experimental do esvaziamento do reservatório para diferentes aberturas foi obtida pelo mapeamento de tempo por meio de um sensor e confirmada por um cronômetro para cada abertura.

Identificou-se experimentalmente a vazão das porcentagens de abertura do atuador a partir de uma análise de regressão, obtida da inclinação da curva “variação do nível do reservatório x tempo”. A inclinação destes gráficos resulta na vazão para cada porcentagem de abertura (MENDONÇA et al., 2018). A maioria dos processos é não linear, porém é possível

determinar uma faixa de operação em que a relação entre a vazão e a posição da haste seja linear, ou até mesmo linearizar a curva por meio de software (PASETTI, 2020).

Para a aquisição das curvas experimentais, contou-se com a plataforma de internet das coisas Ubidots. Utilizou-se o sensor de nível FD10. O reservatório utilizado para a amostragem foi o de 5 cm de altura. O intervalo de amostragem foi definido em 0,25 segundos. A Figura 3.40 ilustra o sensor posicionado no interior do reservatório do dispositivo realizando leitura de escoamento.

Figura 3.40 – Sensor de nível posicionado no interior do reservatório do dispositivo medindo o escoamento



Fonte: Dados do Autor.

3.7.2 Escoamento de LN_2 do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento

Sob pressão, a condição de fornecimento de nitrogênio líquido para o dispositivo de mistura foi mensurada por meio de um dinamômetro. A vazão mássica do esvaziamento do tanque de nitrogênio líquido foi calculada.

Para modelar o escoamento do reservatório sob bombeamento de fluido levou-se em consideração a constante gravitacional e considerou-se um reservatório aberto com área de secção transversal A . O fluido é bombeado para dentro do tanque a uma vazão de Q de entrada de 0,66 [l/min] que flui por uma abertura fixa a . A taxa de fluxo através da abertura é dada conforme a equação de Bernoulli, onde h é o nível do reservatório e g é a constante gravitacional [m/s^2]. Para a modelagem o equacionamento matemático é mostrado pelas Equações 31, 32, 33 e 34. As modelagens e simulações foram realizadas com o software Matlab R2021a da empresa Mathworks. As Figuras 3.41 e 3.42 ilustram a modelagem realizada no Simulink.

$$Q_{saída} = a\sqrt{2gh} \quad (31)$$

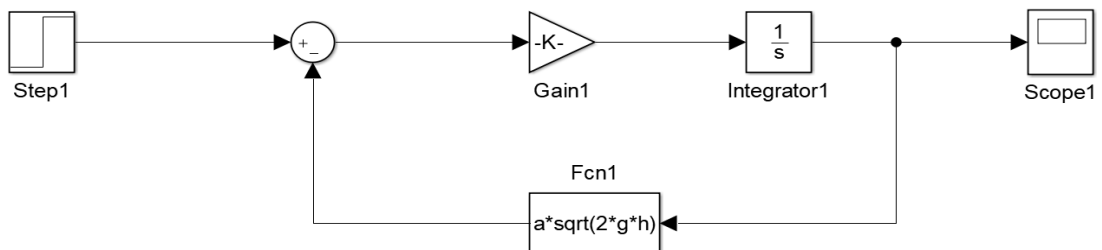
$$A \frac{dh}{dt} = Q_{entrada} - Q_{saída} = Q_{entrada} - a\sqrt{2gh} \quad (32)$$

$$h(t) = h(0) + \int_0^t \frac{1}{A} (Q_{entrada}(t) - Q_{saída}(t)) dt \quad (33)$$

$$h(t) = h(0) + \int_0^t \frac{1}{A} (Q_{entrada}(t) - a\sqrt{2gh(t)}) dt \quad (34)$$

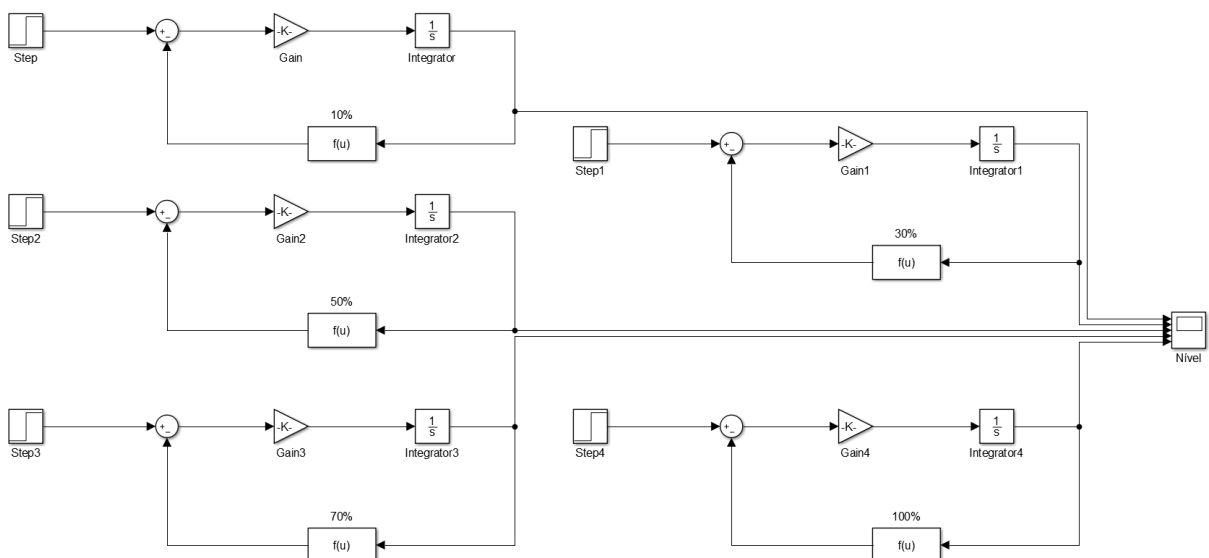
A implementação pode ser visualizada na Figura 4.25 e 4.26.

Figura 3.41 – Modelo de nível do reservatório por meio do Simulink



Fonte: Dados do autor.

Figura 3.42 – Modelo de nível do reservatório implementado para diferentes aberturas por meio do Simulink



Fonte: Dados do autor.

A partir do modelo foram geradas curvas de nível para diferentes aberturas com o intuito de verificar o comportamento do reservatório.

3.7.3 *Escoamento do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento - MQL*

De forma análoga ao cálculo referente ao tópico anterior, para a abordagem MQL partiu-se da vazão medida de 464,17 ml/h (0,00773 l/min). O modelo utilizado foi o mesmo do tópico anterior.

3.7.4 *Determinação da constante K_v do dispositivo de mistura*

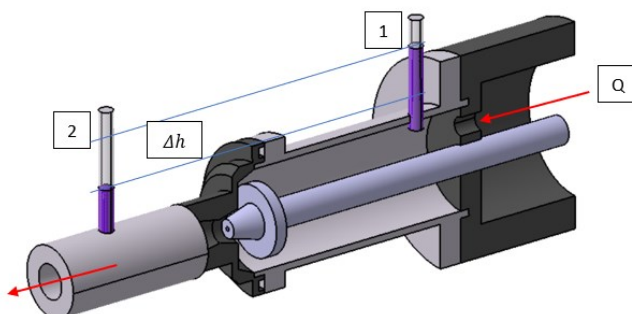
O valor K_v (coeficiente de perda localizada) é um índice padronizado para a vazão de fluidos obtida por uma válvula. “O cálculo do valor K_v é feito segundo a DIN EM 60534 na qual o valor é definido através da medição da água com uma perda de pressão aproximada de 1 bar de acordo com as diretivas VDE/VDI 2173”. Uma válvula on/off só possui um valor K_v e as válvulas de controle possuem um valor K_v para cada posição. O índice para o curso máximo de 100% é o valor K_v (BÜRKERT, 2021a).

A constante K_v do dispositivo de mistura pode ser também estimada pela equação de Bernoulli. Para isto define-se um volume de controle e algumas hipóteses:

- regime permanente;
- escoamento incompressível (densidade constante);
- desconsiderando a presença de bombas e perdas distribuídas, pois a distância é muito pequena.

Como exemplo, com base na Figura 3.43 e aplicando a equação de Bernoulli (Equação 35) de 1 para 2 têm-se:

Figura 3.43 - Esquema para obtenção da constante K_v



Fonte: Dados do autor.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{L-T} \quad (35)$$

$$\Delta h = H_1 - H_2 \quad (36)$$

Considerando o escoamento horizontal, as alturas serão canceladas. Como a entrada e saída possui o mesmo diâmetro, a velocidade nestes pontos não varia. Desta forma, a equação resulta em (37).

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} = h_{L-T} \quad (37)$$

A perda total é a soma da perda localizada com a distribuída (Equação 38). A parcela distribuída não será considerada conforme hipótese c.

$$h_{L-T} = h_{L-L} + h_{L-D} \quad (38)$$

Desta forma, resulta-se que a perda total pode ser definida pela Equação 39. K é o coeficiente de carga localizada. \underline{V} é a velocidade média do escoamento.

$$h_{L-T} = \frac{KV^2}{2g} \quad (39)$$

Igualando-se as equações têm-se:

$$\frac{KV^2}{2g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (40)$$

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho \underline{V}^2} \quad (41)$$

Pela equação de Stevin, resulta-se em (42).

$$K = \frac{2(\rho g \Delta H)}{\rho \underline{V}^2} \quad (42)$$

Assim, considerando-se a densidade constante têm-se:

$$K = \frac{2g\Delta H}{\underline{V}^2} \quad (43)$$

Como a vazão é definida por (44) onde V é definido pelo volume e t é definido pelo tempo e que também é definida por (45) em que \underline{V} é a média da velocidade e A é a área da secção transversal da tubulação, resulta-se em (45).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (44)$$

$$Q = \underline{V} * A \quad (45)$$

$$\underline{V} = \frac{V}{A * t} \quad (46)$$

Assim,

$$Kv = \frac{2g\Delta H}{\left(\frac{V}{A * t}\right)^2} \quad (47)$$

Para a determinação da constante Kv do dispositivo desenvolvido considerou-se a válvula totalmente aberta. As vazões de entrada e saída foram medidas. Considerou-se ainda a massa específica ρ de 1000 kg/m³ para a água e de 895 kg/m³ para o óleo com aceleração gravitacional de 9,81m/s².

3.7.5 *Preenchimento do reservatório com atuação de duas válvulas*

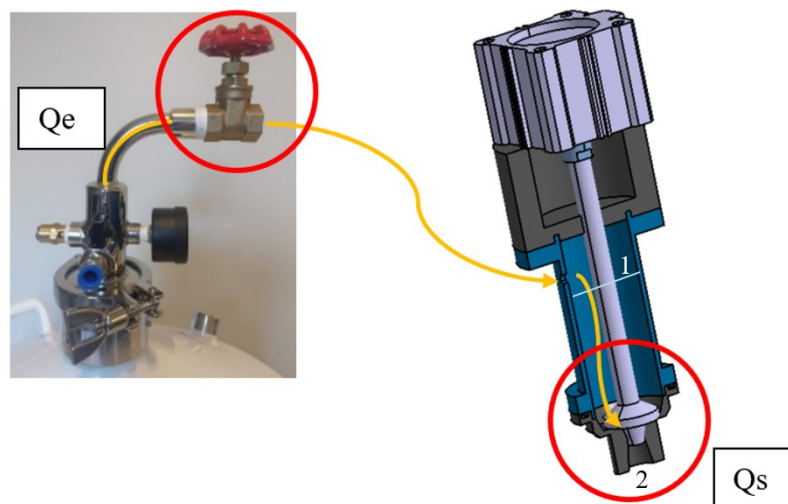
Para a simulação de preenchimento do reservatório algumas considerações foram abordadas para as simulações:

- a) a vazão de entrada deve ser suficiente para que haja vazão de saída. Desta forma a vazão é definida pela vazão de entrada menos a vazão de saída;
- b) o nível estará estável quando a vazão de entrada for igual a vazão de saída;

- c) a altura depende da vazão de entrada;
- d) a vazão de saída depende da altura (pressão atmosférica) e depende de uma restrição na saída do reservatório;
- e) quanto maior a altura do fluido, maior a pressão. A pressão interna no reservatório (pressão atmosférica + pressão do fluido) é maior que a pressão externa (pressão atmosférica).

A modelagem do escoamento foi realizada com embasamento em um tanque sendo abastecido por vazão constante de um líquido incompressível escoando pela abertura de uma área fixa. A Figura 3.44 mostra a concepção da simulação do escoamento e escolha dos componentes. O preenchimento e esvaziamento do reservatório da válvula pode ser controlado pela válvula de entrada, considerando a válvula de saída como perturbação e vice-versa.

Figura 3.44 – Concepção de simulação consistindo de uma entrada de vazão Q_e , uma saída de vazão Q_s e duas válvulas



Fonte: Dados do autor.

Considerando-se uma velocidade v e que a pressão manométrica entre os pontos 1 e 2 é nula, tem-se:

$$\frac{m * v^2}{2} = m * g * h \quad (48)$$

$$v = \sqrt{2 * g * H} \quad (49)$$

O fluxo de saída do tanque pela válvula é:

$$Q = Sv = S\sqrt{2 * g * H} \quad (50)$$

em que o g é a gravidade em $9,8\text{m/s}^2$ e H é a altura máxima do nível do fluido. O fluxo em estado estacionário atuando na válvula é:

$$Qv = kv * As * \sqrt{\Delta P} \quad (51)$$

em que Kv é uma constante, As é a área e ΔP é a variação de pressão a montante e a jusante da válvula. Considerando a diferença de pressão constante, o fluxo que passa pela válvula é proporcional à área de abertura desta. De forma prática aproximou-se de forma linear o fluxo Qv e a abertura da válvula (GIRALDO, 2020):

$$Qs = k2 * a_2 \sqrt{2 * g * h} \quad (52)$$

Supondo Qe proporcional à abertura da válvula têm-se:

$$Qe = k1 * a_1 \quad (53)$$

Para a modelagem do circuito em estudo algumas variáveis foram medidas, outras calculadas. A Tabela 3.8 ilustra as variáveis deste trabalho. Os dados do coeficiente $K1$ para a modelagem foram extraídos de fabricantes (THOMAS POTTER, 2021 e RANIYO, 2021). Para a demonstração da modelagem, o valor de $K2$ foi estabelecido para uma vazão de $0,66$ l/min.

Tabela 3.8 – Variáveis utilizadas na simulação do modelo de tanque

Parâmetros	Propriedades
Área da base	$0,001407 \text{ m}^2$
$H_{\text{máx}}$ do reservatório	$0,040 \text{ m}$
$K1$ (Válvula Gaveta)	$0,0039 \text{ m}^3/\text{s}$
$K2$ (Dispositivo desenvolvido)	$0,017 \text{ m}^3/\text{s}$
A10 – abertura de equilíbrio de $a1$	1
A20 – abertura de equilíbrio de $a2$	1
g (gravidade)	$9,8\text{m/s}^2$

Fonte: Dados do autor.

O modelo matemático que representa o comportamento do nível dentro do tanque é dado por (GIRALDO, 2020):

$$A \frac{dh}{dt} = Qe - Qs \quad (54)$$

Considerando um volume variando com o tempo, a correlação dos dados de entrada deve ser igual aos dados de saída. Desta forma:

$$Qe = Qs \quad (55)$$

assim, a função que representa a dinâmica do tanque é dada por:

$$A \frac{dh}{dt} = k1 * a_1 - k2 * a_2 \sqrt{2 * g * h} \quad (56)$$

Quando se iguala a entrada com a saída é possível buscar um ponto de equilíbrio na qual a vazão de entrada seja a mesma da vazão de saída. Desta forma, substituindo na igualdade da Equação 56 o “h” pelo “H0”, têm-se a altura do fluido em equilíbrio:

$$H_0 = \left(\frac{k1 * a_1}{k2 * a_2 * \sqrt{2g}} \right)^2 \quad (57)$$

De posse do ponto de equilíbrio faz-se a linearização por Taylor (GIRALDO, 2020) considerando-se nesta primeira abordagem a válvula de saída constante. Com esta concepção a válvula de entrada é uma válvula de controle e a válvula de saída será uma perturbação.

$$f(a_1, h) = A \frac{dh}{dt} \quad (58)$$

$$f(a_1, h) \sim f(\underline{a_1}, \underline{h}) + \frac{\partial f}{\partial a_1} * \Delta a_1 |_{(\underline{a_1}, \underline{h})} + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h |_{(\underline{a_1}, \underline{h})} \quad (59)$$

sendo $\underline{a_1}, \underline{h}$ pontos de equilíbrio. Desta forma, substituindo 56 em 58 e aplicando Taylor,

$$f(\underline{a_1}, \underline{h}) \sim k1 * \underline{a_1} - k2 * a_2 \sqrt{2 * g * \underline{h}} + k1 * \Delta a_1 - \frac{k2 * a_2 \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{\underline{h}}} * \Delta h \quad (60)$$

Substituindo 58 em 60, têm-se:

$$f(a_1, h) \sim A \frac{dh}{dt} \Big|_{(a_1, h)} + k_1 * \Delta a_1 - \frac{k_2 * a_2 \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}} * \Delta h \quad (61)$$

$$A \frac{dh}{dt} \sim A \frac{dh}{dt} \Big|_{(a_1, h)} + k_1 * \Delta a_1 - \frac{k_2 * a_2 \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}} * \Delta h \quad (62)$$

$$A \frac{dh}{dt} - A \frac{dh}{dt} \Big|_{(a_1, h)} \sim k_1 * \Delta a_1 - \frac{k_2 * a_2 \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}} * \Delta h \quad (63)$$

Desta forma, o sistema linearizado para o ponto de equilíbrio é dado por:

$$A \frac{d\Delta h}{dt} \sim k_1 * \Delta a_1 - \frac{k_2 * a_2 \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}} * \Delta h \quad (64)$$

Aplicando a Transformada de Laplace ao sistema para representar a função de transferência, tem-se:

$$A s h(s) = k_1 * a_1(s) - \frac{k_2 * a_2 * \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}} h(s) \quad (65)$$

$$\frac{h(s)}{a_1(s)} = \frac{k_1}{A s + \frac{k_2 * a_2 * \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{h}}} \quad (66)$$

Substituindo-se pelos valores e H0, tem-se a função de transferência para o ponto de equilíbrio:

$$\frac{h(s)}{a_1(s)} = \frac{2,77}{s + 516,5} \quad (67)$$

Para a segunda análise em que a válvula de entrada é considerada como perturbação e a válvula de saída é estipulada como controle, realizando o mesmo procedimento matemático, mantendo o mesmo ponto de equilíbrio e linearizando por Taylor com a1 constante, tem-se:

$$f(a_2, h) \sim f(\underline{a_2}, \underline{h}) + \frac{\partial f}{\partial a_2} * \Delta a_2 \Big|_{(\underline{a_2}, \underline{h})} + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \Big|_{(\underline{a_2}, \underline{h})} \quad (68)$$

$$A \frac{dh}{dt} = k1 * a_1 - k2 * a_2 \sqrt{2 * g * h} \quad (69)$$

$$f(a_2, h) \sim A \frac{dh}{dt} \Big|_{(\underline{a_2}, \underline{h})} - k2 \sqrt{2 * g * \underline{h}} * \Delta a_2 - \frac{k2 * \underline{a_2} * \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{\underline{h}}} \Delta h \quad (70)$$

O sistema linear é dado pela equação 71.

$$A \frac{dh}{dt} \sim -k2 \sqrt{2 * g * \underline{h}} * \Delta a_2 - \frac{k2 * \underline{a_2} * \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{\underline{h}}} \Delta h \quad (71)$$

Aplicando a Transformada de Laplace, tem-se:

$$A s h(s) = -k2 \sqrt{2 * g * \underline{h}} a_2(s) - \frac{k2 * \underline{a_2} \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{\underline{h}}} h(s) \quad (72)$$

A função de transferência é dada por 74.

$$\frac{h(s)}{a_2(s)} = \frac{-k2 \sqrt{2 * g * \underline{h}}}{A s + \frac{k2 * \underline{a_2} \sqrt{2 * g}}{2\sqrt{\underline{h}}}} \quad (73)$$

Com a substituição dos valores, tem-se:

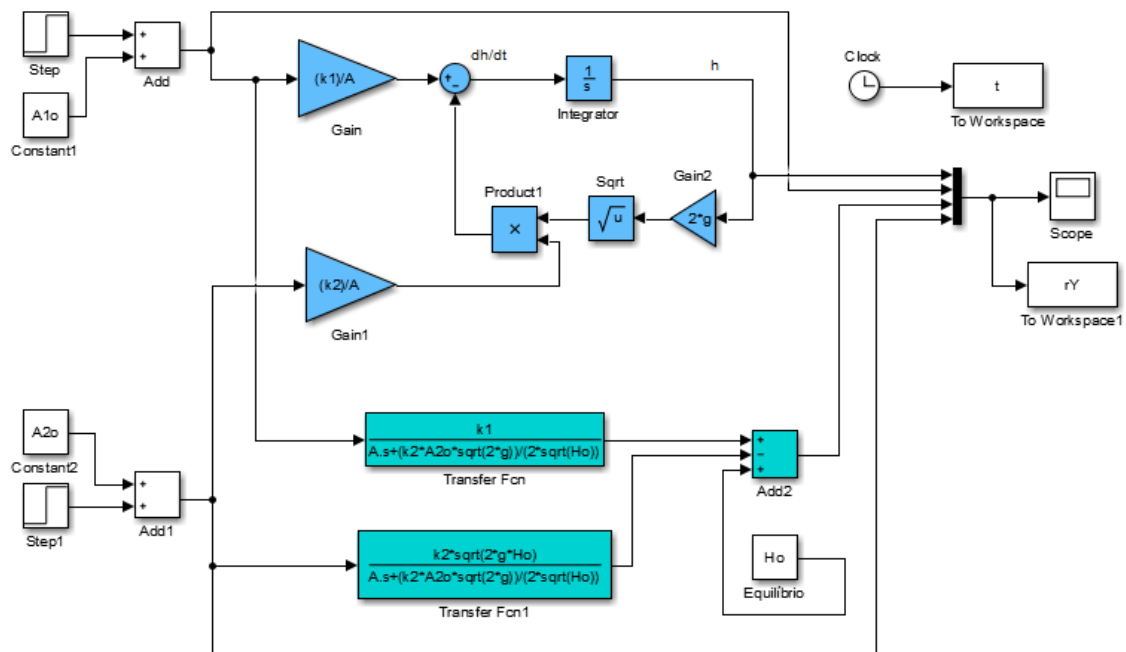
$$\frac{h(s)}{a_2(s)} = \frac{-2,77}{s + 511,72} \quad (74)$$

A função de transferência total que representa a aproximação linear do tanque é dada por 75.

$$G(s) = \frac{2,77}{s + 516,5} + \frac{-2,77}{s + 511,72} \quad (75)$$

A Figura 3.45 ilustra o modelo. Os ícones na cor azul indicam o sistema não linear e o verde o sistema linear.

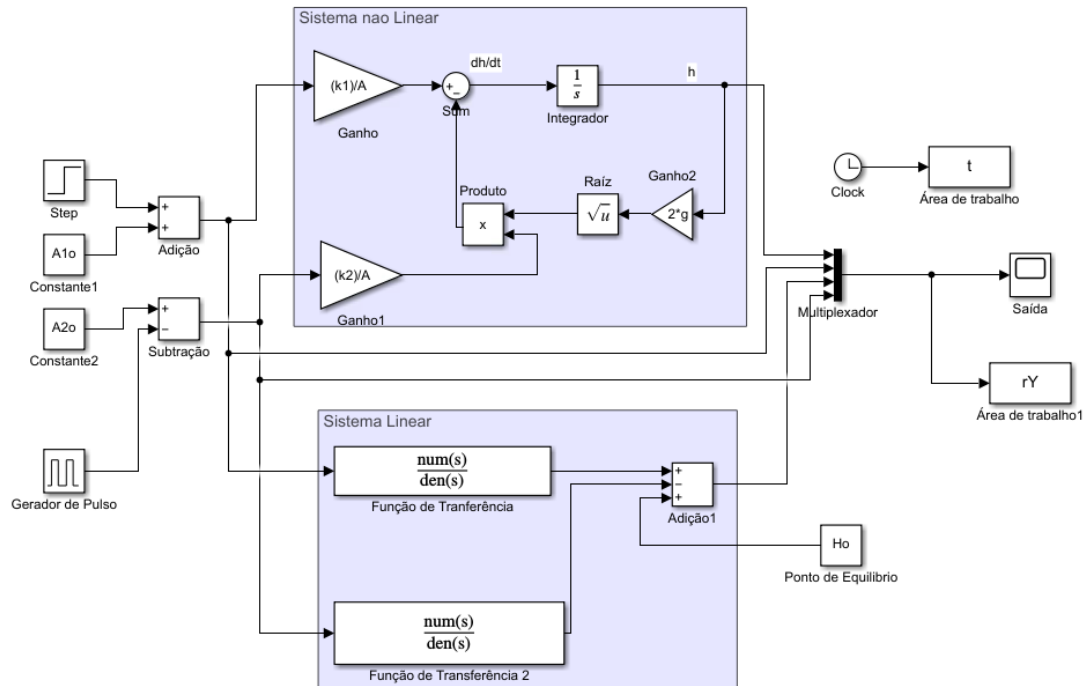
Figura 3.45 - Modelo com duas válvulas de controle



Fonte: Adaptado de Giraldo (2020).

Para simular a condição cíclica, optou-se pela inserção de um gerador de pulso. Este foi configurado para trabalhar com 250 ms, igualmente ao valor praticado nos ensaios com nitrogênio líquido. A Figura 3.46 ilustra a modificação realizada na modelagem.

Figura 3.46 - Modelo com duas válvulas de controle e implementação do gerador de pulso



Fonte: Dados do autor.

3.8 Redes neurais artificiais

Com os dados obtidos pelas medições das forças de usinagem e rugosidade foram executados diferentes padrões de treinamentos e testes das redes neurais artificiais. Os treinamentos foram executados para as diferentes condições de lubrificação com 17 amostras de cada estratégia de lubrificação utilizada, criando-se redes supervisionadas com quatro variáveis de entrada (Estratégia de lubrificação, V_c , f e ap). Como “*target*” foram selecionadas amostras dependentes F_x , F_y , F_z , M_z e parâmetro de rugosidade S_a . Para a execução do treinamento e testes utilizou-se a ferramenta “*Automated Neural Network*” do software Statistica. Os testes representam o resultado da simulação das redes anteriormente treinadas. Para um teste futuro visando a validação do treinamento, 3 amostras de cada estratégia de lubrificação foram reservadas aleatoriamente. As 119 amostras restantes foram replicadas por 15 vezes, totalizando 1904 amostras para o treinamento.

4 RESULTADOS

Neste tópico estão listados os resultados das medições de rugosidade, dureza, forças de usinagem, torque, desgaste do inserto de corte e o resultado teórico e CFD do tempo de esvaziamento da válvula no trajeto de nitrogênio líquido. O comportamento das misturas de diferentes fluidos na usinagem e a abordagem utilizando nitrogênio líquido também foi estudado. A influência dos parâmetros de usinagem em relação à rugosidade, forças de usinagem e momento torsor são comentados.

O planejamento fatorial proposto serviu de base para a obtenção destes dados e resultados. Tomaram-se por base três variáveis independentes (v_c , f e a_p) para execução da análise estatística. A análise dos dados de usinagem foi realizada por meio do software Statistica versão 8.0. Redes neurais artificiais foram criadas e comparadas com o procedimento estatístico.

4.1 Dispositivo de mistura: concepção e comportamento

4.1.1 Curva característica da vazão do dispositivo de mistura

A Tabela 4.1 indica os tempos teóricos de esvaziamento relacionado a cada porcentagem de abertura, calculados pelo procedimento descrito no capítulo anterior.

Tabela 4.1 – Medições de área de abertura e dados de tempo de esvaziamento teóricos calculados

% de abertura	Área de saída (m ²)	Tempo de esvaziamento teórico (s)
10	0,00001181	5,6
30	0,00004702	2,7
50	0,0000763	1,7
70	0,00010943	1,2
100	0,00016633	0,8

Fonte: Dados do Autor.

4.1.2 Escoamento de fluido do reservatório do dispositivo de mistura sob ação do campo gravitacional.

A medição experimental do esvaziamento do reservatório para diferentes aberturas foi obtida pelo mapeamento de tempo por meio de um sensor e confirmada por um cronômetro para cada abertura. A plataforma IoT - Ubidots foi utilizada. A Tabela 4.2 mostra os valores.

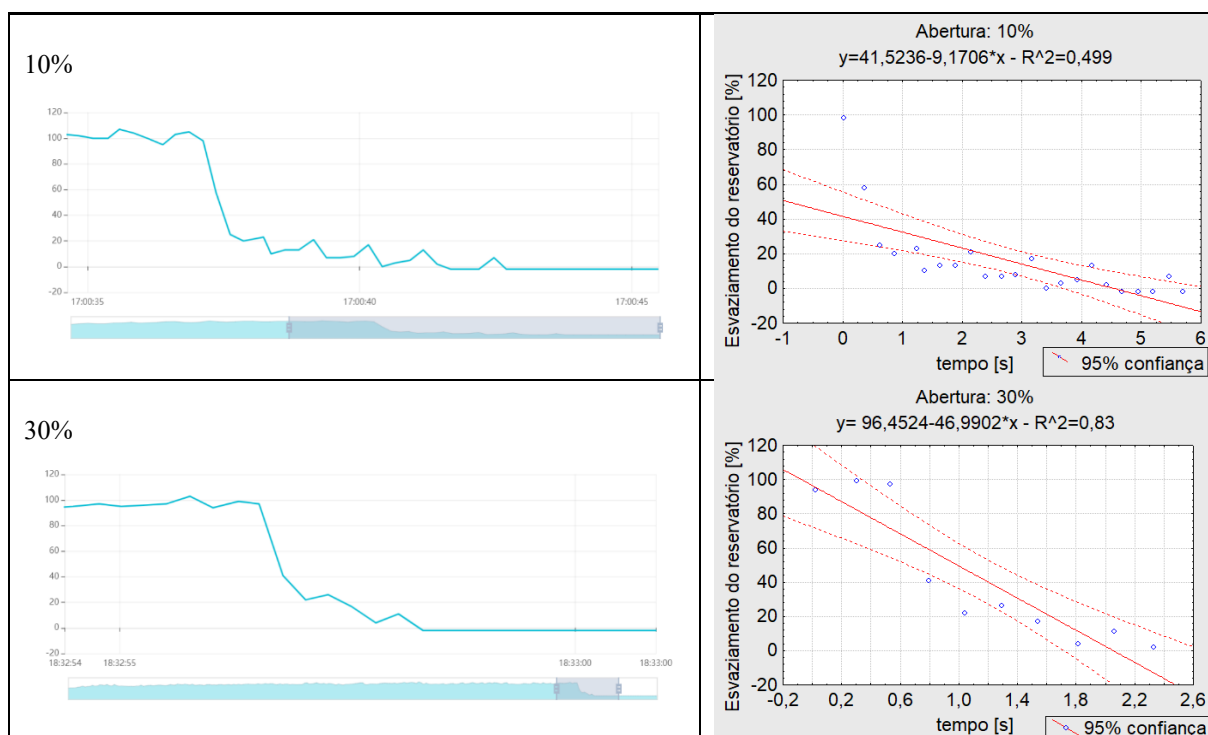
Tabela 4.2 - Valores experimentais de esvaziamento do reservatório

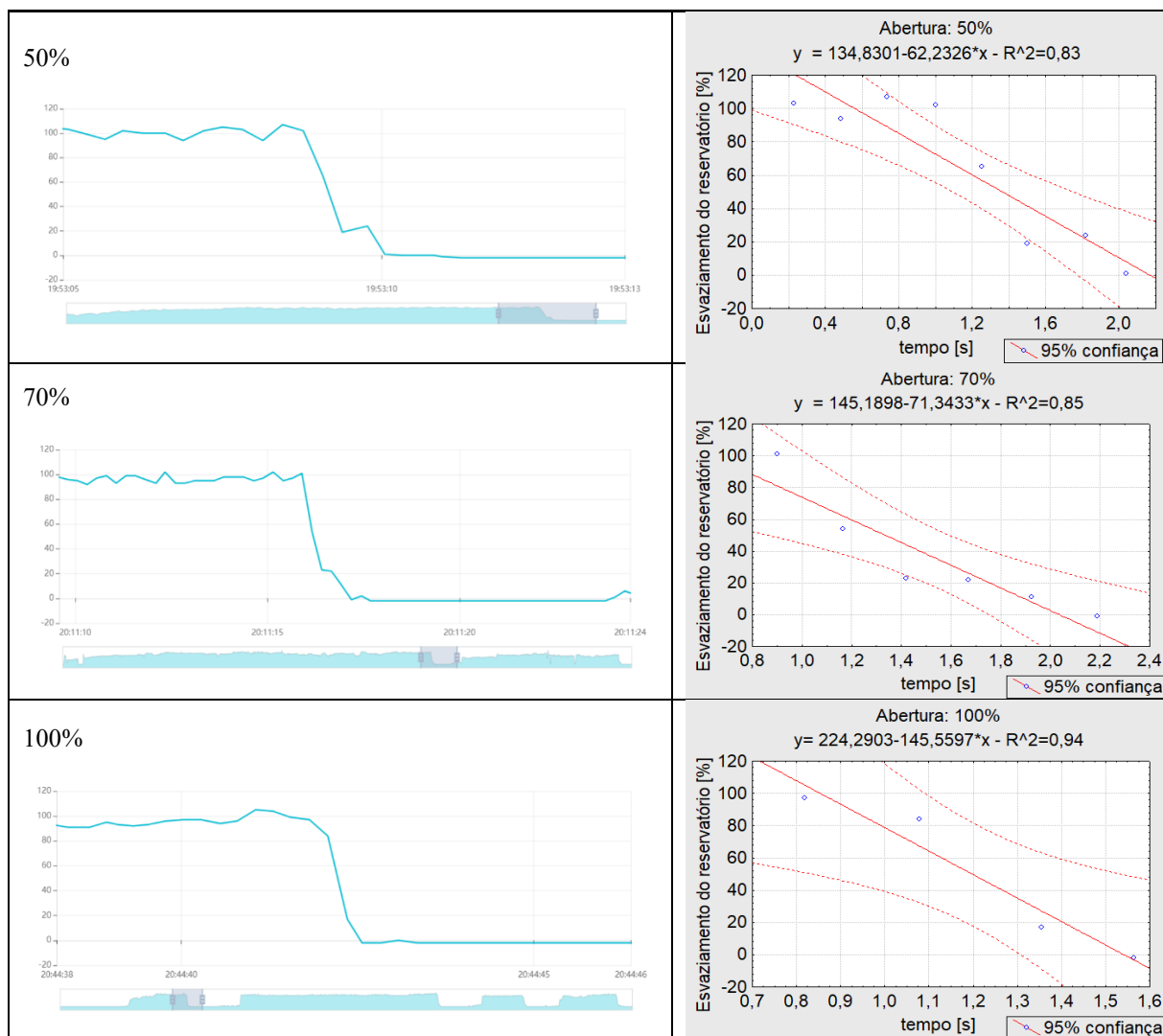
% de abertura	Tempo de esvaziamento medido (s)
10	5,7
30	2,4
50	1,8
70	1,3
100	1,0

Fonte: Dados do Autor.

Os gráficos do esvaziamento do reservatório em função do tempo e sua respectiva regressão são mostrados na Figura 4.1 respectivamente para 10%, 30%, 50%, 70% e 100%.

Figura 4.1 - Gráficos das porcentagens de aberturas mapeadas pelo sensor e respectiva regressão linear

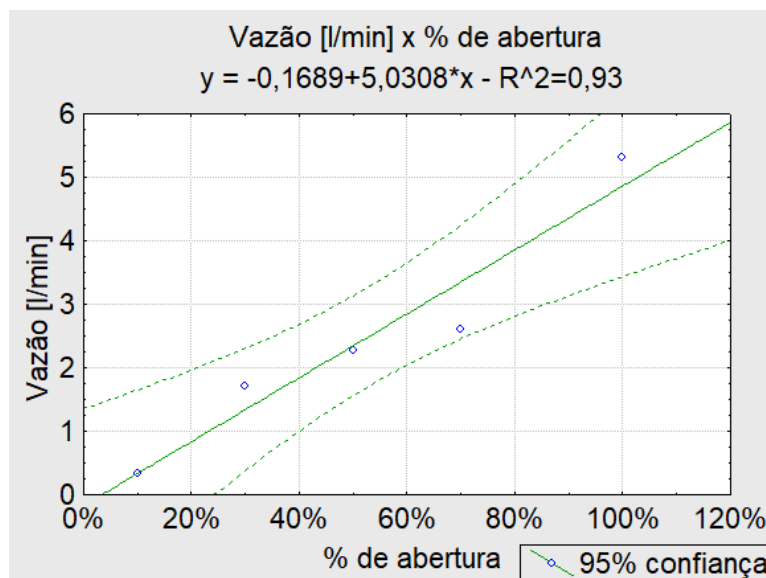




Fonte: Dados do autor.

A curva característica de vazão para o dispositivo é ilustrada na Figura 4.2. Os valores de vazão foram convertidos para litros/minuto.

Figura 4.2 – Curva característica de vazão do dispositivo de mistura fabricado



Fonte: Dados do Autor.

A Tabela 4.3 mostra os dados experimentais oriundos de regressão linear.

Tabela 4.3 - Dados experimentais do escoamento de fluido

% de abertura	Vazão [%/s]	Vazão [l/min]
10	9,17	0,33
30	46,99	1,71
50	62,23	2,27
70	71,34	2,60
100	145,56	5,31
25	40,16	1,46

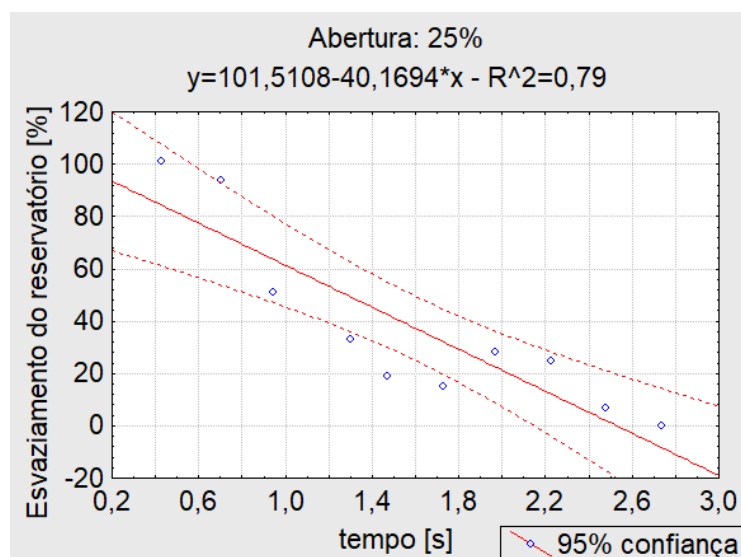
Fonte: Dados do autor.

Para validação foi estudada a abertura de 25% do dispositivo. O gráfico é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – (a) Curva para validação do modelo com abertura de 25% adquirido pelo sensor. (b) Regressão linear



(a)



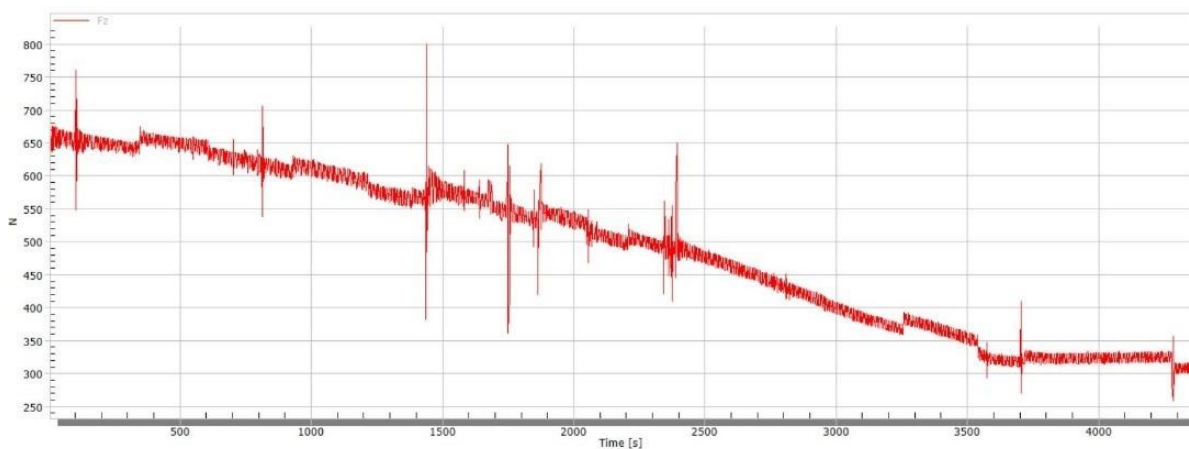
(b)

Fonte: Dados do Autor.

4.1.3 Escoamento de LN_2 do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento

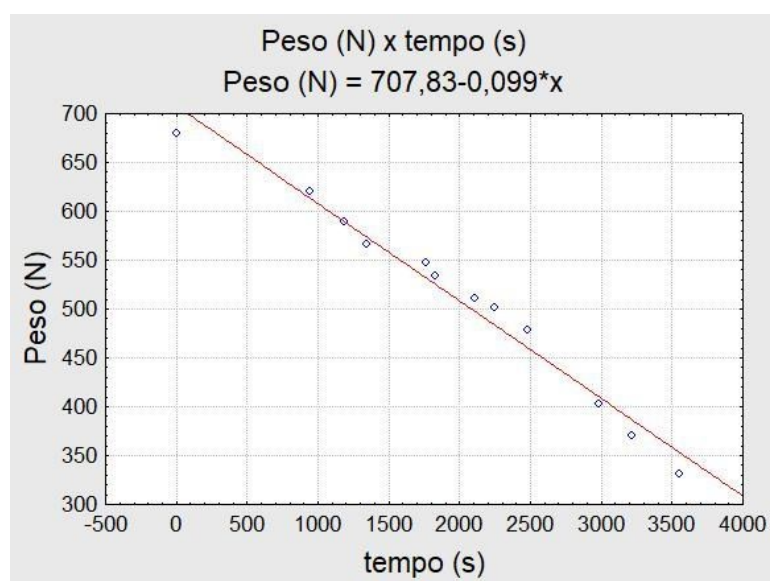
Sob pressão, a condição de fornecimento líquido de nitrogênio líquido foi mensurada por meio de um dinamômetro. A vazão mássica foi calculada. A Figura 4.4 ilustra o esvaziamento do *dewar* de nitrogênio líquido. A Figura 4.5 mostra a interpolação linear realizada para o esvaziamento do tanque. A vazão medida foi de 0,66 l/min.⁷

Figura 4.4 - Esvaziamento do tanque de nitrogênio líquido sob pressão de 6 bar



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.5 – Interpolação linear do esvaziamento do dewar



Fonte: Dados do autor.

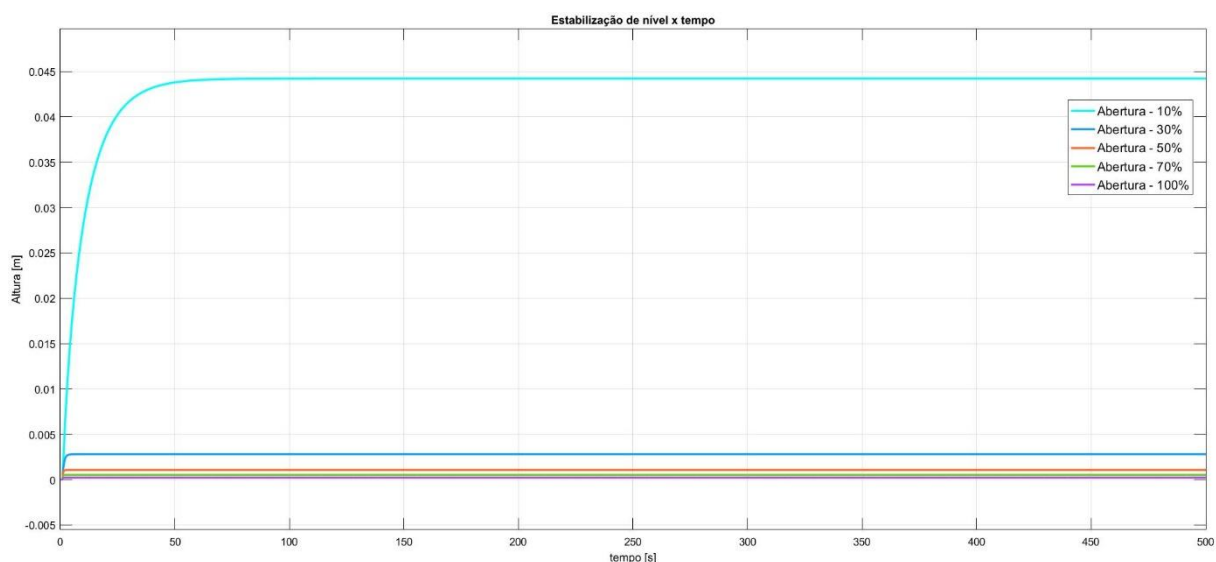
A partir do modelo foram geradas curvas de nível para diferentes aberturas com o intuito de verificar o comportamento do reservatório do dispositivo. A Figura 4.6 ilustra o comportamento do nível com diferentes aberturas. A estabilidade de altura do fluido para cada abertura da agulha é mostrada conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Estabilização para diferentes aberturas

% de abertura	Área de saída (m ²)	Estabilização (m)	Tempo de Estabilização (s)
10	0,00001181	0,0442	115,193
30	0,00004702	0,00278	6,63
50	0,0000763	0,00106	2,88
70	0,00010943	0,00051	2,08
100	0,00016633	0,00022	1,47

Fonte: Dados do autor.

Figura 4.6 – (a) Estabilização de nível em função do tempo



Fonte: Dados do autor.

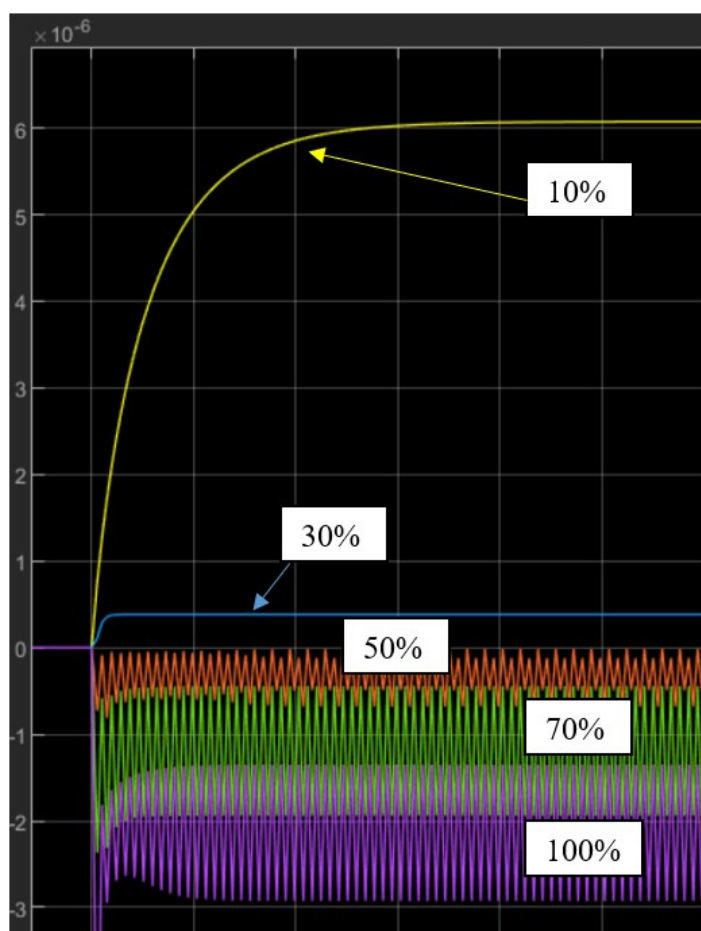
Percebe-se que a abertura de 10% se torna inviável para o reservatório de 5 cm de altura, pois se não houver um controle preciso ou a vazão for alterada ocorre o transbordamento do fluido já que o regime estaria operando no seu limite. Este estudo possibilitou verificar a faixa de atuação do dispositivo quanto à sua abertura para o jato de fluido.

4.1.4 Escoamento do reservatório do dispositivo de mistura sob bombeamento - MQL

A partir do modelo foram geradas curvas de nível para diferentes aberturas com o intuito de verificar o comportamento do reservatório. A Figura 4.7 ilustra o comportamento do nível com diferentes aberturas. O gráfico possui em seu eixo x a unidade de tempo em segundos [s] e no eixo y, o valor da altura do reservatório [m]. Percebe-se que para nenhuma abertura do dispositivo ocorrerá transbordamento, dada a pequena quantidade de óleo utilizada na

abordagem MQL. Nota-se que existe o risco de faltar fluido para as aberturas de 30%, 50%, 70% e 100%. Desta forma, recomenda-se trabalhar nesta abordagem somente com a abertura de 10%.

Figura 4.7 – (a) Estabilização de nível em função do tempo – MQL (Altura (m) x tempo (s))



Fonte: Dados do autor.

4.1.5 Determinação da constante K_v do dispositivo de mistura

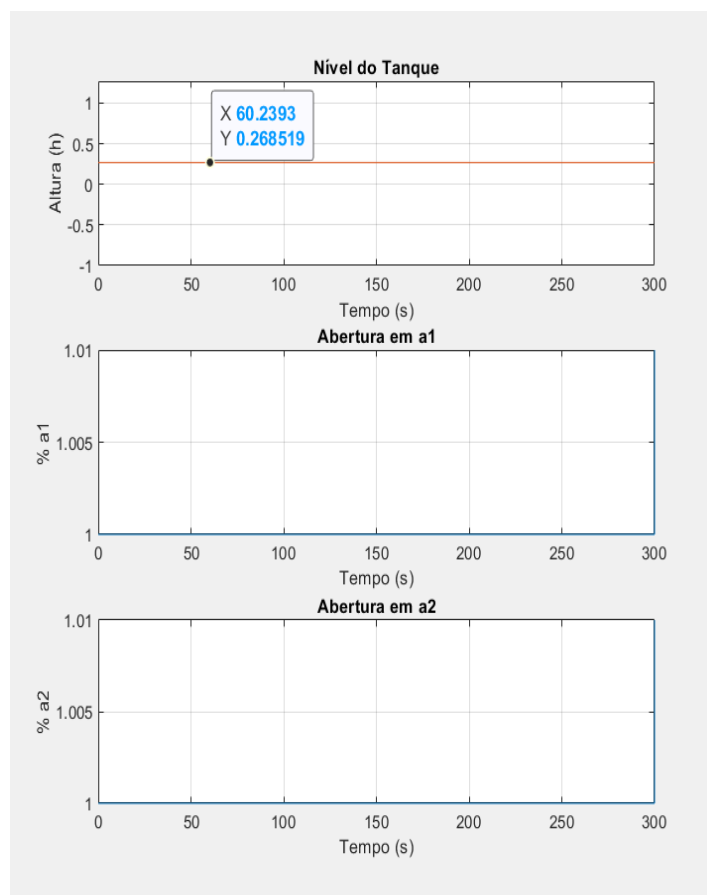
O resultado foi de 0,0002 m³/h para água e 0,00019 m³/h para o Superfluido 3. A Equação 47 foi utilizada para os cálculos. A vazão de 0,000464 m³/h (MQL) foi medida e considerada para a utilização na equação. Considerou-se como perda de pressão o valor de 5 bar (BÜRKERT, 2021b).

$$K_v = Q * \sqrt{\frac{1\text{bar}}{\Delta p} * \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \quad (76)$$

4.1.6 Preenchimento do reservatório com atuação de duas válvulas

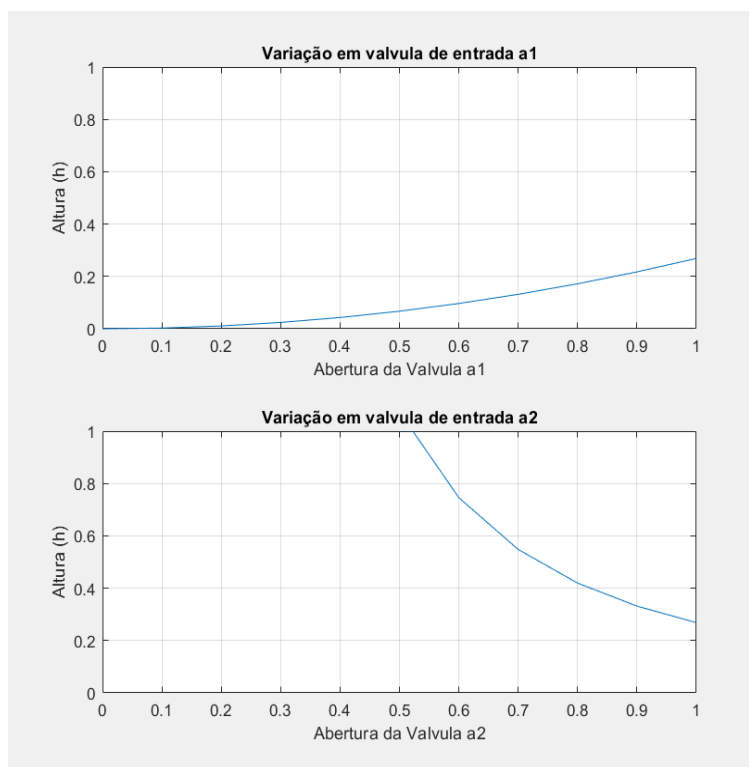
As Figuras 4.8 e 4.9 mostram o resultado da simulação considerando os dados na Tabela 4.5 com a abertura das válvulas fixas (100% de abertura). Observa-se o nivelamento (ponto de equilíbrio) no tanque em 26% da altura do tanque. Se houvesse uma variação na válvula a1, o tanque teria um comportamento parabólico crescente. Se houvesse uma variação em a2, o tanque teria um comportamento decrescente. Para complementar a análise, simulou-se a abordagem com a válvula a1 aberta em 50%. O resultado está ilustrado na Figura 4.10. Observa-se que a altura de equilíbrio passou a ser de 6%.

Figura 4.8 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula



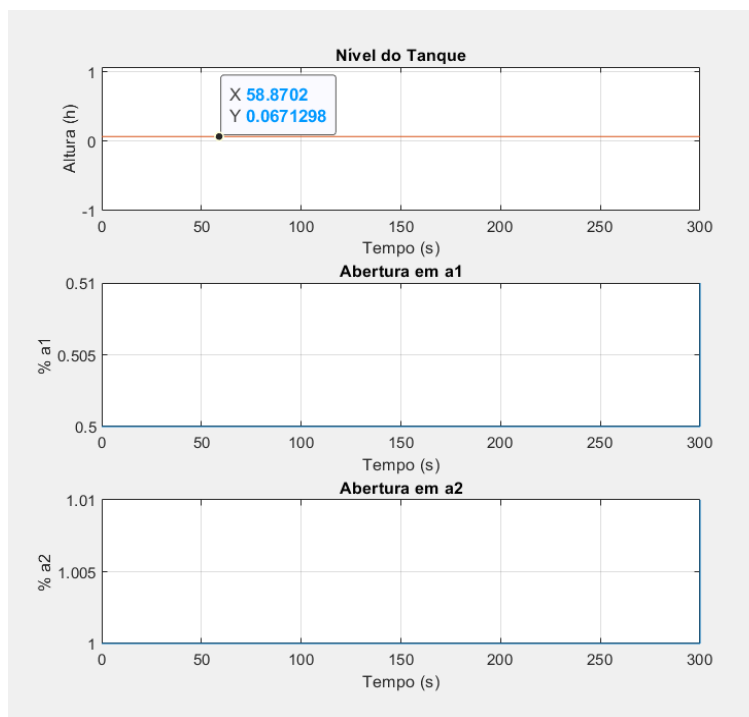
Fonte: Dados do autor.

Figura 4.9 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula



Fonte: Dados do autor.

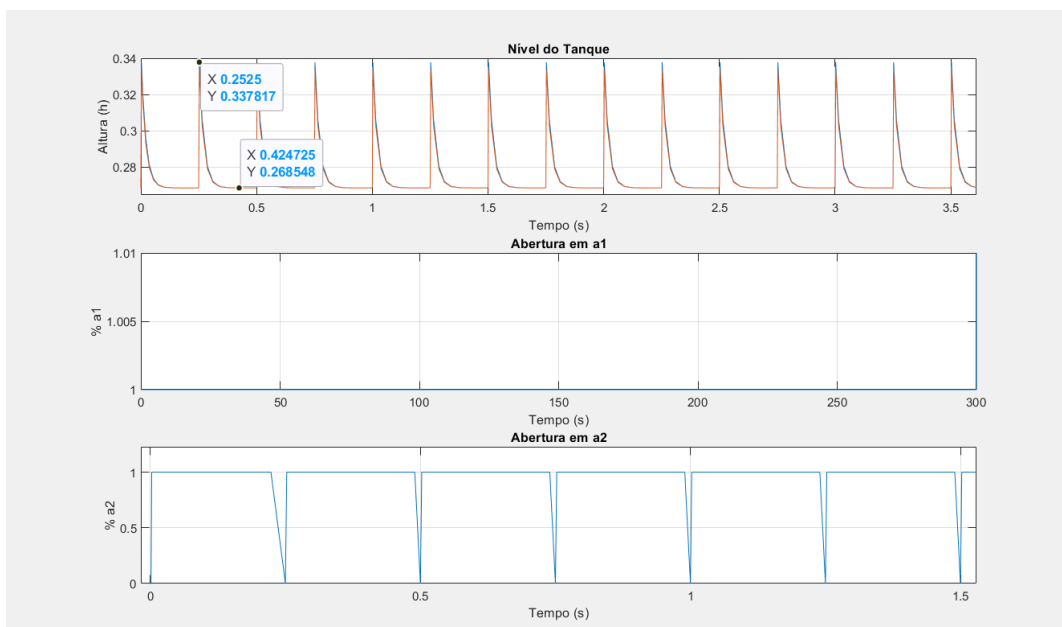
Figura 4.10 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula



Fonte: Dados do autor.

O resultado da simulação da condição cíclica do atuador está ilustrado na Figura 4.11. Nesta pode-se verificar o nível do reservatório entre 27 e 34%, a abertura de 100% da válvula a1 e a movimentação da válvula a2 a cada 250ms.

Figura 4.11 - Comportamento do nível do reservatório e aberturas de válvula



Fonte: Dados do autor.

4.2 Simulações CFD

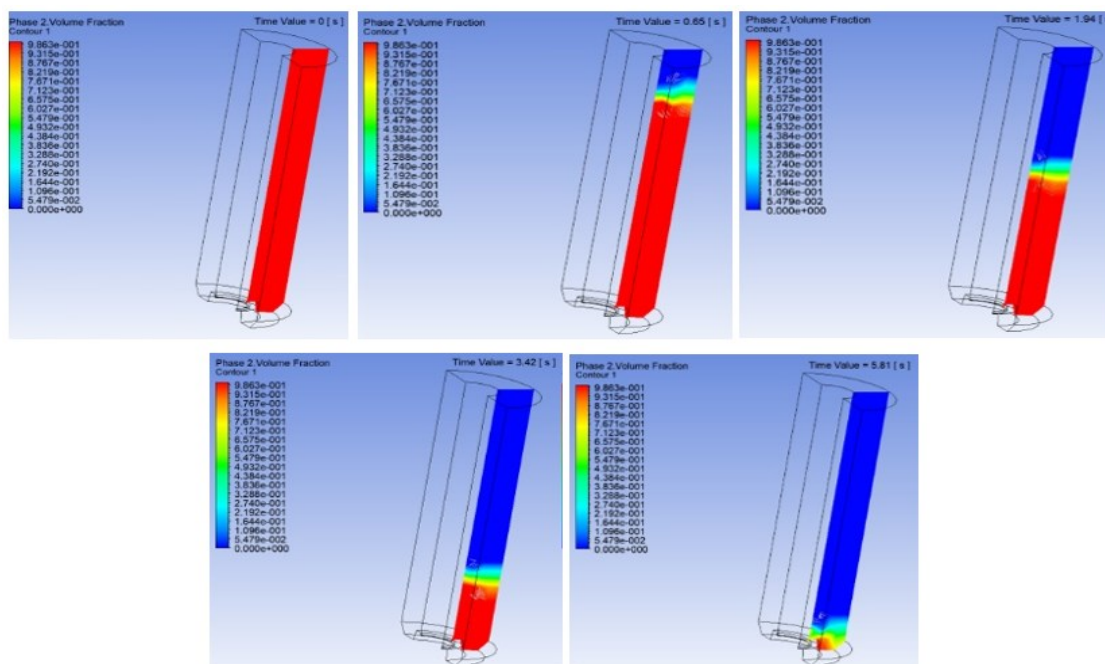
Neste tópico estão os resultados das simulações executadas.

4.2.1 Simulação 1 – Esvaziamento do reservatório

Com a abertura da válvula em 100% o tempo previsto para o esvaziamento do reservatório foi de 5,81 segundos.

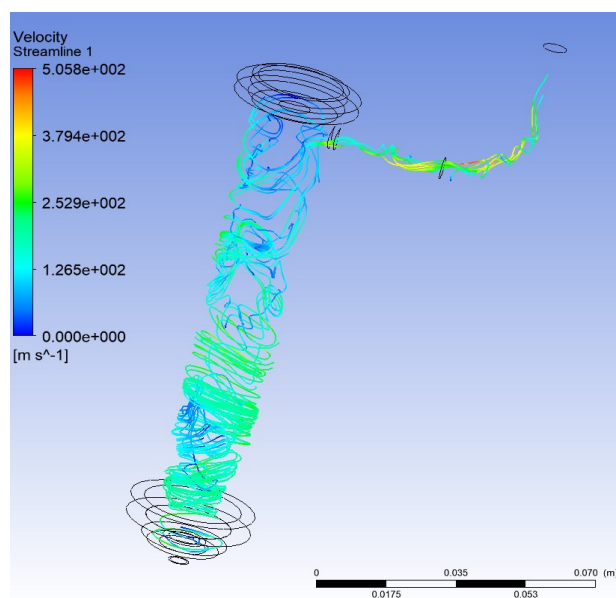
A Figura 4.12 ilustra a simulação do esvaziamento do reservatório para a fração volumétrica de nitrogênio líquido com 100% de abertura.

Figura 4.12 – Estudo de esvaziamento do reservatório



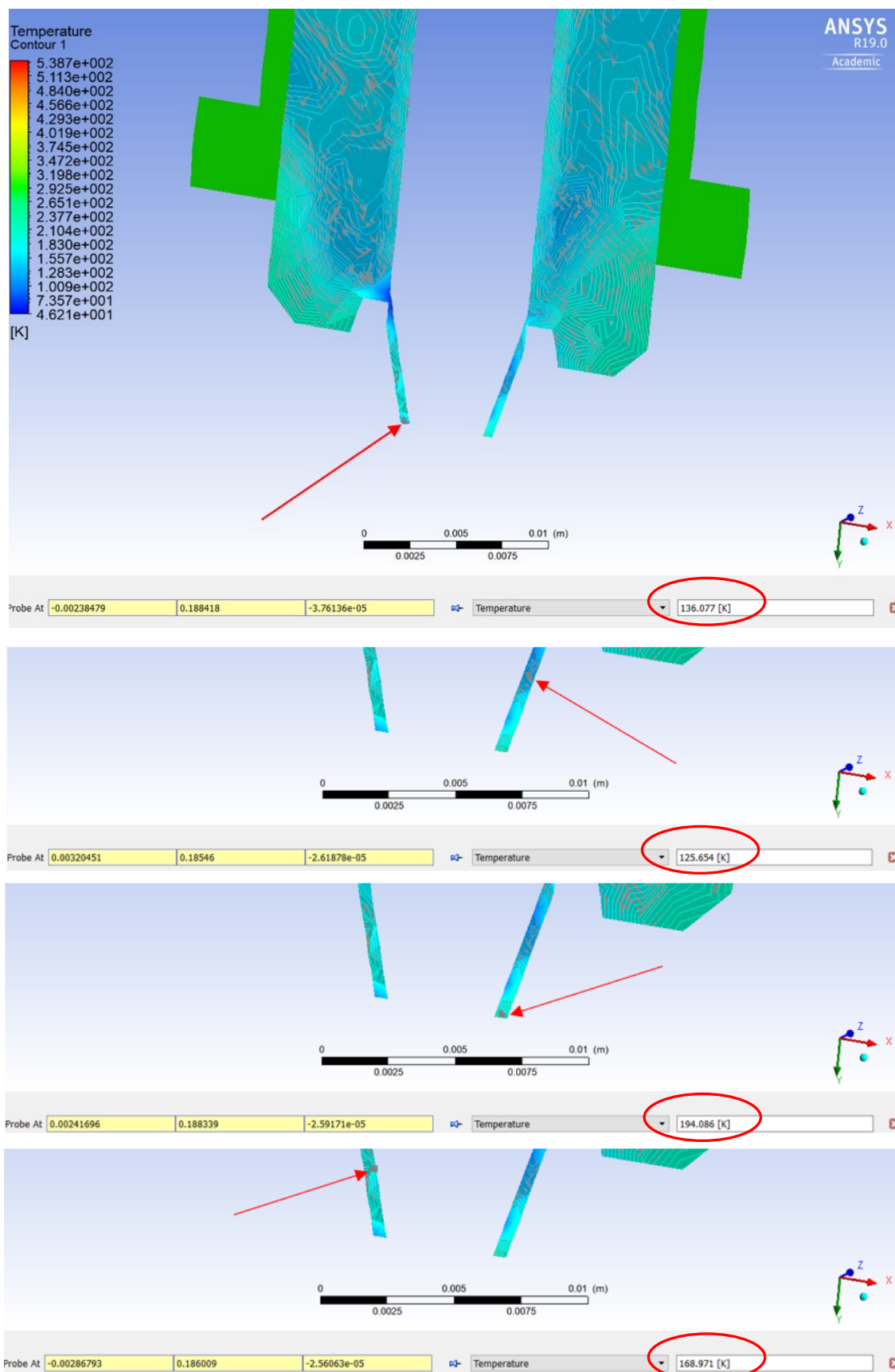
Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.13 ilustra o comportamento da velocidade do fluido no envase e esvaziamento do protótipo e a Figura 4.14 mostra a variação de temperatura local para o domínio fluido. Com o *probe* do software foram tomadas 4 posições diferentes para a estimativa da temperatura do líquido na saída. Com uma temperatura externa de 25°C, o nitrogênio comporta-se com a saída em torno de uma temperatura média de 156 K (-117°C).

Figura 4.13 – Esvaziamento do reservatório de LN₂

Fonte: Dados do autor.

Figura 4.14 - Estimativa da temperatura de saída do nitrogênio líquido

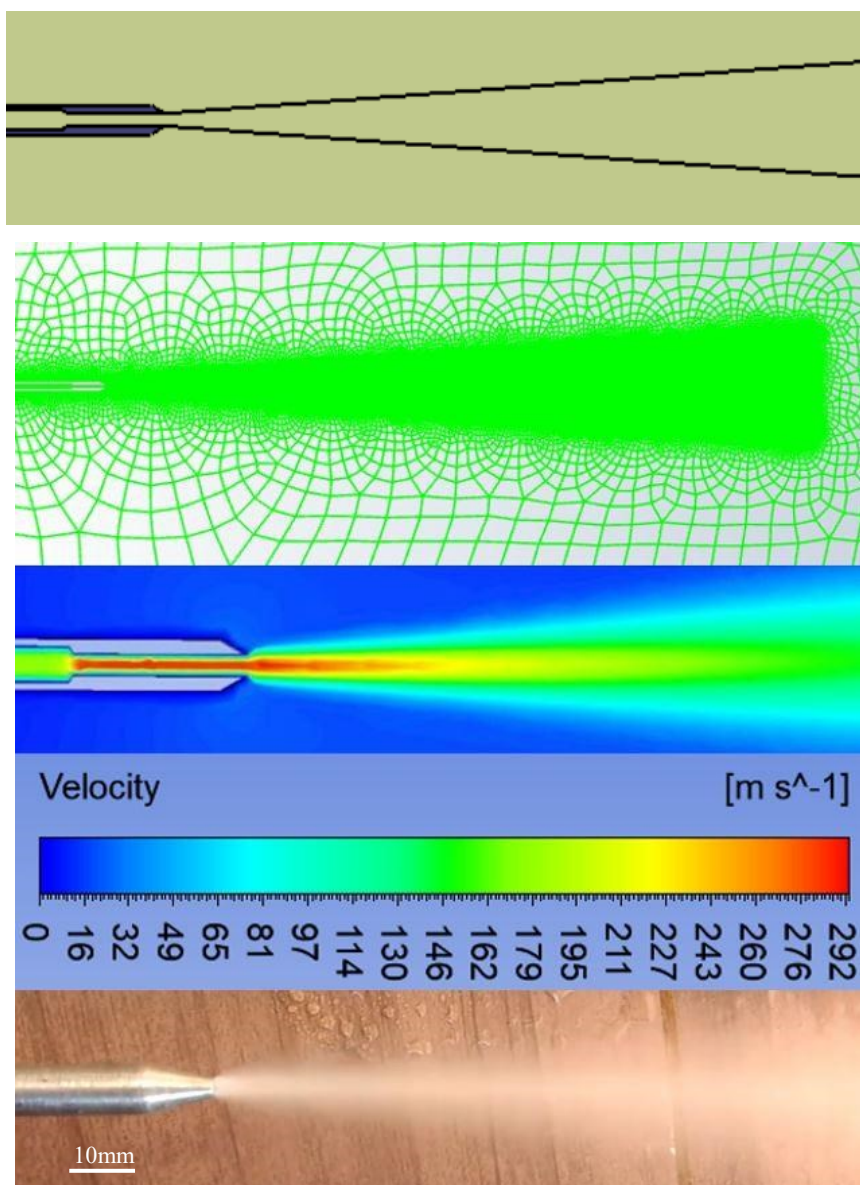


Fonte: Dados do autor.

4.2.2 Simulação 2 – Jato sob pressão

O resultado da criação de malhas e da simulação CFD encontra-se na Figura 4.15. Nota-se uma grande aderência para com a situação real.

Figura 4.15 – Simulação CFD de jato de óleo utilizado



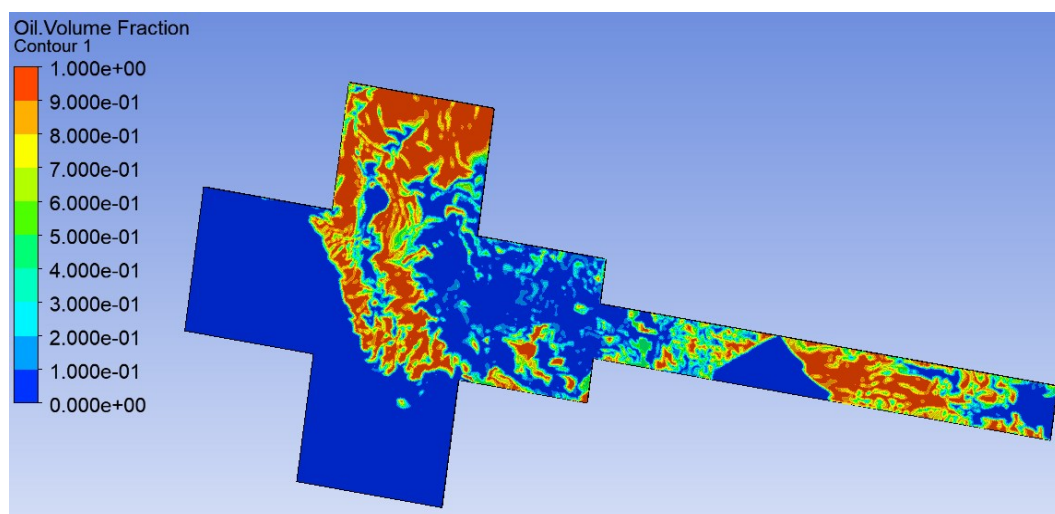
Fonte: Dados do autor.

4.2.3 Simulação 3 – Mistura MQL

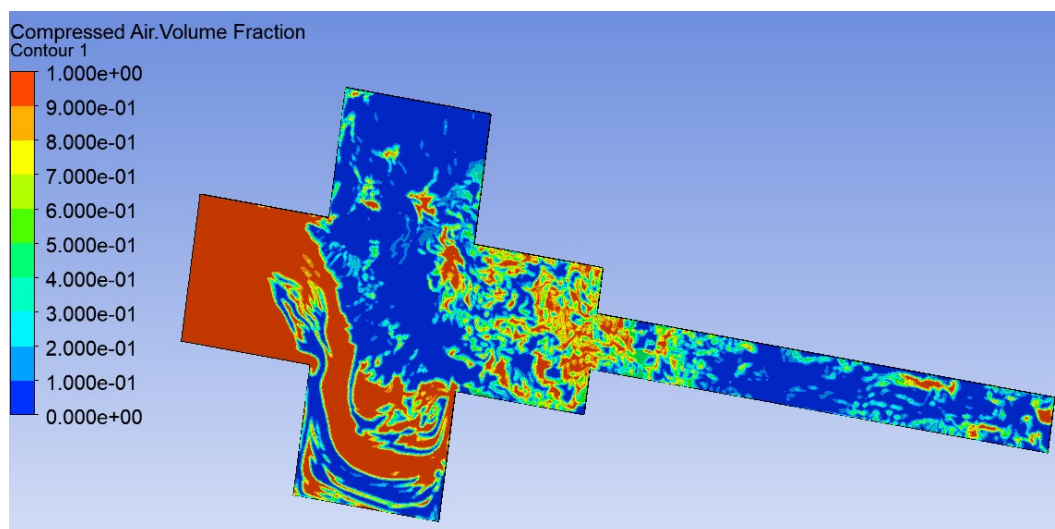
Tendo em vista que na lateral direita da cruzeta só existe recirculação, simulou-se somente o caminho efetivo do fluido. A Figura 4.16 mostra o perfil de mistura dentro da cruzeta.

A fração volumétrica de óleo está ilustrada na Figura 4.16(a). Em 4.16(b) e 4.16(c) são mostradas as frações de ar comprimido e de ar na condição inicial antes da mistura. Desta forma nota-se que a concepção do dispositivo com a mistura sendo efetuada externamente possui vantagem sobre a mistura interna, já que a mistura interna é executada longe do ponto de aplicação e pela densidade diferente dos fluidos, a mistura pode se desfazer no ponto de aplicação do lubrificante.

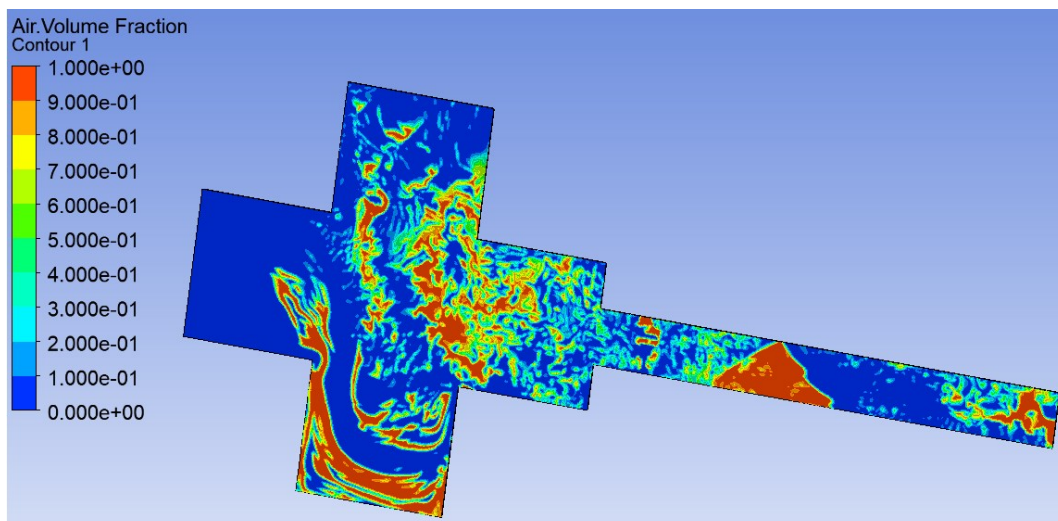
Figura 4.16 – Fração volumétrica de ar, óleo e ar comprimido



(a)



(b)



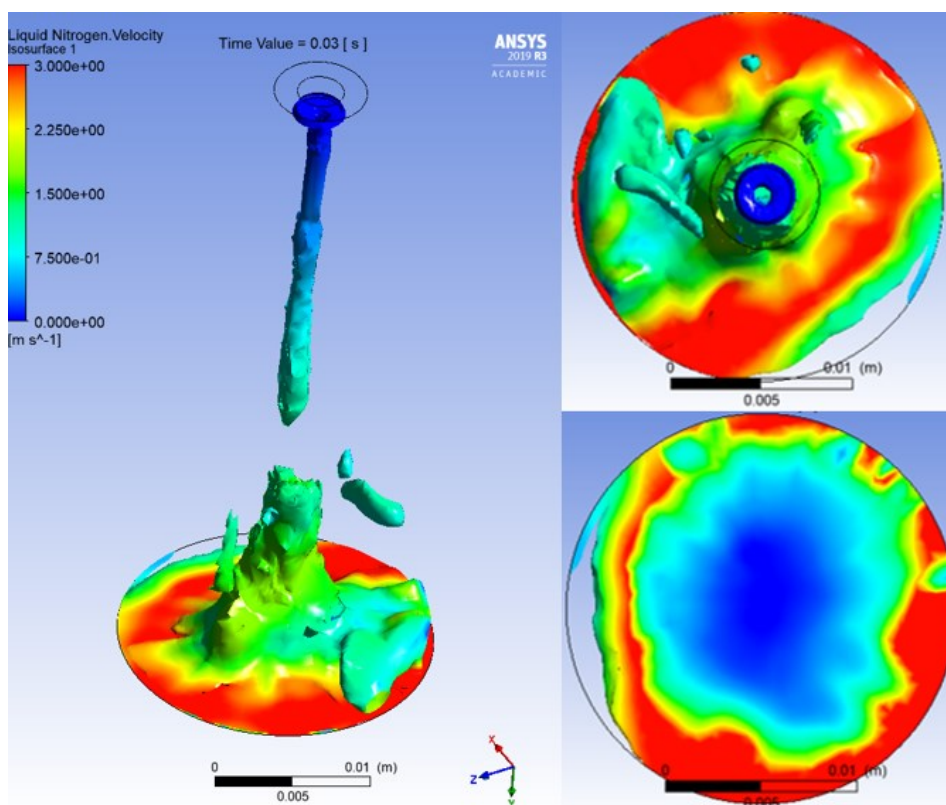
(c)

Fonte: Dados do autor.

4.2.4 Simulação 4 -Gota de nitrogênio sob ação gravitacional

Percebe-se o início do contato da gota de nitrogênio líquido com a superfície em 0,03 segundos. A Figura 4.17 ilustra o comportamento da velocidade de gota em 0,03s.

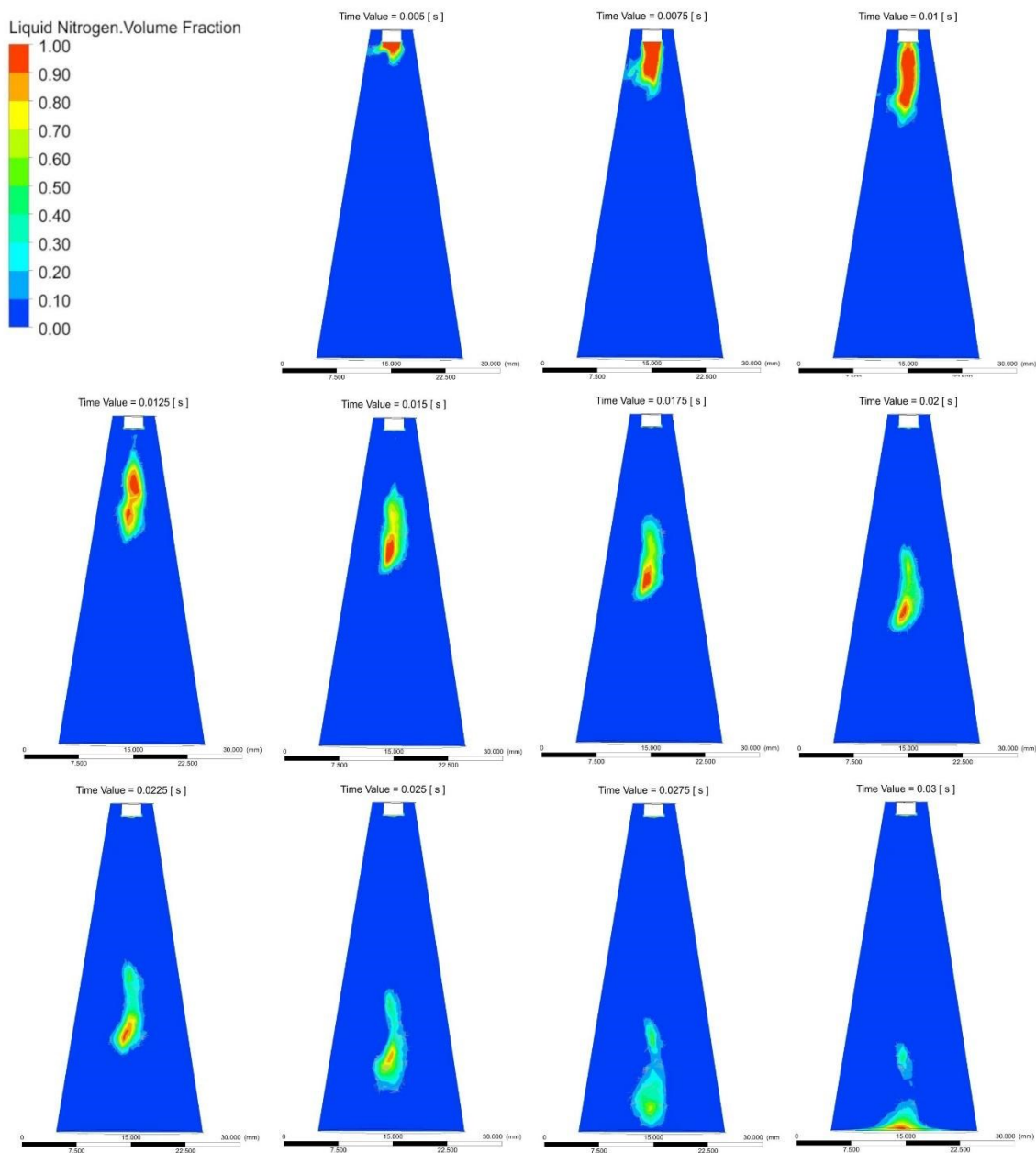
Figura 4.17 - Simulação da velocidade de gota de nitrogênio líquido em 0,03s



Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.18 mostra a evolução da queda da gota com o tempo mapeada pela fração de nitrogênio líquido.

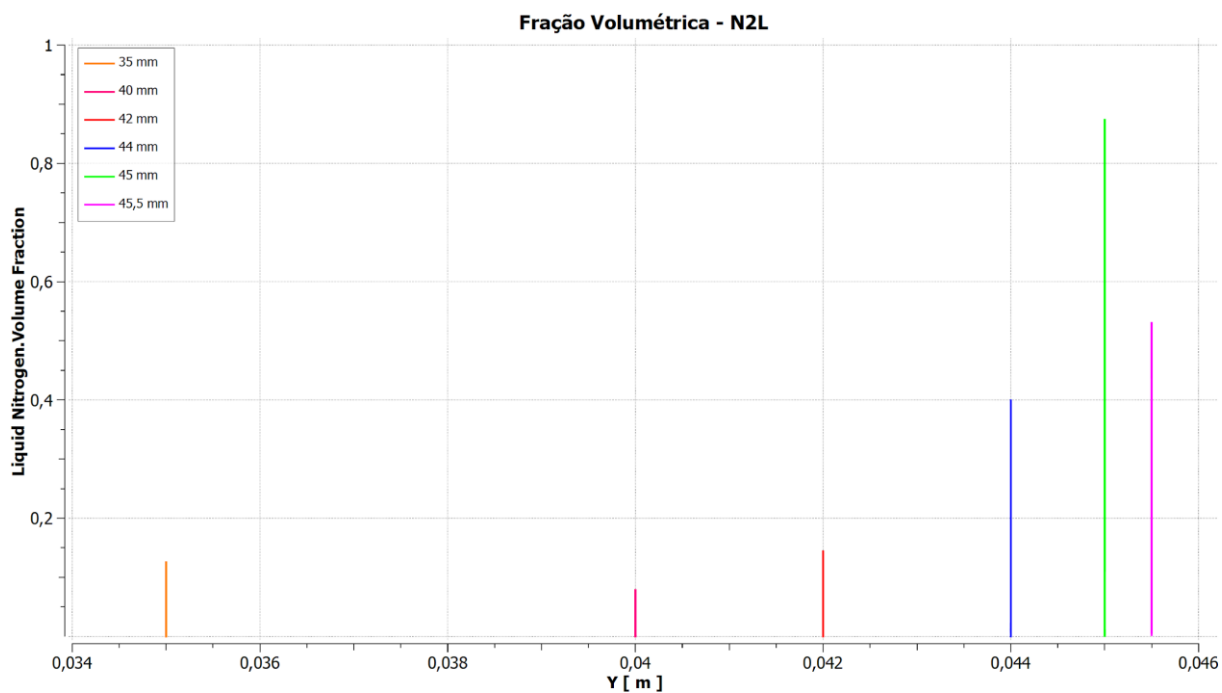
Figura 4.18 – Evolução da gota de nitrogênio ao longo do tempo



Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.19 mostra o gráfico de fração volumétrica de nitrogênio líquido no momento do contato com a superfície. Nota-se que em 0,03s existe 54% de nitrogênio líquido na altura aproximada de 0,5mm em relação a base.

Figura 4.19 - Fração volumétrica de nitrogênio líquido em 0,03s

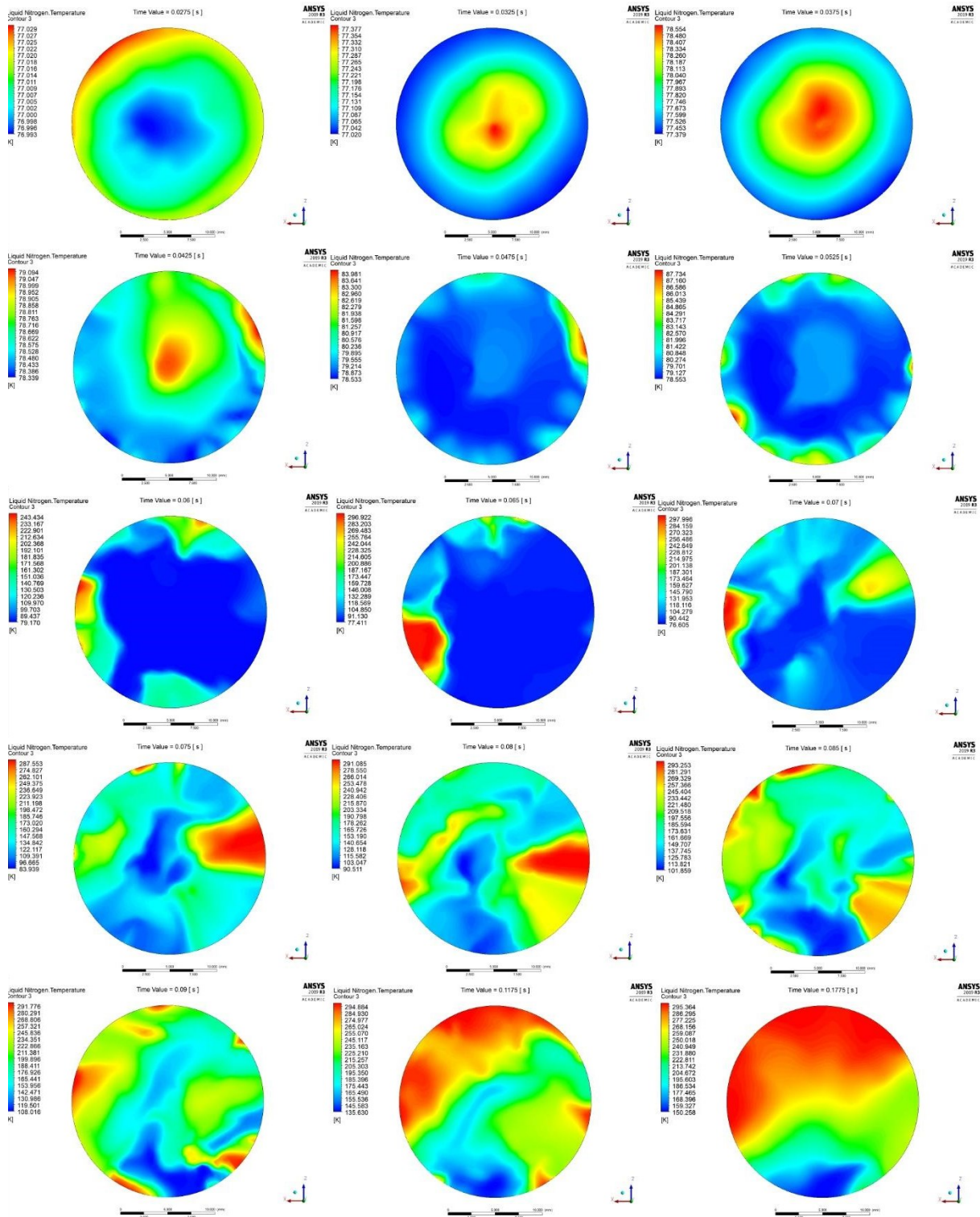


Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.20 mostra o comportamento da gota em contato com o anteparo simulando a base da queda. Os tempos foram ilustrados a partir de 0,0275s até 0,1775 segundos (PASCHOALINOTO et. al, 2021).

É possível observar de forma teórica o comportamento da temperatura do nitrogênio líquido no ponto de contato com a peça.

Figura 4.20 – Comportamento do nitrogênio líquido em contato com anteparo

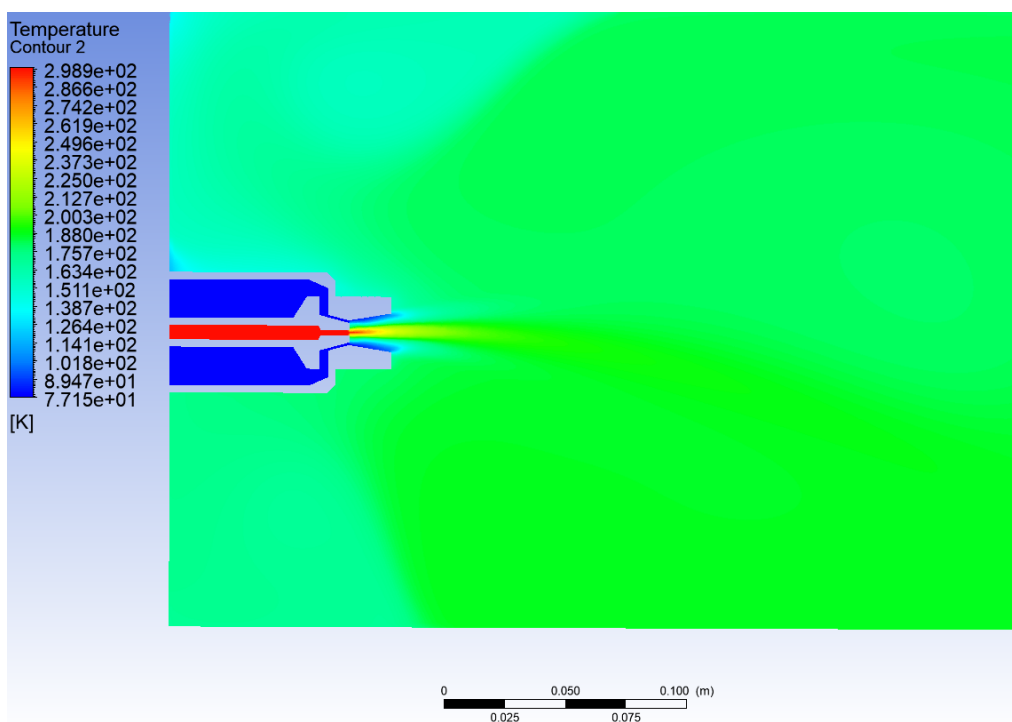


Fonte: Dados do autor.

4.2.5 Simulação 5 - Análise CFD para jato de nitrogênio com a válvula de mistura

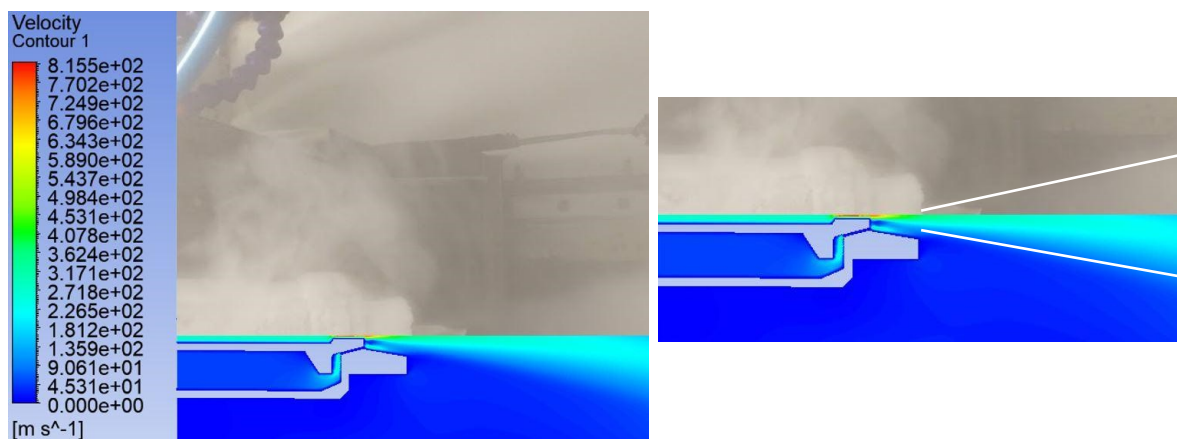
Percebeu-se uma temperatura média de 180 Kelvin considerando a distância de ensaio sob a ação da peça ferramenta. A Figura 4.21 ilustra o contorno de temperatura. O comportamento da velocidade da simulação é comparado à situação real e está ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.21 – Perfil de temperatura com simulação com pressão inicial de 6 bar



Fonte: Dados do autor.

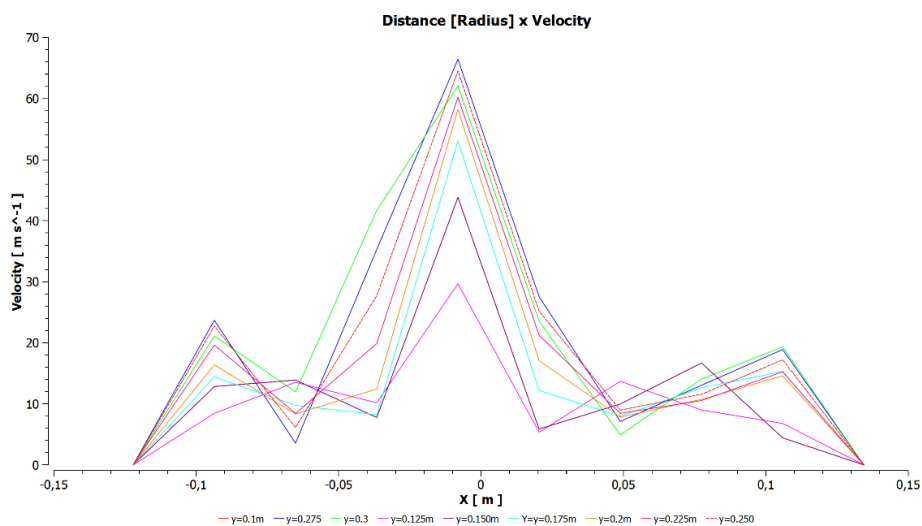
Figura 4.22 – Perfil de velocidade com simulação com pressão inicial de 6 bar



Fonte: Dados do Autor.

A Figura 4.23 mostra o perfil de velocidade obtido em função da distância radial. Observa-se a diminuição de velocidade em função do aumento da distância do bocal central de injeção do nitrogênio líquido.

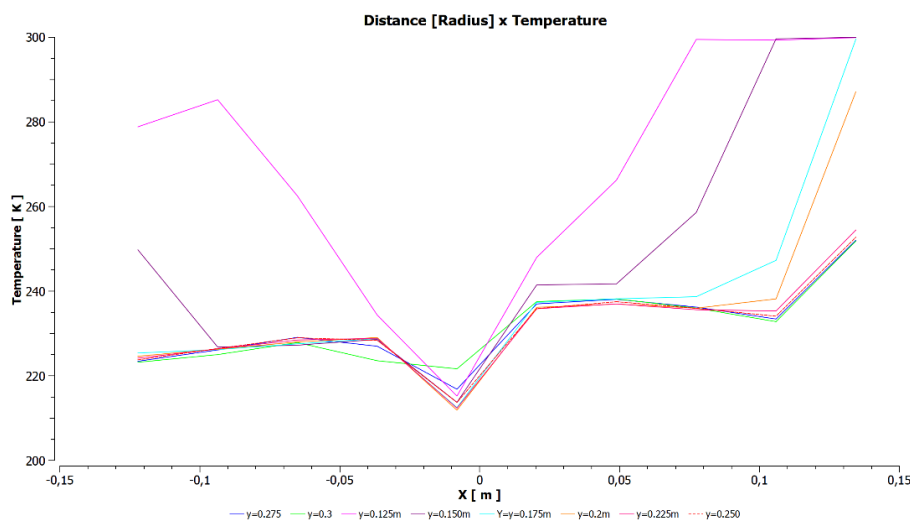
Figura 4.23 – Mapeamento da velocidade em função da distância



Fonte: Dados do autor.

Nota-se na Figura 4.24 o comportamento de aumento da temperatura à medida que se distância do bocal de injeção do dispositivo de mistura.

Figura 4.24 – Mapeamento da temperatura em função da distância



Fonte: Dados do autor.

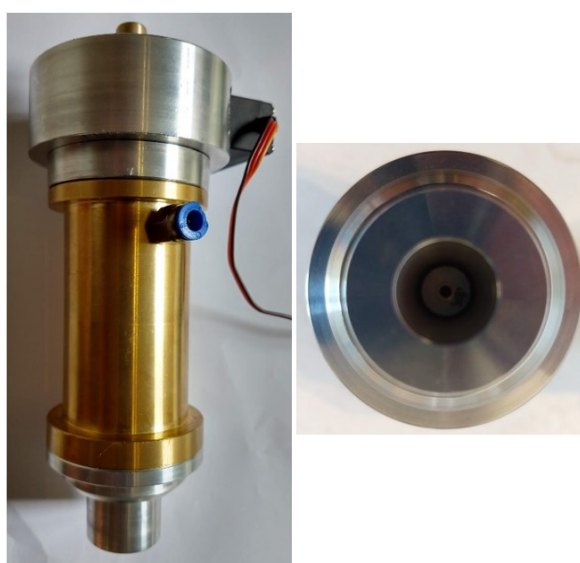
4.3 Construção e montagem dos dispositivos de mistura

A partir da simulação e observação do funcionamento do protótipo foram confeccionados os dispositivos para utilização nos ensaios. A construção destes permite a possibilidade de utilização de duas possibilidades de montagem do sistema. Ambas possibilitam a realização de ciclagem de fornecimento de mistura ou de nitrogênio líquido, minimizando as perdas para a atmosfera com o fornecimento do fluido em menor quantidade e evita o congelamento no bocal quando o nitrogênio líquido é utilizado. Foram propostas duas alturas de reservatório (5 cm e 10 cm) intercambiáveis entre as concepções. A Figura 4.25(a) apresenta as peças para a montagem com a utilização do servomotor. A Figura 4.25(b) mostra o sistema montado. É importante ressaltar que neste dispositivo a mistura é feita externamente.

Figura 4.25 - Concepções do dispositivo. (a) Peças para montagem servomotor. (b) Montagem da concepção utilizando o servomotor



(a)

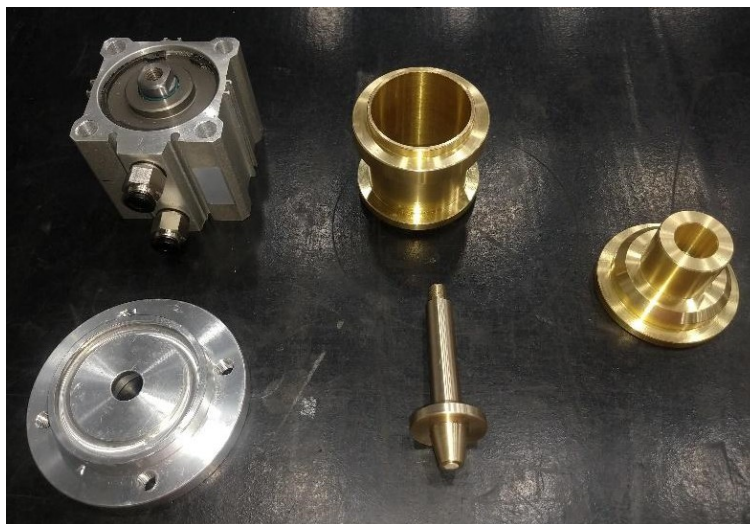


(b)

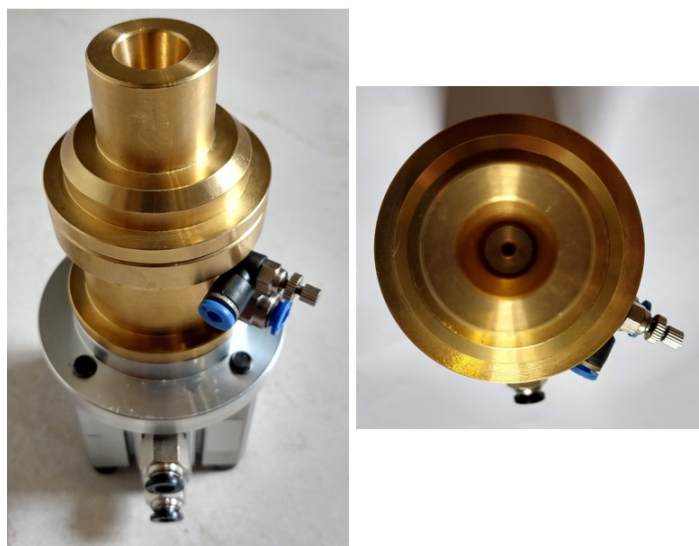
Fonte: Dados do autor.

As Figuras 4.26(a) e 4.26(b) mostram respectivamente as peças para a montagem do dispositivo de mistura com a utilização do sistema pneumático e o sistema montado utilizando o cilindro pneumático.

Figura 4.26 – (a) Peças para montagem do atuador pneumático. (b) Montagem da concepção utilizando cilindro pneumático



(a)



(b)

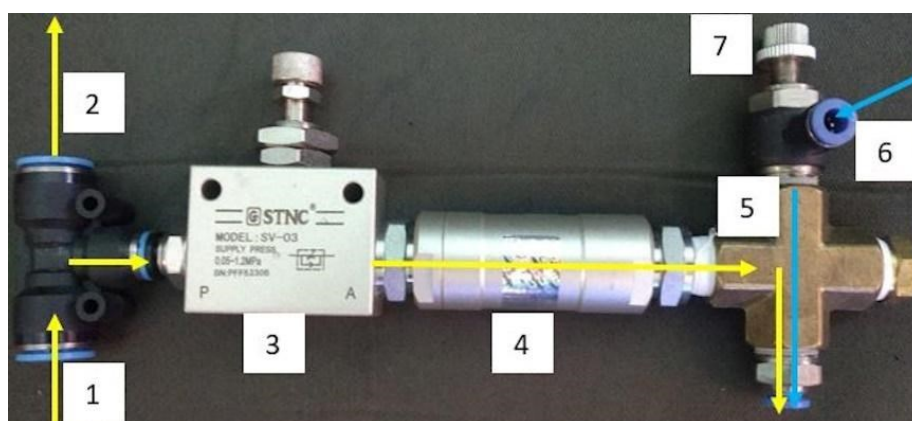
Fonte: Dados do autor.

Com os testes, percebeu-se que o sistema de ciclos com acionamento pneumático possui um atraso e é eficiente para tempos da ordem de 1,0 segundo.

O circuito hidráulico sob ação de bombeamento da válvula MQL final está ilustrado na Figura 4.27 e contém uma válvula de regulagem (3), uma válvula de retenção (4), uma cruzeta

(5), uma válvula de controle para o ar comprimido (7), uma mangueira de retorno de fluido (2), um tanque de combustível e uma agulha. O fluido entra no circuito em 1 e o excedente retorna para o tanque em 2. O ar comprimido tem acesso ao circuito pela entrada (6). A saída da mistura se faz pela parte inferior do item (5). A agulha está conectada na parte inferior do item (5) por meio de uma mangueira e direciona o fluxo da mistura (PASCHOALINOTO, N.W. et al., 2020).

Figura 4.27 - Circuito MQL



Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.28 mostram os componentes utilizados no circuito pneumático da válvula. Um filtro de ar com regulação foi utilizado na entrada do circuito pneumático.

Figura 4.28 – Circuito pneumático para acionamento da válvula 5/2 vias



Fonte: Dados do autor.

Para os ensaios utilizando o dispositivo de mistura desenvolvido, utilizou-se a montagem com o servomotor. Ensaios com óleo, óleo e grafite, com a mistura de Álcool Etílico e CO₂ sólido, grafite + Etanol e com nitrogênio líquido foram efetuados. A Figura 4.29(a) mostra as abordagens com a utilização da proposta MQL e a Figura 4.29(b) ilustra a proposta com a utilização de nitrogênio líquido.

Figura 4.29 – Aplicação da válvula de mistura. (a) MQL. (b) Nitrogênio líquido



(a)

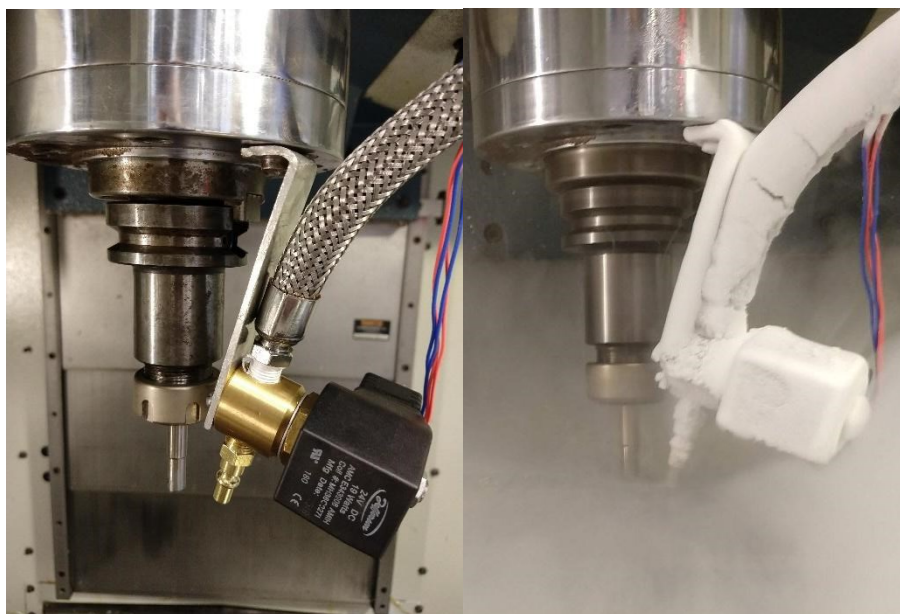


(b)

Fonte: Dados do autor.

Com a utilização da válvula industrial é possível injetar o nitrogênio por meio do direcionamento do dispositivo para a interface ferramenta x peça. A Figura 4.30 mostra a válvula industrial presa no cabeçote da máquina antes e durante a usinagem com nitrogênio líquido. O intervalo de ciclos pode variar a partir de 250 ms conforme testes executados.

Figura 4.30 – Montagem da válvula no cabeçote da máquina. (a) Antes da usinagem. (b) Durante a usinagem



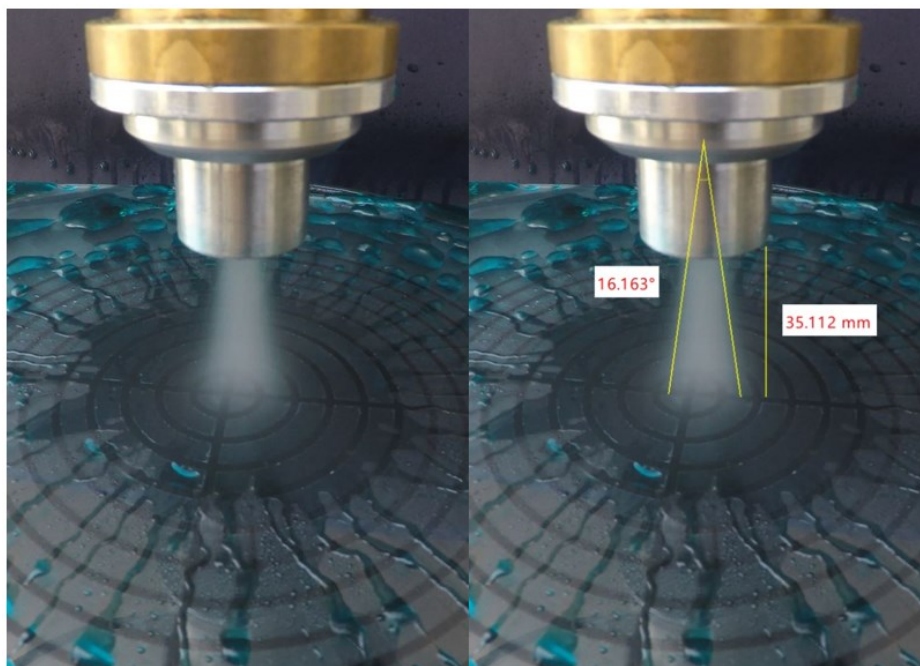
Fonte: Dados do autor.

4.4 Medições e análise dos jatos

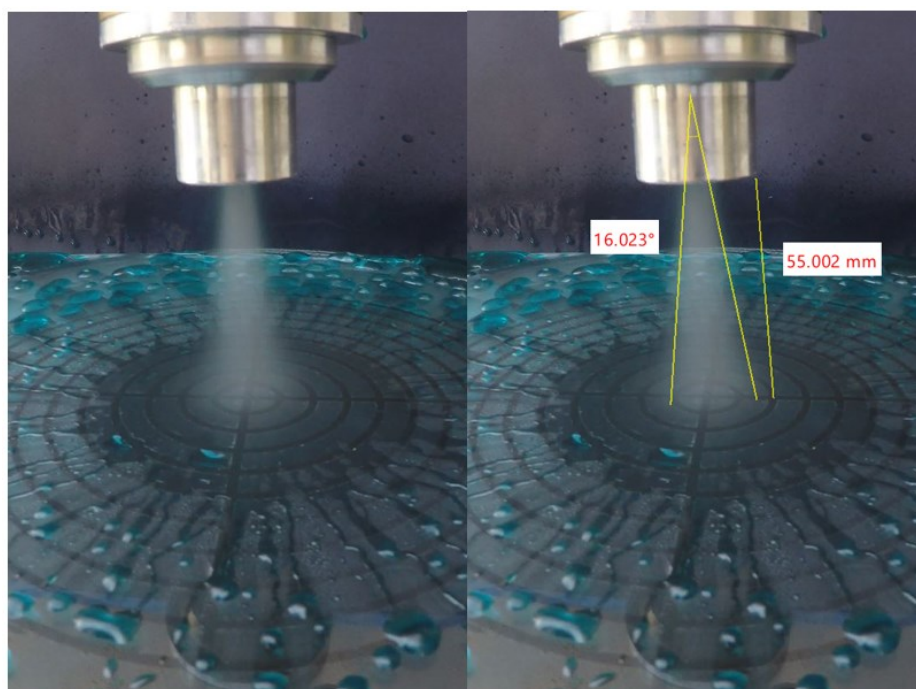
4.4.1 Jato MQL

Para a verificação da abrangência dos jatos MQL, mediu-se o ângulo de abertura e a área de contato para 4 alturas diferentes, utilizando-se os mesmos dados dos ensaios. Para a coleta destes dados contou-se com a filmagem da pulverização em resolução 4K utilizando uma GoPRO Hero 4. Para a medição o software *Camera Measure 2.1.4* da empresa E2ESOFT foi utilizado. A Figura 4.31 ilustra os resultados. O jato médio foi estabelecido em 16,14°.

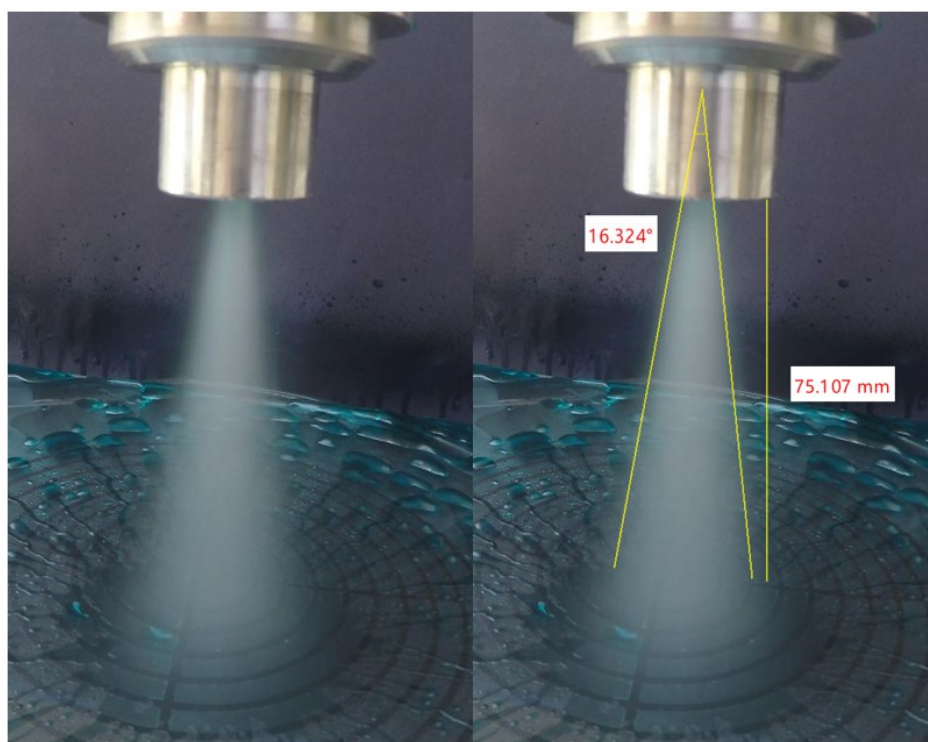
Figura 4.31 – Medição de ângulo em diferentes alturas. (a) Altura de 35 mm. (b) Altura de 55 mm. (c) Altura de 75 mm. (d) Altura de 150 mm



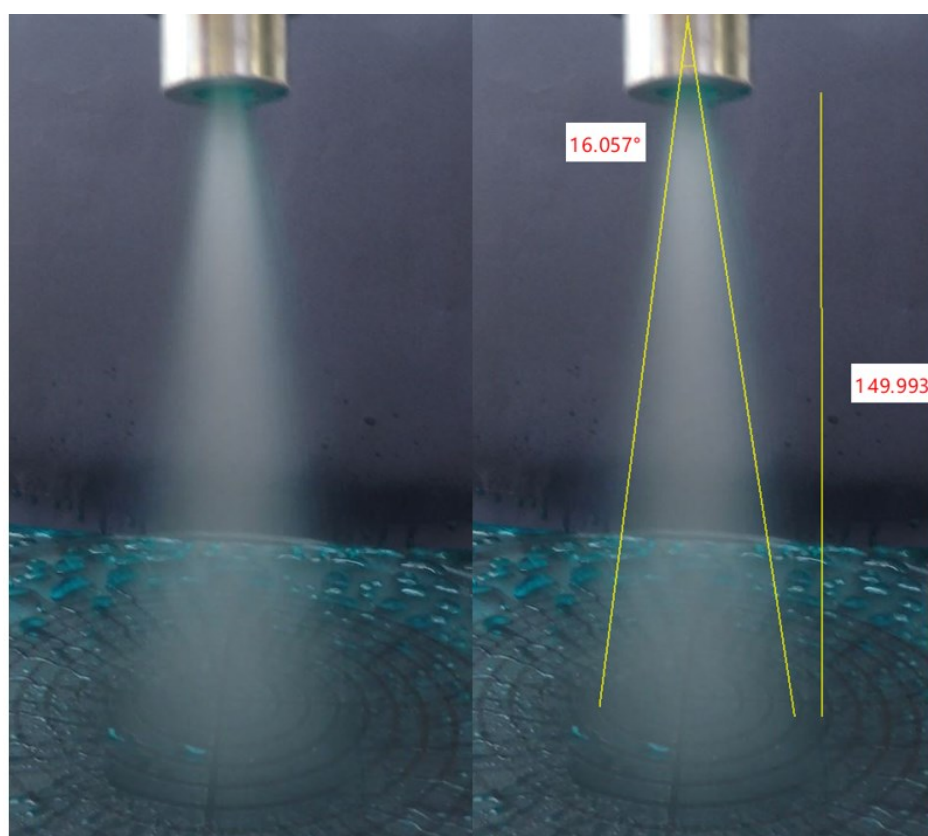
(a)



(b)



(c)

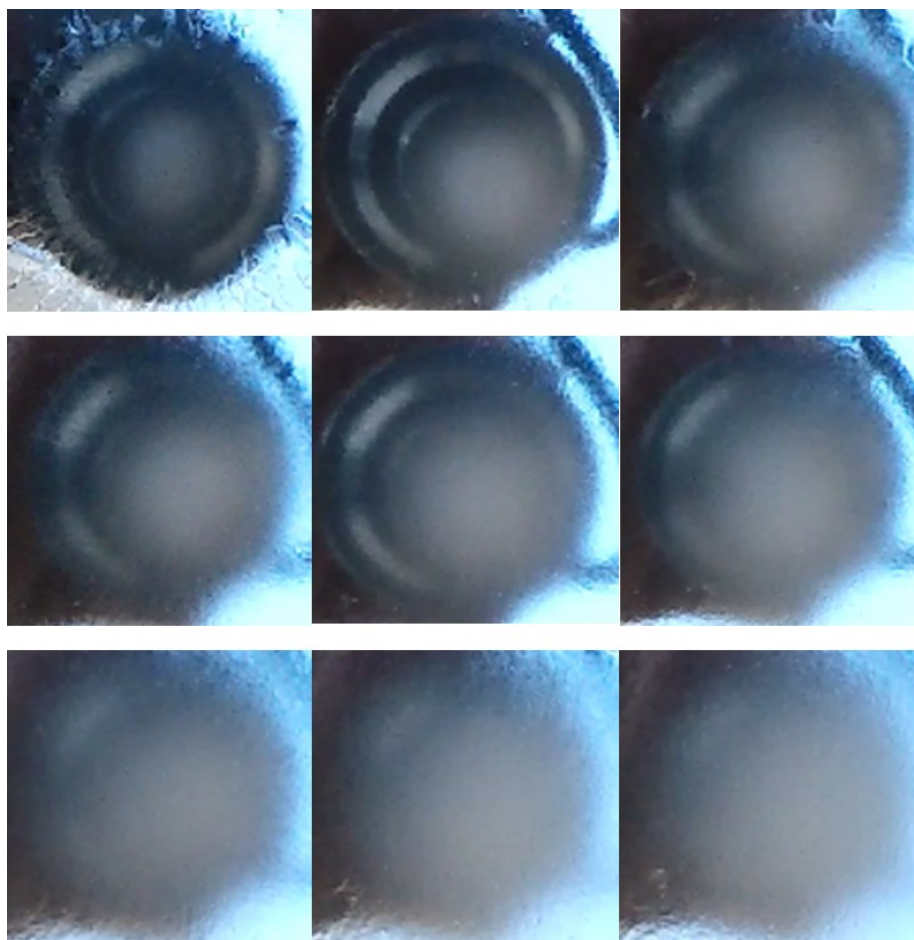


(d)

Fonte: Dados do autor

Para a observação da área de contato contou-se com um anteparo de vidro com a filmagem realizada pelo lado oposto. A Figura 4.32 mostra o comportamento da área de abrangência com o aumento da distância do dispositivo em relação ao anteparo. Observa-se no anteparo o comportamento e área de cobertura conforme distância estudada.

Figura 4.32 – Jatos – área de abrangência utilizando estratégia MQL

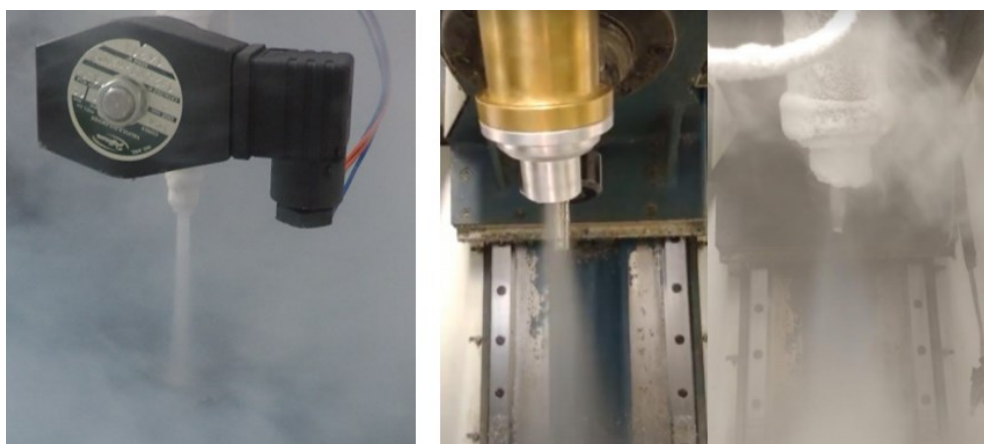


Fonte: Dados do autor.

4.4.2 Jato – Nitrogênio líquido

A abrangência dos jatos com nitrogênio líquido foi avaliada para as duas abordagens partindo de uma altura fixa de 46 mm, dado o sistema de fixação da válvula industrial. Para a válvula desenvolvida a altura da válvula foi mantida para efeito de padronização e comparação. Para a medição da área de abrangência do jato, contou-se com um anteparo opaco negro. As imagens foram adquiridas a partir de uma filmagem em 4K com 15 frames por segundo. A Figura 4.33(a) mostra o jato da válvula industrial. Na Figura 4.33(b) é ilustrado o jato do dispositivo desenvolvido.

Figura 4.33 – Jatos. (a) Válvula industrial com sistema de ciclagem desenvolvido. (b) Dispositivo desenvolvido



(a)

(b)

Fonte: Dados do autor.

Com auxílio do software, medidas da área efetiva do jato e da área molhada foram realizadas. Percebe-se a partir da área molhada o efeito Leidenfrost, devido ao aumento de temperatura nas regiões mais distantes do fluxo central do jato. É importante mencionar que o fluxo central foi direcionado para a interface ferramenta x peça. A Figura 4.34(a) ilustra o efeito do impacto do jato no anteparo e a Figura 4.34(b) mostra comportamento do efeito molhado antes do novo ciclo de injeção.

Figura 4.34 – Área da abrangência do fluido. (a) Área molhada e efeito de Leidenfrost. (b) Área molhada antes do início de nova injeção



(a)

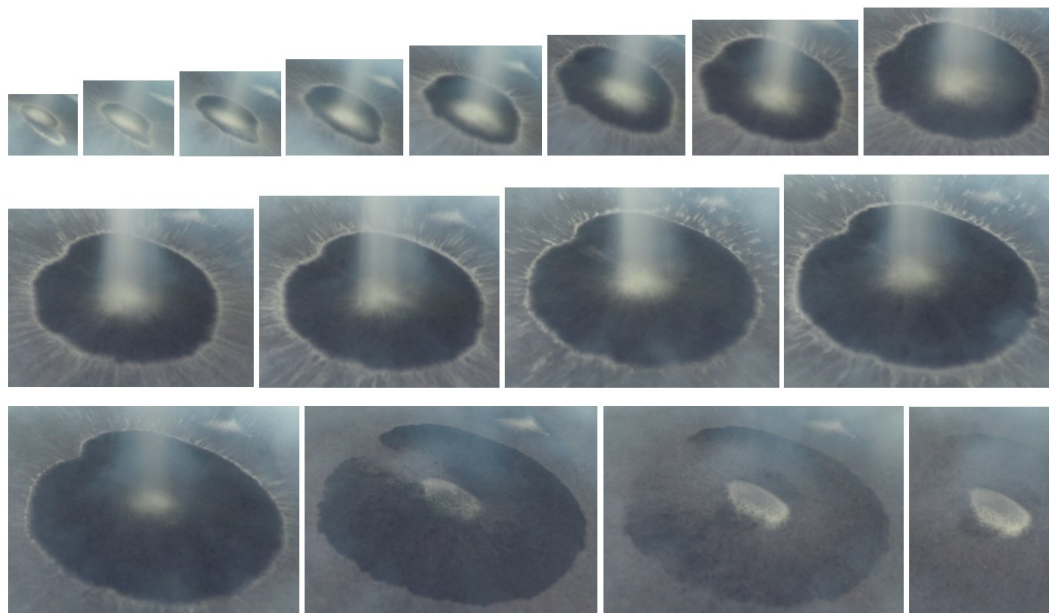
(b)

Fonte: Dados do autor.

As áreas de cobertura do jato de nitrogênio líquido em contato com um anteparo foram observadas. A Figura 4.35 mostra o comportamento para o dispositivo desenvolvido e a Figura

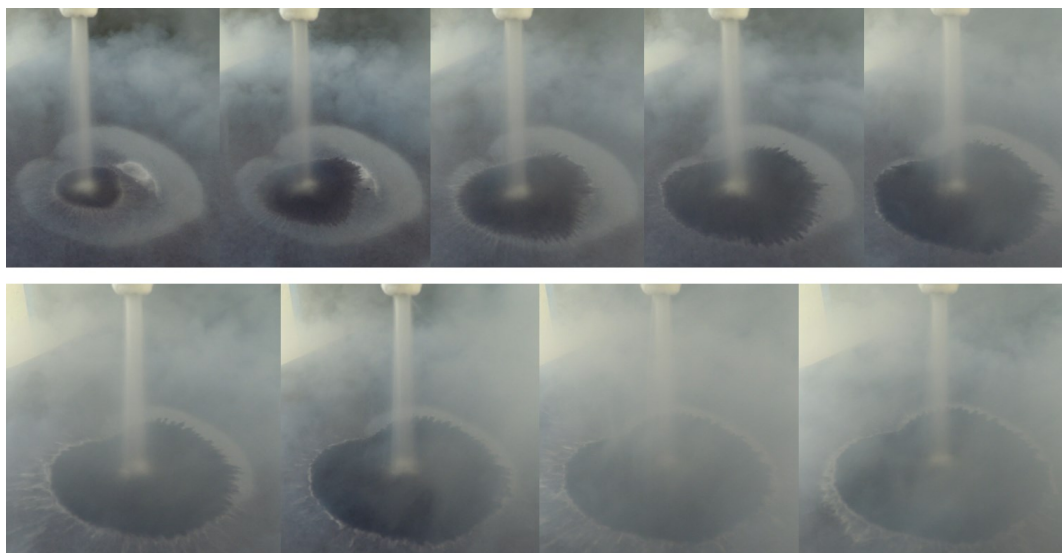
4.36 ilustra o comportamento para a válvula industrial. Nota-se que o jato da válvula industrial é mais concentrado.

Figura 4.35 – Observação de área de cobertura do jato de nitrogênio líquido (1,0s) – Dispositivo desenvolvido



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.36 – Observação da área de cobertura do jato de nitrogênio líquido (0,6s) – Válvula industrial

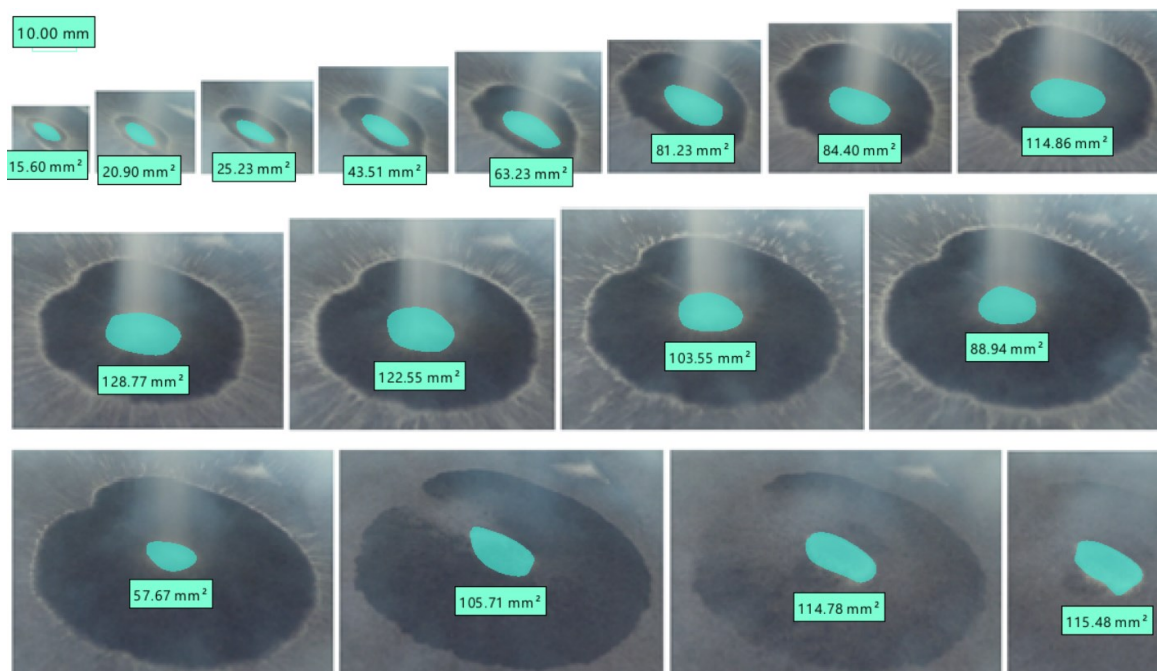


Fonte: Dados do autor.

A partir da filmagem em resolução 4K, imagens foram obtidas e com estas foram observadas as áreas do jato e da área molhada. As Figuras 4.37 e 4.38 ilustram respectivamente a área do jato e a área molhada para a utilização da válvula desenvolvida e as Figuras 4.39 e

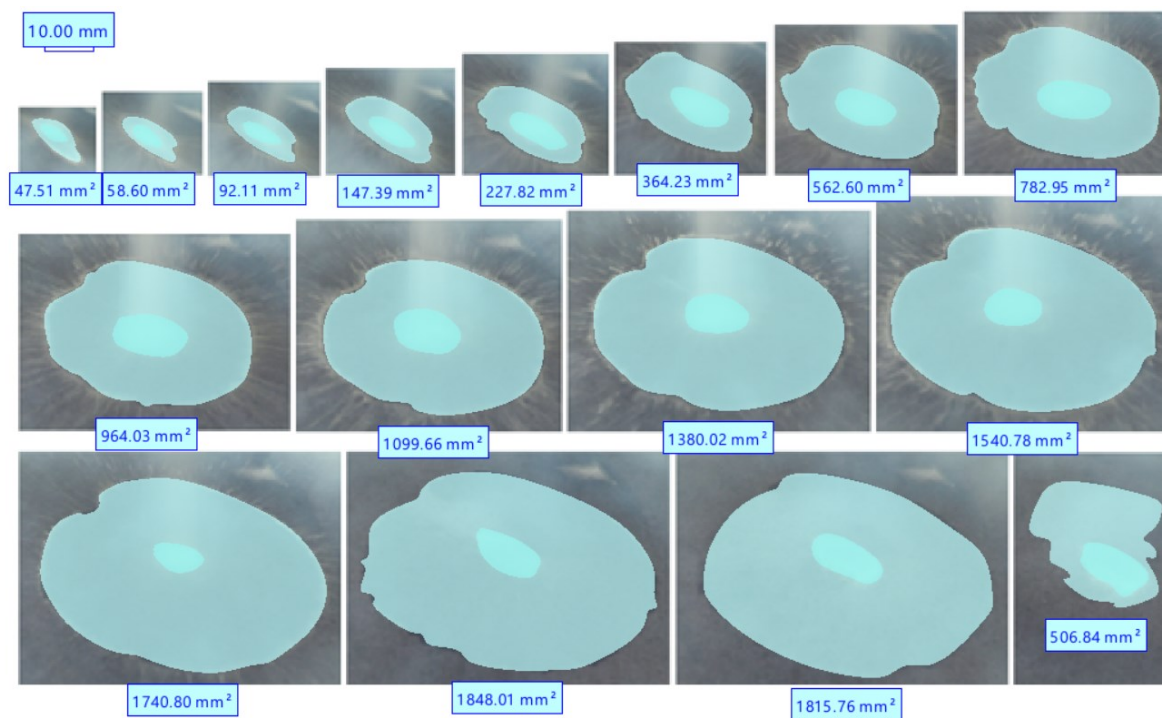
4.40 ilustram respectivamente a área do jato e a área molhada para a utilização da válvula industrial utilizando o sistema eletrônico de injeção por ciclos desenvolvido.

Figura 4.37 – Medição de área de cobertura do jato de nitrogênio líquido – Dispositivo desenvolvido



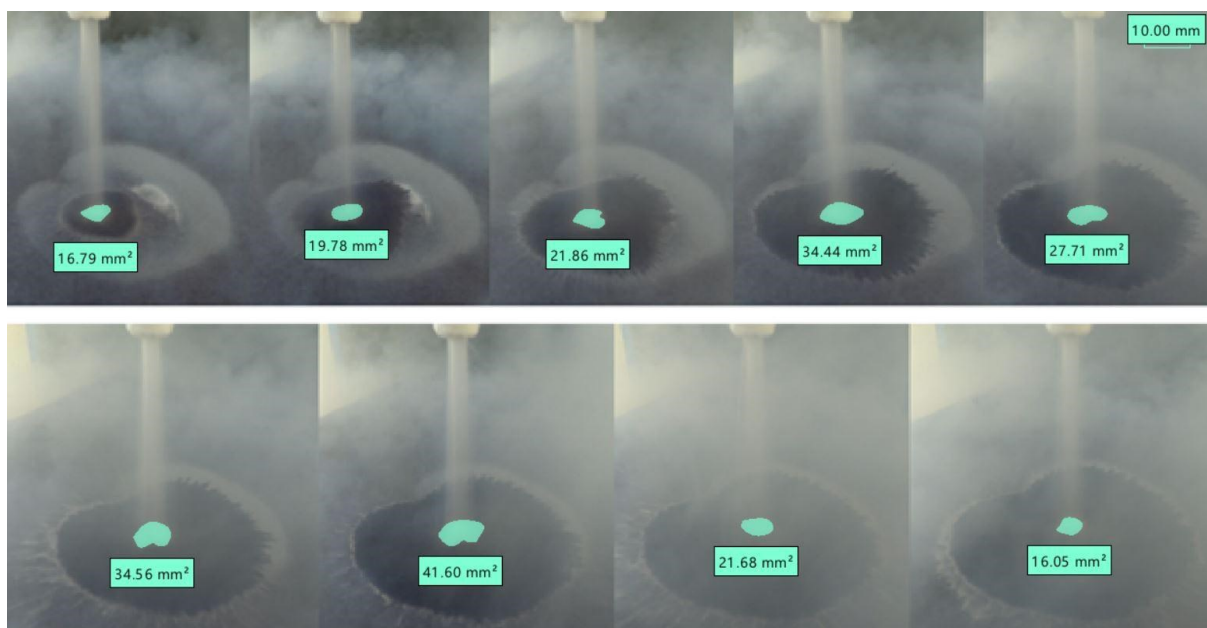
Fonte: Dados do autor.

Figura 4.38 – Medição de área de cobertura da área molhada de nitrogênio líquido – Dispositivo desenvolvido



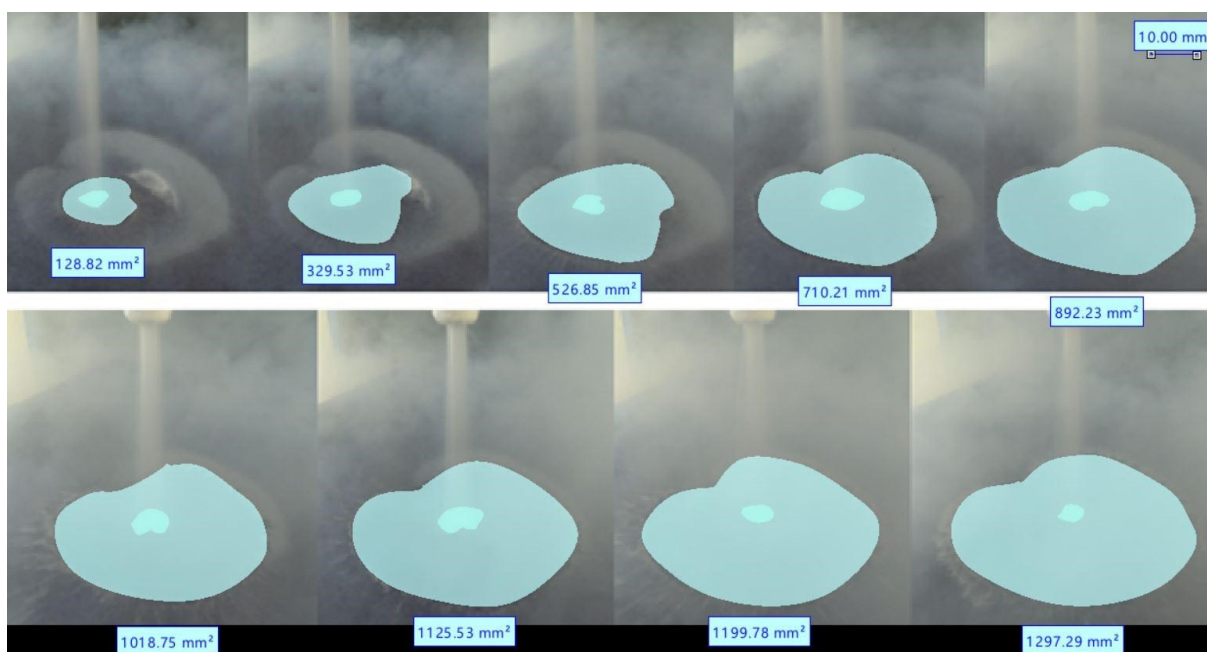
Fonte: Dados do autor.

Figura 4.39 – Medição de área de cobertura da área do jato de nitrogênio líquido– Válvula industrial



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.40 – Medição de área de cobertura da área molhada de nitrogênio líquido – Válvula industrial

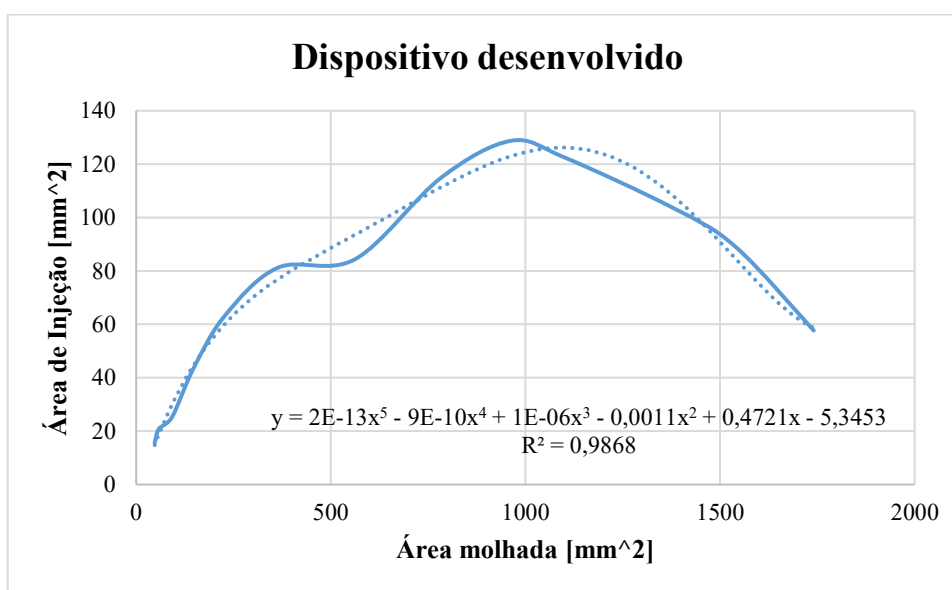


Fonte: Dados do autor.

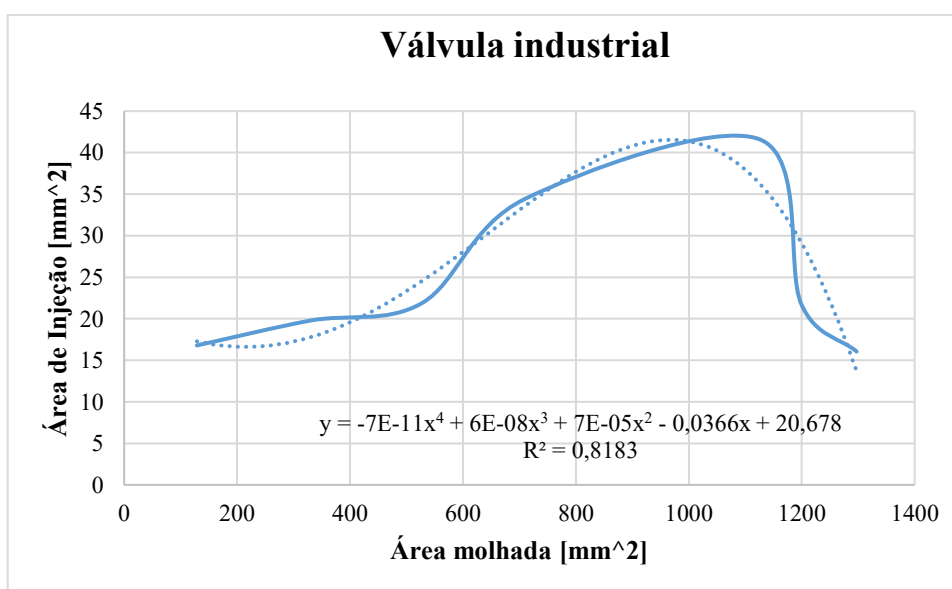
Nota-se que a área molhada do dispositivo desenvolvido é maior devido ao maior ângulo de incidência do fluido e, devido ao volume maior do reservatório do dispositivo desenvolvido, a evaporação do nitrogênio é maior, dada às trocas de calor com o ambiente. Com os valores da área alcançada pelo jato do nitrogênio líquido e pelos valores da respectiva área dissipada, criou-se um gráfico para obtenção de uma curva para entendimento do efeito de Leidenfrost

neste estudo, ilustrado na Figura 4.41(a) e Figura 4.41(b). Desta forma, com o valor da área da injeção do nitrogênio líquido, pode-se estimar a área molhada e atuação do fluido criogênico. Para a utilização do nitrogênio líquido nos ensaios de usinagem, a utilização da válvula industrial operando por ciclos mostrou-se mais eficiente devido ao fluxo mais concentrado e menor evaporação por possuir menor área de troca de calor.

Figura 4.41 – Área molhada x área de injeção. (a) dispositivo desenvolvido. (b) Válvula industrial



(a)



(b)

Fonte: Dados do autor.

4.5 Abordagens utilizadas no fresamento da liga Ti-6Al-4V

Os itens deste tópico englobam o resultado para as diferentes abordagens de lubrificação e resfriamento utilizadas. O resultado do planejamento fatorial para todos os ensaios é mostrado. Características das superfícies usinadas são ilustradas para as condições mais críticas do planejamento experimental. Com o intuito de caracterização química e análise elementar dos materiais presentes nos insertos de corte, estes foram submetidos a uma análise por EDS. Para verificar o comportamento dos parâmetros de rugosidade estudados, adotou-se como premissa o estudo dos menores e maiores valores das condições de corte. Desta forma, os testes 1 e 8 de cada estratégia do planejamento experimental são analisados. A Tabela 4.5 indica o procedimento adotado para as análises.

Tabela 4.5 – Procedimento para análise dos resultados

Variável	Análise
Forças de usinagem	Todos os ensaios
Rugosidade S_a	Todos os ensaios
Análise da rugosidade $S_q, S_{ku}, S_{sk}, S_p, S_v, S_z$	Ensaio 1 e 8 de cada abordagem
Análise da superfície usinada	Condição mais crítica de cada abordagem
Análise da deformação lateral do material após usinagem	Condição mais crítica de cada abordagem
Análise por EDS	Condição mais crítica de cada abordagem
Desgaste do inserto de corte	Condição mais crítica de cada abordagem

Fonte: Dados do autor.

4.5.1 Usinagem sem lubrificação

4.5.1.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem sem lubrificação é mostrado na Tabela 4.6.

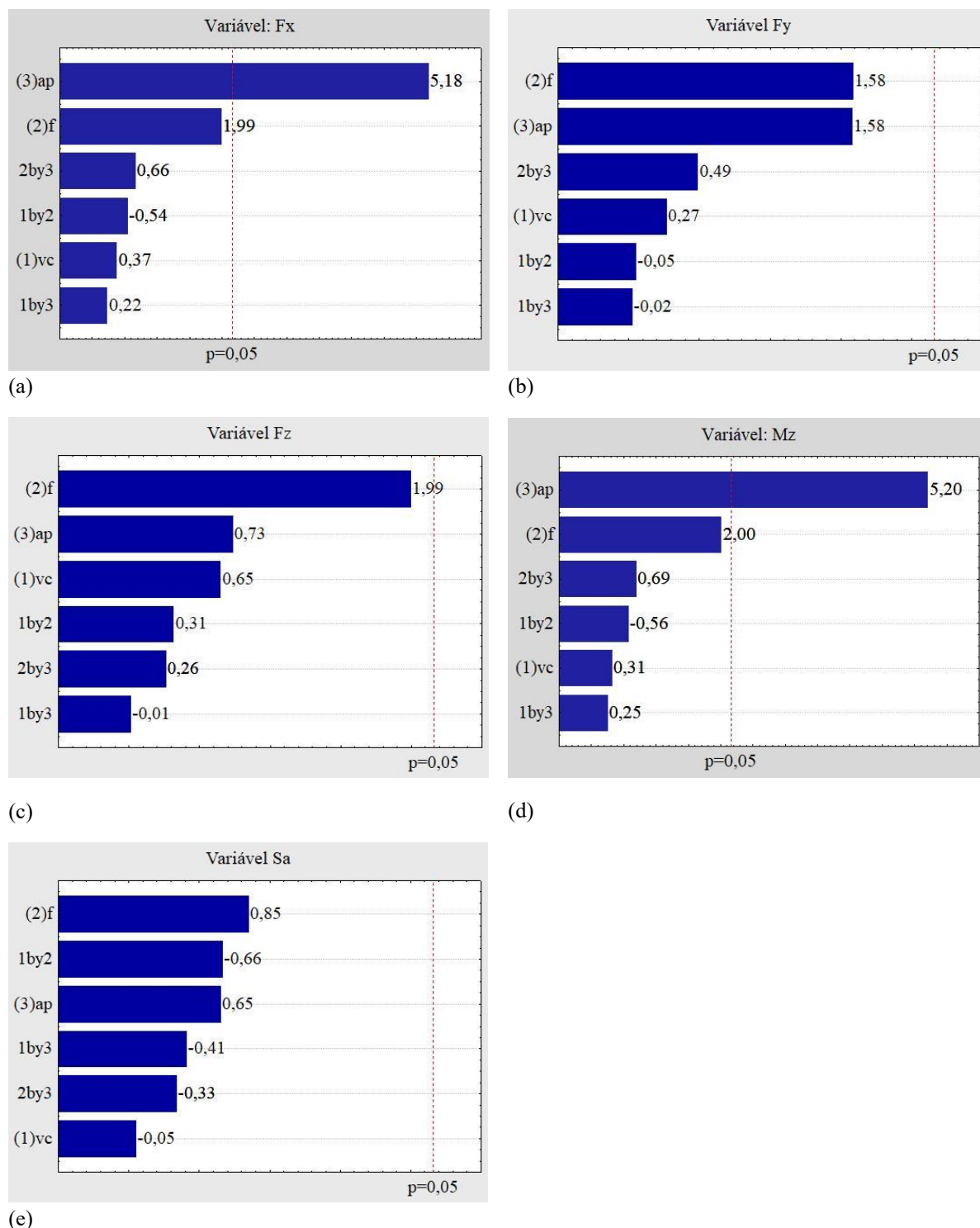
Tabela 4.6 – Planejamento fatorial dos ensaios sem lubrificação

Seco	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μm)
1	80	0,06	0,5	49,36	71,00	52,04	0,25	0,44
2	100	0,06	0,5	50,25	108,00	60,96	0,25	0,65
3	80	0,1	0,5	67,47	112,99	93,74	0,34	0,66
4	100	0,1	0,5	72,54	109,00	113,53	0,36	0,79
5	80	0,06	1,0	90,12	94,73	63,35	0,45	0,89
6	100	0,06	1,0	112,20	100,50	70,97	0,56	1,01
7	80	0,1	1,0	138,10	172,62	119,37	0,69	1,16
8	100	0,1	1,0	110,73	139,40	103,14	0,55	0,88
9	90	0,08	0,75	97,05	164,42	203,95	0,49	1,17
10	90	0,08	0,75	104,98	207,94	207,95	0,52	1,17
11	80	0,06	0,5	65,66	102,91	61,17	0,33	0,34
12	100	0,06	0,5	55,78	86,80	63,16	0,28	0,47
13	80	0,1	0,5	57,55	118,37	96,20	0,29	0,75
14	100	0,1	0,5	66,17	127,66	146,39	0,33	0,53
15	80	0,06	1,0	73,96	135,18	69,58	0,37	0,36
16	100	0,06	1,0	90,43	137,10	91,80	0,45	0,33
17	80	0,1	1,0	97,66	147,69	142,35	0,49	0,52
18	100	0,1	1,0	105,75	195,40	206,65	0,53	0,39
19	90	0,08	0,75	104,59	184,33	214,11	0,52	0,24
20	90	0,08	0,75	106,19	241,86	221,35	0,53	0,30

Fonte: Dados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto observou-se que para um intervalo de confiança de 95% a profundidade de penetração foi a variável de maior influência para F_x . Para F_y as variáveis de maior influência foram a profundidade de penetração e o avanço, embora ficassem abaixo do intervalo de confiança definido. O momento torsor também teve a profundidade de penetração como a variável mais influente. O avanço foi a variável que mais influenciou a força F_z e a rugosidade S_a . A Figura 4.42 mostra os dados.

Figura 4.42 - Gráficos de Pareto para a estratégia sem lubrificação. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a .

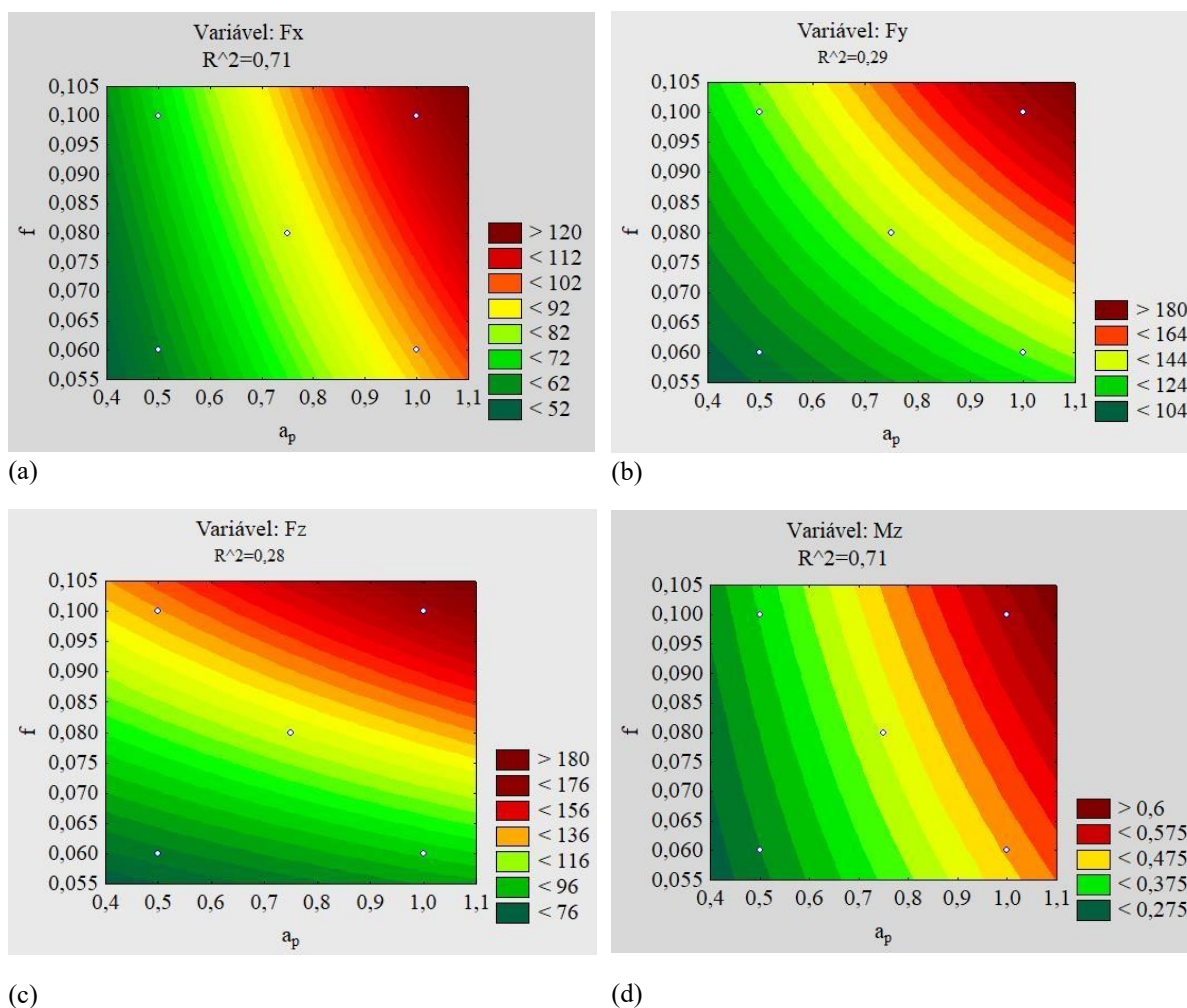


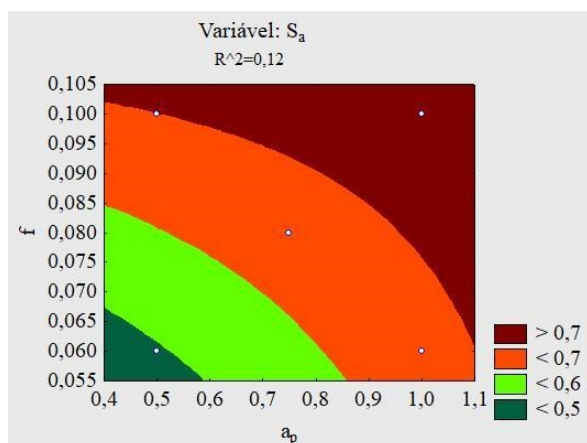
Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio sem lubrificação ilustradas na Figura 4.43 percebe-se que os valores mínimos de F_x , F_f , F_z e torque (M_z) ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte. As contribuições de a_p e f são marcantes, indicando serem possivelmente as responsáveis pelo mecanismo de regulação

das forças de usinagem desta condição de ensaio. A área da secção de corte que é definida pelo produto do avanço pela profundidade de corte aumenta com a elevação do avanço e da profundidade de corte provocando aumento das forças em questão. A Tabela 4.7 mostra as funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes.

Figura 4.43 - Superfícies de resposta para a estratégia sem lubrificação. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$)





(e)

Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.7 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática

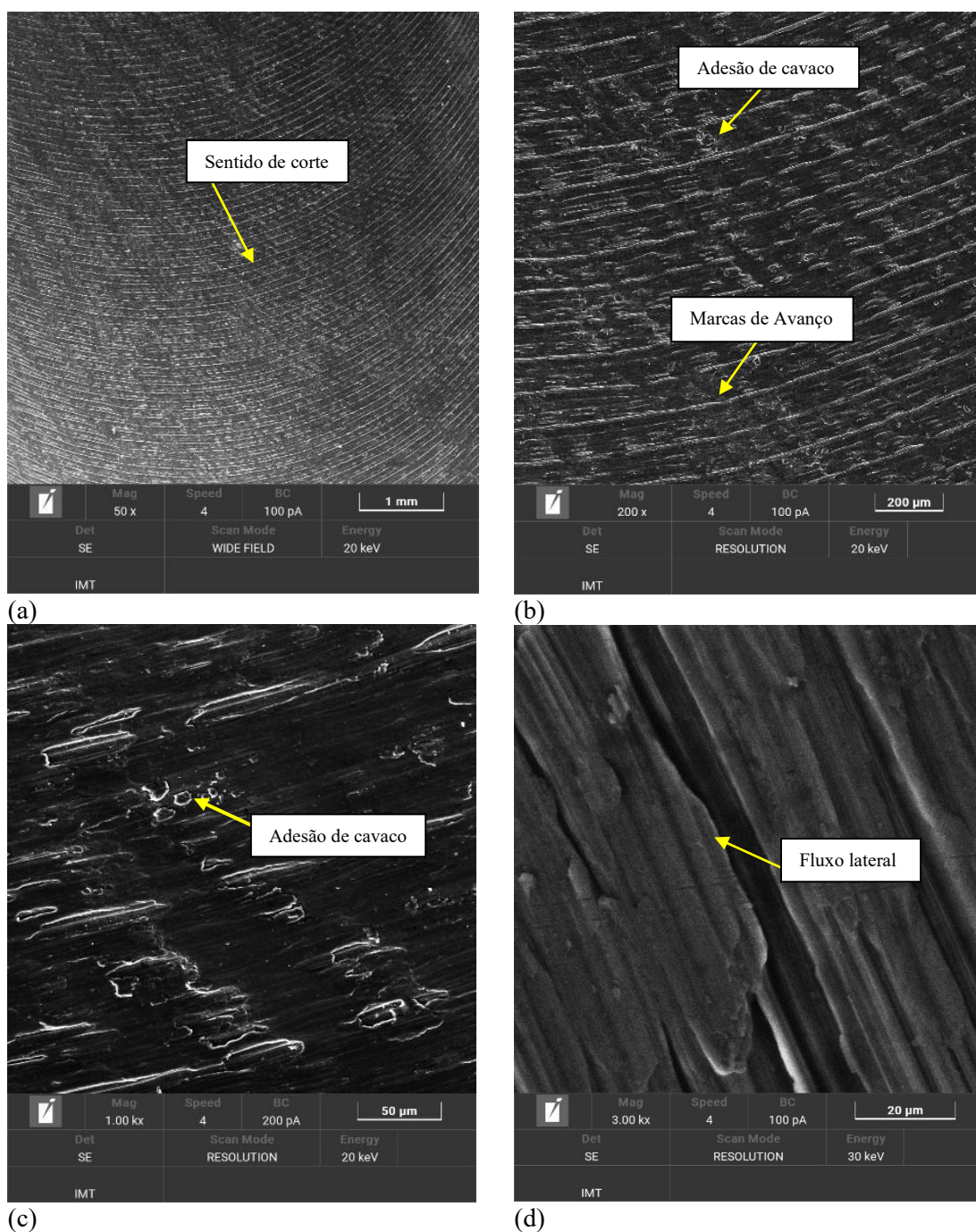
Seco	Função matemática
F_x	$= -44,73+0,75*v_c+987,53*f-10,98*v_c*f+0,36*a_p*v_c+535,62*a_p*f+5,93$
F_y	$= 25,03+0,59*v_c+316,09*f-2,75*v_c*f-0,10*a_p*v_c+1103,62*a_p*f-5,85$
F_z	$= 91,28-0,88*v_c-1241,25*f+24,16*v_c*f-0,07*a_p*v_c+791*a_p*f-8,68$
M_z	$= -0,20+0,004*v_c+4,99*f-0,05*v_c*f+0,002*a_p*v_c+2,75*a_p*f+0,01$
S_a	$= -3,18+0,03*v_c+34,28*f-0,29*v_c*f-0,01*a_p*v_c-5,87*a_p*f+1,48$

Fonte: Dados do Autor.

4.5.1.2 Superfície usinada

Na superfície usinada na condição de corte sem lubrificação são observados marcas de avanço bem definidas e adesão de cavacos. Sulcos causados pela abrasão e fluxo lateral de material são também observados. A Figura 4.44 mostra a superfície usinada com aumentos de 50, 200, 1000 e 3000 vezes.

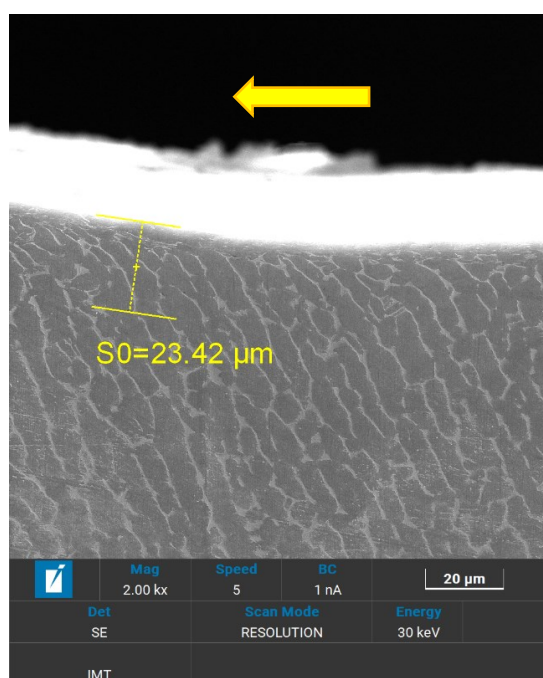
Figura 4.44 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.



Fonte: Dados do autor.

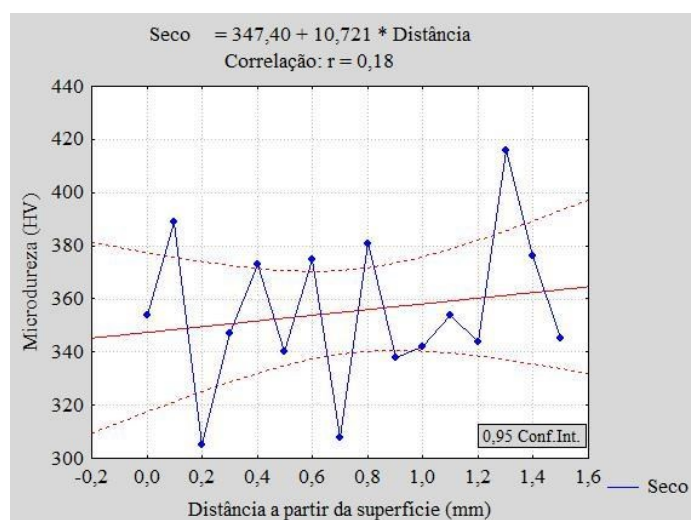
A Figura 4.45 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada (MEV). Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $23,05 \pm 5,12$. Esta medida da camada deformada é linear. A Figura 4.46 mostra os resultados de micro dureza Vickers a partir da superfície. Nota-se uma tendência de endurecimento com o aumento da distância a partir da superfície.

Figura 4.45 – Deformação na superfície usinada



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.46 – Medições de dureza (HV) – Sem lubrificação



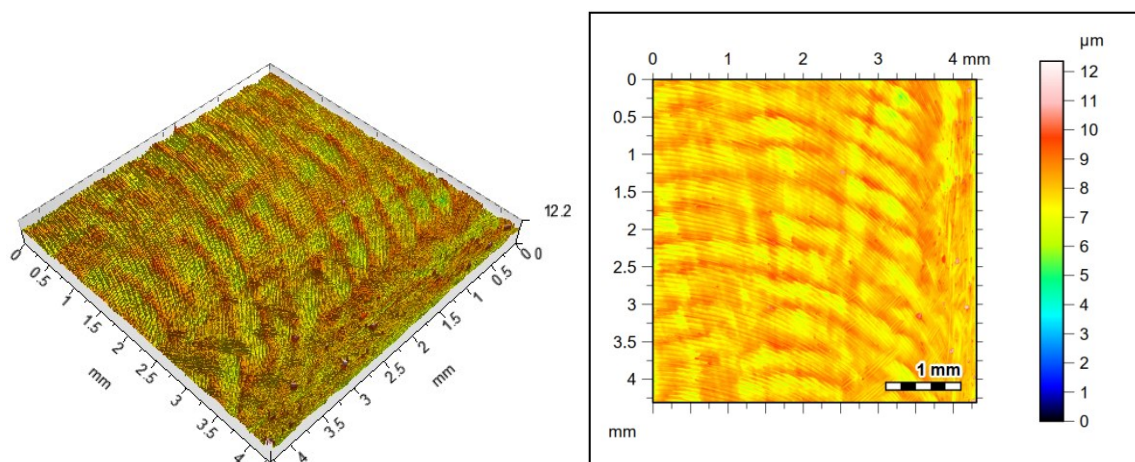
Fonte: Dados do autor.

4.5.1.3 Rugosidade

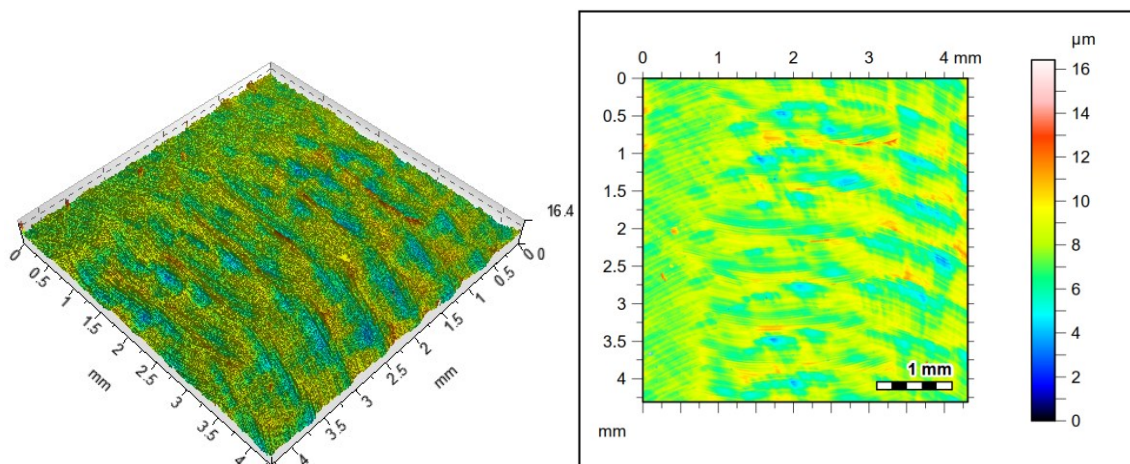
A Figura 4.47 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes para a estratégia sem lubrificação. Percebe-se um aumento de S_q na ordem de 99,8% devido ao aumento de a_p e f ocasionando maiores irregularidades do perfil de rugosidade. O parâmetro S_{sk}

negativo para as duas condições indica a prevalência de vales. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos.

Figura 4.47 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia sem lubrificação. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,57$; $S_{sk}=-0,13$; $S_{ku}=3,95$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=1,14$; $S_{sk}=-0,05$; $S_{ku}=3,59$)



(a)



(b)

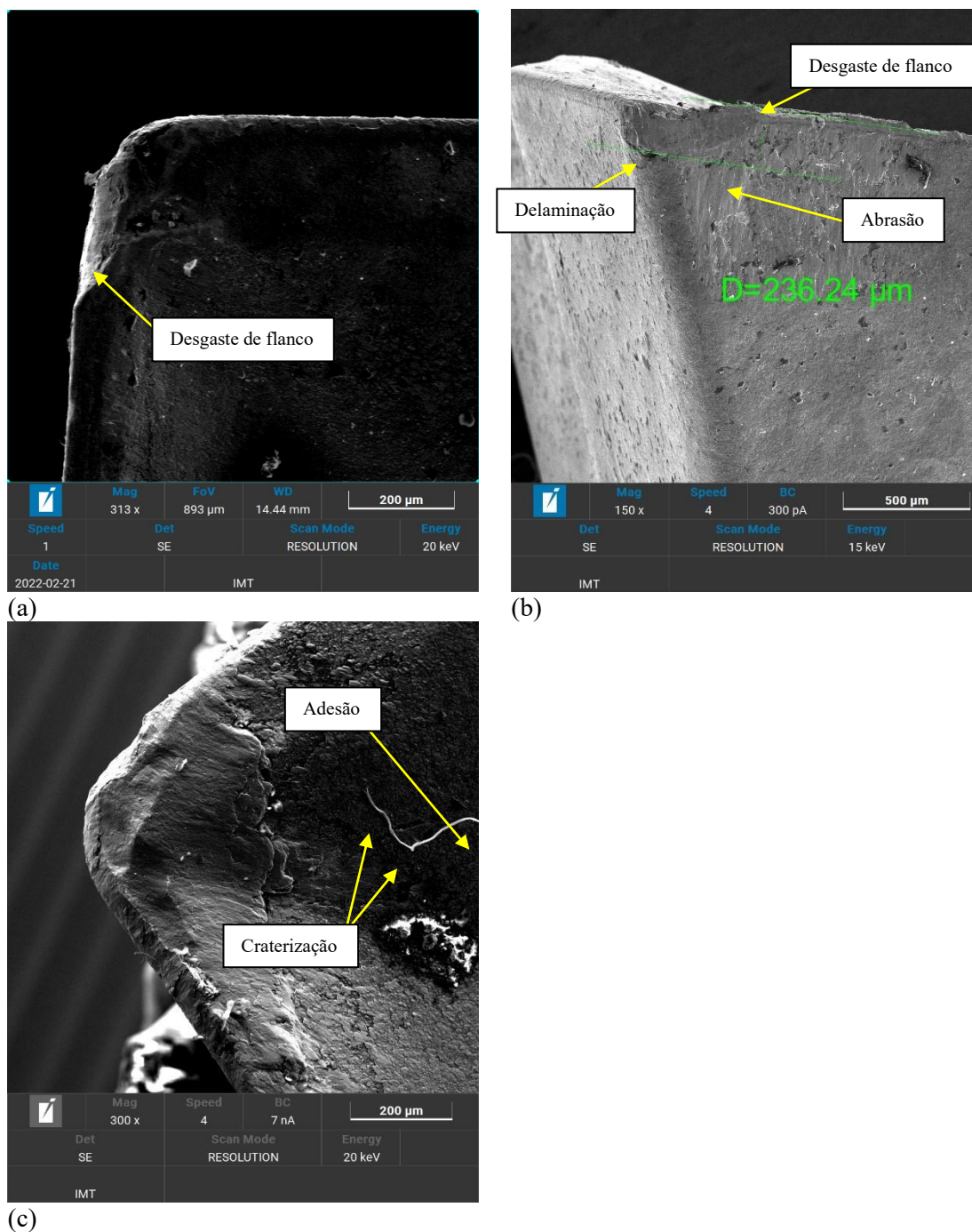
Fonte: Dados do autor.

4.5.1.4 Desgaste do inserto de corte

Na estratégia sem lubrificação e resfriamento notou-se a ocorrência de desgastes de flanco, abrasão, craterização, delaminação e adesão do material de trabalho na superfície de saída do inserto de corte (Figura 4.48). Análises por Espectroscopia de raios X por dispersão

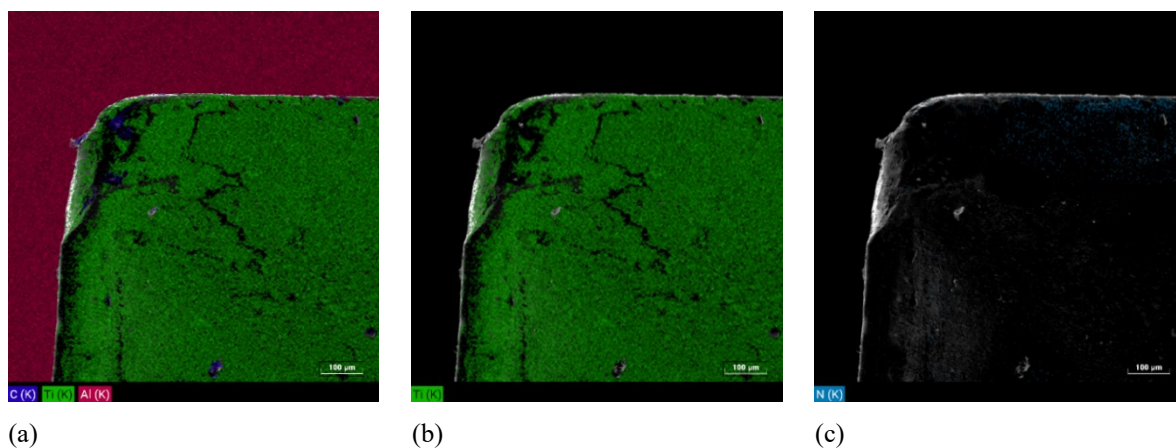
de energia foram realizadas para verificar a distribuição dos constituintes. A Figura 4.49 ilustra o resultado, com a presença de Ti, Al e N.

Figura 4.48 – Desgastes nos insertos sem lubrificação



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.49 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte sem lubrificação. (a) Elementos encontrados. (b) Distribuição de Titânio (c) Distribuição de Nitrogênio



Fonte: Dados do autor.

4.5.2 Usinagem utilizando lubrificação com Óleo

4.5.2.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de óleo como lubrificante via MQL é mostrado na Tabela 4.8.

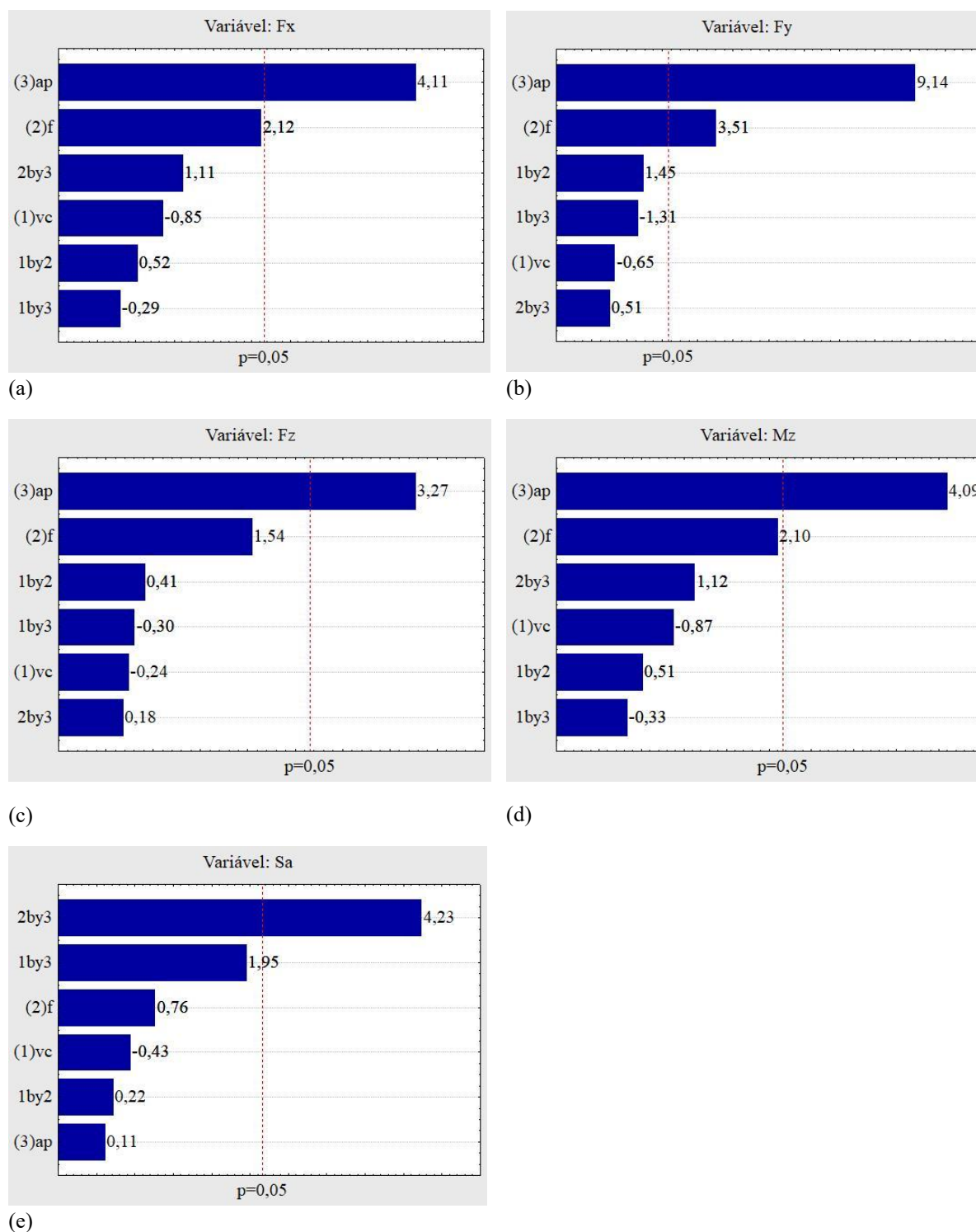
Tabela 4.8 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de óleo

Óleo	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μ m)
1	80	0,06	0,5	50,25	214,05	76,62	0,25	0,51
2	100	0,06	0,5	48,00	180,00	65,74	0,24	0,37
3	80	0,1	0,5	72,98	238,50	94,65	0,36	0,34
4	100	0,1	0,5	63,91	251,25	96,19	0,32	0,35
5	80	0,06	1,0	103,06	457,80	186,79	0,52	0,36
6	100	0,06	1,0	95,87	348,75	146,95	0,48	0,36
7	80	0,1	1,0	137,18	464,55	194,86	0,69	0,44
8	100	0,1	1,0	131,76	461,70	196,94	0,66	0,48
9	90	0,08	0,75	104,06	368,55	166,16	0,52	0,37
10	90	0,08	0,75	112,59	357,75	163,07	0,56	0,36
11	80	0,06	0,5	117,00	216,50	84,80	0,59	0,47
12	100	0,06	0,5	89,00	260,00	95,20	0,45	0,38
13	80	0,1	0,5	107,00	285,00	110,00	0,54	0,36
14	100	0,1	0,5	116,00	310,00	113,00	0,58	0,36
15	80	0,06	1,0	154,00	365,00	99,40	0,77	0,23
16	100	0,06	1,0	116,50	315,00	96,00	0,58	0,40
17	80	0,1	1,0	195,00	412,50	124,00	0,98	0,48
18	100	0,1	1,0	182,50	435,00	129,00	0,91	0,41
19	90	0,08	0,75	125,50	330,00	137,60	0,63	0,39
20	90	0,08	0,75	119,00	335,00	125,00	0,60	0,37

Fonte: Dados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.50 observou-se que a variável a_p foi o parâmetro que demonstrou maiores influências sobre as forças F_x , F_z e M_z . O parâmetro F_y é influenciado pela profundidade de corte e pelo avanço. O parâmetro S_a foi influenciado pela interação a_p e f .

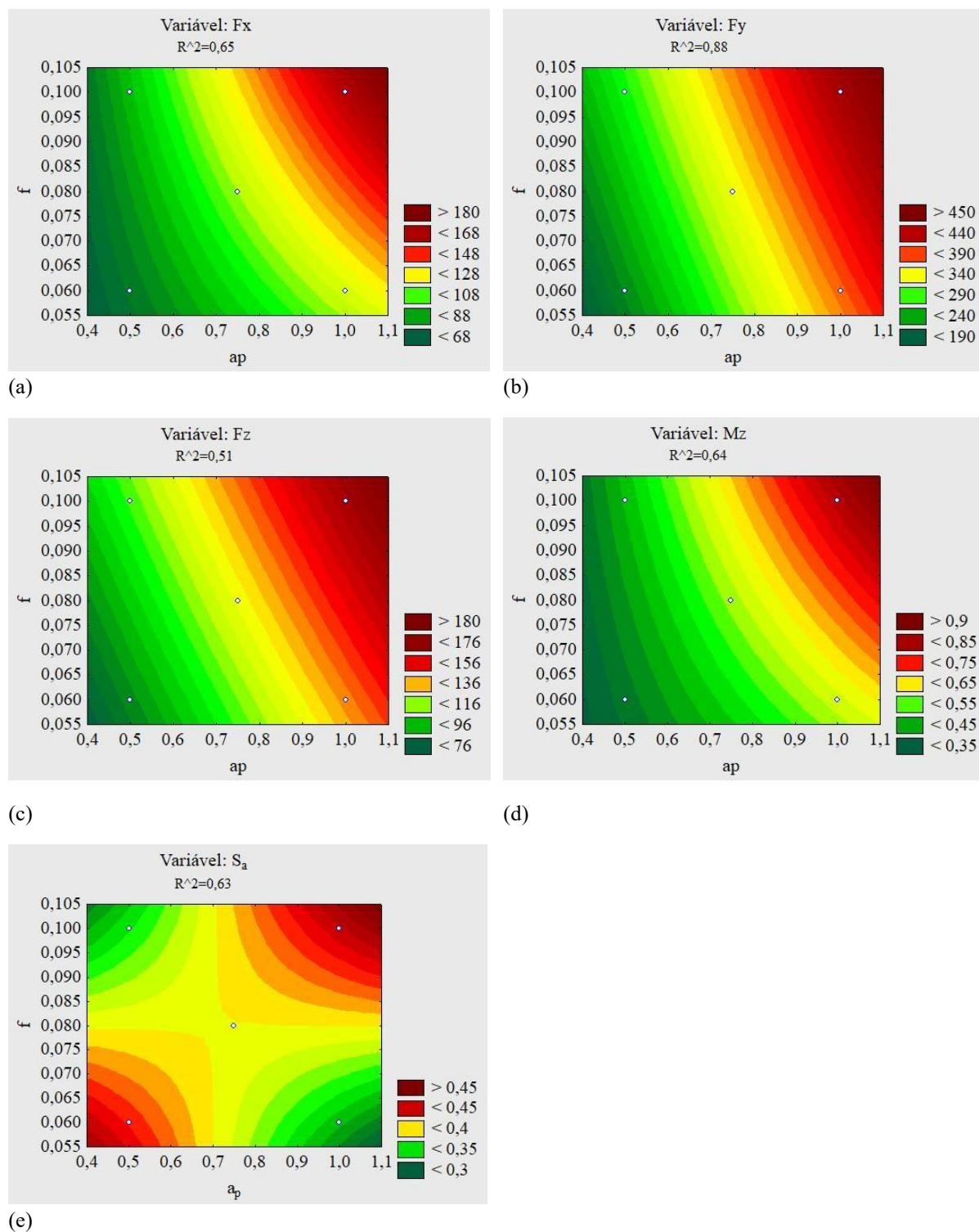
Figura 4.50 - Gráficos de Pareto para a condição de usinagem com óleo. (a) Força F_x . (b) Força F_y . (c) Força F_z . (d) Torque M_z . (e) Rugosidade S_q . (f) Parâmetro S_{sk} .



Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio utilizando óleo percebe-se que os valores mínimos das forças de usinagem e torque, ilustrados na Figura 4.51, ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte.

Figura 4.51 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando óleo. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).



Fonte: Dados do autor.

A superfície de resposta de rugosidade não condiz com a literatura. Alguma vibração pode ter ocasionado esta variação. A tabela 4.9 mostra as funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes.

Tabela 4.9 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

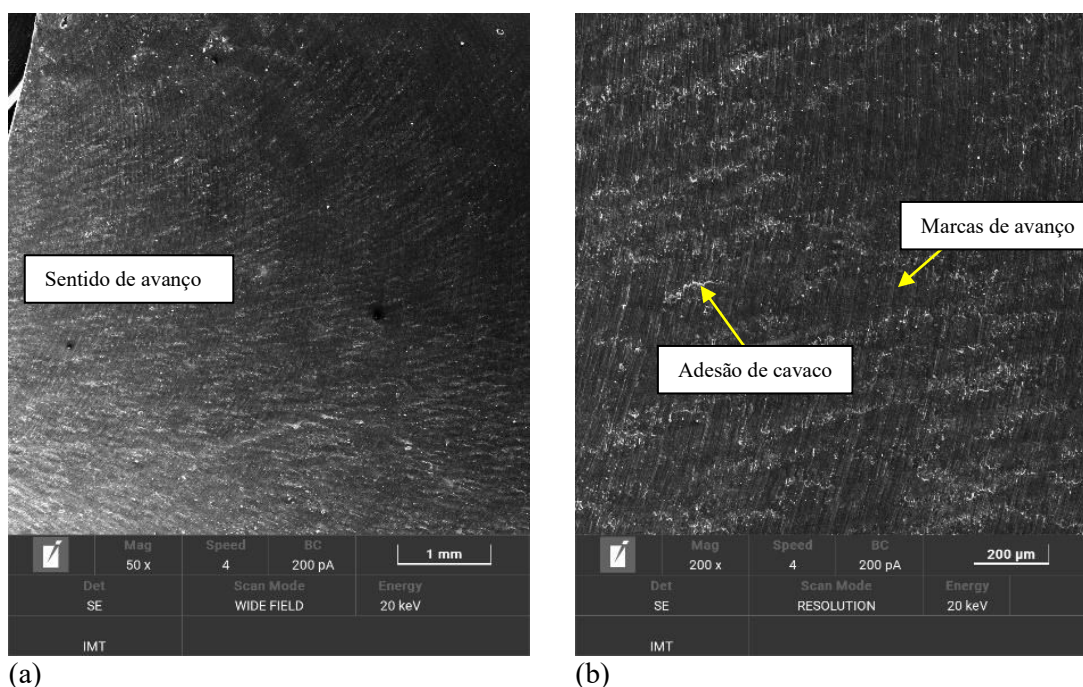
Óleo	Função matemática
F_x	$= 186,14 - 1,40 \cdot v_c - 2012,53 \cdot f + 17,80 \cdot v_c \cdot f - 0,81 \cdot a_p \cdot v_c + 1517,12 \cdot a_p \cdot f + 48,16$
F_y	$= 217,78 - 2,25 \cdot v_c - 4939,37 \cdot f + 64,69 \cdot v_c \cdot f - 4,66 \cdot a_p \cdot v_c + 912,50 \cdot a_p \cdot f + 504,82$
F_z	$= 84,07 - 0,83 \cdot v_c - 1135,81 \cdot f + 17,29 \cdot v_c \cdot f - 1,00 \cdot a_p \cdot v_c + 302,25 \cdot a_p \cdot f + 131,81$
M_z	$= 0,91 - 0,01 \cdot v_c - 10,06 \cdot f + 0,09 \cdot v_c \cdot f - 0,004 \cdot a_p \cdot v_c + 7,75 \cdot a_p \cdot f + 0,2625$
S_a	$= 1,68 - 0,008 \cdot v_c - 8,00 \cdot f + 0,01 \cdot v_c \cdot f + 0,009 \cdot a_p \cdot v_c + 9,75 \cdot a_p \cdot f - 1,19$

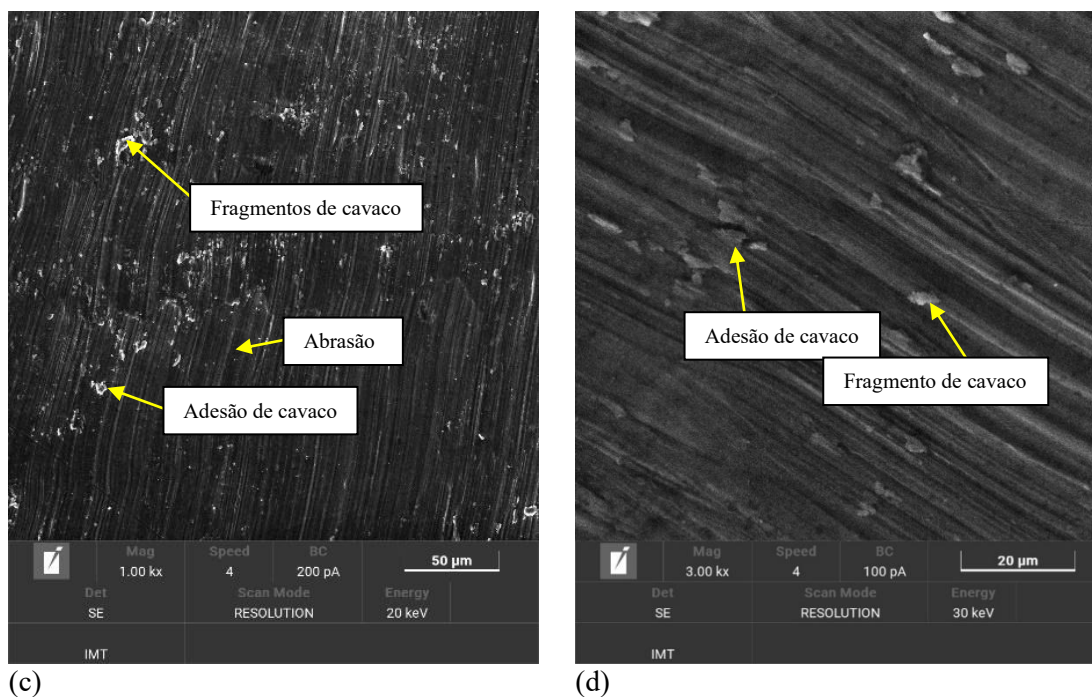
Fonte: Dados do Autor.

4.5.2.2 Superfície usinada

Na superfície usinada na condição de corte com aplicação de óleo as marcas de avanço são menos definidas do que o corte a seco, caracterizando uma melhor qualidade em relação a estratégia sem lubrificação. Marcas de avanço, adesão de cavacos e fragmentos destes foram observados. Sulcos causados pela abrasão e fluxo lateral de material são também observados na Figura 4.52.

Figura 4.52 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x

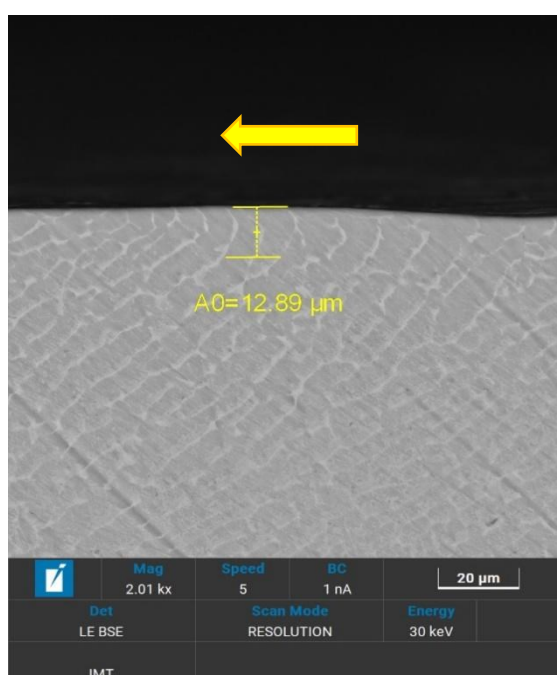




Fonte: Dados do autor.

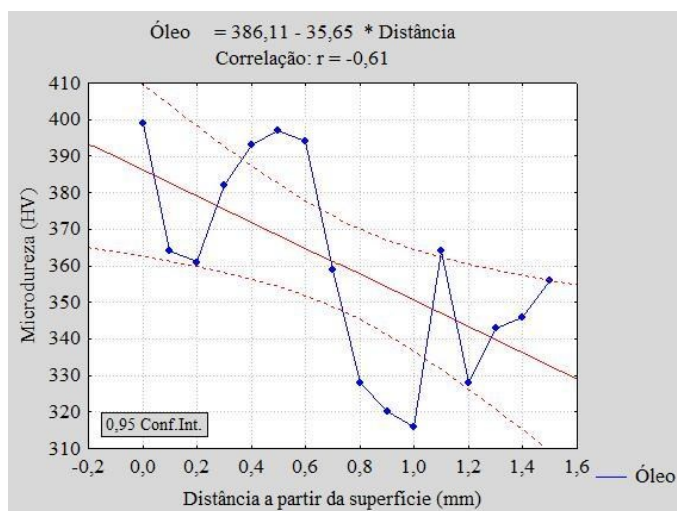
A Figura 4.53 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média da camada deformada para a estratégia de usinagem a seco foi de $14,93 \pm 4,69$. A Figura 4.54 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se a tendência de diminuição de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.53 – Deformação na superfície usinada



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.54 – Medições de dureza (HV) - Óleo

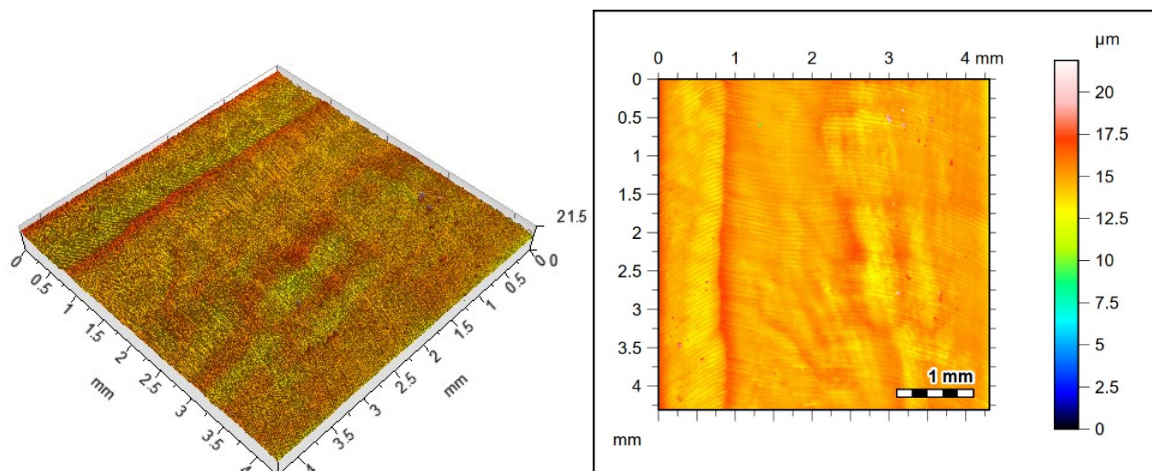


Fonte: Dados do autor.

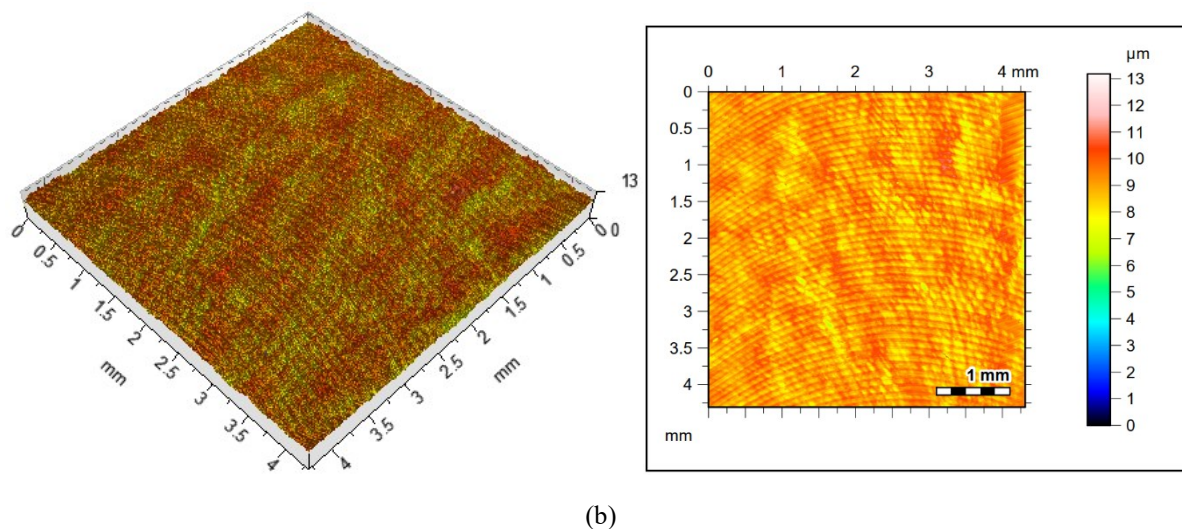
4.5.2.3 Rugosidade

A Figura 4.55 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com o óleo Superfluido 3. O parâmetro S_{sk} , positivo para a condição de corte mínima indica a prevalência de picos, o que não ocorre para os valores máximos. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos. Observa-se que o aumento do avanço e velocidade de corte acentuou as marcas da usinagem.

Figura 4.55 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando óleo. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,68$; $S_{sk}=0,49$; $S_{ku}=5,71$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,60$; $S_{sk}=-0,16$; $S_{ku}=3,32$).



(a)

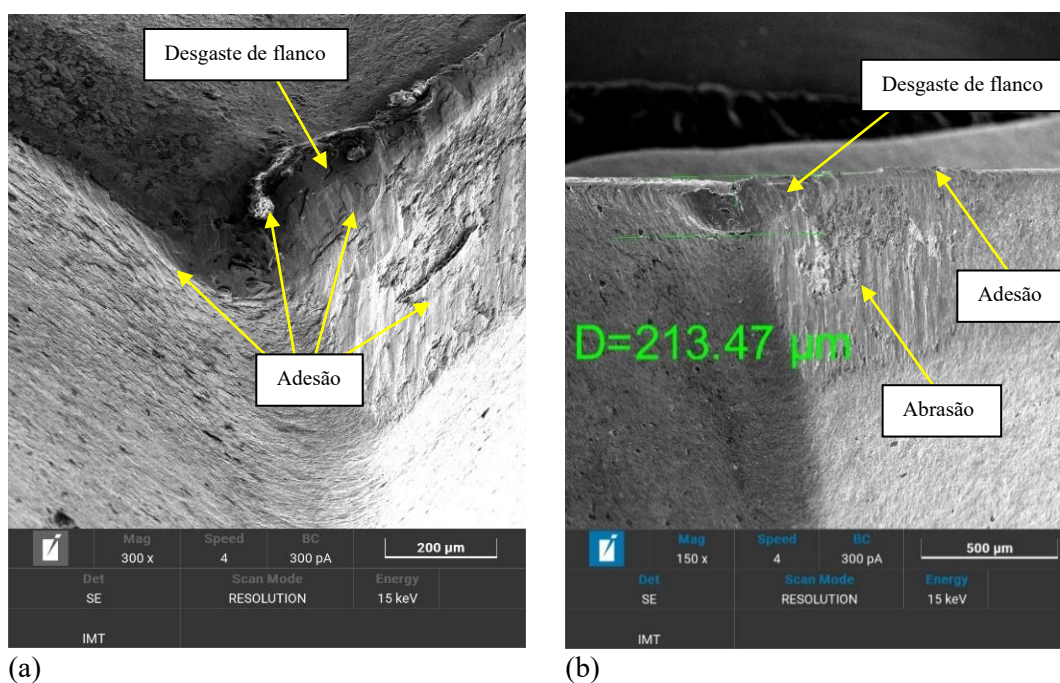


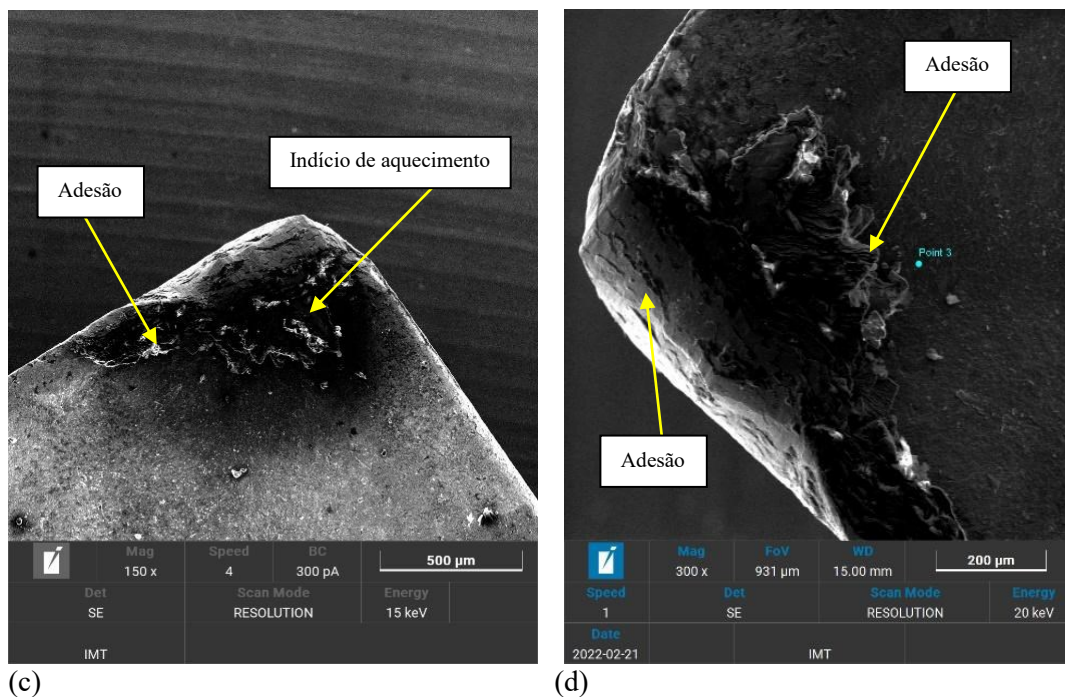
Fonte: Dados do autor.

4.5.2.4 Desgaste do inserto de corte

Na estratégia de lubrificação com a utilização de óleo como fluido notou-se a ocorrência de desgastes de abrasão, flanco e adesão do material de trabalho na superfície de saída do inserto de corte. Indício maior de aquecimento também foi constatado pela coloração mais escura na região de saída da ferramenta de corte (Figura 4.56). Análises por Espectroscopia de raios X por dispersão de energia foram realizadas para verificar a distribuição dos constituintes. A Figura 4.57 ilustra o resultado, com a presença de Ti, Al e V. A análise EDS do ponto indica os mesmos constituintes.

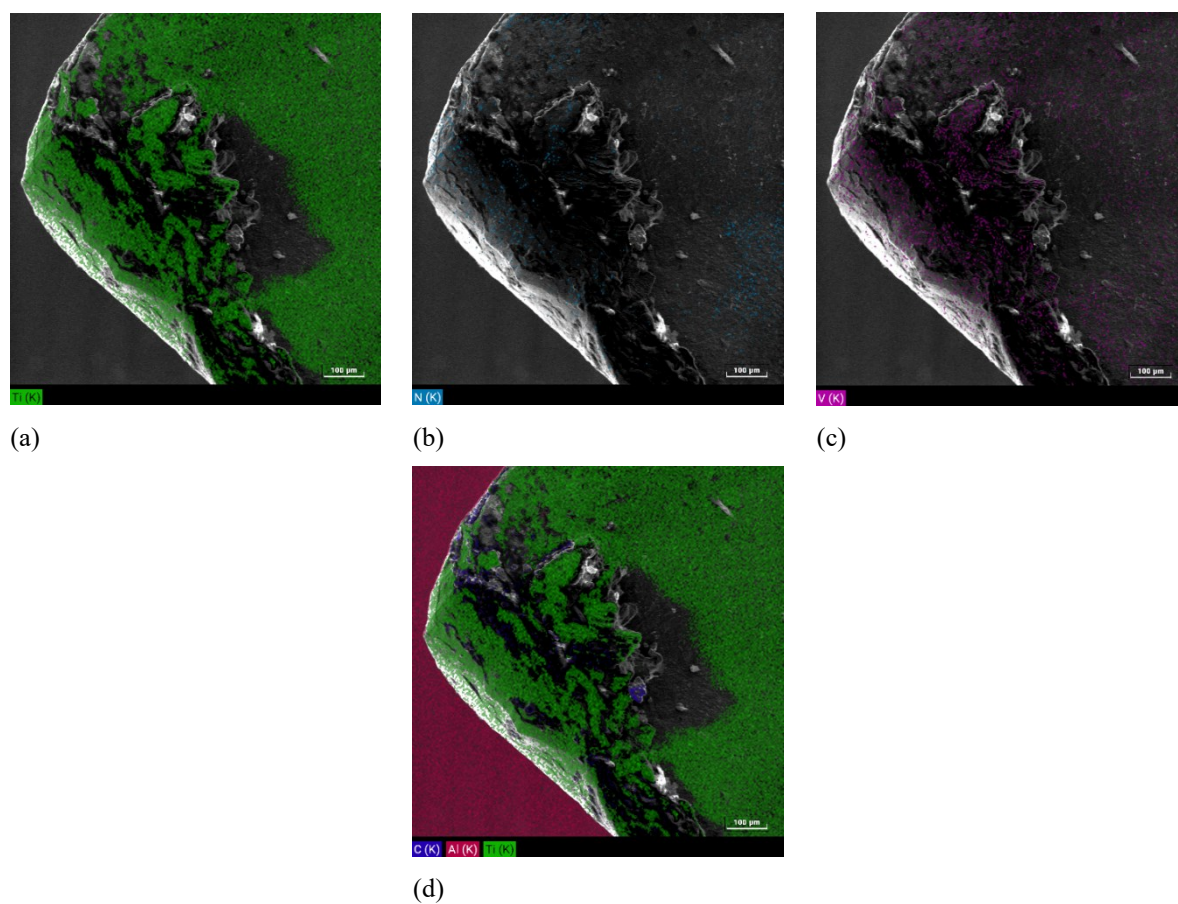
Figura 4.56 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com óleo





Fonte: Dados do autor.

Figura 4.57 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com óleo. (a) Distribuição de Titânio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados.



Fonte: Dados do autor.

4.5.3 Usinagem utilizando lubrificação com Óleo + Grafite

4.5.3.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de óleo e grafite sólido como lubrificante é mostrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de óleo e grafite.

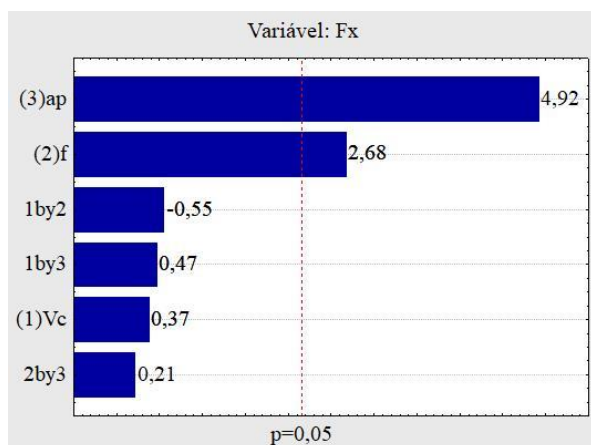
Óleo + Grafite	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μ m)
1	80	0,06	0,5	80,00	192,50	52,00	0,40	0,34
2	100	0,06	0,5	84,00	217,50	63,00	0,42	0,31
3	80	0,1	0,5	127,50	242,50	71,00	0,64	0,35
4	100	0,1	0,5	115,00	255,00	81,00	0,58	0,34
5	80	0,06	1,0	127,50	375,00	77,00	0,64	0,32
6	100	0,06	1,0	142,50	410,00	88,00	0,71	0,32
7	80	0,1	1,0	175,00	485,00	112,00	0,88	0,45
8	100	0,1	1,0	190,00	465,00	121,00	0,95	0,45
9	90	0,08	0,75	130,00	410,00	124,00	0,65	0,34
10	90	0,08	0,75	140,00	395,00	116,00	0,70	0,31
11	80	0,06	0,5	47,00	201,38	71,11	0,23	0,33
12	100	0,06	0,5	53,62	214,88	78,92	0,27	0,35
13	80	0,1	0,5	72,24	287,85	107,68	0,36	0,36
14	100	0,1	0,5	69,52	296,85	106,25	0,35	0,38
15	80	0,06	1,0	102,05	349,95	145,38	0,51	0,37
16	100	0,06	1,0	121,23	395,85	152,70	0,61	0,35
17	80	0,1	1,0	138,62	443,18	178,51	0,69	0,48
18	100	0,1	1,0	130,25	441,23	177,76	0,65	0,47
19	90	0,08	0,75	108,87	369,53	157,31	0,54	0,37
20	90	0,08	0,75	108,92	369,08	157,84	0,54	0,35

Fonte: Dados do autor.

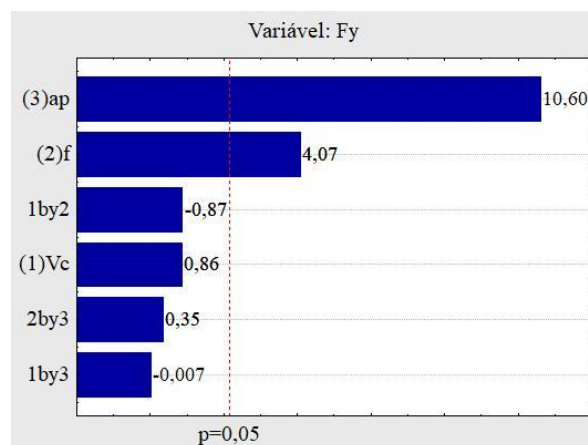
Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.58 observou-se que a variável a_p demonstrou influência sobre F_z . As variáveis a_p e f demonstraram influência F_x , F_y e M_z . A variável S_a foi influenciada pelo avanço, pela profundidade de corte e pela interação avanço e profundidade de corte.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio com óleo e grafite ilustrada na Figura 4.59 percebe-se que os valores mínimos de forças, torque e rugosidade ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte.

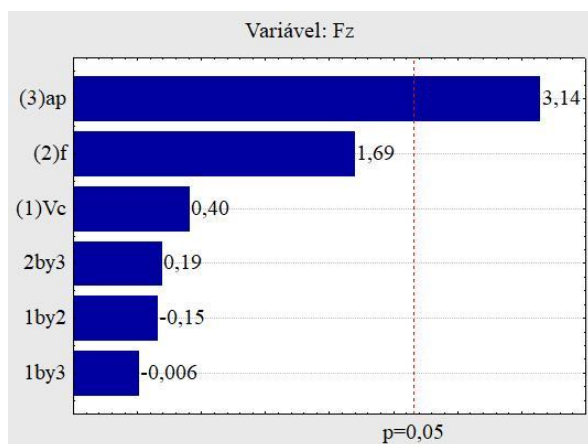
Figura 4.58 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando óleo e grafite. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a .



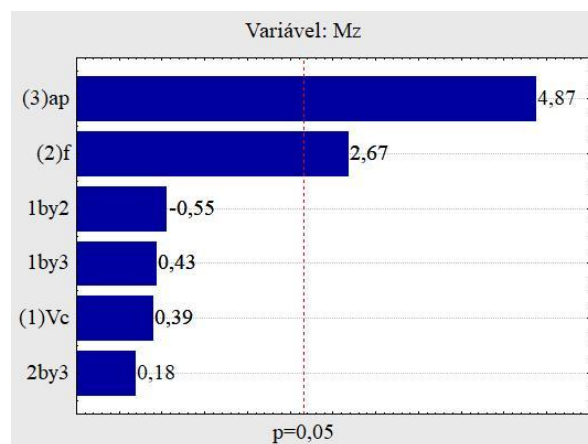
(a)



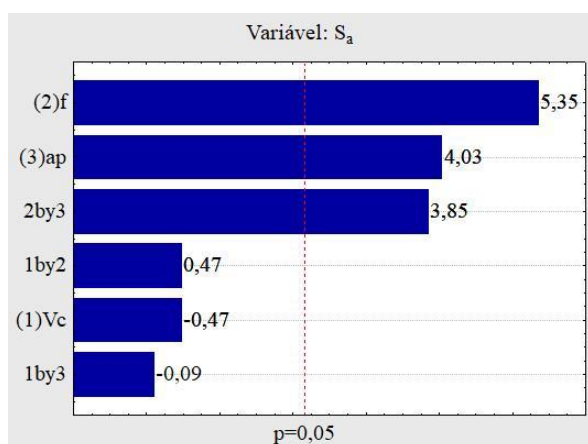
(b)



(c)



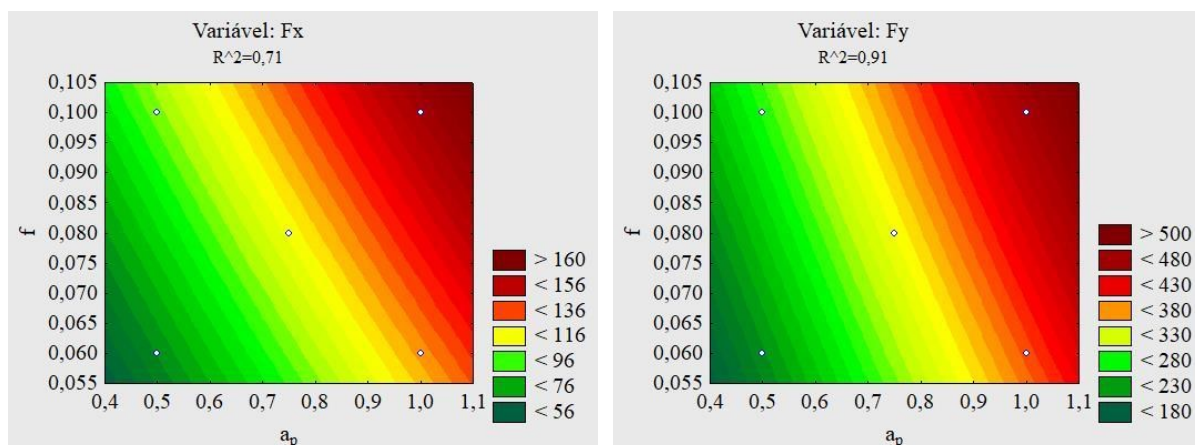
(d)



(e)

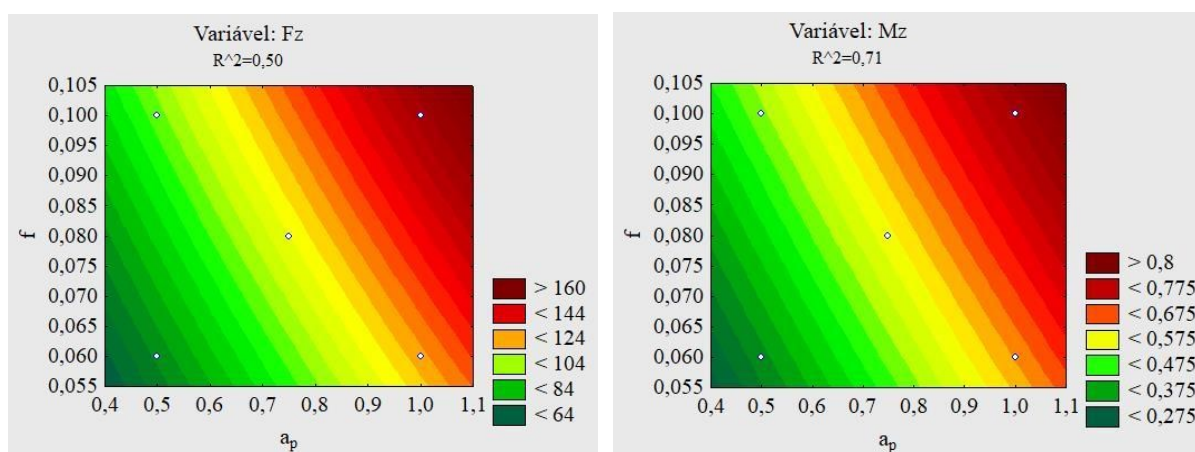
Fonte: Dados do autor.

Figura 4.59 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando óleo e grafite. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).



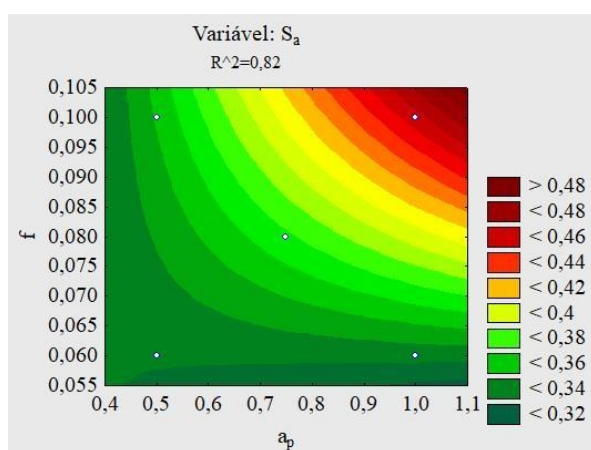
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Fonte: Dados do autor.

A tabela 4.11 mostra as funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes.

Tabela 4.11 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

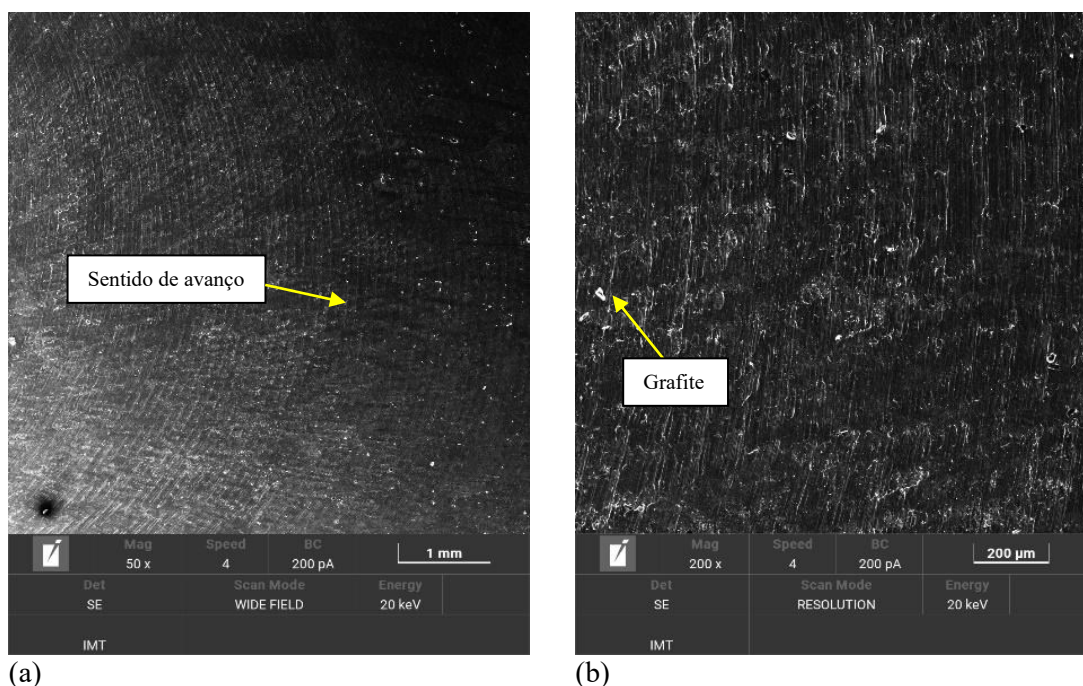
Óleo + Grafite	Função matemática
F_x	$= -89,69+0,71*v_c+2118,41*f-16,68*v_c*f+1,13*a_p*v_c+261,87*a_p*f-2,67$
F_y	$= -374,75+3,76*v_c+4672,47*f-37,45*v_c*f-0,03*a_p*v_c+595,87*a_p*f+239,16$
F_z	$= -82,30+0,86*v_c+1043,78*f-6,35*v_c*f-0,02*a_p*v_c+316,12*a_p*f+61,41$
M_z	$= -0,50+0,004*v_c+10,84*f-0,08*v_c*f+0,005*a_p*v_c+1,12*a_p*f+0,03$
S_a	$= 0,58-0,001*v_c-3,47*f+0,015*v_c*f-0,0002*a_p*v_c+5,12*a_p*f-0,21$

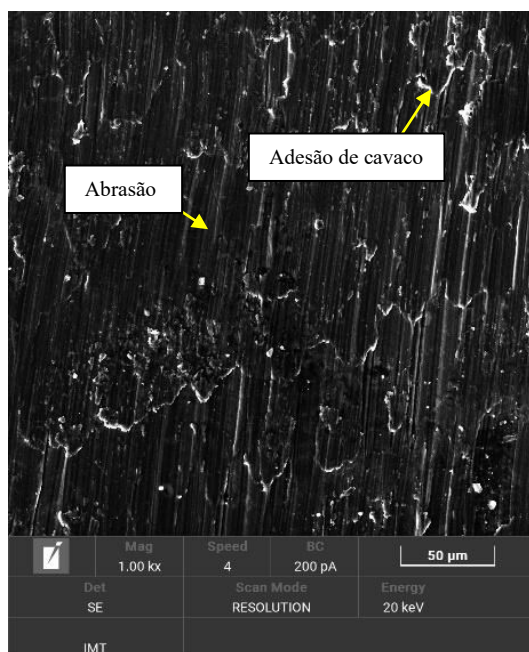
Fonte: Dados do Autor.

4.5.3.2 Superfície usinada

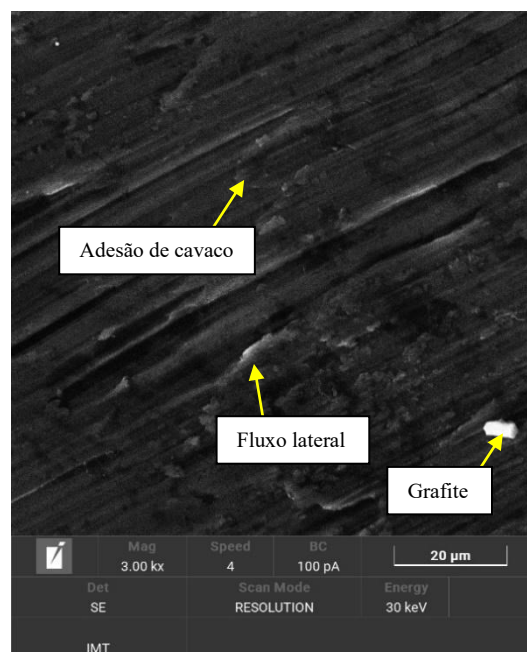
Na superfície usinada na condição de corte com aplicação de óleo e grafite as marcas de avanço são menos visíveis do que a condição sem lubrificação. Marcas de avanço, adesão de cavacos e fragmentos destes foram observados. Fluxo lateral de material são também observados na Figura 4.60.

Figura 4.60 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x





(c)

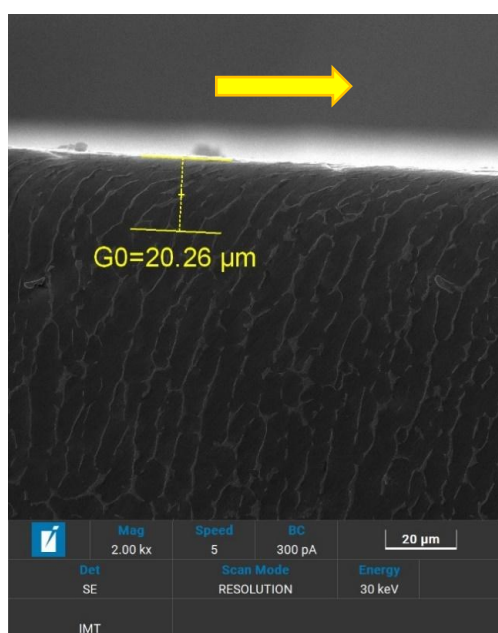


(d)

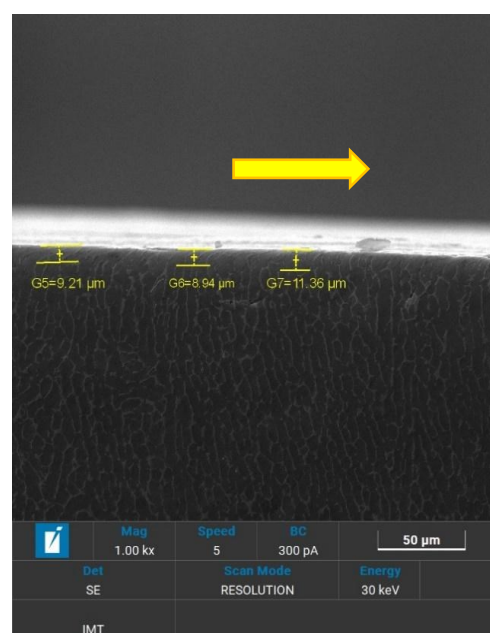
Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.61 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $12,30 \pm 3,46$. A Figura 4.62 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se a tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.61 – Deformação na superfície usinada



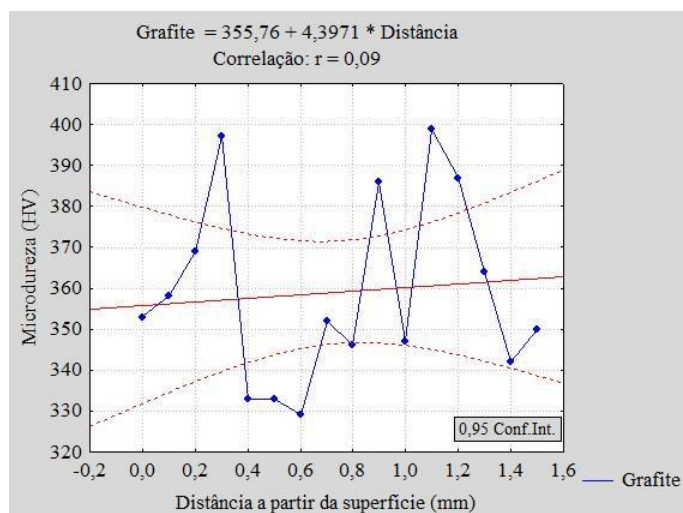
(a)



(b)

Fonte: Dados do autor.

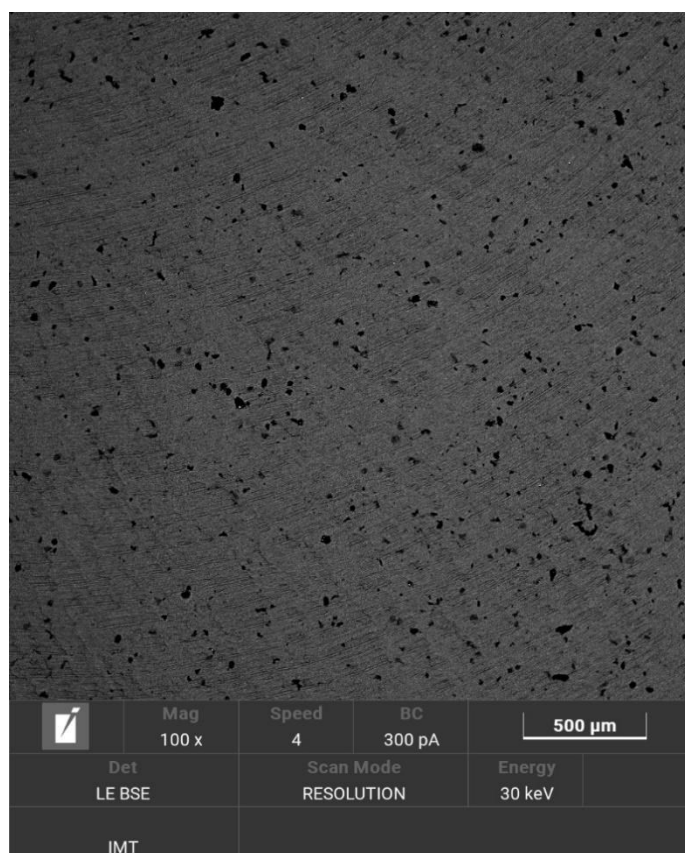
Figura 4.62 – Medições de dureza (HV) – Óleo + Grafite



Fonte: Dados do autor.

A figura 4.63 mostra a superfície após a usinagem com distribuição de partículas de grafite (MEV).

Figura 4.63 – Distribuição de partículas de grafite na superfície usinada

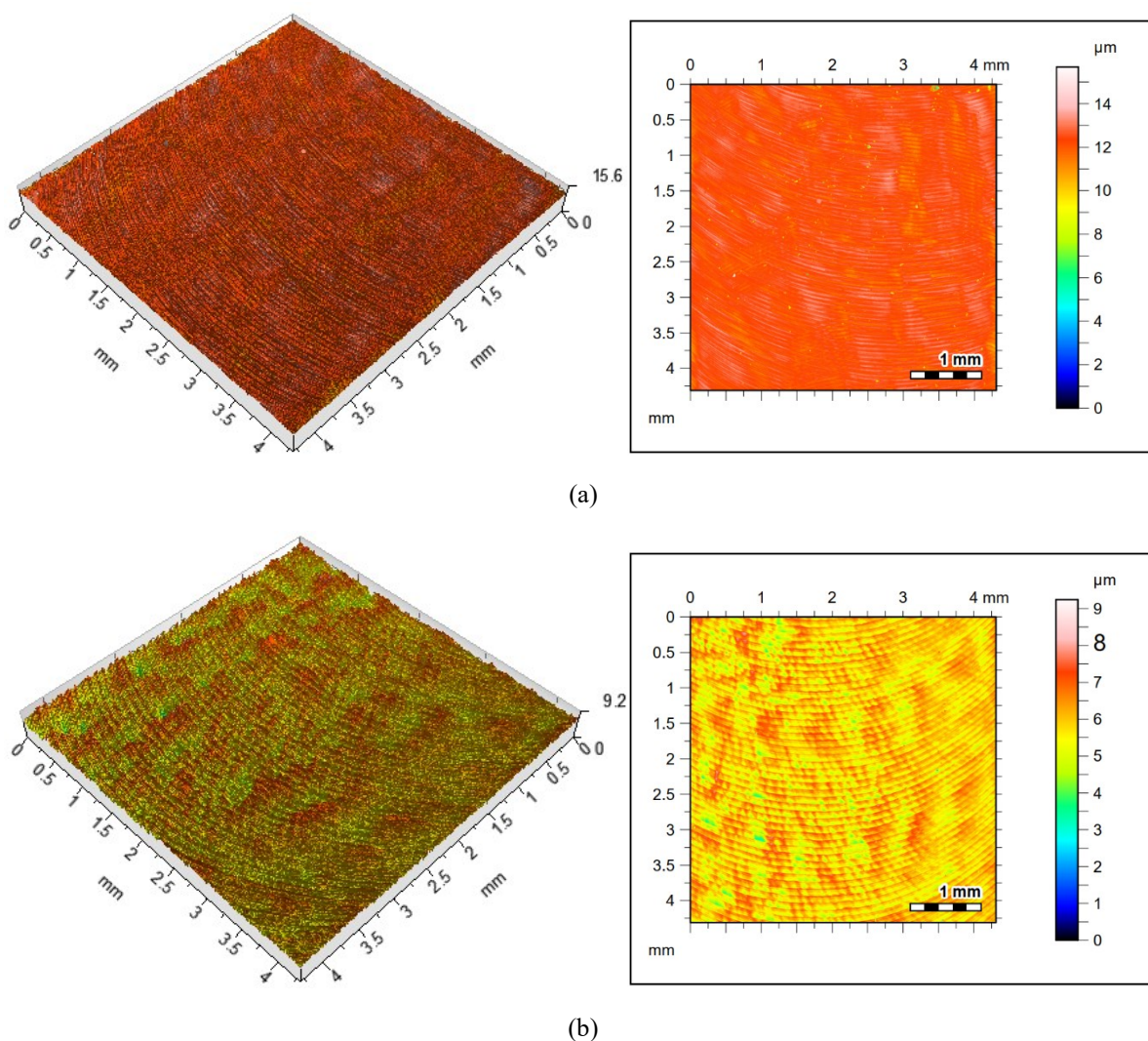


Fonte: Dados do autor.

4.5.3.3 Rugosidade

A Figura 4.64 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a mistura do óleo Superfluido 3 com grafite. Nota-se um aumento de S_q de 27%. O parâmetro S_{sk} , negativo para ambas as condições de corte indicam a prevalência de vales. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos. Observa-se que o aumento de f acentuou as marcas de avanço.

Figura 4.64 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando óleo e grafite. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,45$; $S_{sk}=-1,05$; $S_{ku}=15,30$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,57$; $S_{sk}=-0,13$; $S_{ku}=3,33$)

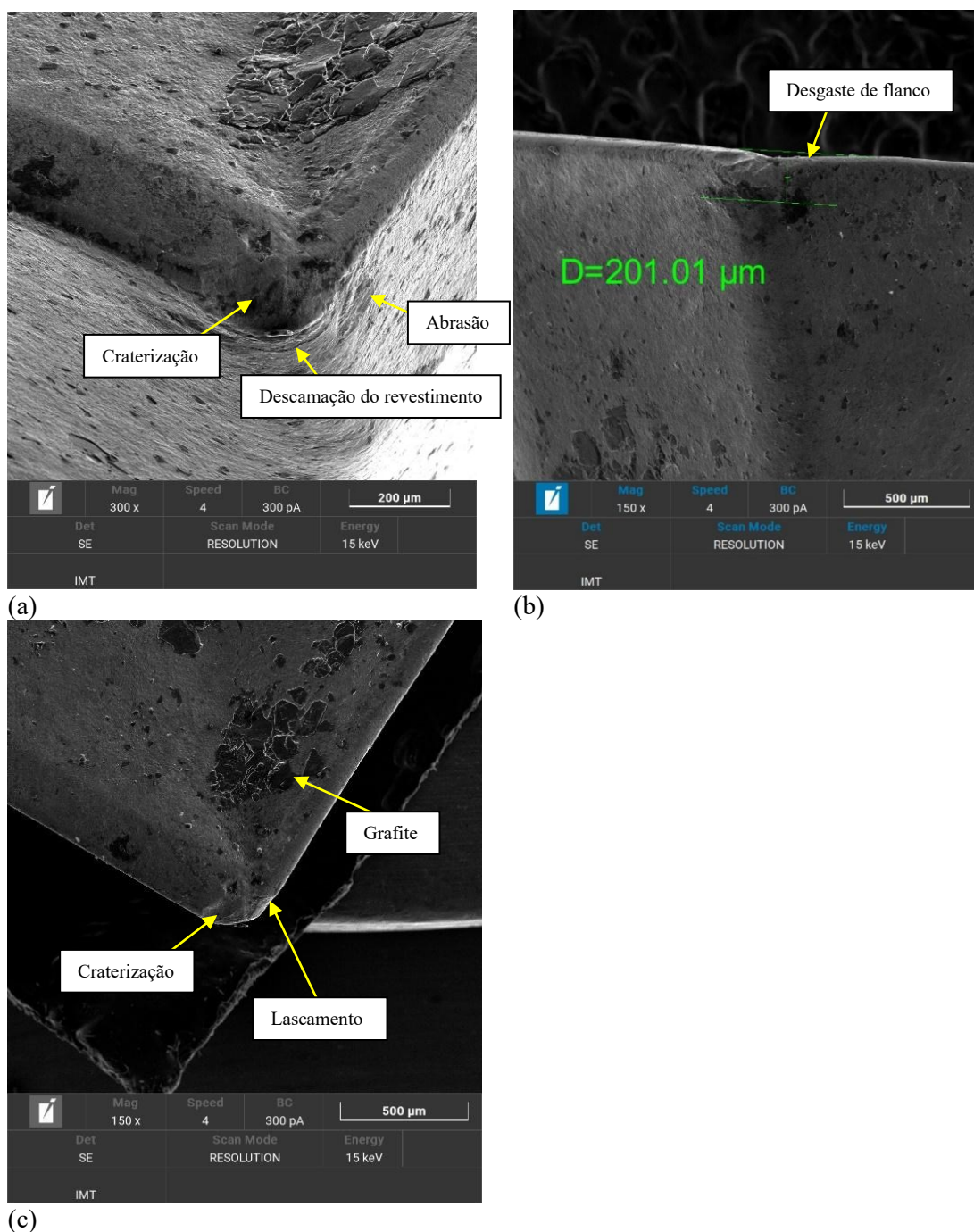


Fonte: Dados do autor.

4.5.3.4 Desgaste do inserto de corte

Na estratégia de lubrificação com a utilização de óleo + grafite como fluido notou-se a ocorrência de desgastes de abrasão, de flanco, lascamento e desgaste de cratera na superfície de saída do inserto de corte (Figura 4.65). Análises por espectroscopia de raios X por dispersão de energia foram realizadas para verificar a distribuição dos constituintes.

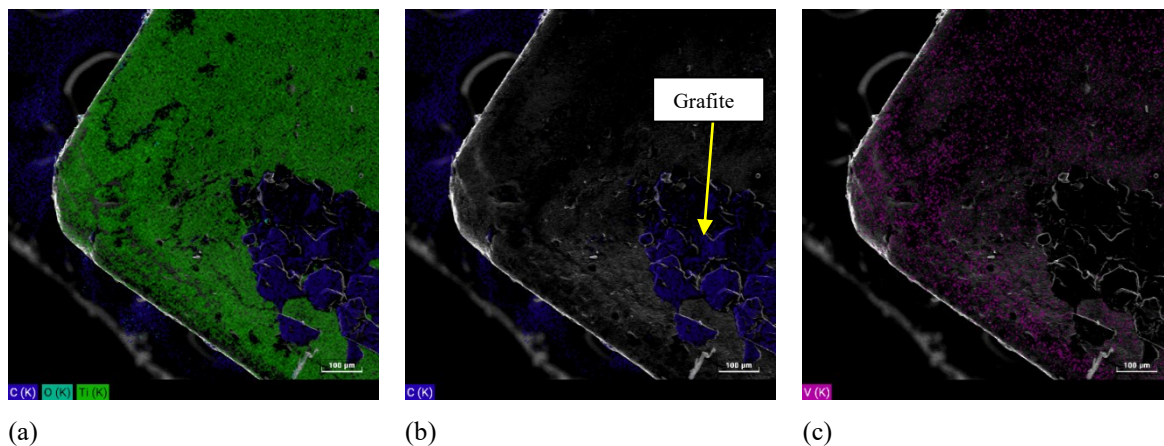
Figura 4.65 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição óleo e grafite



Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.66 ilustra o resultado, demonstrando a presença e distribuição dos elementos Titânio, Vanádio, Carbono e Oxigênio. É possível verificar o acúmulo e distribuição de partículas de grafite no inserto de corte.

Figura 4.66 – Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com óleo e grafite. (a) Elementos encontrados (b) Distribuição de Carbono. (c) Distribuição de Vanádio



Fonte: Dados do autor.

4.5.4 Usinagem utilizando lubrificação intermitente com Nitrogênio Líquido

4.5.4.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de nitrogênio líquido como lubrificante é mostrado na Tabela 4.12.

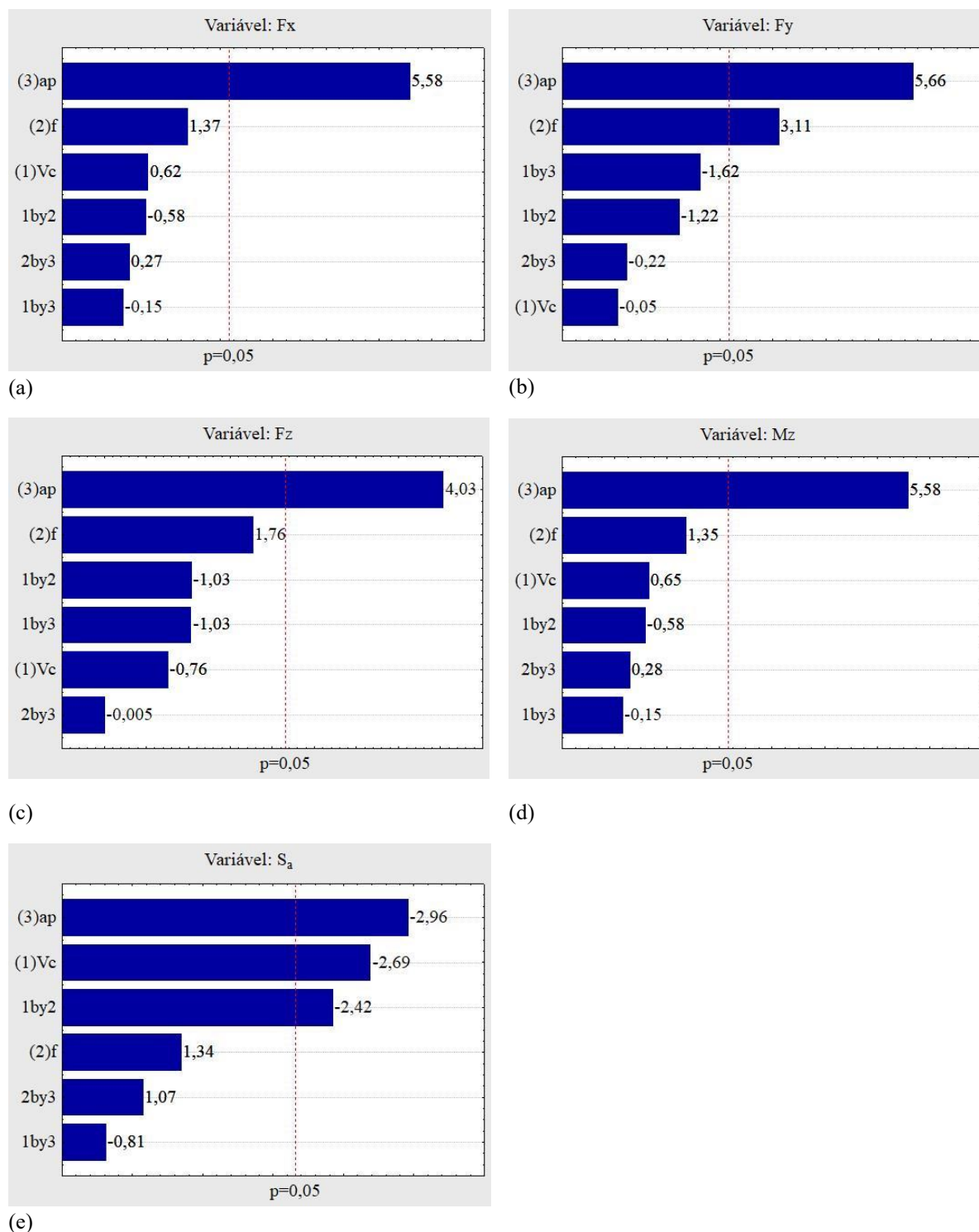
Tabela 4.12 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de nitrogênio líquido

LN ₂ Cíclico	v _c (m/min)	f _z (mm/rev)	a _p (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _z (Nm)	S _a
1	80	0,06	0,5	30,83	115,80	98,44	0,15	0,23
2	100	0,06	0,5	67,52	307,50	132,64	0,34	0,25
3	80	0,1	0,5	92,57	322,95	149,51	0,46	0,27
4	100	0,1	0,5	70,83	344,10	142,50	0,35	0,20
5	80	0,06	1,0	137,98	425,55	194,26	0,69	0,23
6	100	0,06	1,0	169,51	412,20	188,58	0,85	0,19
7	80	0,1	1,0	171,85	623,25	275,12	0,86	0,25
8	100	0,1	1,0	163,86	482,85	152,26	0,82	0,20
9	90	0,08	0,75	130,83	380,85	205,59	0,65	0,21
10	90	0,08	0,75	186,04	388,50	231,86	0,93	0,19
11	80	0,06	0,5	58,06	189,75	81,97	0,29	0,23
12	100	0,06	0,5	76,34	182,55	74,63	0,38	0,26
13	80	0,1	0,5	60,94	283,95	118,40	0,30	0,28
14	100	0,1	0,5	73,71	286,20	120,29	0,37	0,24
15	80	0,06	1,0	128,10	376,05	164,96	0,64	0,21
16	100	0,06	1,0	113,67	360,00	165,77	0,57	0,20
17	80	0,1	1,0	146,06	450,75	222,59	0,73	0,25
18	100	0,1	1,0	165,52	399,90	205,80	0,83	0,19
19	90	0,08	0,75	141,29	474,30	230,71	0,71	0,24
20	90	0,08	0,75	157,28	440,40	218,69	0,79	0,23

Fonte: Fados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.67 observou-se que a profundidade de corte demonstrou influência sobre F_x, F_z e M_z. A força F_y foi influenciada pelas variáveis independentes a_p e f no intervalo de confiança estudado. O parâmetro de rugosidade foi influenciado pela profundidade de penetração, pela velocidade de corte e pela interação entre velocidade de corte e avanço.

Figura 4.67 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a .

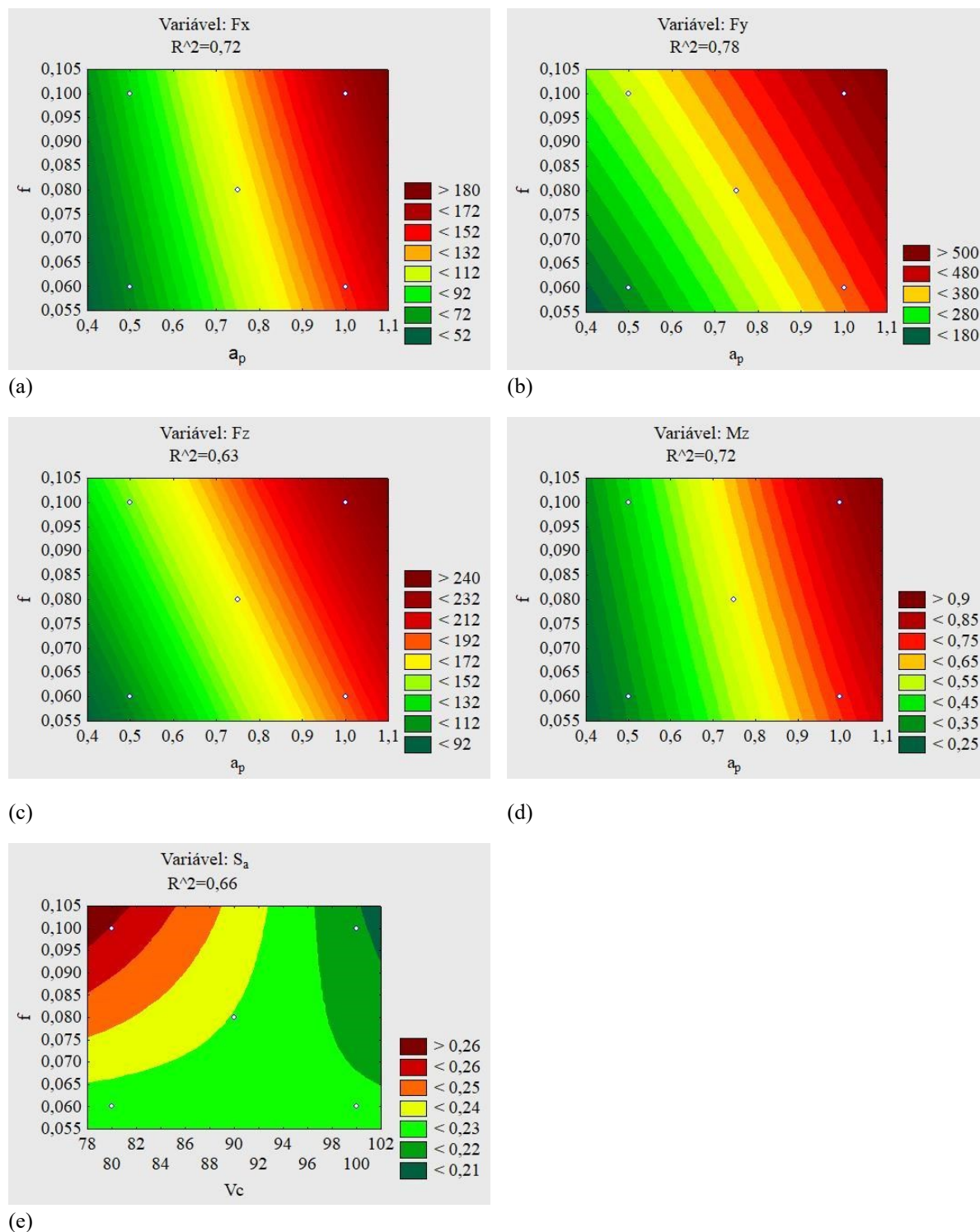


Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio com nitrogênio líquido ilustrada na Figura 4.68 percebe-se que os valores mínimos de forças ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte. Os menores valores de S_a ,

ocorrem com menores avanços. A Tabela 4.13 mostra as equações de predição pela metodologia DOE empregada.

Figura 4.68 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$)



Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.13 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

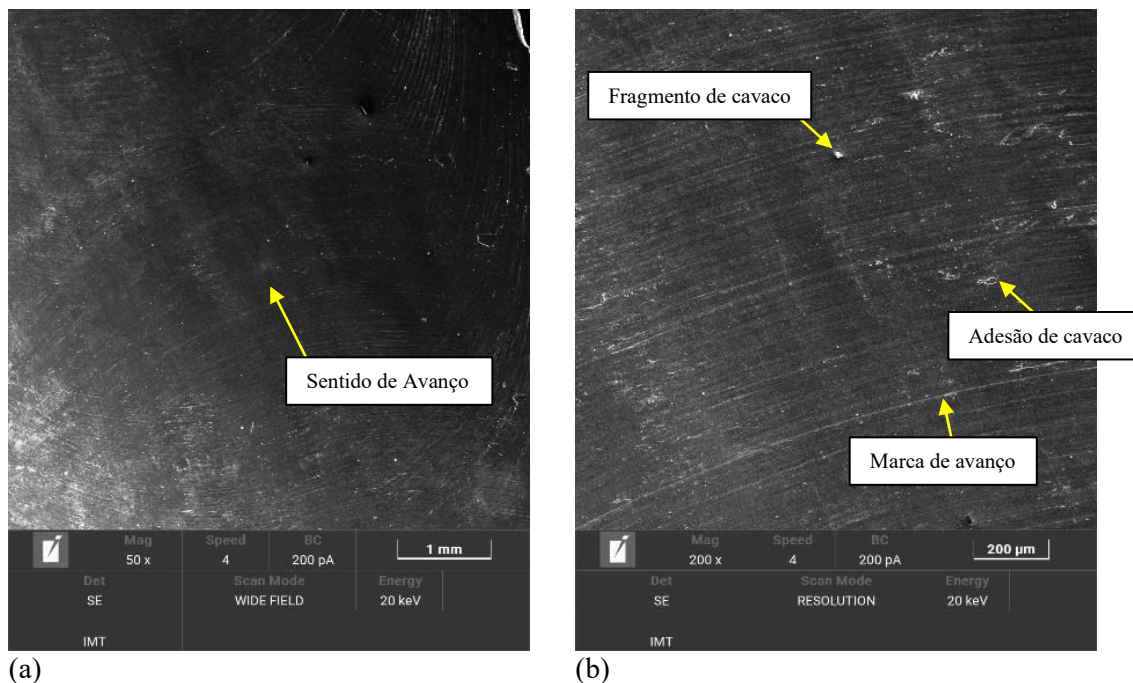
LN ₂ cíclico	Função matemática
F _x	$=-251,86+2,53*v_c+2160,22*f-21,74*v_c*f-0,43*a_p*v_c+409,12*a_p*f+129,69$
F _y	$=-1611,23+16,03*v_c+12209,53*f-100,92*v_c*f-10,71*a_p*v_c-733,12*a_p*f+1047,99$
F _z	$z=-611,96+6,52*v_c+5589,12*f-52,115*v_c*f-4,16*a_p*v_c-10,25*a_p*f+403,23$
M _z	$=-1,28+0,01*v_c+10,78*f-0,11*v_c*f-0,002*a_p*v_c+2,12*a_p*f+0,65$
S _a	$=-0,09+0,004*v_c+4,62*f-0,06*v_c*f-0,002*a_p*v_c+1,0*a_p*f$

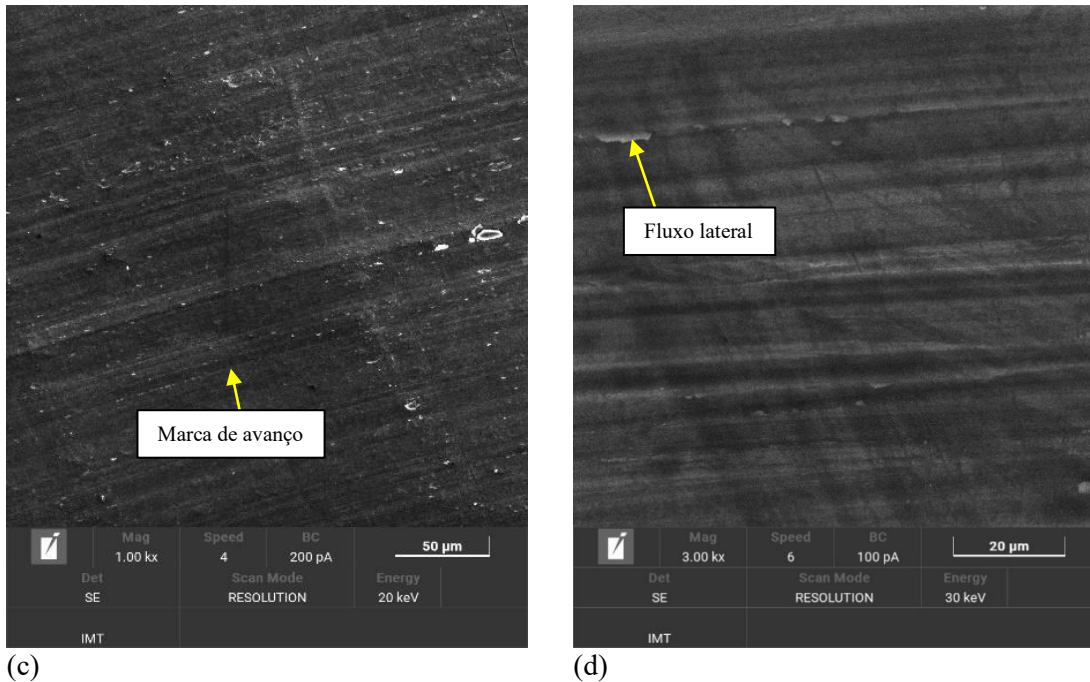
Fonte: Dados do Autor.

4.5.4.2 Superfície usinada

A Figura 4.69 mostra a superfície usinada na condição de corte com nitrogênio líquido intermitente. Nesta é possível visualizar as marcas de avanço menos pronunciadas. Apenas poucos fragmentos e cavaco aderidos foram observados, resultando em um acabamento superior às demais estratégias de corte.

Figura 4.69 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.

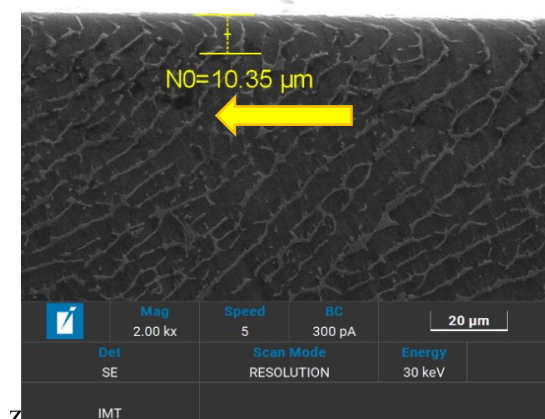




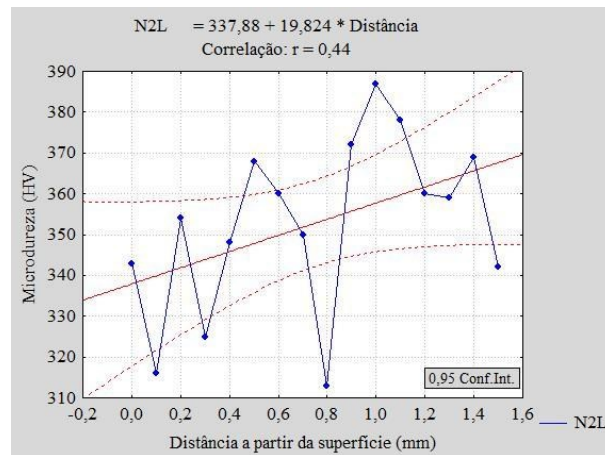
Fonte: Dados do autor.

A Figura 4.70 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $12,23 \pm 3,18$. A Figura 4.71 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se a tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.70 – Deformação na superfície usinada.



Fonte: Dados do autor.

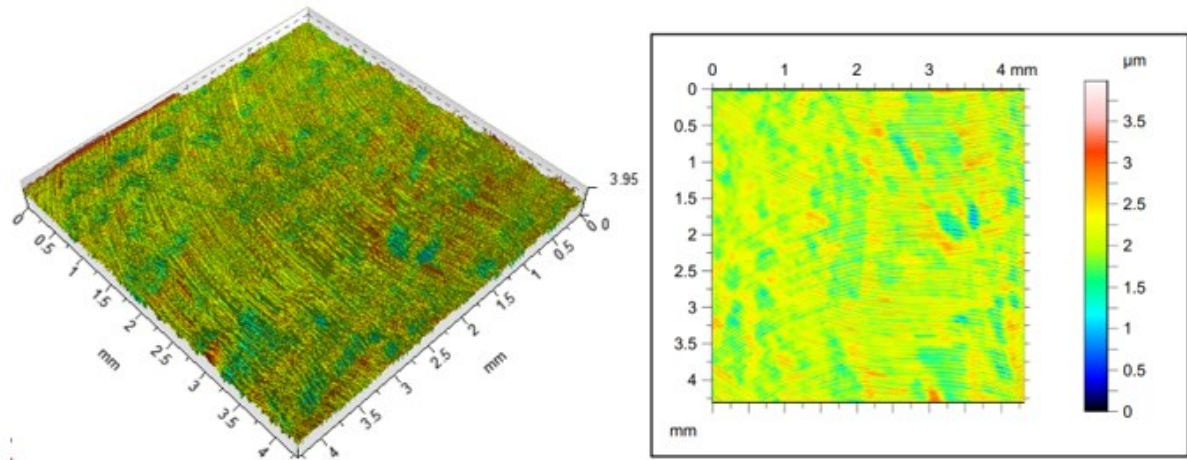
Figura 4.71 – Medições de dureza (HV) - Óleo.

Fonte: Dados do autor.

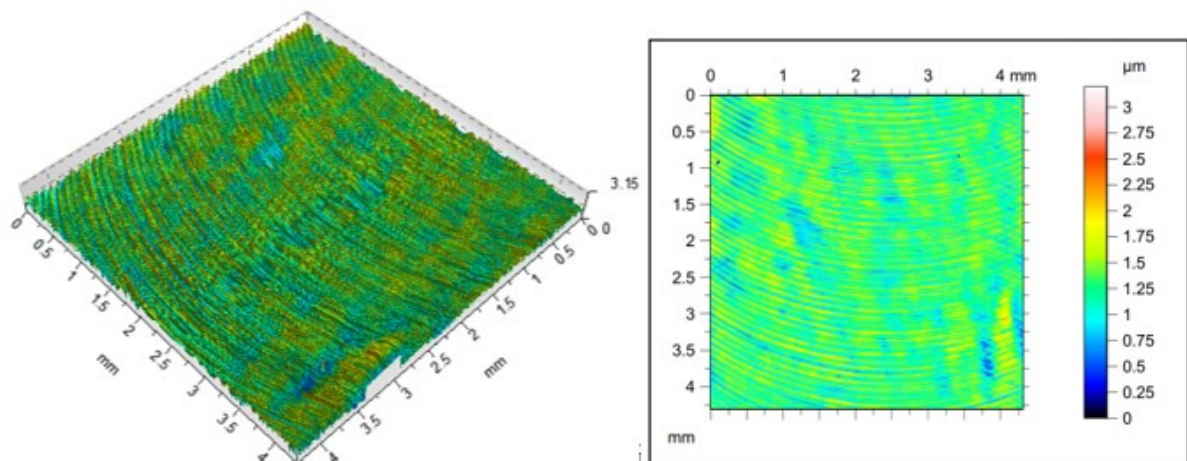
4.5.4.3 Rugosidade

A Figura 4.72 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a utilização de nitrogênio líquido. O parâmetro S_{sk} , negativo indica a prevalência de vales para a condição mínima de corte. Para a condição máxima de corte indica a prevalência de picos. O parâmetro S_q praticamente se manteve constante. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos.

Figura 4.72 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando nitrogênio líquido. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,30$; $S_{sk}=-0,50$; $S_{ku}=4,65$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,26$; $S_{sk}=0,16$; $S_{ku}=3,42$).



(a)



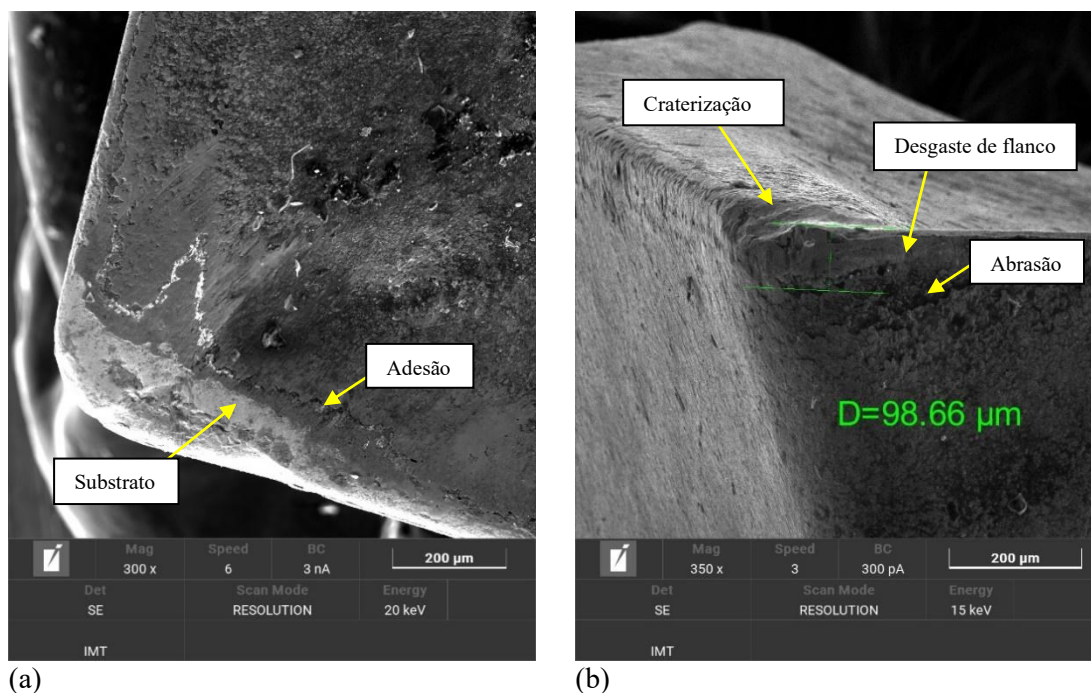
(b)

Fonte: Dados do autor.

4.5.4.4 Desgaste do inserto de corte

A utilização de nitrogênio líquido como refrigerante proporcionou a ocorrência de desgastes de flanco, abrasão e desgaste de cratera na superfície de saída do inserto de corte (Figura 4.73). Análises por espectroscopia de raios X por dispersão de energia foram realizadas para verificar a distribuição dos constituintes.

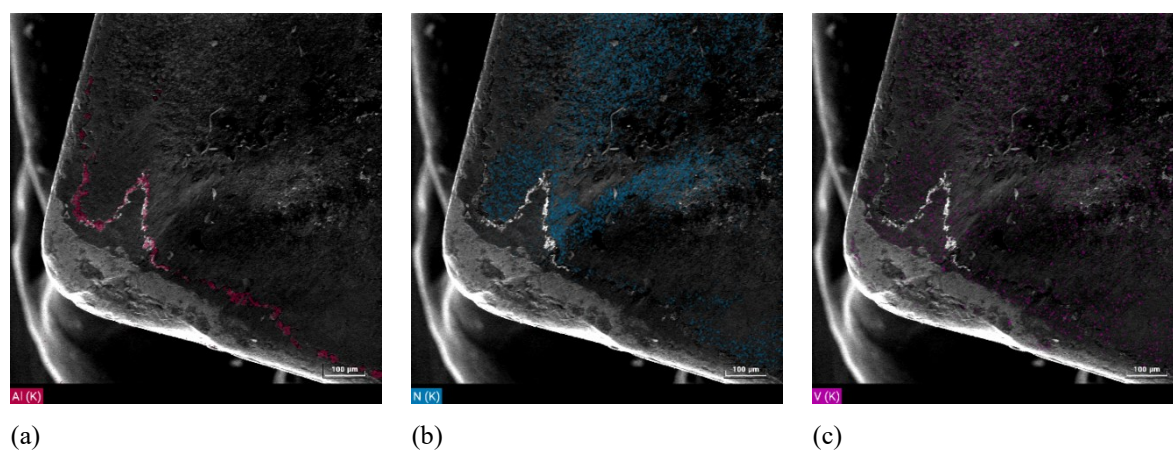
Figura 4.73 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com nitrogênio líquido.

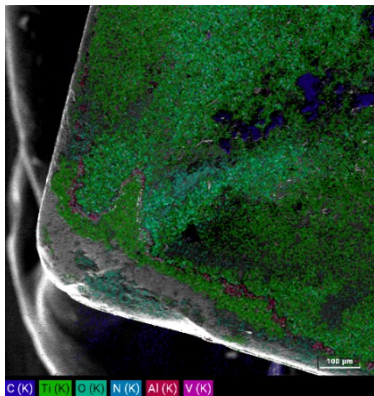


Fonte: Dados do autor.

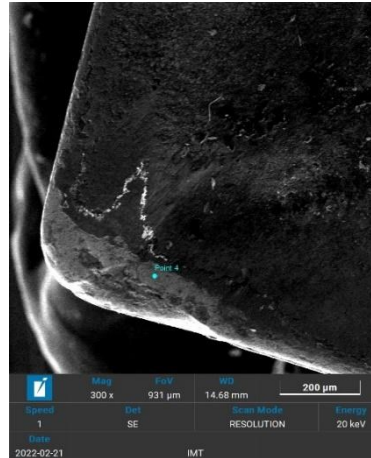
A análise por EDS demonstrou a presença e distribuição dos elementos Titânio, Alumínio, Nitrogênio e Vanádio visualizados na Figura 4.74. Nota-se uma linha de elemento Alumínio, provavelmente pelo transiente térmico ocorrido. A análise EDS do ponto mostra a presença de Cobalto, Tungstênio, Nitrogênio, indicando a remoção da camada de cobertura.

Figura 4.74 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.





(d)



(e)

Fonte: Dados do autor.

4.5.5 Usinagem utilizando lubrificação com Álcool Etilico + CO₂ Sólido

4.5.5.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de álcool etílico + CO₂ sólido como lubrificante é mostrado na Tabela 4.14.

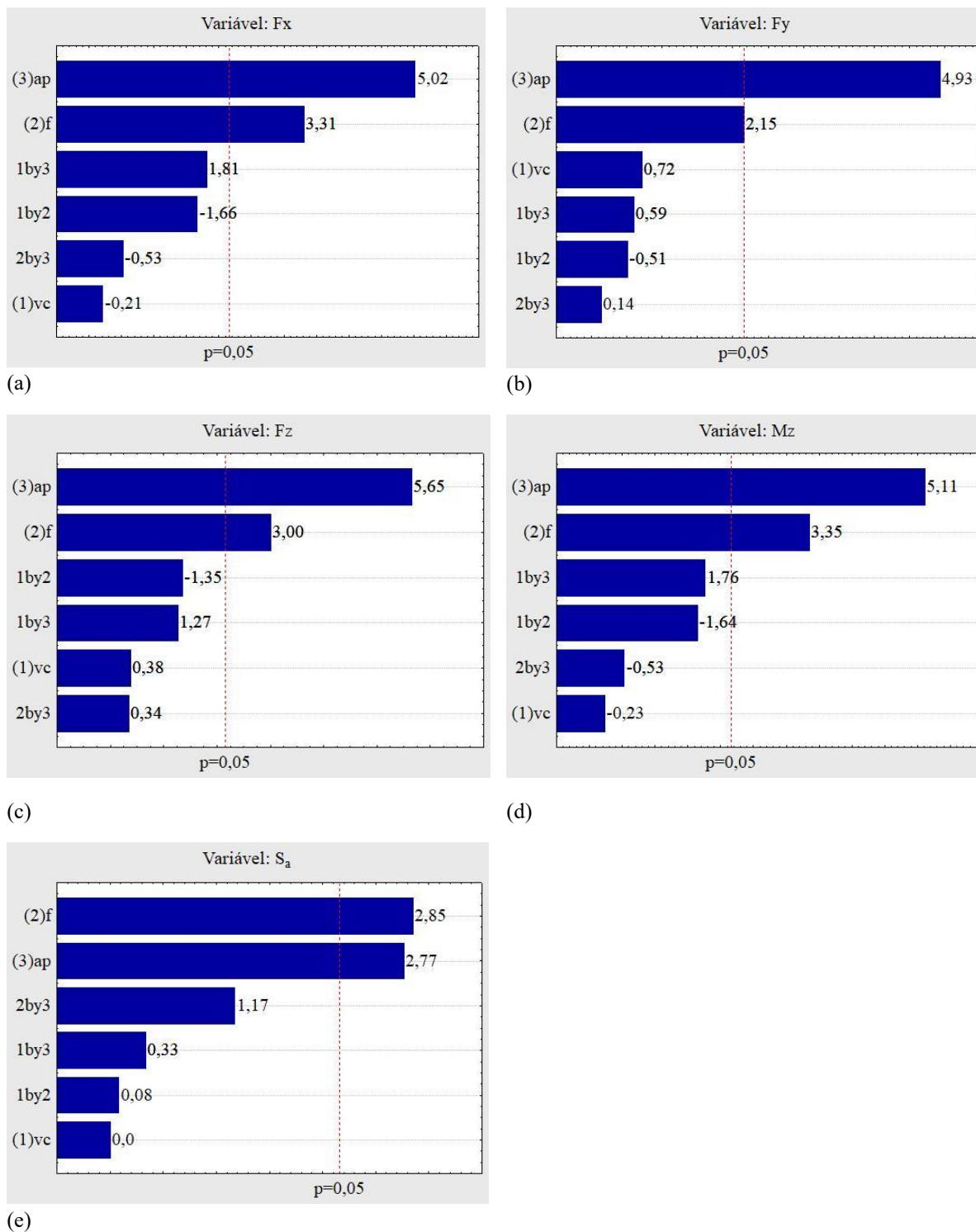
Tabela 4.14 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Álcool Etilico + CO₂ Sólido.

Álcool + CO ₂	v _c (m/min)	f _z (mm/rev)	a _p (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _z (Nm)	S _a
1	80	0,06	0,5	52,79	205,20	66,24	0,26	0,23
2	100	0,06	0,5	60,42	232,50	87,73	0,30	0,21
3	80	0,1	0,5	80,40	314,25	119,35	0,40	0,24
4	100	0,1	0,5	67,59	319,50	112,03	0,34	0,24
5	80	0,06	1,0	107,93	358,50	152,09	0,54	0,26
6	100	0,06	1,0	138,32	461,25	178,29	0,69	0,24
7	80	0,1	1,0	147,58	457,80	185,78	0,74	0,29
8	100	0,1	1,0	123,62	405,60	176,14	0,62	0,33
9	90	0,08	0,75	108,05	345,00	149,52	0,54	0,25
10	90	0,08	0,75	111,24	348,15	153,28	0,56	0,29
11	80	0,06	0,5	74,78	107,4	79,98	0,37	0,25
12	100	0,06	0,5	54,62	91,8	74,33	0,27	0,22
13	80	0,1	0,5	134,84	152,4	121,54	0,67	0,31
14	100	0,1	0,5	90,94	153,9	73,66	0,45	0,32
15	80	0,06	1,0	77,04	233,7	89,25	0,39	0,27
16	100	0,06	1,0	108,88	304,2	124,18	0,54	0,33
17	80	0,1	1,0	119,9	381,3	154,6	0,60	0,50
18	100	0,1	1,0	136,42	457,5	176,23	0,68	0,46
19	90	0,08	0,75	102,84	287,7	116,02	0,51	0,29
20	90	0,08	0,75	111,74	315,3	129,36	0,56	0,35

Fonte: Dados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.75 observou-se que a profundidade de corte e o avanço influenciaram as forças de corte e o torque. O parâmetro de rugosidade também foi influenciado pelo avanço e pela profundidade de corte.

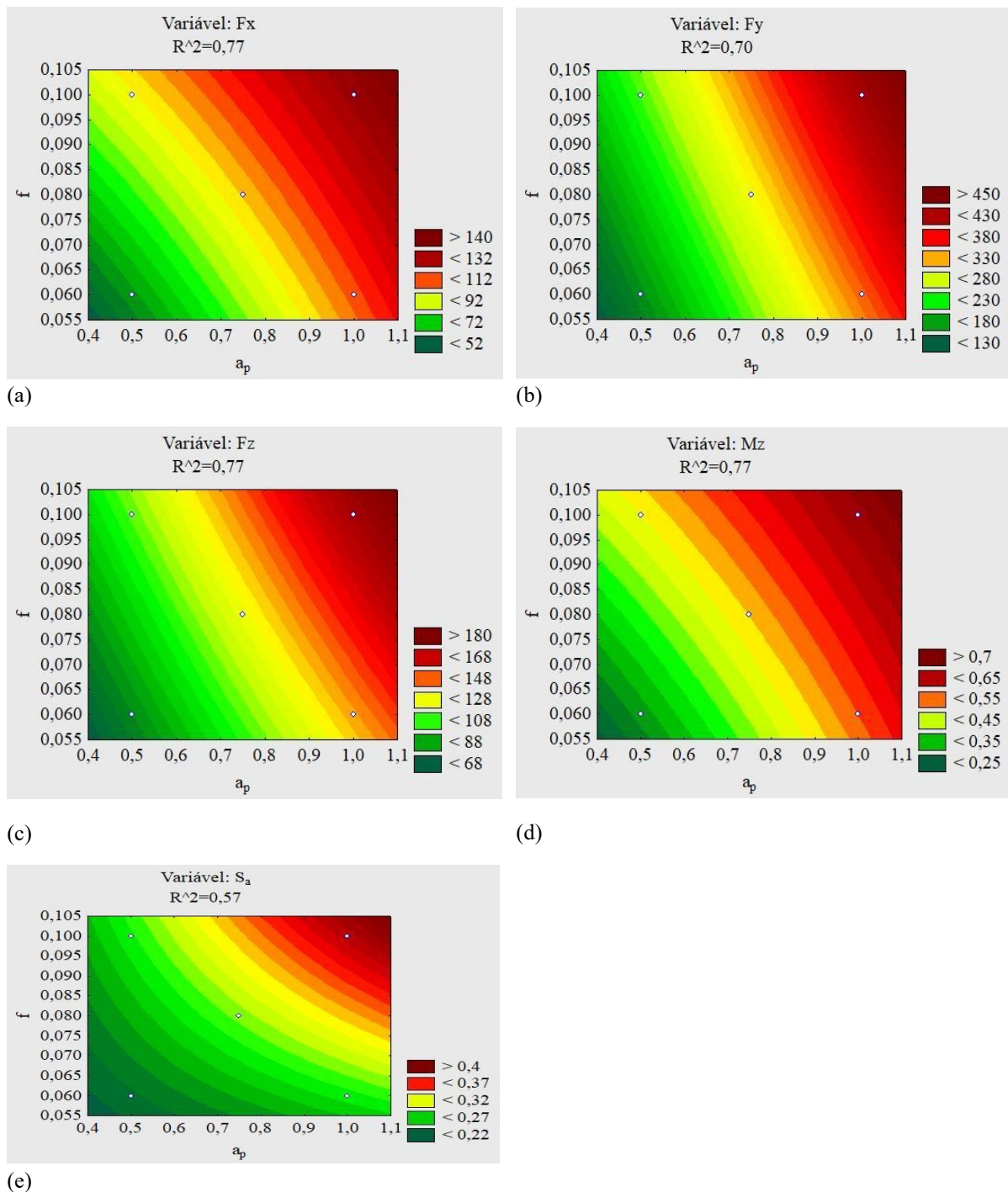
Figura 4.75 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando Álcool Etilico + CO₂ Sólido. (a) F_x. (b) F_y. (c) F_z. (d) M_z. (e) S_a.



Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio com álcool etílico hidratado e CO₂ ilustrada na Figura 4.76 percebe-se que os valores mínimos de forças de usinagem e torque ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte. Os menores valores de S_a também ocorrem com menores avanços e profundidades de penetração. A Tabela 4.15 mostra as equações de predição pela metodologia DOE empregada.

Figura 4.76 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando Álcool Etílico + CO₂ Sólido. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).



Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.15 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

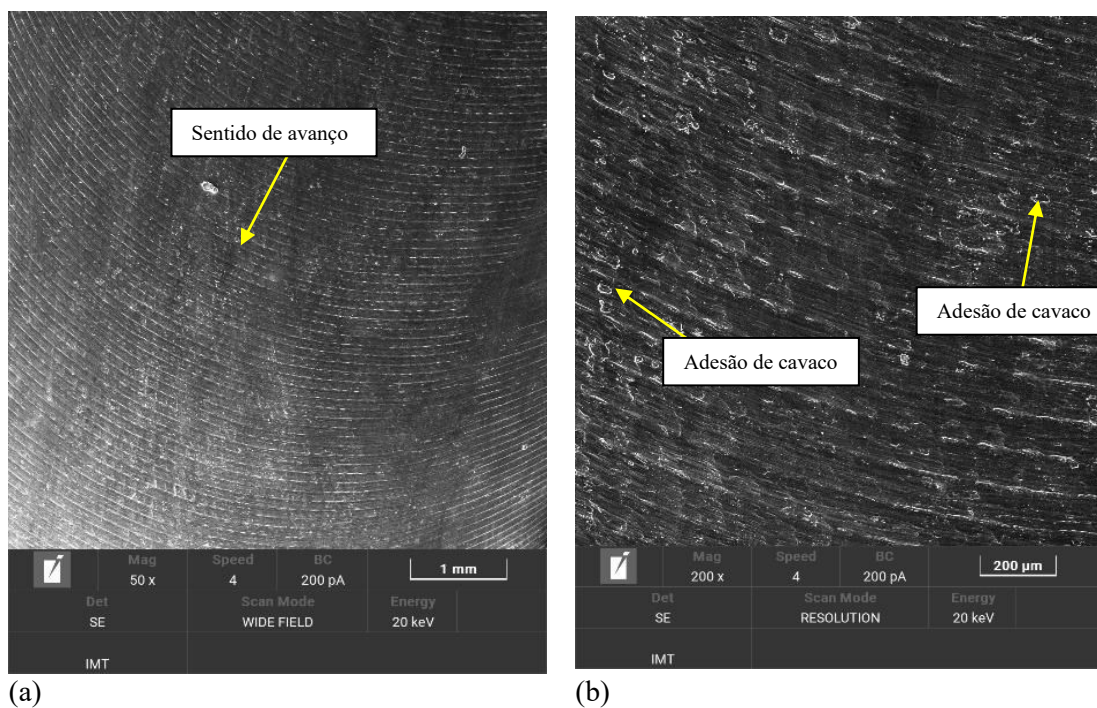
Álcool e CO ₂	Função matemática
F_x	$=-194,35+1,77*v_c+2533,567*f-23,06*v_c*f+0,34*a_p*v_c+111,5*a_p*f+63,66$
F_y	$=-335,23+2,64*v_c+5423,44*f-32,72*v_c*f+1,07*a_p*v_c-746,25*a_p*f+208,35$
F_z	$=-137,07+1,02*v_c+1844,72*f-10,83*v_c*f+0,009*a_p*v_c-142,87*a_p*f+116,85$
M_z	$=-0,97+0,009*v_c+12,5*f-0,11*v_c*f+0,001*a_p*v_c+0,50*a_p*f+0,34$
S_a	$=0,39-0,002*v_c-1,06*f+0,006*v_c*f+0,002*a_p*v_c+3,5*a_p*f-0,22$

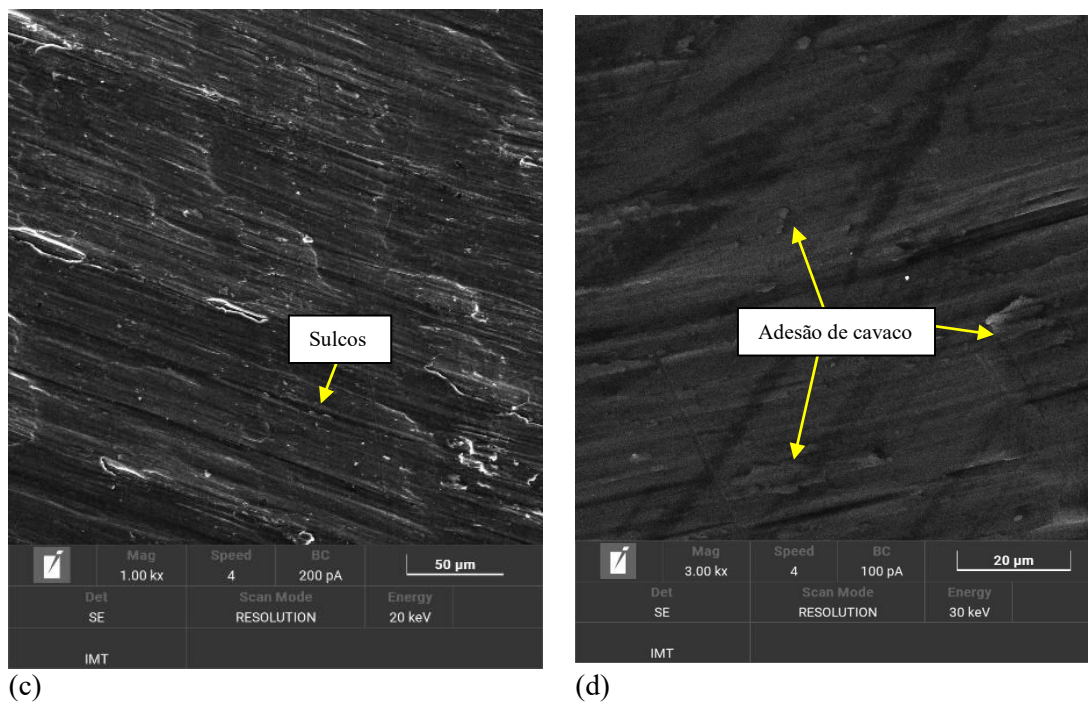
Fonte: Dados do Autor.

4.5.5.2 Superfície usinada

Na superfície usinada na condição de corte com aplicação de Álcool Etilico hidratado + CO₂ as marcas de avanço são nítidas. Marcas de avanço e adesão de cavacos foram observados. A Figura 4.77 mostra ampliações da superfície.

Figura 4.77 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.

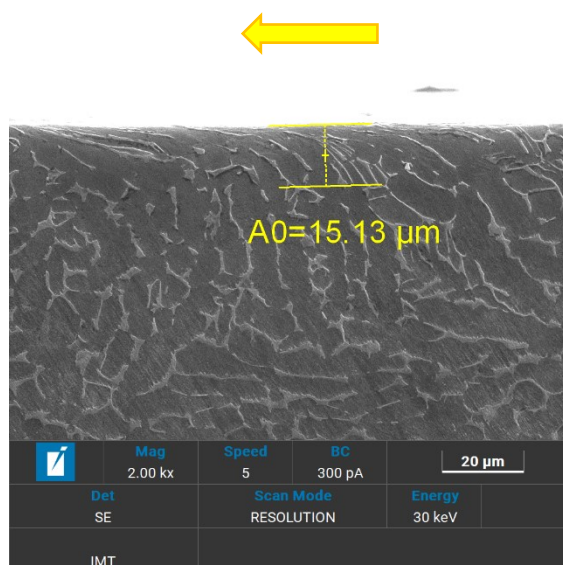




Fonte: Dados do autor.

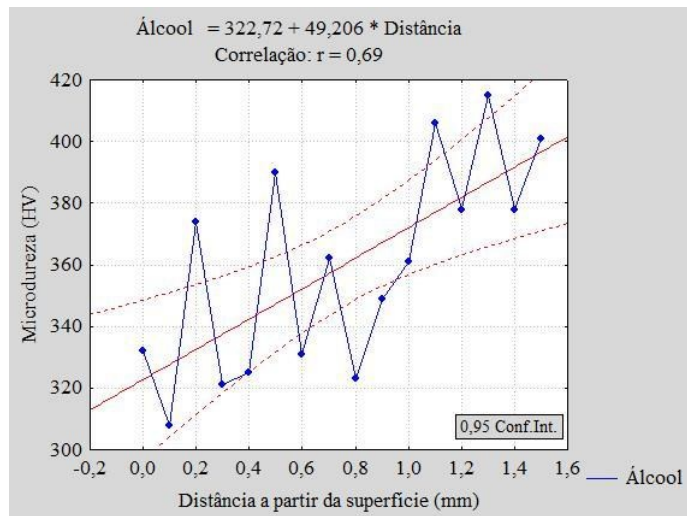
A Figura 4.78 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $11,21 \pm 2,00$. A Figura 4.79 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se a tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.78 – Deformação na superfície usinada



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.79 – Medições de dureza (HV) – Álcool Etilico Hidratado

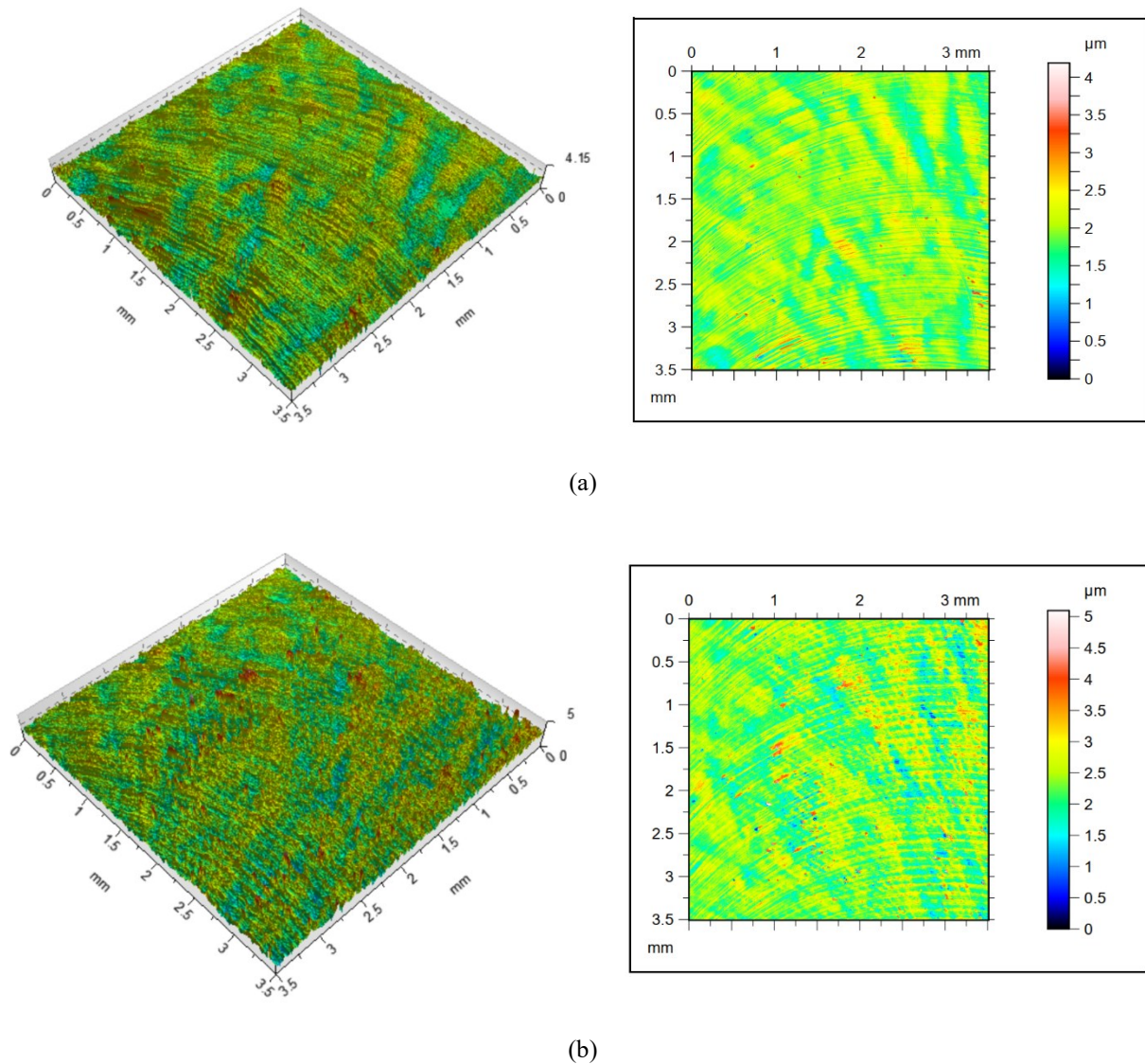


Fonte: Dados do autor.

4.5.5.3 Rugosidade

A Figura 4.80 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a utilização de álcool etílico hidratado + CO₂. O parâmetro S_{sk} , positivo indica a prevalência de picos. O parâmetro S_q aumentou em 48% para a condição mais crítica quando comparado com a condição menos crítica de corte. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos.

Figura 4.80 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando álcool etílico hidratado. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,29$; $S_{sk}=0,21$; $S_{ku}=4,38$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,43$; $S_{sk}=0,30$; $S_{ku}=4,45$).



Fonte: Dados do autor.

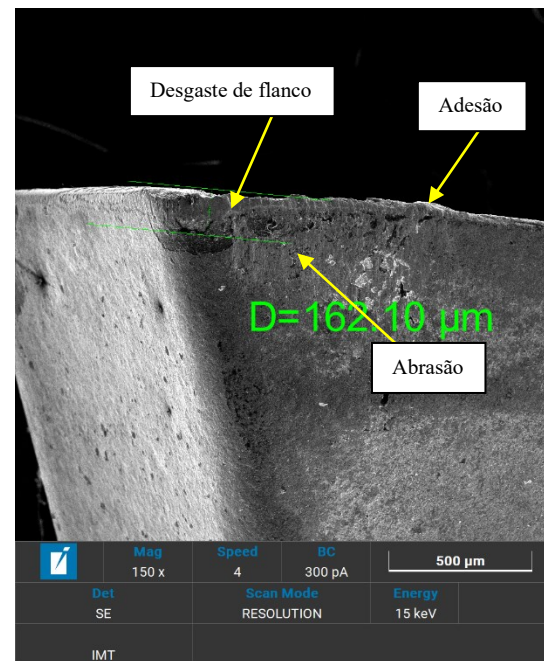
4.5.5.4 Desgaste do inserto de corte

A utilização de Álcool Etílico + CO₂ Sólido como lubrificante e refrigerante proporcionou a ocorrência de desgastes de flanco, abrasão e adesão. Nota-se também a remoção do material do inserto em alguns pontos (Figura 4.81). A análise por EDS demonstrou a presença e distribuição dos elementos Alumínio, Titânio, Nitrogênio, Carbono e Vanádio visualizados na Figura 4.82.

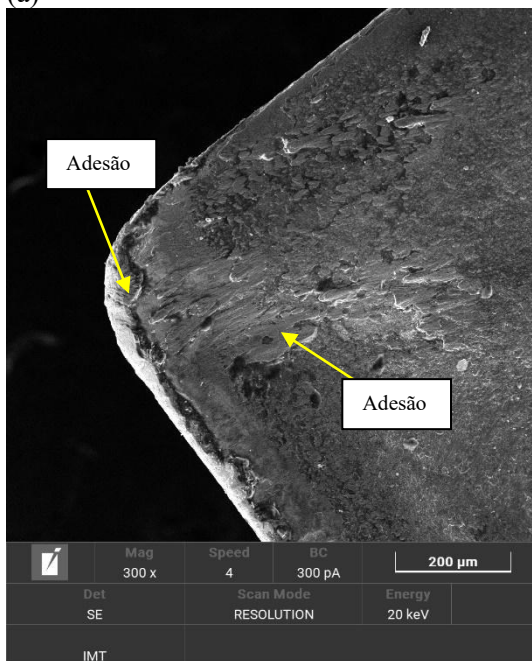
Figura 4.81 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição sem lubrificação -150x.



(a)



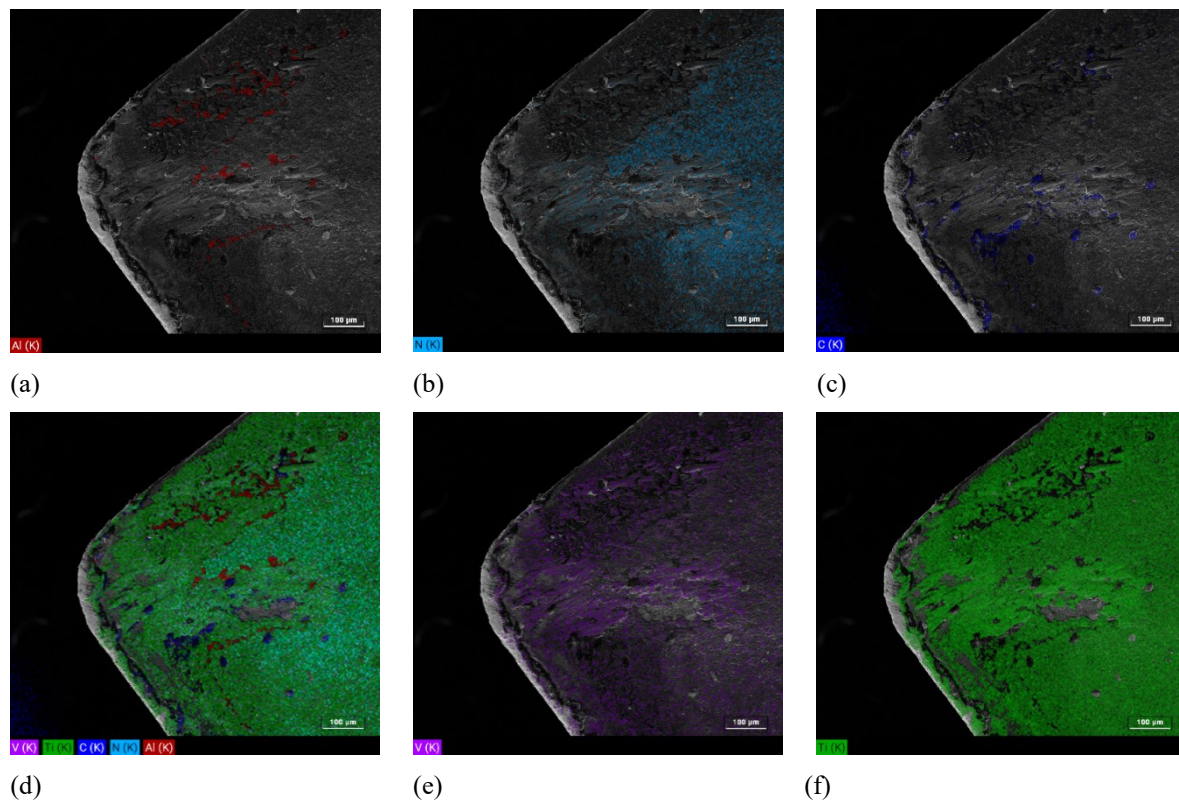
(b)



(c)

Fonte: Dados do autor.

Figura 4.82 – Análise de espectroscopia de raios X – Inseto de corte utilizado com álcool etílico hidratado e CO₂ sólido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Carbono (d) Elementos encontrados. (e) Distribuição de Vanádio. (f) Distribuição de Titânio.



Fonte: Dados do autor.

4.5.6 Usinagem utilizando CO₂ sólido com Etanol (100%)

4.5.6.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de CO₂ sólido com Etanol como lubrificante é mostrado na Tabela 4.16.

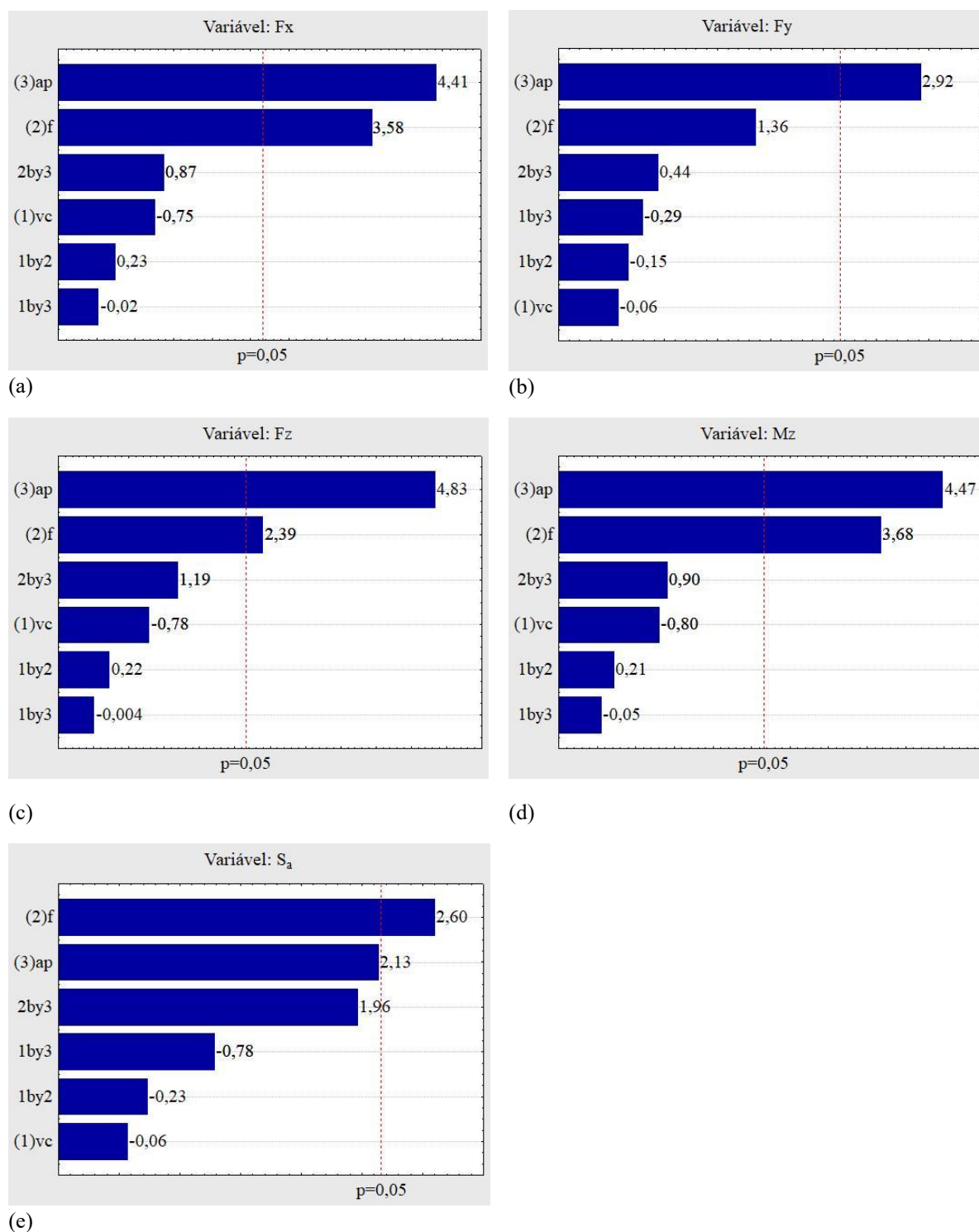
Tabela 4.16 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Etanol (100%) + CO₂ sólido.

Etanol + CO ₂	v _c (m/min)	f _z (mm/rev)	a _p (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _z (Nm)	S _a
1	80	0,06	0,5	52,24	121,5	108,19	0,26	0,46
2	100	0,06	0,5	53,95	142,5	116,83	0,27	0,38
3	80	0,1	0,5	102,13	205,5	147,55	0,51	0,33
4	100	0,1	0,5	93,47	210,3	132,08	0,47	0,52
5	80	0,06	1,0	103,95	362,55	174,58	0,52	0,38
6	100	0,06	1,0	88,74	365,25	157,31	0,44	0,51
7	80	0,1	1,0	131,4	525,75	210,72	0,66	0,82
8	100	0,1	1,0	148,79	519,3	204,64	0,74	0,62
9	90	0,08	0,75	95,24	402,75	161,39	0,48	0,33
10	90	0,08	0,75	109,96	424,8	169,09	0,55	0,40
11	80	0,06	0,5	84,32	30,15	103,25	0,42	0,27
12	100	0,06	0,5	74,08	56,85	66,98	0,37	0,28
13	80	0,1	0,5	91,38	86,25	86,85	0,46	0,32
14	100	0,1	0,5	80,66	96,15	90,26	0,40	0,37
15	80	0,06	1,0	110,24	156,3	127,75	0,55	0,28
16	100	0,06	1,0	96,38	131,1	121,41	0,48	0,26
17	80	0,1	1,0	153,12	258,3	179,41	0,77	0,59
18	100	0,1	1,0	135,42	193,35	168,99	0,68	0,48
19	90	0,08	0,75	124,54	186,6	138,58	0,62	0,27
20	90	0,08	0,75	154,98	189,45	154,11	0,77	0,31

Fonte: Dados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.83 observou-se que as forças F_x e F_z e o Torque são influenciadas pela profundidade de corte e pelo avanço. A força F_y foi influenciada pela profundidade de penetração no intervalo de confiança estudado. O parâmetro de rugosidade S_a foi influenciado pelo avanço.

Figura 4.83 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando CO₂ sólido com Etanol (100%). (a) F_x. (b) F_y. (c) F_z. (d) M_z. (e) S_a.

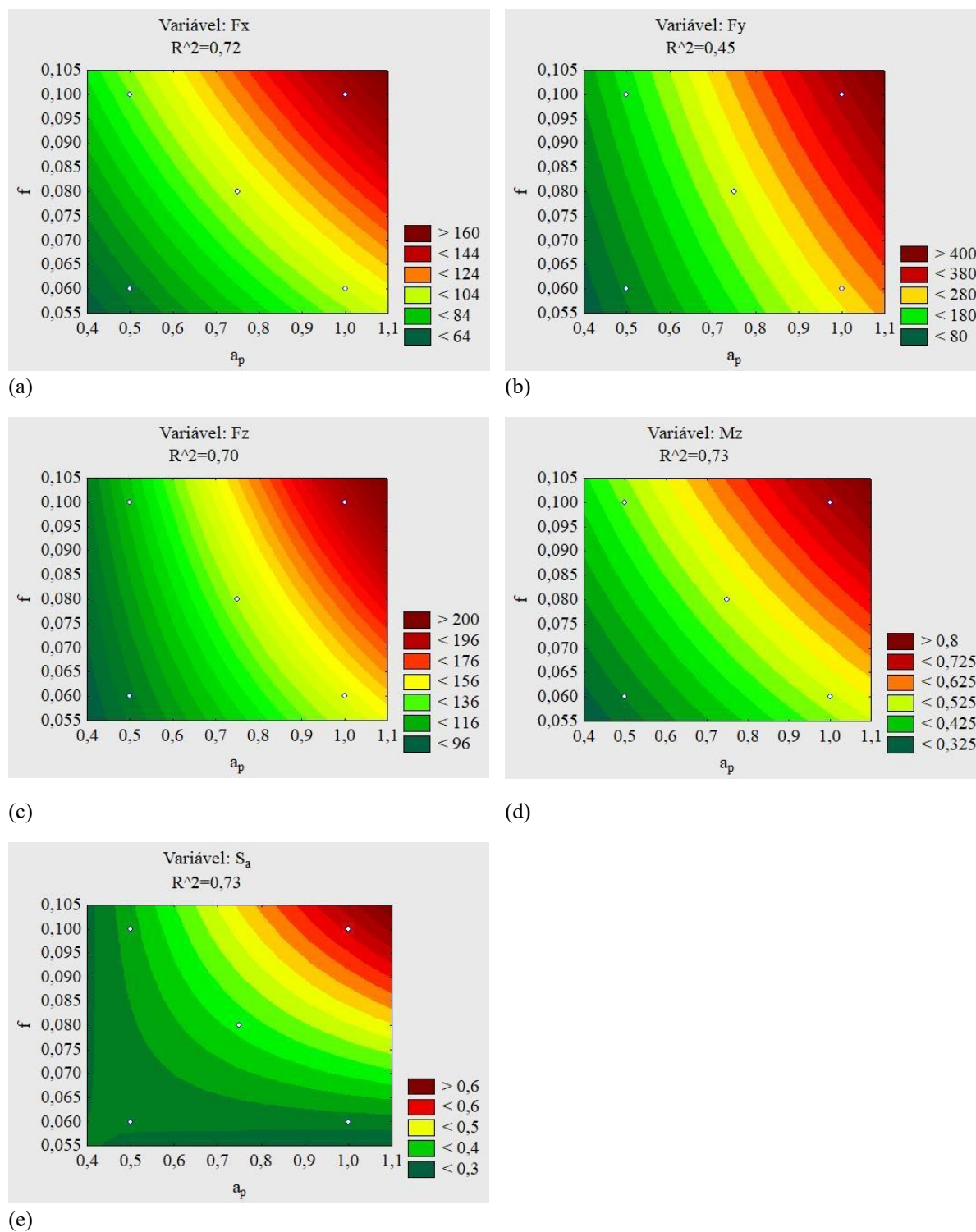


Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio com nitrogênio líquido ilustrada na Figura 4.84 percebe-se que os valores mínimos de forças de usinagem ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte. Os menores

valores de S_a , também ocorrem com menores avanços e menores profundidades de penetração. A Tabela 4.17 mostra as equações de predição pela metodologia DOE empregada.

Figura 4.84 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando CO_2 sólido com Etanol (100%). (a) F_x (a_p x f). (b) F_y (a_p x f). (c) F_z (a_p x f). (d) M_z (a_p x f). (e) S_a (a_p x f).



Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.17 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

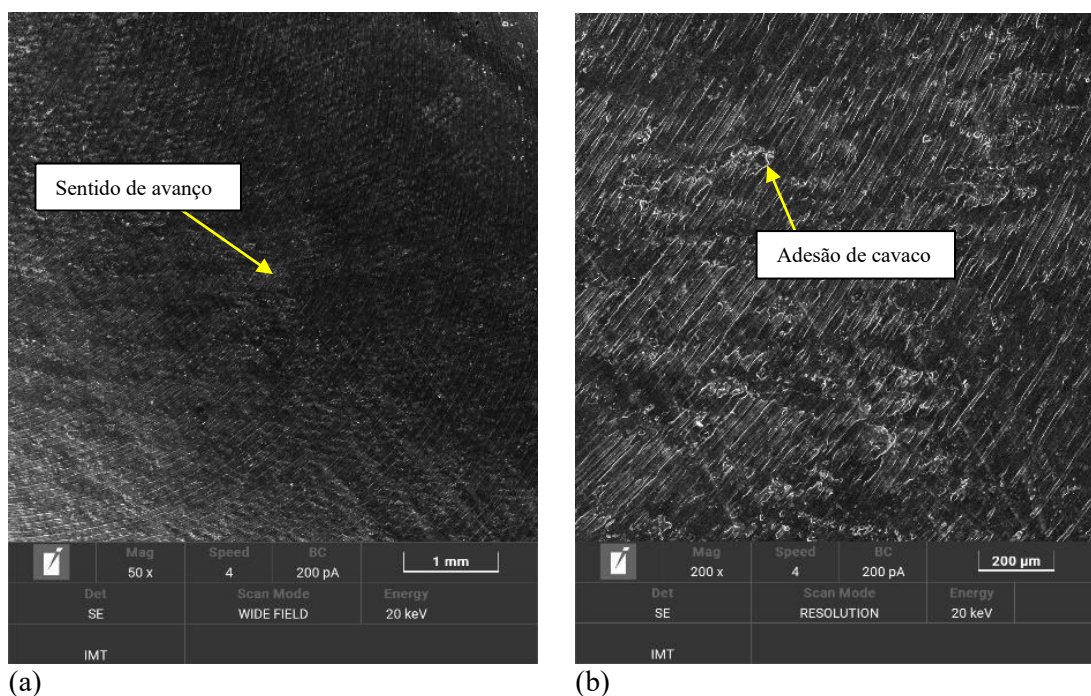
LN ₂ cíclico	Função matemática
F _x	= 92,9-0,78*v _c -274,47*f+5,60*v _c *f-0,04*a _p *v _c +829,62*a _p *f+15,6675
F _y	= -496,53+4,78*v _c +2384,06*f-25,59*v _c *f-3,91*a _p *v _c +2928,75*a _p *f+381,04
F _z	= 173,67-1,06*v _c -1011,19*f+7,09*v _c *f-0,01*a _p *v _c +1515,25*a _p *f+2,20
M _z	= 0,43-0,003*v _c -1,12*f+0,25*v _c *f-0,0004*a _p *v _c +4,25*a _p *f+0,09
S _a	= -0,24+0,009*v _c -1,78*f-0,03*v _c *f-0,009*a _p *v _c +11,62*a _p *f+0,12

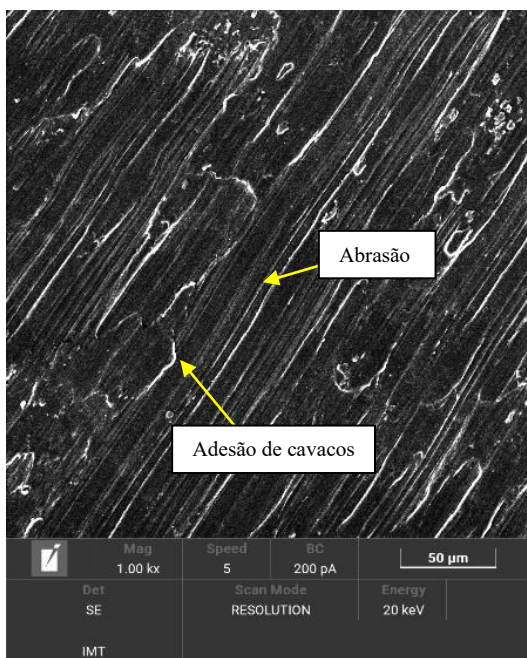
Fonte: Dados do Autor.

4.5.6.2 Superfície usinada

Na superfície usinada na condição de corte com aplicação de Etanol (100%) + CO₂ as marcas de avanço são suavizadas. Adesão de cavacos foram observados. A Figura 4.85 mostra ampliações da superfície.

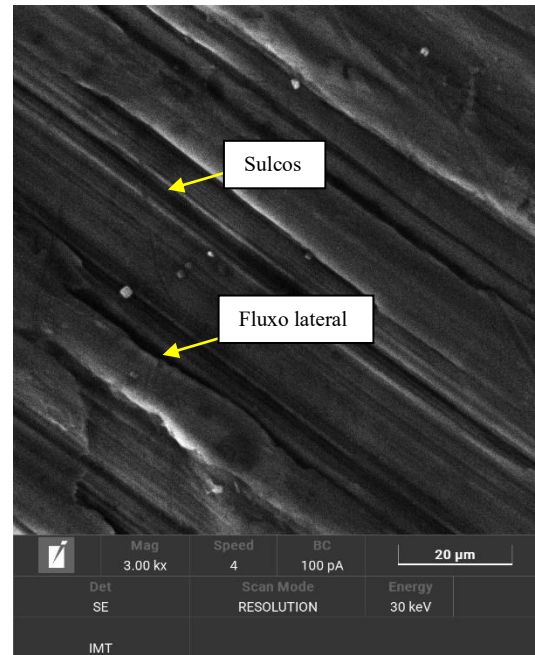
Figura 4.85 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.





(c)

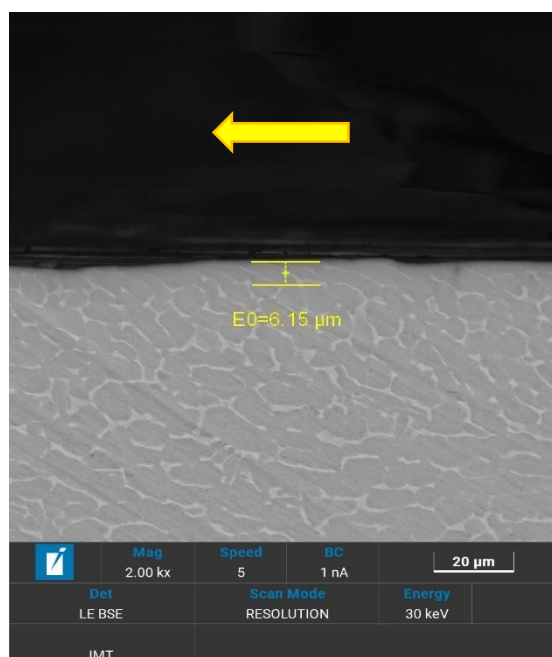
Fonte: Dados do autor.



(d)

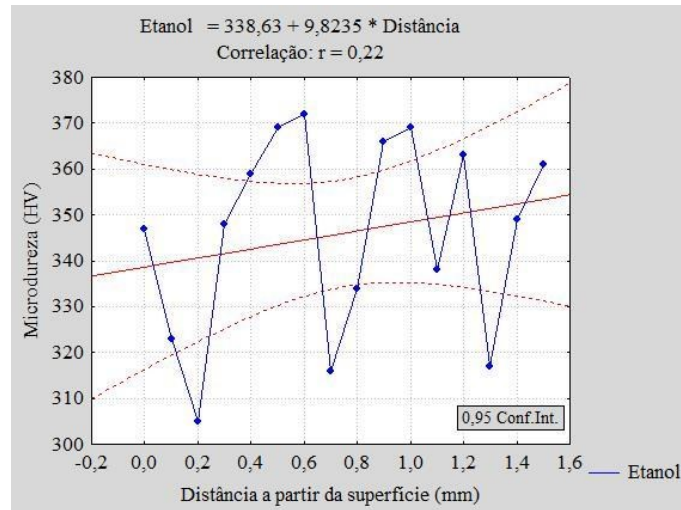
A Figura 4.86 mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $8,87 \pm 2,63$. A Figura 4.87 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se uma leve tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.86– Deformação na superfície usinada



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.87 – Medições de dureza (HV) – Etanol (100%) +CO₂.

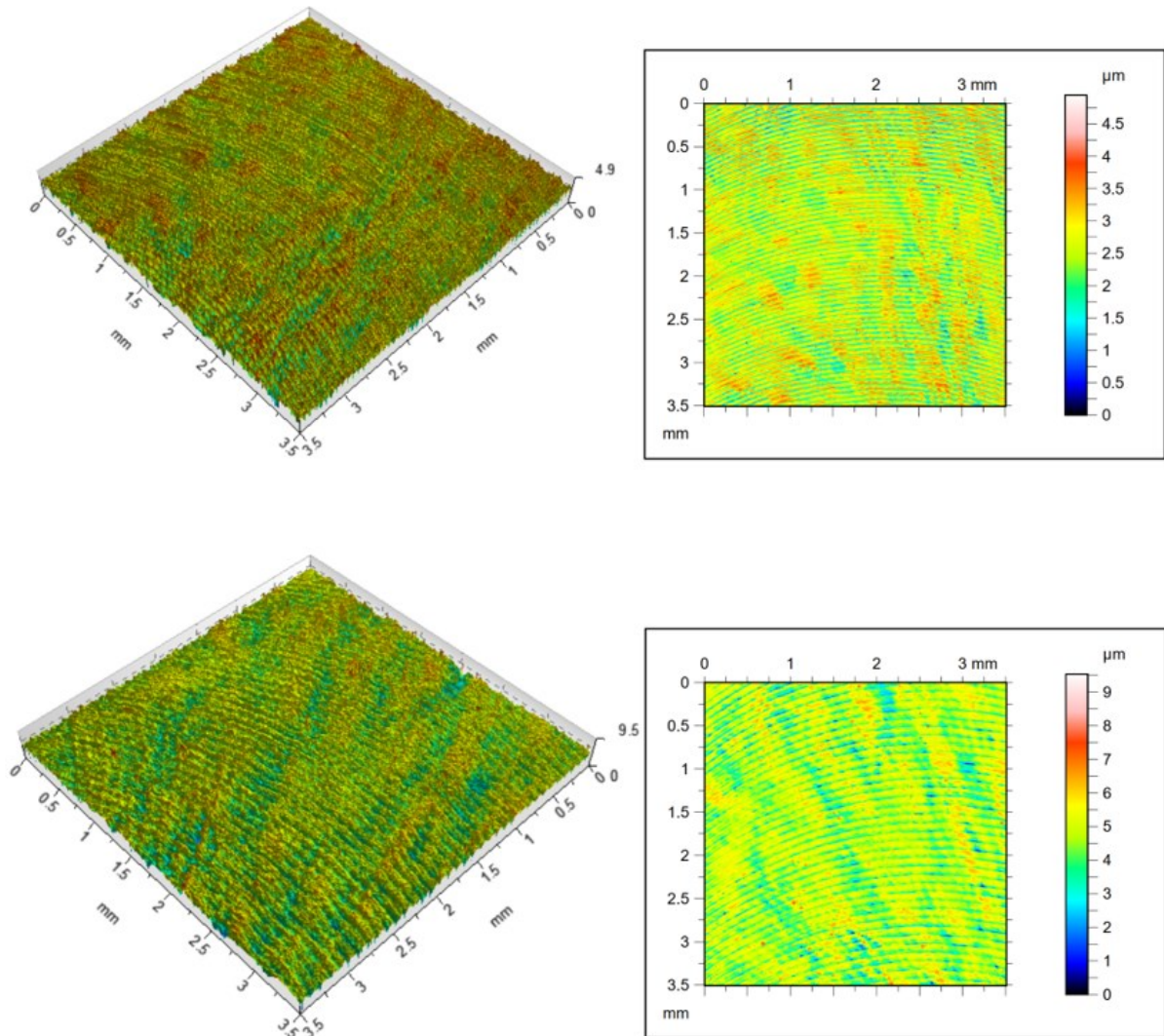


Fonte: Dados do autor.

4.5.6.3 Rugosidade

A Figura 4.88 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a utilização de Etanol (100%) + CO₂. O parâmetro S_{sk} , negativo indica a prevalência de vales. O parâmetro S_q aumentou em 44% para a condição mais crítica de corte quando comparado com a condição menos crítica. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos. Observa-se que o aumento de f acentuou as marcas de avanço.

Figura 4.88 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando Etanol (100%) + CO₂. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,57$; $S_{sk}=-0,59$; $S_{ku}=2,99$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,82$; $S_{sk}=-0,90$; $S_{ku}=4,66$).

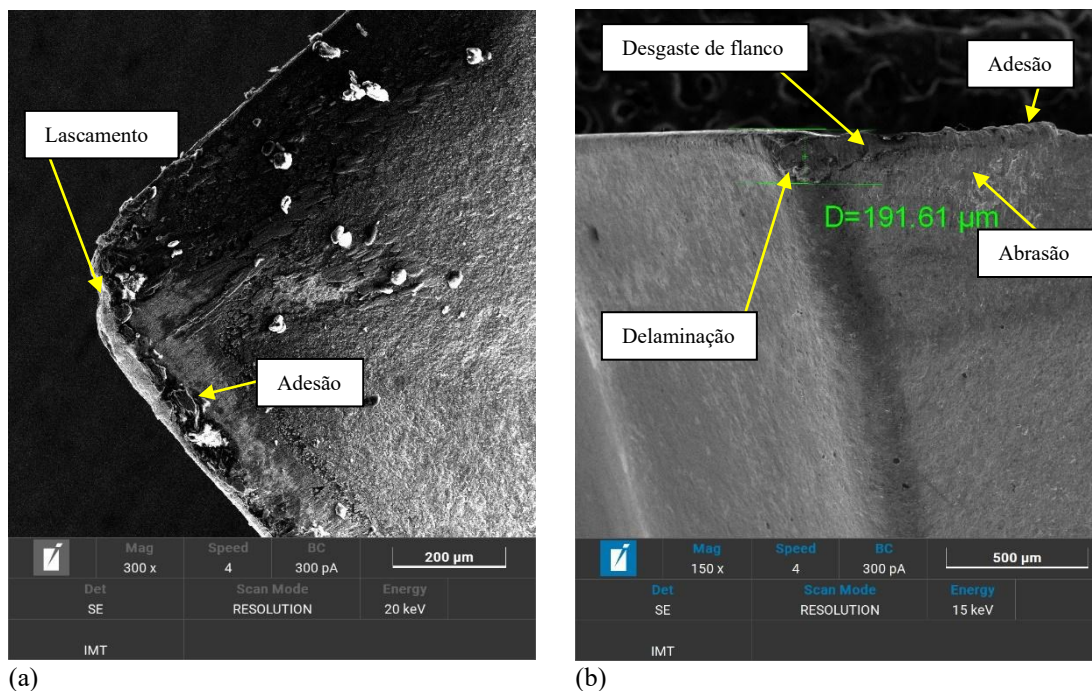


Fonte: Dados do autor.

4.5.6.4 Desgaste do inserto de corte

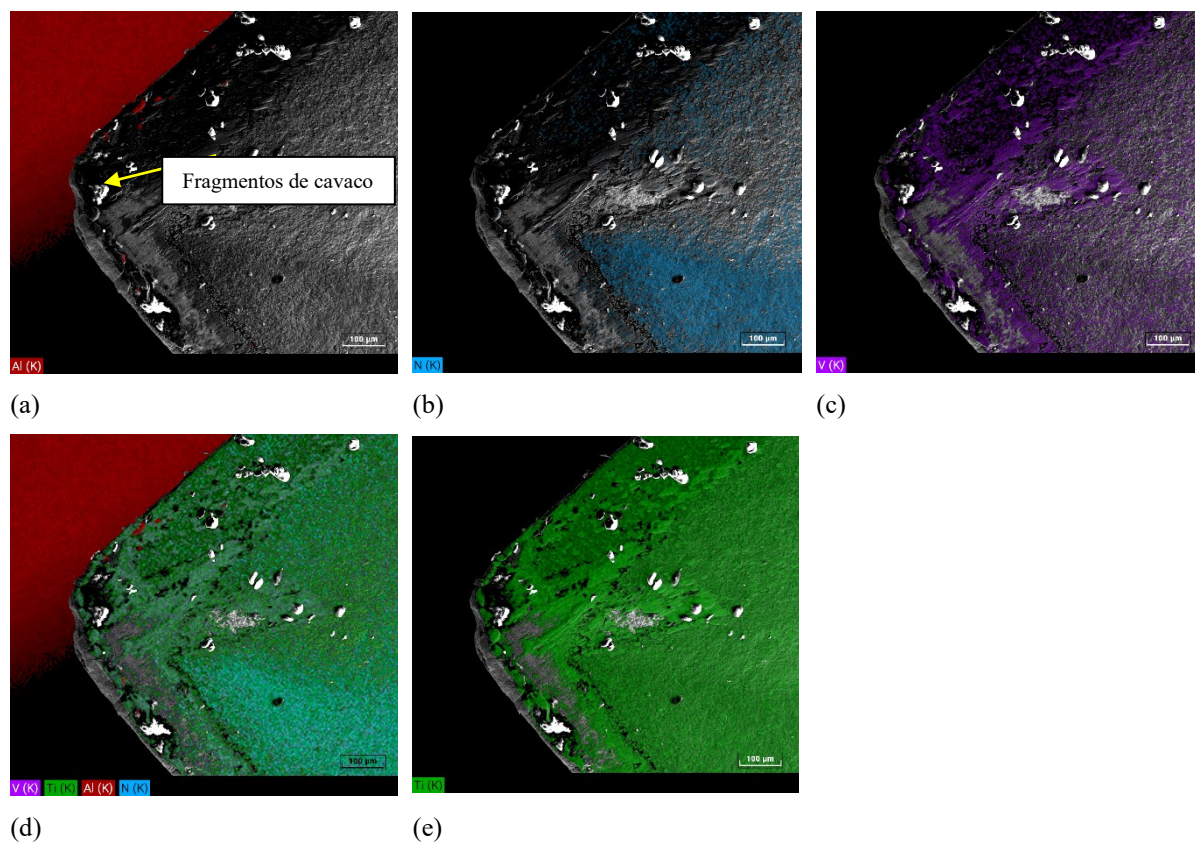
A utilização de Etanol (100%) + CO₂ Sólido como lubrificante e refrigerante proporcionou a ocorrência de desgastes de abrasão, de flanco, delaminação e adesão (Figura 4.89). A análise por EDS demonstrou a presença e distribuição dos elementos Titânio, Alumínio, Nitrogênio e Vanádio visualizados na Figura 4.90.

Figura 4.89 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada na condição sem lubrificação -150x.



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.90 – Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.



Fonte: Dados do autor.

4.5.7 Usinagem utilizando Grafite com Etanol (100%)

4.5.7.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental para a abordagem com a utilização de Grafite com Etanol como lubrificante é mostrado na Tabela 4.18.

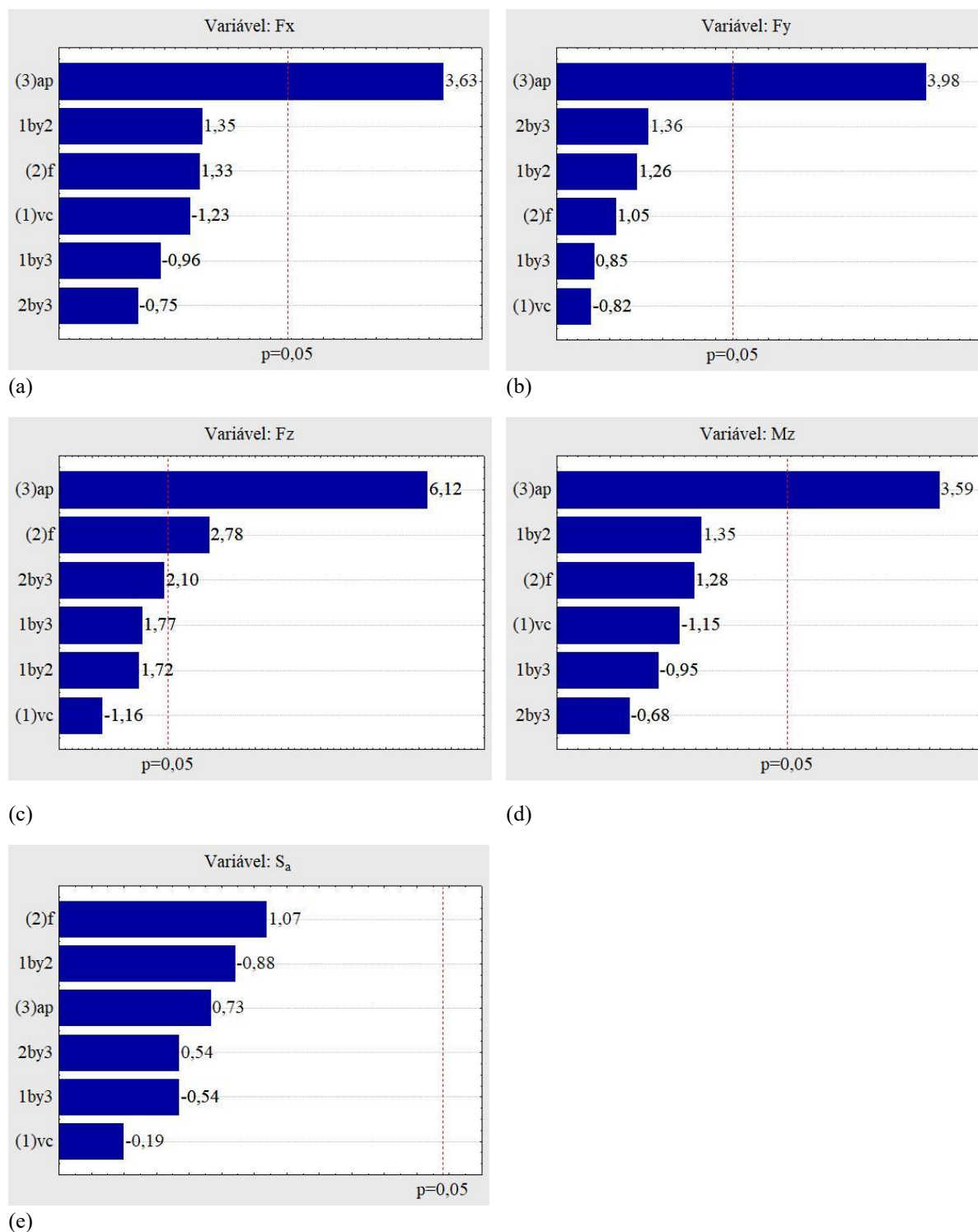
Tabela 4.18 – Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Etanol (100%) + Grafite.

Etanol+Grafite	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
1	80	0,06	0,5	31,73	50,85	76,45	0,16	0,30
2	100	0,06	0,5	32,12	41,85	57,48	0,16	0,37
3	80	0,1	0,5	44,62	63,15	82,77	0,22	0,29
4	100	0,1	0,5	42,05	73,80	86,47	0,21	0,31
5	80	0,06	1,0	48,93	131,70	116,41	0,24	0,24
6	100	0,06	1,0	48,97	149,40	124,31	0,24	0,33
7	80	0,1	1,0	69,91	221,55	163,85	0,35	0,59
8	100	0,1	1,0	75,37	325,20	183,22	0,38	0,25
9	90	0,08	0,75	62,6	272,25	135,14	0,31	0,23
10	90	0,08	0,75	55,46	126,90	123,78	0,28	0,23
11	80	0,06	0,5	40,51	221,25	142,99	0,20	0,21
12	100	0,06	0,5	31,08	48,00	65,23	0,16	0,23
13	80	0,1	0,5	52,83	114,90	104,32	0,26	0,33
14	100	0,1	0,5	56,39	70,20	92,90	0,28	0,37
15	80	0,06	1,0	115,85	262,20	129,46	0,58	0,31
16	100	0,06	1,0	49,45	157,65	115,57	0,25	0,35
17	80	0,1	1,0	68,99	240,15	152,45	0,34	0,33
18	100	0,1	1,0	65,85	227,10	160,80	0,33	0,26
19	90	0,08	0,75	58,52	128,25	137,10	0,29	0,25
20	90	0,08	0,75	59,85	253,20	135,04	0,30	0,18

Fonte: Dados do autor.

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Figura 4.91 observou-se que as forças F_x e F_y e o Torque são influenciadas pela profundidade de corte. A força F_z foi influenciada pela profundidade de penetração e pelo avanço. Para o parâmetro de rugosidade S_a o avanço foi a variável que mais demonstrou influência, embora estatisticamente não tenha alcançado o intervalo de confiança definido.

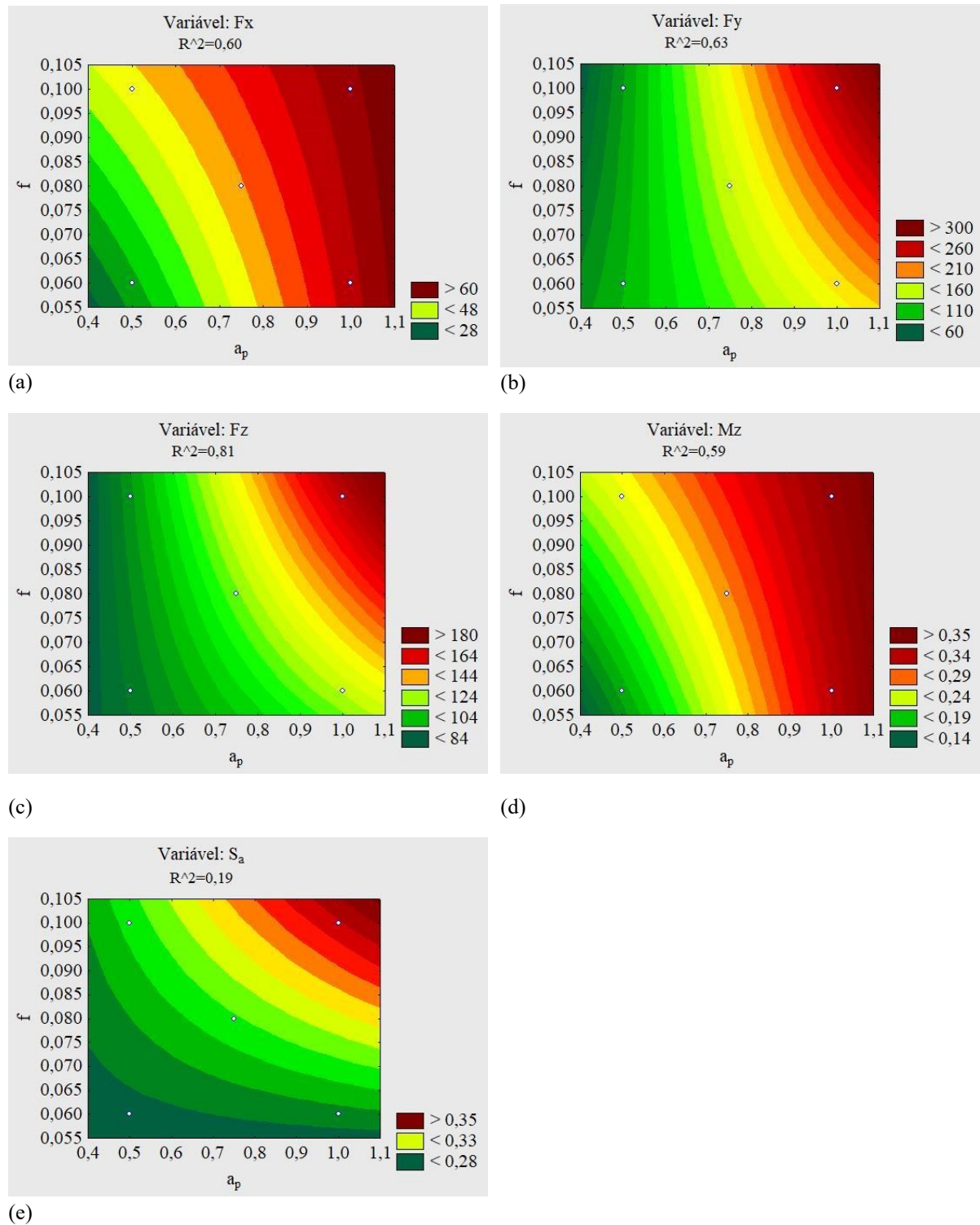
Figura 4.91 - Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando Etanol (100%) + Grafite. (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a .



Fonte: Dados do autor.

Analisando as superfícies de respostas na Figura 4.92 percebe-se que os valores mínimos de forças e rugosidade ocorrem com menores avanços e menores profundidades de penetração. A Tabela 4.19 mostra as equações de predição pela metodologia DOE empregada.

Figura 4.92 - Superfícies de resposta para a estratégia utilizando Etanol (100%) + Grafite. (a) F_x ($a_p \times f$). (b) F_y ($a_p \times f$). (c) F_z ($a_p \times f$). (d) M_z ($a_p \times f$). (e) S_a ($a_p \times f$).



Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.19 - Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

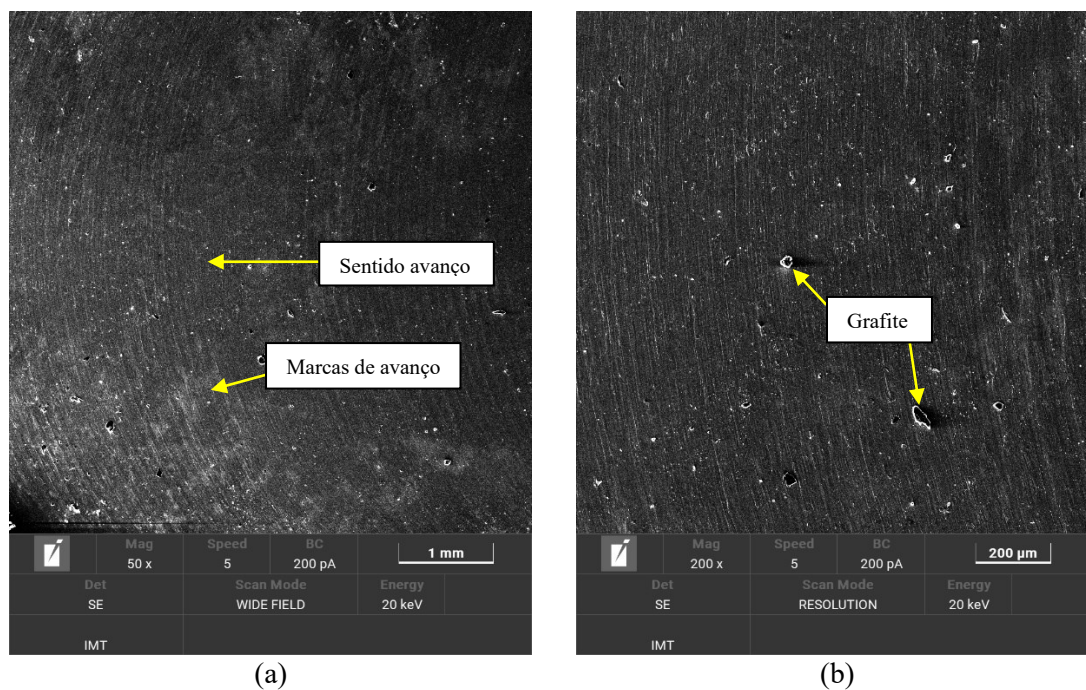
Etanol+Grafite	Função matemática
F_x	$=86,99-1,37*v_c-1563,84*f+24,60*v_c*f-1,40*a_p*v_c-544,12*a_p*f+166,88$
F_y	$=1385,70-13,59*v_c-11614,22*f+101,76*v_c*f+5,50*a_p*v_c+4411,87*a_p*f-442,74$
F_z	$=635,82-5,95*v_c-4238,69*f+38,35*v_c*f+3,15*a_p*v_c+1878,25*a_p*f-243,60$
M_z	$=0,45-0,007*v_c-8,19*f+,125*v_c*f-0,007*a_p*v_c-2,5*a_p*f+0,82$
S_a	$=-0,83+0,01*v_c+9,44*f-0,11*v_c*f-0,005*a_p*v_c+2,75*a_p*f+0,2625$

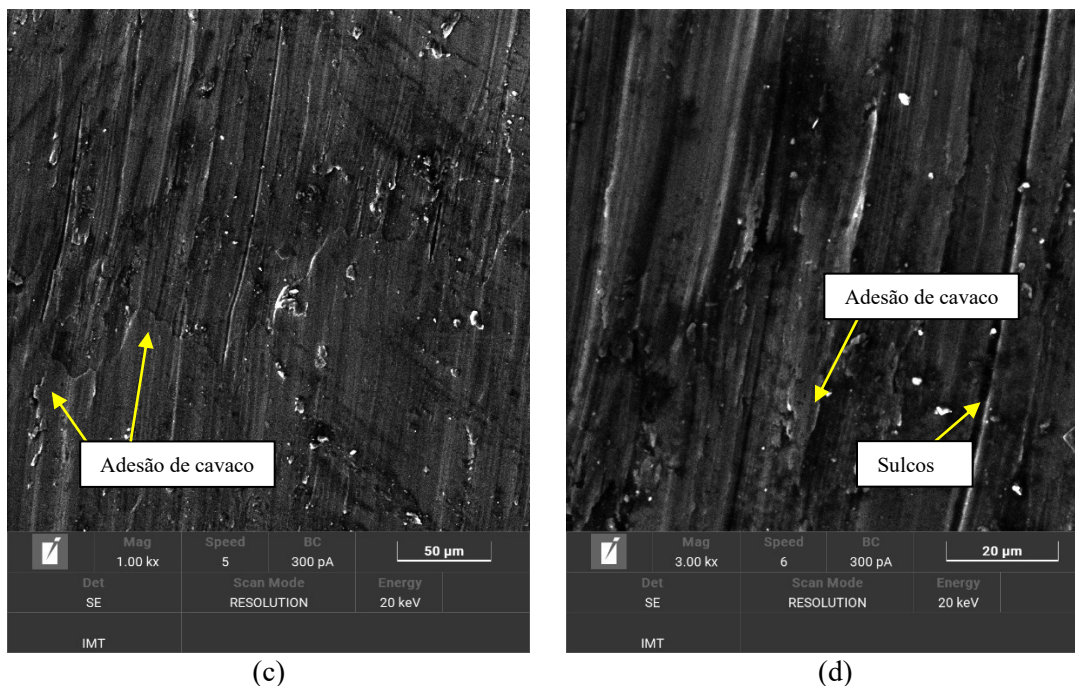
Fonte: Dados do Autor.

4.5.7.2 Superfície usinada

Na superfície usinada na condição de corte com aplicação de Etanol + grafite as marcas de avanço menos pronunciadas provavelmente devido a minimização do atrito causado pelo lubrificante sólido. Marcas de avanço e adesão de cavacos foram observados. A Figura 4.93 mostra ampliações da superfície que possui menor intensidade de fragmentos de cavacos.

Figura 4.93 – Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 200x. (c) Aumento de 1000x. (d) Aumento de 3000x.

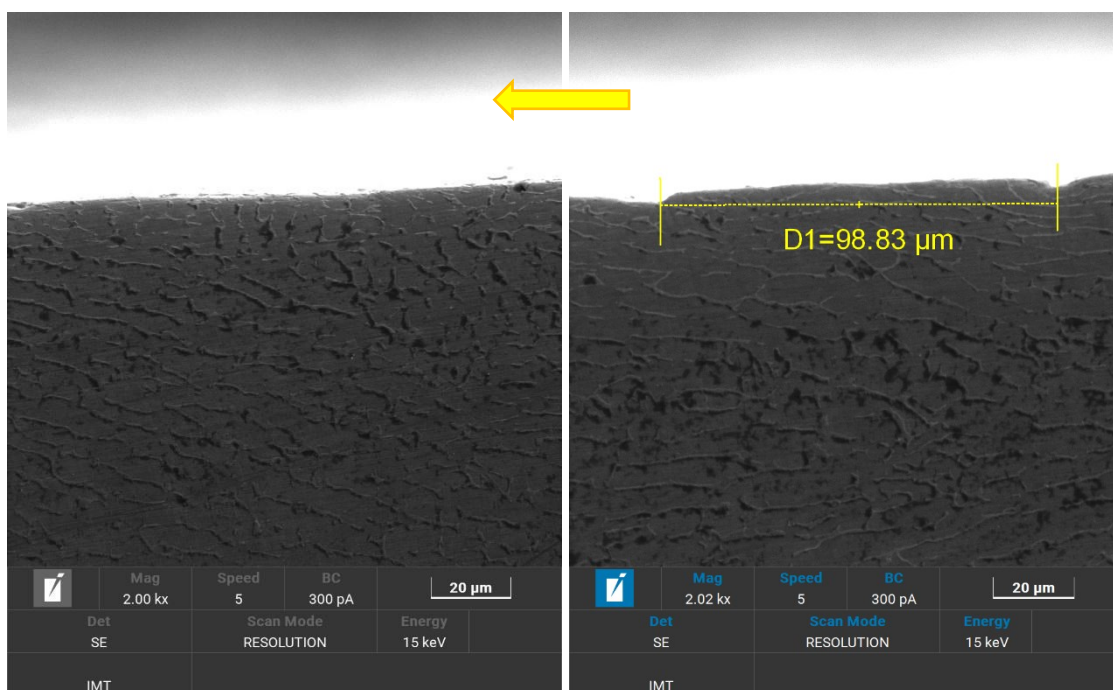




Fonte: Dados do autor.

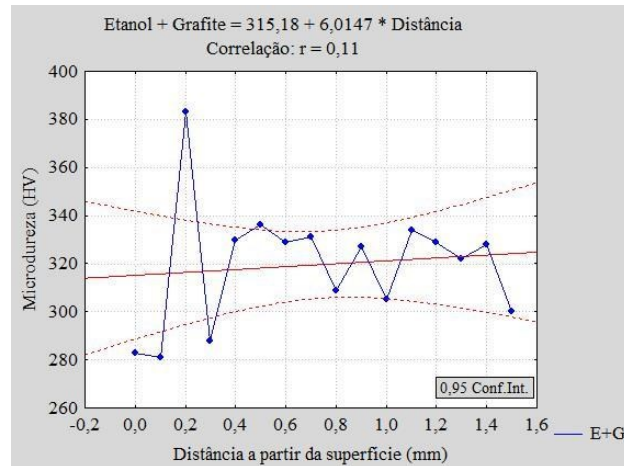
Não foram encontradas deformações para esta estratégia de lubrificação. A Figura 4.94(a) mostra a imagem sem deformação. A Figura 4.94 (b) mostra o espaçamento referente ao avanço de 0,1mm/volta. A Figura 4.95 mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se uma leve tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada.

Figura 4.94 – Superfície usinada.



Fonte: Dados do autor.

Figura 4.95 – Medições de dureza (HV) – Etanol + Grafite.

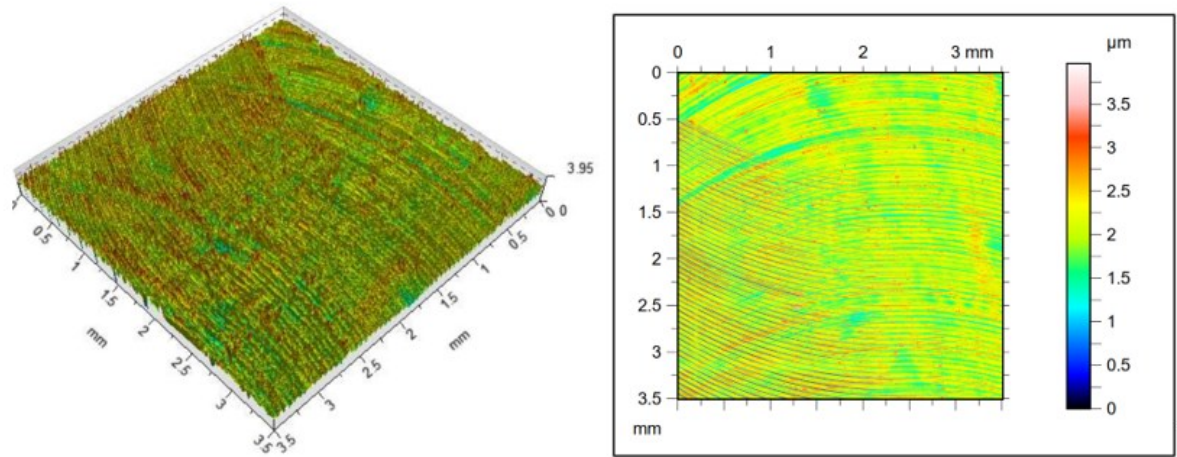


Fonte: Dados do autor.

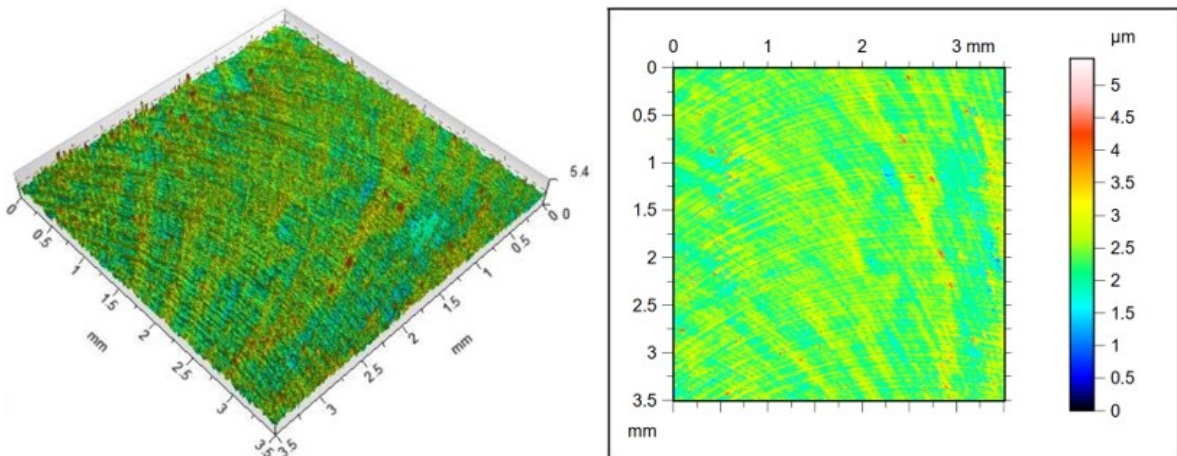
4.5.7.3 Rugosidade

A Figura 4.96 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a utilização de Etanol (100%) + grafite. O parâmetro S_{sk} , negativo para a condição menos crítica, indica a prevalência de vales. Para a condição com os maiores valores das variáveis independentes o parâmetro S_{sk} positivo indica a predominância de picos. O parâmetro S_q estatisticamente analisado mostrou comportamento semelhante nas duas condições de corte. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os picos da superfície usinada são agudos.

Figura 4.96 - Topografia da superfície usinada. Vista isométrica e mapa de contorno - Estratégia utilizando Etanol + Grafite. (a) $v_c=80\text{m/min}$ / $a_p=0,5\text{ mm}$ / $f_z = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,42$; $S_{sk}=-0,57$; $S_{ku}=5,27$). (b) $v_c=100\text{m/min}$ / $a_p=1,0\text{ mm}$ / $f_z = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,38$; $S_{sk}=0,79$; $S_{ku}=6,34$).



(a)



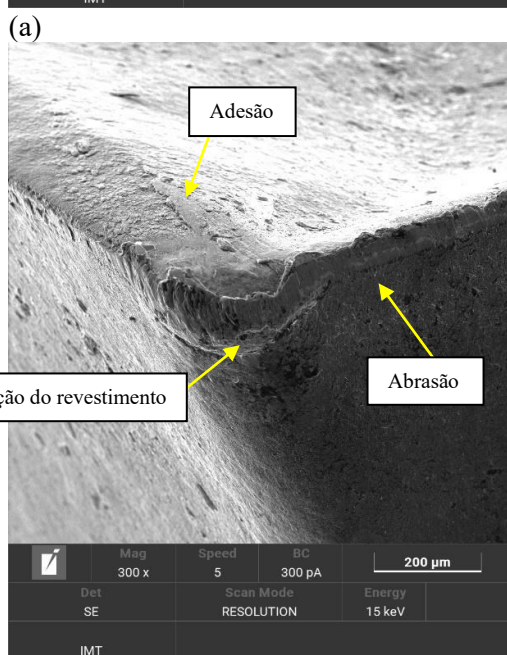
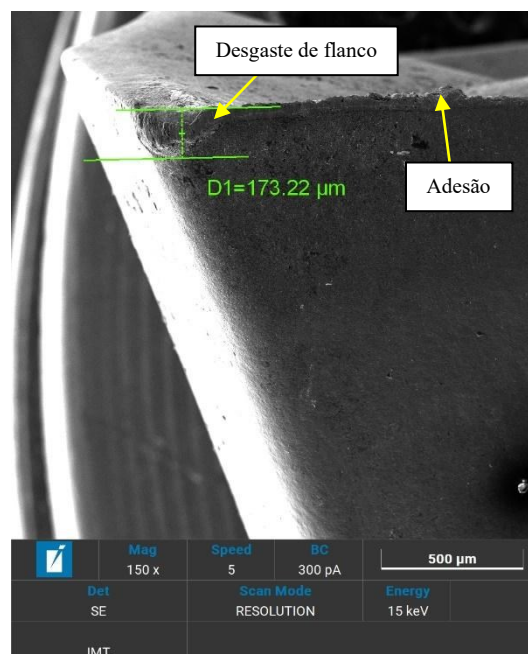
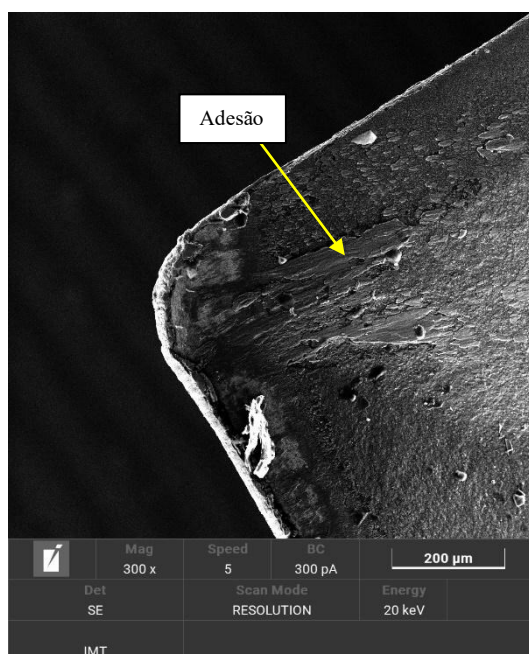
(b)

Fonte: Dados do autor.

4.5.7.4 Desgaste do inserto de corte

A utilização de Etanol (100%) + Grafite como lubrificante e refrigerante proporcionou a ocorrência de abrasão, desgastes de flanco e adesão (Figura 4.97). A análise demonstrou a presença e distribuição dos elementos Titânio, Alumínio, Nitrogênio e Vanádio visualizados na Figura 4.98. O ponto ilustrado na Figura 4.98(e) indica a remoção do revestimento e a Figura 4.98(f) mostra material da peça de trabalho aderido no inserto de corte.

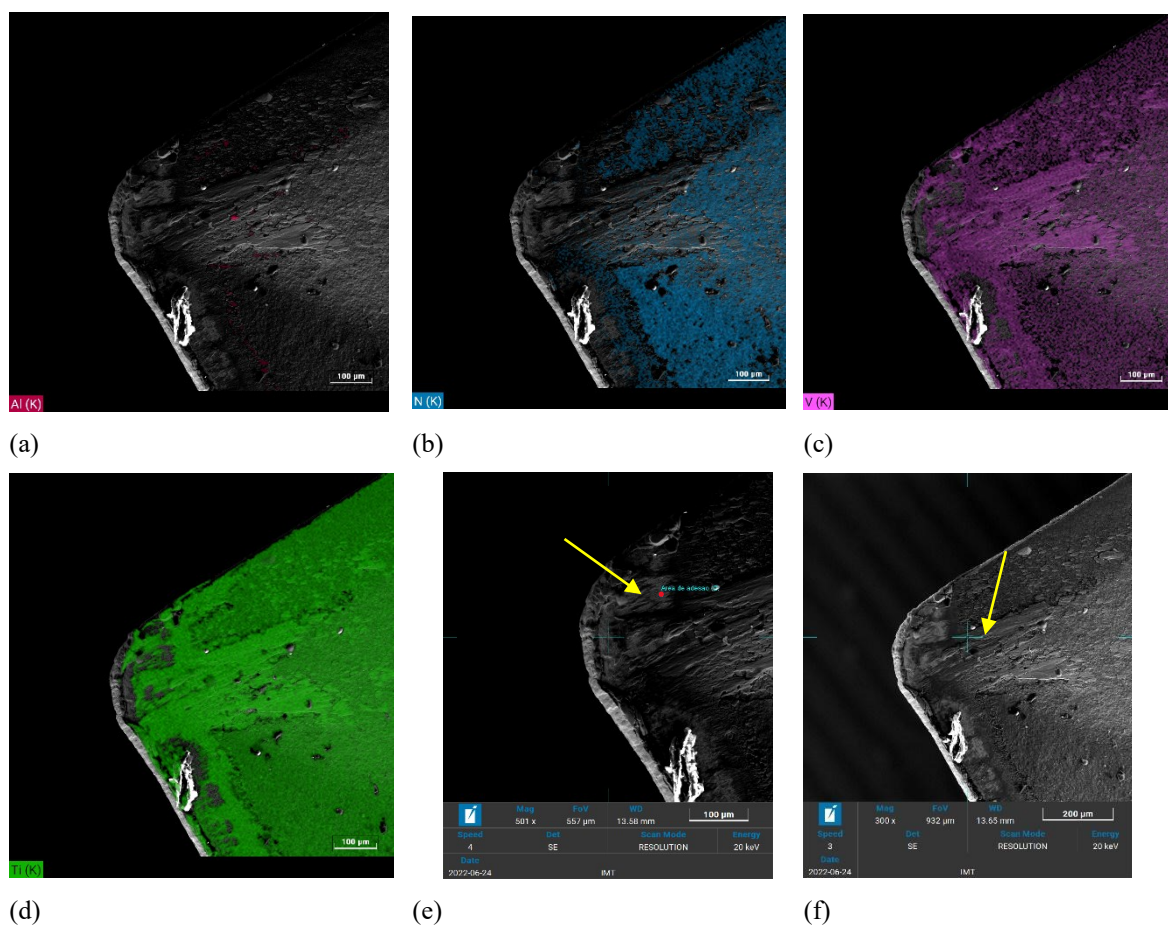
Figura 4.97 - Avaliação de desgastes – Flanco “Ponta 1”. (a) Pastilha utilizada com Etanol e Grafite



(c)

Fonte: Dados do autor.

Figura 4.98 – Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com nitrogênio líquido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Vanádio (d) Elementos encontrados. (e) Aquisição de ponto.



Fonte: Dados do autor.

4.6 Predições dos resultados pelas redes neurais artificiais (RNAs)

A Tabela 4.20 mostra as variáveis escolhidas aleatoriamente para os testes de validação. Na Tabela 4.21 estão as informações da arquitetura da rede neural artificial com melhor índice. Os primeiros 85 dados de treinamento são mostrados na Figura 4.99.

Para cada estratégia de usinagem foram treinadas 20000 redes utilizando diversas combinações de números de neurônios, funções de ativação e número de camadas até atingir valores coerentes. A quantidade mínima e máxima de neurônios na camada oculta foram respectivamente 3 e 25. A função de erro escolhida foi a soma dos quadrados (SOS) devido ao fato de ser uma das mais utilizadas em treinamentos de redes neurais artificiais nas tarefas de regressão. O fator de redução de peso foi estipulado entre 0,0001 e 0,001. Todas as funções de ativação disponíveis (identidade, logística, tangencial, exponencial e senoidal) foram utilizadas para os treinamentos. Nota-se boa aproximação entre os valores.

Tabela 4.20 - Amostras escolhidas aleatoriamente para testes dos treinamentos das ANNs criadas.

Seco	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μm)
3	80	0,1	0,5	67,47	112,99	93,74	0,34	0,66
10	90	0,08	0,75	104,98	207,94	207,95	0,52	1,17
13	80	0,1	0,5	57,55	118,37	96,20	0,29	0,75
Óleo	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μm)
1	80	0,06	0,5	50,25	214,05	76,62	0,25	0,51
9	90	0,08	0,75	104,06	368,55	166,16	0,52	0,37
17	80	0,1	1,0	195,00	412,50	124,00	0,98	0,48
Óleo + Grafite	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a (μm)
2	100	0,06	0,5	84,00	217,50	63,00	0,42	0,31
5	80	0,06	1,0	127,50	375,00	77,00	0,64	0,32
8	100	0,1	1,0	190,00	465,00	121,00	0,95	0,45
LN₂ Cíclico	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
4	100	0,1	0,5	70,83	344,10	142,50	0,35	0,20
9	90	0,08	0,75	130,83	380,85	205,59	0,65	0,21
15	80	0,06	1,0	128,10	376,05	164,96	0,64	0,26
Álcool + CO₂	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
7	80	0,1	1,0	147,58	457,80	185,78	0,74	0,29
12	100	0,06	0,5	54,62	91,8	74,33	0,27	0,23
19	90	0,08	0,75	102,84	287,7	116,02	0,51	0,28
Etanol + CO₂	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
9	90	0,08	0,75	95,24	402,75	161,39	0,48	0,33
13	80	0,1	0,5	91,38	86,25	86,85	0,46	0,32
20	90	0,08	0,75	154,98	189,45	154,11	0,77	0,31
Etanol + grafite	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
3	80	0,1	0,5	44,62	63,15	82,77	0,22	0,29
6	100	0,06	1,0	48,97	149,4	124,31	0,24	0,33
18	100	0,1	1,0	65,85	227,1	160,8	0,33	0,22

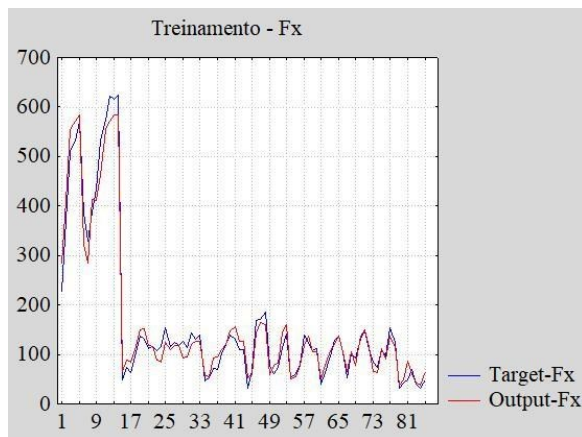
Fonte: Dados do autor.

Tabela 4.21 - Arquitetura das redes neurais artificiais.

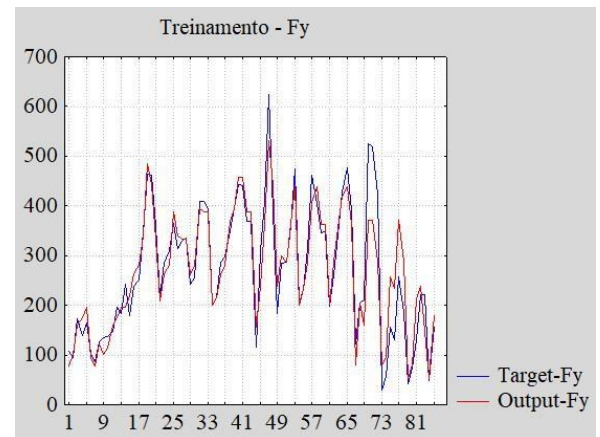
Resumo	Rede
Índice	1
Nome da Rede	MLP 10-22-5
Treinamento	0,918850
Teste	0,912866
Validação	0,915423
Erro do treinamento	0,015089
Erro do teste	0,015067
Erro de validação	0,014160
Algoritmo de treinamento	BFGS 100
Função de erro	SOS
Ativação na camada oculta	Logística
Ativação na saída	Logística

Fonte: Dados do autor.

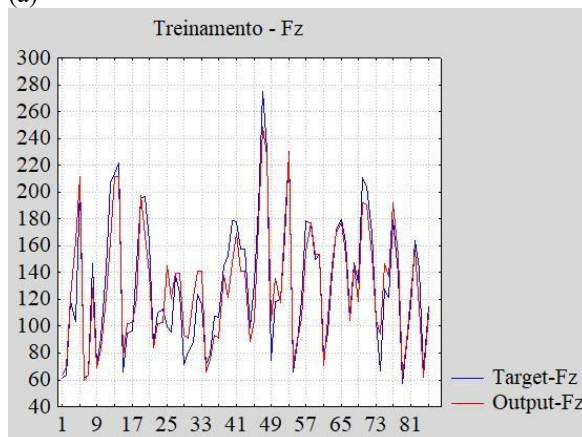
Figura 4.99 – Treinamento das redes neurais artificiais. (a) F_x x amostras treinadas. (b) F_y x amostras treinadas. (c) F_z x amostras treinadas. (d) M_z x amostras treinadas. (e) S_a x amostras treinadas.



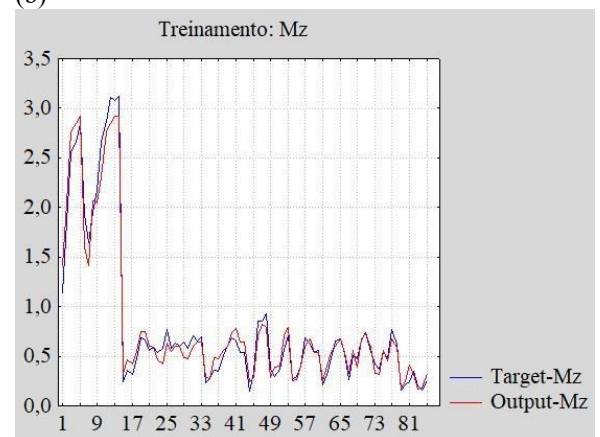
(a)



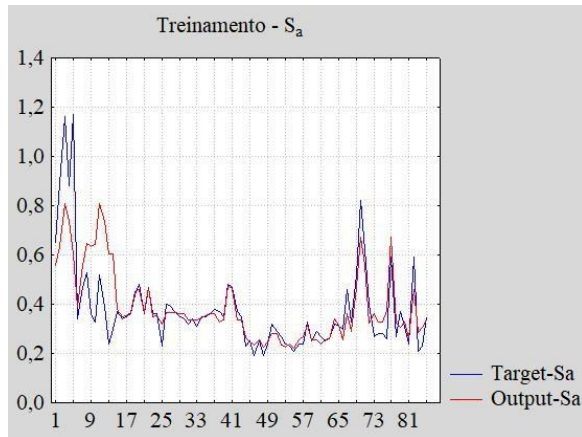
(b)



(c)



(d)

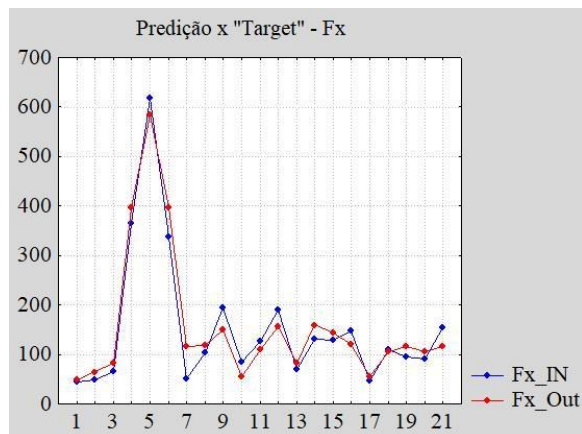


(e)

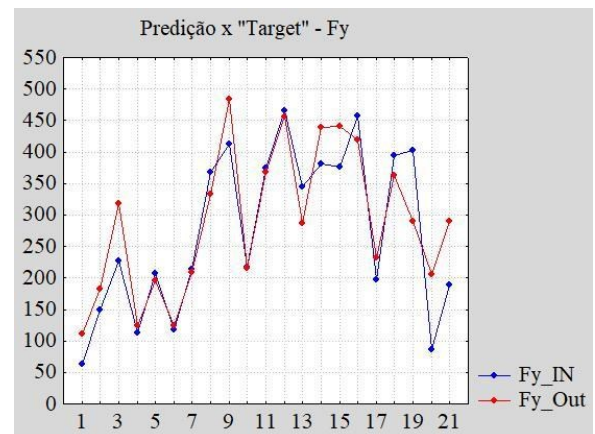
Fonte: Dados do autor.

Os valores de entrada (*IN*) e saída da rede neural artificial (*Out*) foram comparados e os resultados são mostrados na Figura 4.100. Os resultados dos testes mostraram-se pertinentes com 91% de acerto.

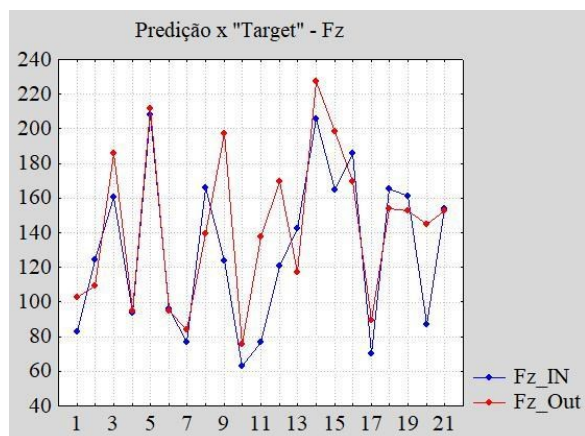
Figura 4.100 – Comparação entre Entradas e Saídas dos testes das redes neurais artificiais. (a) F_x x amostras testadas. (b) F_y x amostras testadas. (c) F_z x amostras testadas. (d) M_z x amostras testadas. (e) S_a x amostras testadas.



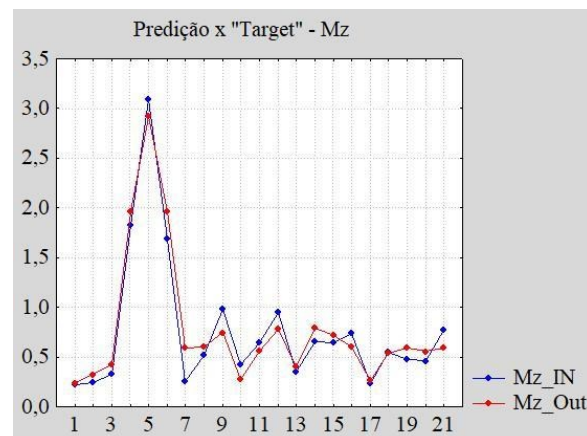
(a)



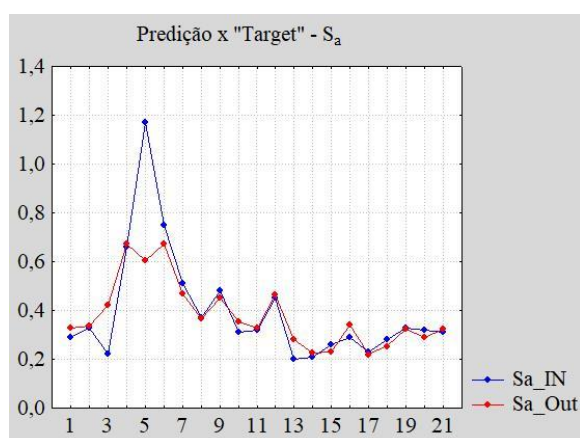
(b)



(c)



(d)



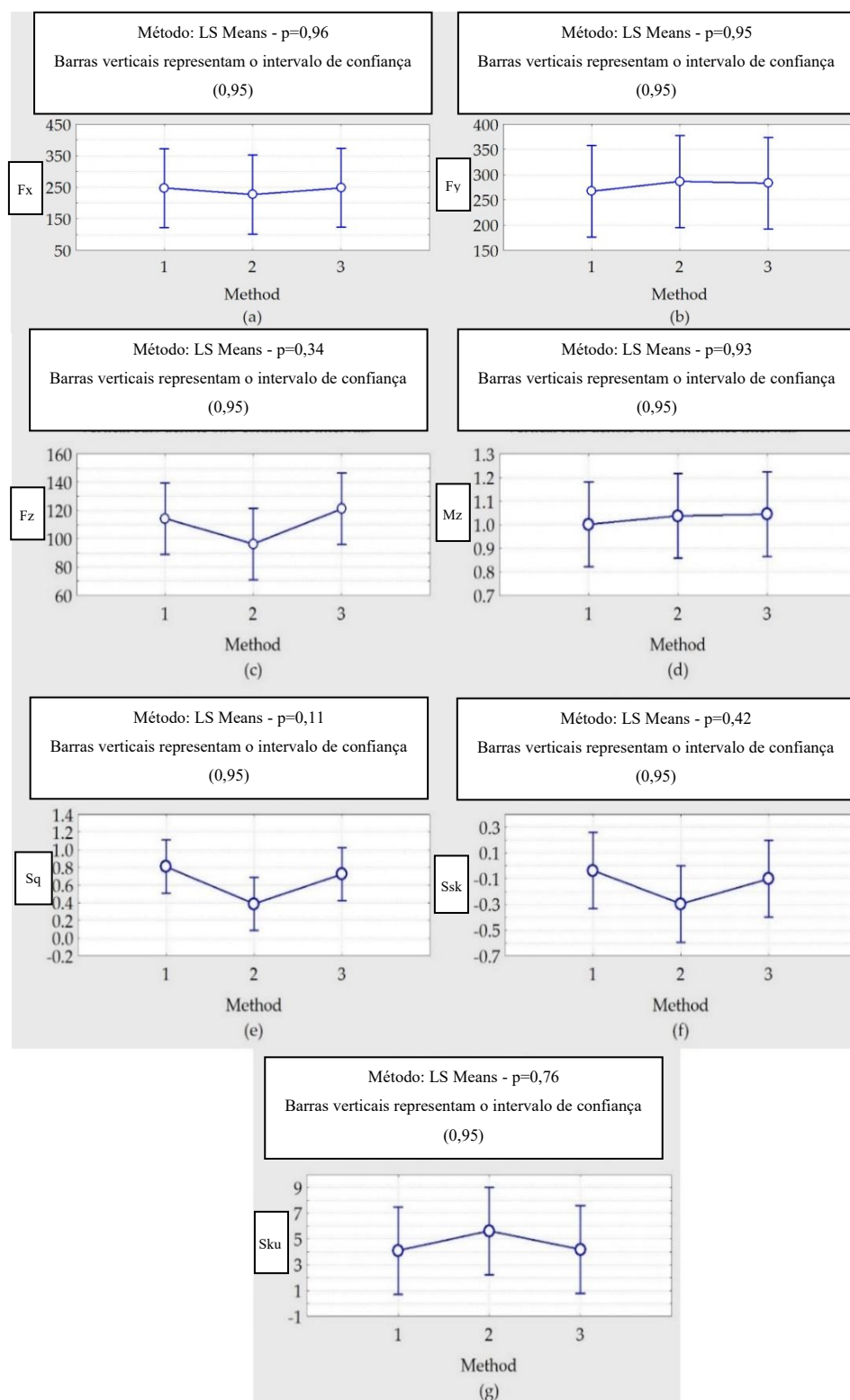
(e)

Fonte: Dados do autor.

4.7 Análise comparativa das predições

Para verificar se os métodos de predição empregados neste trabalho produzem respostas de forma semelhante, realizou-se um teste estatístico para verificar a igualdade de médias de tratamentos (ANOVA). Percebeu-se conforme a Figura 4.101 que não houve diferenças globais entre os métodos de predição ($p\text{-value} > 0.05$). Nestes gráficos os números 1,2 e 3 representam respectivamente os valores - medidos, os resultados do planejamento experimental utilizando as equações e os resultados das RNAs.

Figura 4.101 - Diferenças entre os pares de média. (a) F_x (b) F_y . (c) F_z . (d) Torque M_z . (e) S_q . (f) S_{sk} . (g) S_{ku} .



Fonte: Dados do autor.

5 DISCUSSÃO

Um dispositivo de mistura para resfriamento e lubrificação foi desenvolvido e aplicado no fresamento da liga Ti-6Al-4V. No entanto, este produto pode ser utilizado na maioria das máquinas operatrizes, dado a sua geometria e sistema de fixação simplificado. A abordagem com a mistura de fluidos sendo executada de forma externa ao dispositivo diferencia o produto dos demais existentes no mercado e a inversão do caminho do ar comprimido pelo(s) fluido(s) permite uma maior possibilidade de misturas e testes. A utilização do servo mecanismo permitiu que obstruções por congelamento deixassem de ocorrer. Além disso, permite a remoção da ferramenta de corte de forma facilitada para medições, permitindo ainda que as ferramentas sejam trocadas sem que a desmontagem do dispositivo seja efetuada, minimizando os tempos de *setup*. O sistema permite a pulverização de misturas para a região de corte, mas possui como limitação a posição fixa, oriunda do posicionamento inicial de montagem.

Por meio do dispositivo desenvolvido foi possível acompanhar o comportamento dos fluidos e a área de abrangência destes quando em contato com o anteparo, simulando a peça usinada. Com as simulações e medições percebeu-se a relação entre a área de atuação do fluido, divididos neste estudo em área do jato e área molhada. O efeito Leindenfrost ocorreu na aplicação do nitrogênio líquido a uma área distante da atuação do jato central. Desta forma, este estudo descarta a opção de que o fluido criogênico não adquire contato com a peça x ferramenta. Outro aspecto foi mostrar que as forças de corte na usinagem criogênica não são reduzidas quando comparados à usinagem úmida conforme estudos de Jerold (2013), embora os respectivos autores também alcançassem menores valores de rugosidade com a aplicação criogênica.

5.1 Deformação subsuperficial

A microestrutura induzida por usinagem, particularmente a espessura da camada deformada e refinamento de grãos, é de grande interesse para pesquisadores quando investigam integridade após a usinagem. Durante as operações de usinagem, os efeitos térmicos e mecânicos são as principais razões para qualquer transformação de fase observada e alterações microestruturais na superfície e subsuperfície dos materiais (SUN, 2020).

A microestrutura das peças usinadas utilizando as diferentes estratégias de lubrificação e resfriamento, paralelas a direção do avanço, a partir da superfície de corte foi estudada. Percebeu-se uma camada deformada visível para todas as amostras com exceção das amostras

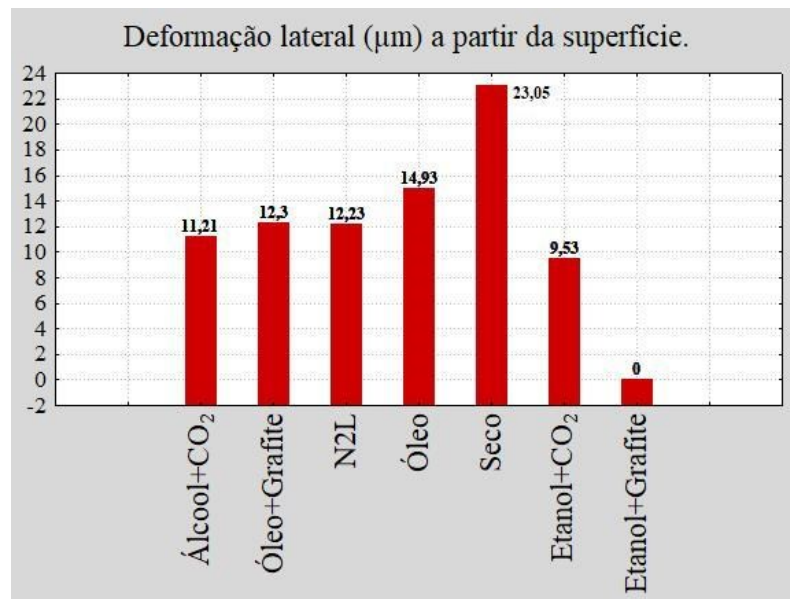
usinadas com a estratégia Etanol + grafite. As medições compreenderam uma varredura pela amostra e os resultados médios entre 10 medições de cada estratégia estão inseridos na Tabela 5.1 e representados na Figura 5.1.

Tabela 5.1 - Estatística descritiva – Deformação subsuperficial.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Seco	23,05	15,79	32,08	5,12
Óleo	14,93	10,04	22,09	4,69
Óleo + Grafite	12,30	8,88	20,26	3,46
Nitrogênio	12,23	7,06	16,72	3,18
Álcool + CO₂	11,21	8,49	15,13	2,00
Etanol + CO₂	8,87	6,12	14,05	2,63
Etanol + Grafite	0	0	0	0

Fonte: Dados do autor.

Figura 5.1 – Deformação lateral a partir da superfície usinada.



Fonte: Dados do autor.

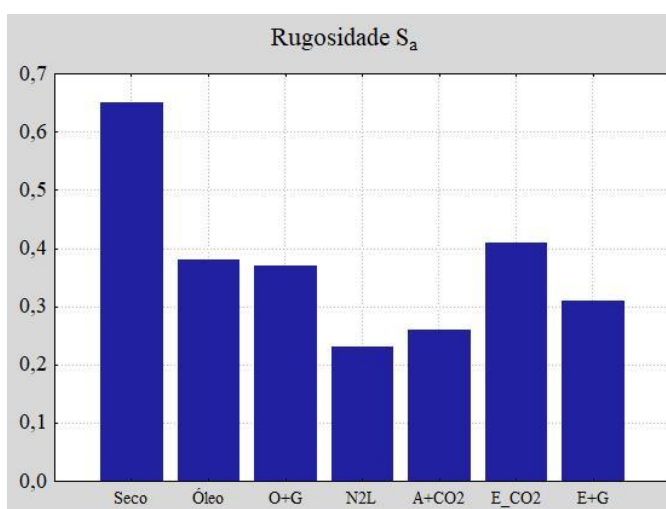
5.2 Resultados estatísticos das medições de rugosidade

Para os valores mínimos e máximos das variáveis independentes de lubrificação e refrigeração de cada estratégia utilizada, analisou-se os resultados das medições encontradas. Os resultados estatísticos estão dispostos na Tabela 4.8 e 4.9. O parâmetro S_q corresponde ao desvio padrão da curva de distribuição (UNDA; LIN; DE GODOY, 2007). O parâmetro S_{ku} é sempre apresentado com o parâmetro S_{sk} , descrevendo a forma de distribuição da superfície

topográfica de rugosidade. Matematicamente, os parâmetros *Skewness* (S_{sk}) e *Kurtosis* (S_{ku}) medem a simetria e o desvio do histograma de todas as alturas de picos e vales da superfície usinada em relação à distribuição Gaussiana. O parâmetro de rugosidade *Skewness* pode monitorar superfícies usinadas quanto ao desgaste em serviço. Para uma superfície com distribuição normal, o parâmetro S_{sk} é igual a zero. Valores positivos de S_{sk} indicam predominância de picos e valores negativos, predominância de vales. Já o parâmetro S_{ku} mede o grau de achatamento ou de afinamento da distribuição topográfica dos picos do perfil de rugosidade. Em uma superfície com distribuição Normal simétrica o parâmetro S_{ku} é igual a três. Em termos práticos, $S_{ku} > 3$ indica a presença de picos agudos, enquanto $S_{ku} < 3$ indica textura superficial sem picos desproporcionalmente agudos (DONG et al., 1994 e RODRIGUES et al., 2013).

Neste contexto, o menor valor de S_q foi obtido pelo ensaio número 8 com a utilização de nitrogênio líquido ($0,26\mu\text{m}$). O maior valor de S_q ocorreu no ensaio 8 da estratégia sem a utilização de lubrificação ($1,14\mu\text{m}$). O menor valor de S_a foi obtido pela estratégia com nitrogênio líquido ($0,20\mu\text{m}$) e o maior valor com a abordagem sem lubrificação ($0,88\mu\text{m}$). A Figura 5.2 mostra uma comparação dos valores de S_a de acordo com as estratégias de lubrificação e resfriamento utilizadas. Os parâmetros de rugosidade demonstraram serem regidos pelas variáveis independentes a_p e f .

Figura 5.2 – Rugosidade S_a



Fonte: Dados do autor.

Para as mínimas e máximas condições de corte nota-se boa aproximação da rugosidade S_a obtida da abordagem Etanol com Grafite ($0,26\mu\text{m}$ – Ensaio 8) com a abordagem utilizando nitrogênio líquido ($0,20\mu\text{m}$ – Ensaio 8). A abordagem utilizando álcool etílico hidratado + CO_2

também propiciou menores valores de S_a . Desta forma, conseguiu-se com estas aplicações resultados semelhantes à abordagem criogênica. Para o parâmetro rugosidade, os principais fatores que a influenciam são o avanço, a velocidade de corte, a profundidade de corte, as vibrações das ferramentas de corte, condições do lubrificante e especificações da ferramenta (JAMES, ANNAMALAI, 2018). Neste estudo foi constatado que o avanço e profundidade de corte foram as variáveis que mais influenciaram a rugosidade. A velocidade de corte mostrou influência apenas para a estratégia usando nitrogênio líquido. Na estratégia criogênica, os valores mínimos de rugosidade ocorrem com maiores velocidades de corte. Isto é devido a uma redução da deformação plástica na zona de corte incorrida por uma velocidade de corte mais alta. O defeito da superfície é menor, tendo um valor geral de rugosidade mais baixo. A rugosidade da superfície diminui, associada com velocidades elevadas (OOSTHUIZEN, 2016). Na Tabela 5.2 é possível perceber a semelhança de comportamento entre as estratégias com Álcool Etilíco+CO₂ e Etanol + grafite quando comparados à estratégia criogênica. A estatística descritiva para os valores de rugosidade S_a está disposta na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 - Estatística descritiva – parâmetros de rugosidade para a mínima e máxima condição de corte.

Seco	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,57	-0,13	3,95	4,38	7,97	12,35	0,44
Ensaio 8	100	0,1	1,0	1,14	-0,05	3,59	8,75	7,67	16,42	0,88
Óleo	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,68	0,49	5,71	7,04	14,83	21,88	0,51
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,60	-0,16	3,32	4,12	9,06	13,18	0,48
Óleo + Grafite	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,45	-1,05	15,30	3,42	12,27	15,69	0,34
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,57	-0,13	3,33	3,35	5,89	9,24	0,47
LN ₂ Cíclico	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,30	-0,50	4,65	1,94	2,05	3,99	0,23
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,26	0,16	3,42	1,92	1,28	3,19	0,20
Álcool + CO ₂	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,29	0,21	4,38	2,24	1,95	4,19	0,23
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,43	0,30	4,45	2,76	2,33	5,09	0,33
Etanol+ CO ₂	vc	f	ap	S _q	S _{sk}	S _{ku}	S _p	S _v	S _z	S _a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,57	-0,59	2,99	2,34	2,60	4,94	0,46

Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,82	-0,90	4,66	4,85	4,68	9,53	0,62
Etanol+ Grafite	vc	f	a_p	S_q	S_{sk}	S_{ku}	S_p	S_v	S_z	S_a
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,42	-0,57	5,27	1,92	2,04	3,96	0,30
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,38	0,79	6,34	3,01	2,39	5,40	0,26

Fonte: Dados do Autor.

Tabela 5.3 - Estatística descritiva – rugosidade S_a.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Seco	0,65	0,24	1,17	0,31
Óleo	0,38	0,23	0,51	0,06
Óleo + Grafite	0,37	0,31	0,48	0,05
Nitrogênio	0,23	0,19	0,28	0,03
Álcool + CO₂	0,29	0,21	0,50	0,07
Etanol+ CO₂	0,41	0,26	0,82	0,14
Etanol+ Grafite	0,30	0,18	0,59	0,09

Fonte: Dados do autor.

Com relação ao parâmetro S_{sk} o estudo demonstrou que a prevalência de picos é encontrada na abordagem utilizando Álcool + CO₂. A ocorrência de vales é configurada pelas estratégias sem lubrificação, com a utilização de óleo com grafite e pela abordagem com etanol +CO₂. As demais estratégias apresentaram configurações mistas. O parâmetro S_{ku} demonstrou neste estudo que os picos são predominantemente agudos. Os resultados para as condições mínimas e máximas de corte da aplicação da mistura de Etanol + Grafite se assemelha aos resultados da aplicação do nitrogênio líquido, conforme Tabela 4.8.

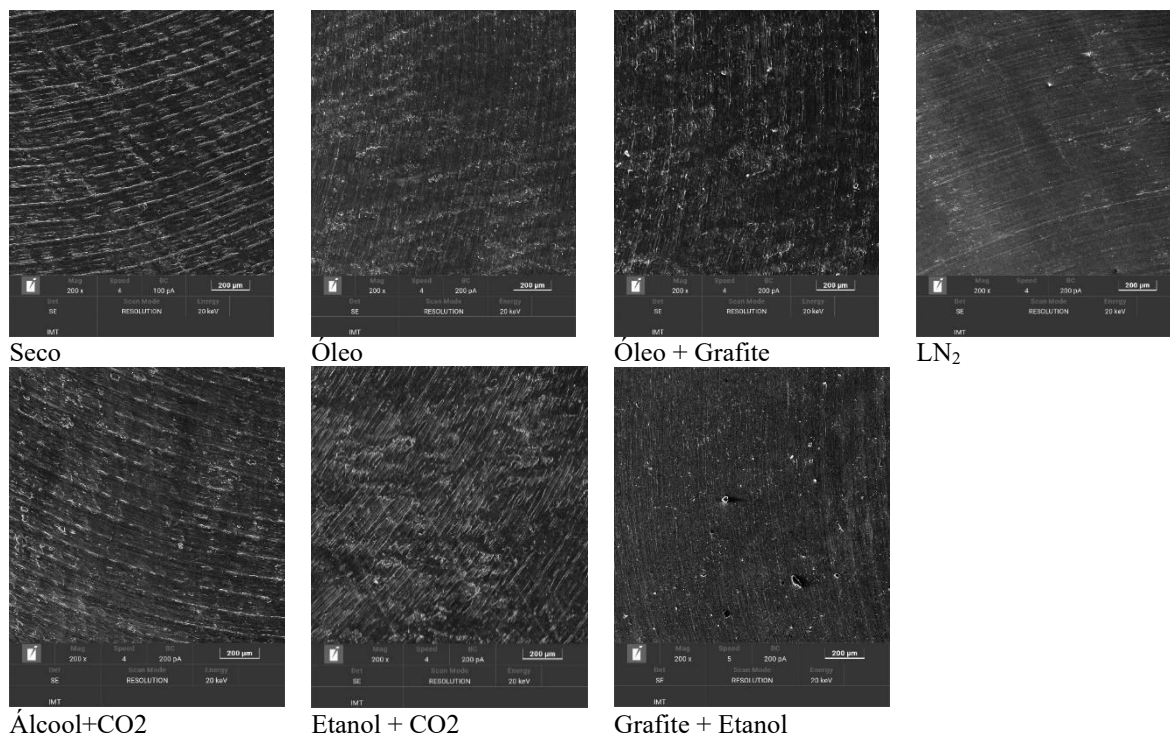
5.3 Acabamento superficial

Em todas as amostras deste estudo foram percebidas marcas de avanço e adesão de cavacos. No entanto, algumas estratégias de corte minimizam as marcas de avanço resultando em uma qualidade de acabamento superficial melhor.

A adesão de cavacos ocorre porque o atrito da interface cavaco-ferramenta aumenta facilitando para os cavacos se soldarem à superfície usinada no ambiente alternado de aquecimento e resfriamento (AN et al., 2020). A Figura 5.3 mostra o padrão das diferentes superfícies oriundas das diferentes estratégias de lubrificação e resfriamento. No corte a seco e na estratégia utilizando Álcool + CO₂, observou-se com clareza as marcas de avanço. Nos ensaios usando óleo e óleo com adição de grafite estas marcas de avanço foram suavizadas. A aplicação de Etanol +CO₂ causou uma superfície irregular. A utilização de Etanol com a adição

de grafite propiciou um acabamento melhor, próximo ao acabamento superior conseguido com a utilização de nitrogênio líquido.

Figura 5.3 – Superfícies obtidas das diferentes estratégias de lubrificação e resfriamento.



Fonte: Dados do autor.

5.4 Análise dos esforços de corte

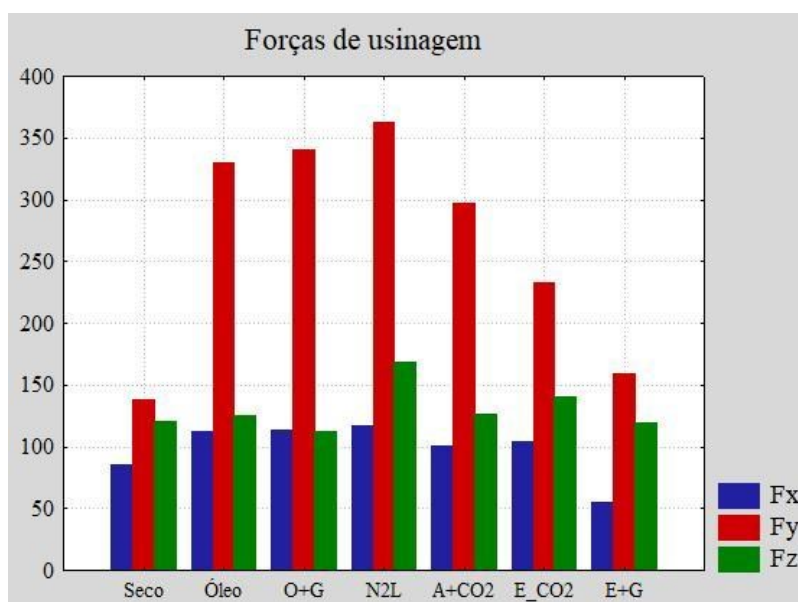
A variação dos parâmetros de entrada foi planejada para permitir trabalhar dentro do intervalo do planejamento experimental especificado (SINGH et al, 2019). A Figura 5.4 mostra a análise comparativa entre as forças de usinagem. Nota-se que as forças são maiores na estratégia utilizando nitrogênio líquido. O resfriamento do material e do inserto de corte propiciou maiores forças para a usinagem do material. Aceves (2018) comenta que as ligas de titânio exibem forças mais altas durante a deformação em baixas temperaturas. Mesmo com forças de corte mais altas experimentadas em baixas temperaturas de corte, uma tensão menor é necessária para gerar a banda de cisalhamento, levando a um menor gasto de energia para geração do cavaco. O fato de o jateamento do nitrogênio líquido ser intermitente, inserido neste trabalho, não alterou o relatado pela literatura. Os menores esforços de corte ocorreram na usinagem sem lubrificação e na estratégia usando a mistura de grafite com etanol. No corte a seco, caracterizado pela não utilização de lubrificante, o aquecimento é latente. As forças de corte devem ser menores sob usinagem a seco e resfriamento convencional, pois há mais calor

acumulado e o Ti-6Al-4V tem uma baixa condutividade térmica. Assim o material deve amolecer e gerar menor forças de corte (ACEVES, 2018). Percebe-se uma facilidade maior para a usinagem, mas ocorre também um “amolecimento” do inserto de corte, ocasionando uma superfície de acabamento e rugosidade ruins.

Krishnamurthy et al. (2017) propuseram a utilização de refrigeração criogênica e uma mistura de etanol com refrigeração úmida na usinagem de Ti-6Al-4V. Tinham como preceito reduzir o desgaste por difusão-adesão e reduzir a flutuação das forças de corte causadas pela formação do cavaco serrilhado que, segundo os autores, leva a vibração e ao desgaste de flanco severo. O resfriamento criogênico reduziu em 25% as forças de corte quando comparado com a usinagem sem lubrificação. Essa redução foi atribuída pela diminuição da energia de fratura conseguida pelos cavacos frágeis e curtos durante a usinagem criogênica. A mistura de etanol com refrigeração por inundação propiciou uma redução de 65% nas forças de corte e eliminou o desgaste de ferramenta por adesão por meio da absorção de carbono da ferramenta de corte para grupos OH do etanol.

A nova mistura proposta neste trabalho de etanol com grafite permitiu menores esforços de corte e possibilitou um acabamento superficial melhor, quando comparados com a abordagem sem lubrificação. Possivelmente devido à passivação da superfície da ferramenta com a parcela OH do etanol comentada por Krishnamurthy et al. (2017), associada à minimização de atrito proporcionada por partículas de grafite. No entanto, foi notada a presença de material da peça aderida na ferramenta. A mistura grafite e etanol propiciou acabamento superficial semelhante à abordagem com nitrogênio líquido.

Figura 5.4 – Forças de Usinagem



Fonte: Dados do autor.

A utilização do planejamento experimental resultou em medições das variáveis dependentes para condições de lubrificação. Os dados estatísticos podem ser visualizados na Tabela 5.4. A análise das forças de usinagem para os ensaios mostrou que estas forças são dominadas pelas variáveis avanço e profundidade de penetração.

Sabe-se que quanto maiores forem estes parâmetros, maiores serão as forças de remoção do cavaco e conseqüentemente maiores as forças geradas para removê-los. Nota-se que as forças de usinagem diminuem nas aplicações MQL quando comparadas com a usinagem criogênica. A aplicação MQL com óleo e óleo+grafite é minimizada devido a emulsividade do fluido, minimizando o atrito e a temperatura. O tipo de fluido base tem um forte efeito sobre os componentes da força de corte. Conseqüentemente, a força é reduzida (DUC, TRAN, TRAN, 2019). Nos ensaios sem lubrificação, pode-se perceber que as forças de usinagem (F_x , F_y , F_z) e o torque (M_z) são também influenciadas estatisticamente pela profundidade de penetração e avanço. Nos ensaios com lubrificação, percebe-se que as forças de usinagem e o torque possuem o mesmo comportamento. No entanto, a magnitude destas forças varia. Com o aumento da profundidade de corte e avanço, aumenta-se a área de corte na ferramenta e com isto, aumenta-se o esforço de corte. Com o aumento da velocidade de corte, aumenta-se a temperatura, e a força é minimizada pelo aquecimento do material facilitando sua remoção. A aplicação do óleo contribui para este processo, minimiza a temperatura e favorece a vida da ferramenta. Geralmente, o desgaste da ferramenta e o uso de refrigerante influenciam o acabamento de superfície (POLISHETTY, 2014). Menores forças de corte e menores avanços propiciaram menores valores de rugosidade. As inferências da análise da força de corte corroboram com a análise da rugosidade.

Tabela 5.4 - Estatística descritiva – Forças de usinagem e torque.

Seco	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	85,82	49,36	138,10	24,74
Fy	137,89	71,00	241,00	44,48
Fz	120,08	52,04	221,35	59,79
Mz	0,43	0,25	0,69	0,12
Óleo	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	112,06	48,00	195,00	38,14
Fy	330,34	180,00	464,55	87,18
Fz	125,09	65,74	196,94	39,50
Mz	0,56	0,24	0,98	0,19
Óleo + Grafite	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	113,19	47,00	190,00	37,43
Fy	340,86	192,50	485,00	94,44
Fz	111,92	52,00	178,51	39,19
Mz	0,57	0,23	0,95	0,19
Nitrogênio	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	117,14	30,83	186,04	46,82
Fy	362,37	115,80	623,25	116,50
Fz	168,73	74,63	275,12	54,86
Mz	0,58	0,15	0,93	0,23
Álcool + CO₂	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	100,49	52,79	147,58	29,23
Fy	296,65	91,80	461,25	113,21
Fz	125,98	66,24	185,78	38,68
Mz	0,50	0,26	0,74	0,15
Etanol+ CO₂	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	104,25	52,24	154,98	29,83
Fy	233,23	30,15	525,75	149,46
Fz	140,99	66,98	210,72	38,87
Mz	0,52	0,26	0,77	0,15
Etanol+ Grafite	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Fx	55,55	31,08	115,80	19,16
Fy	158,98	41,85	325,20	87,60
Fz	119,28	57,48	183,22	34,30
Mz	0,28	0,16	0,58	0,09

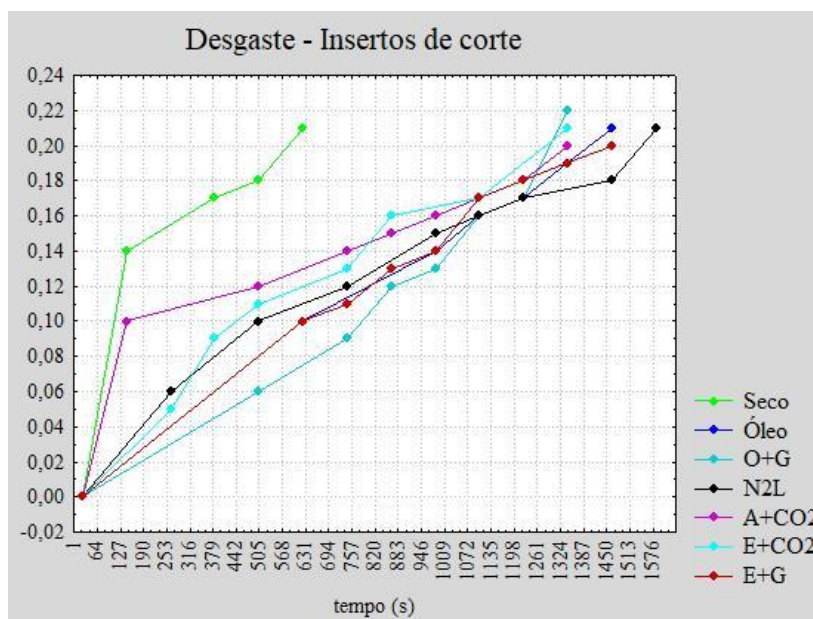
Fonte: Dados do autor.

5.5 Análise do desgaste da ferramenta de corte

Ensaio de desgaste foram realizados para as estratégias de lubrificação adotadas com a condição mais crítica de cada ensaio. A Figura 5.5 mostra o comportamento do desgaste de flanco V_b dos insertos utilizados em cada abordagem. O comportamento de cada inserto foi

monitorado a cada 120 segundos de trabalho até o limite de 0,2mm. A relação entre as abordagens MQL e criogênica foram semelhantes com um pequeno acréscimo de tempo do inserto de corte para a lubrificação com nitrogênio líquido. O corte a seco causou o desgaste do inserto em um tempo menor de uso.

Figura 5.5 - Desgaste V_b dos insertos de corte.



Fonte: Dados do autor.

As ferramentas de fresamento são submetidas a condições severas de carga causando diferentes mecanismos de desgaste. Entre outros, o mecanismo dominante de desgaste da ferramenta depende da combinação do material da peça e do material da ferramenta, parâmetros de corte e o modo de operação (KALTENBRUNNER et al., 2022).

No estudo de Khatri e Jahan (2018) todas as ferramentas de corte em condições de usinagem a seco, refrigeração por inundação e MQL usando metal duro não revestido e metal duro revestido com TiAlN foram analisadas para investigar diferentes tipos de desgaste da ferramenta e entender o mecanismo de desgaste. O desgaste por abrasão foi o mecanismo de desgaste mais dominante. A ocorrência de desgaste por abrasão foi menor em MQL e menor para líquido de arrefecimento de inundação quando comparados com a usinagem a seco. A Abrasão foi dominante na face de flanco e face de saída da ferramenta. O segundo mecanismo de desgaste foi o lascamento e adesão com a condição sem lubrificação com o maior número de ocorrências e MQL com um menor número de ocorrências. O desgaste por abrasão ocorreu principalmente devido ao atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho e pode ser minimizado com a seleção de condições de usinagem adequadas. O desgaste por abrasão não é desejado,

pois não apenas desgasta a ferramenta rapidamente, mas também causa um acabamento superficial ruim. O lascamento é causado por altas tensões e altas temperaturas na aresta de corte além da dureza da ferramenta. Uma maior profundidade de corte ou mesmo uma alta taxa de avanço pode levar a lascamento mais frequente. Flutuações térmicas possibilitam trincas térmicas em microescala e a usinagem com maior velocidade de corte pode aumentar rapidamente as microfissuras. A propagação dessas trincas tende a causar lascamento (SU et al., 2006).

A adesão é um desgaste na qual o material da peça de trabalho fica soldado à ferramenta. Isso pode alterar a geometria da ferramenta, devido ao atrito e calor, que é a principal razão para o desgaste da ferramenta de adesão. Assim, se mais alguma usinagem é feita, a ferramenta de corte pode resultar em um acabamento superficial indesejado. Neste estudo constatou-se que o desgaste por adesão foi superior na usinagem a seco em comparação à abordagem MQL, já que as temperaturas no processo sem lubrificação são mais altas. Dependendo das condições de corte, se este calor for localizado, pode resultar em falha plástica, quando uma aresta da ferramenta é completamente lascada do inserto. Já a deformação plástica ocorre quando durante a usinagem uma tensão de compressão atua sob uma área de contato muito pequena, possibilitando a deformação plástica do material. O desgaste do entalhe geralmente ocorre na ponta da ferramenta sendo mais acentuado ao longo da aresta de corte e da face de flanco. A delaminação é um tipo de mecanismo de desgaste em que o revestimento da ferramenta é removido. As trincas térmicas ocorrem quando há flutuações de temperatura na ferramenta (choque térmico), que proporciona formações de fissuras térmicas na ferramenta. O desgaste de cratera geralmente está associado a um processo químico (KHATRI, JAHAN, 2018). Wang, Ji e Guo (2020) fizeram uma análise detalhada da progressão da falha da ferramenta de metal duro revestida (PVD) no fresamento sem lubrificação da liga Ti-6Al-4V. Os autores concluíram que a delaminação do revestimento e o desgaste de flanco são os principais modos de falha que dominam a vida da ferramenta na velocidade de corte de 100 m/min. A velocidade de corte acelerou significativamente a falha da ferramenta e afetou as morfologias de desgaste das ferramentas de corte. A difusão da fase ligante (Co) foi observada após a delaminação do revestimento e a velocidade de corte promoveu o processo de difusão do cobalto. Foram encontradas microfissuras havendo uma forte correlação entre difusão de cobalto e iniciação de trincas. A iniciação e propagação de trincas promoveu fraturas de ferramentas de corte em altas velocidades de corte.

No presente estudo, os desgastes encontrados nas respectivas estratégias de lubrificação e resfriamento estão inseridos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Desgastes encontrados nos insertos utilizados

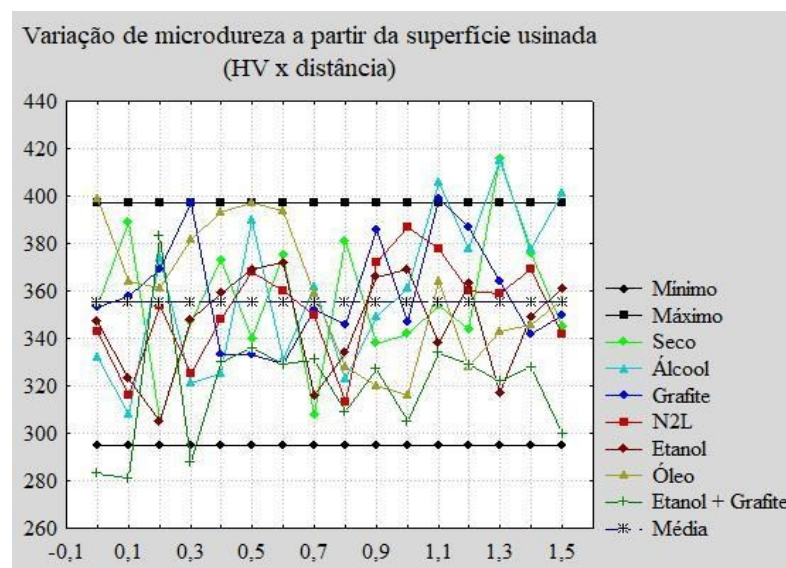
Estratégia	Flanco	Lascamento	Adesão	Crateras	Delaminação
Seco	X		X	X	X
Óleo	X		X		
Óleo + Grafite	X	X		X	
Nitrogênio Liq.	X			X	
Álcool E. + CO ₂	X		X		X
Etanol (1005) + CO ₂	X		X		X
Grafite + Etanol	X		X		

Fonte: Dados do autor.

5.6 Análise de dureza Vickers

Todas as medições estão ilustradas na Figura 5.6. Nota-se que os valores se encontram distribuídos dentro do intervalo de micro dureza medidos antes da usinagem (295HV – 397HV). O valor médio das medições é de 355,4HV. Nota-se que com as medições efetuadas a cada 0,1 mm de distância a tendência de endurecimento ou diminuição de dureza são mínimas. Desta forma, pode-se concluir que o efeito das estratégias de lubrificação/ resfriamento neste estudo não propiciaram mudanças de dureza, já que todas as medições se situaram no intervalo de medida da peça antes da usinagem. Cabe mencionar que o intervalo de 0,1mm pode ter sido muito alto para verificar as variações de dureza.

Figura 5.6 – Variação de micro dureza Vickers a partir da superfície usinada.

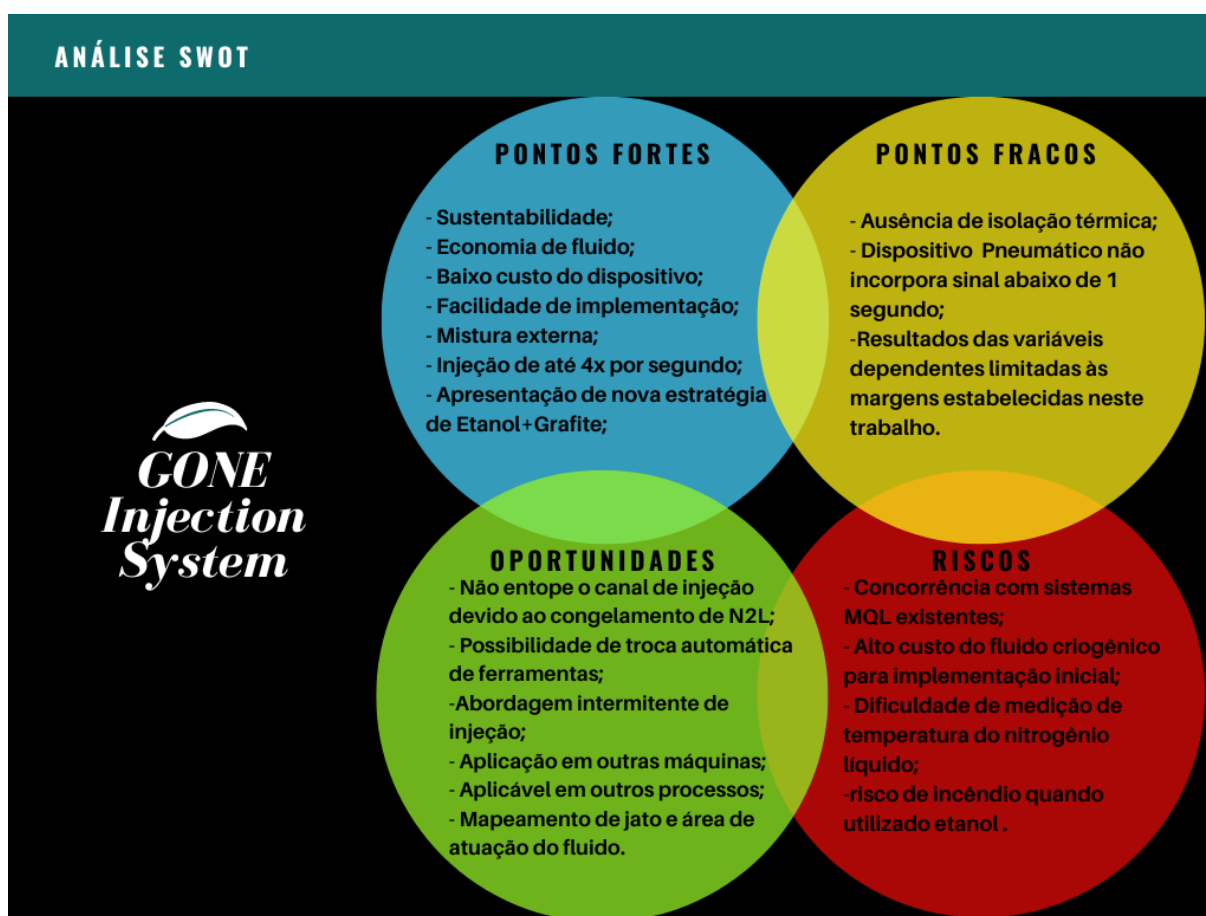


Fonte: Dados do autor.

5.7 Matriz SWOT

De posse do dispositivo de injeção criado, uma análise SWOT foi efetuada com o intuito de mapear os pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças ao projeto desenvolvido. A Figura 5.7 mostra o resultado da análise.

Figura 5.7 - Análise SWOT



Fonte: Dados do autor.

6 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A principal contribuição deste estudo é a apresentação de novos conhecimentos sobre o fresamento da liga Ti-6Al-4V com aplicações de novas estratégias de lubrificação e resfriamento com um novo dispositivo MQL de mistura externa. O design comercial e simples do dispositivo desenvolvido atrelado à praticidade de montagem e utilização torna-se um facilitador para ser acolhido pela indústria.

A facilidade de manutenção e baixo custo do dispositivo de mistura é um ponto forte para sua adoção.

A aplicação de novas estratégias de lubrificação e resfriamento utilizando misturas de Etanol, Grafite e CO₂ sólido possibilitou resultados de acabamento superficial semelhantes à abordagem criogênica com um custo menor.

7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do dispositivo de mistura permitiu o estudo e a fabricação de um produto e a utilização de estratégias de lubrificação/resfriamento sob abordagem MQL. As conclusões foram:

- Nos nebulizadores convencionais há um tempo de resposta devido a um retardo de chegada de lubrificante no ponto de mistura com o ar comprimido. Neste sistema o fluido já está localizado no dispositivo, fazendo com que a mistura seja imediata. O dispositivo promove fácil manutenção, permite a troca de ferramentas com o dispositivo instalado, acoplamento na maioria das máquinas operatrizes, menor preço, facilidade de uso, facilidade de implementação e economia devido a redução da quantidade de lubrificante. O dispositivo de mistura pode ser utilizado por meio de bomba ou por gravidade. Salienta-se a inversão do fluxo dos fluidos, quando comparados aos dispositivos existentes no mercado.
- O estudo de vazão, levantamento de curvas e função de transferência possibilitou entender o comportamento do dispositivo de mistura buscando sua melhor utilização;
- O jato da mistura criogênica MQL e sua área de abrangência foi mapeado e possibilitou verificar o efeito da área molhada a partir da injeção de nitrogênio líquido e de alcance do fluido criogênico evitando-se o efeito Leidenfrost quando de sua aplicação. Jatos MQL foram medidos e fornecem dados de utilização.
- O uso de jatos intermitentes na abordagem com nitrogênio líquido evita o entupimento e interrupção do fornecimento do fluido. O ciclo de injeção a cada 250ms não afetou o fornecimento do fluido. Não foram encontradas trincas térmicas nos insertos utilizados.
- O dispositivo construído com atuação pneumática é válido para ciclos iguais ou maiores do que 1,0 segundo dada a resposta lenta do respectivo sistema. A construção e implementação de placa eletrônica na válvula industrial possibilitou injeções em um ciclo mínimo de 250 ms.
- A simulação CFD da mistura condiz com os resultados práticos. A abordagem CFD permitiu verificar o comportamento do nitrogênio líquido no dispositivo desenvolvido e ilustrou o comportamento do fluido e mistura no procedimento de usinagem, estimando parâmetros de distância da peça x ferramenta para que a temperatura fosse estipulada, bem como os contornos de velocidade e temperatura.

- Com relação ao planejamento fatorial e usinagem percebeu-se que as variáveis que mais influenciam as forças de usinagem e rugosidade são a profundidade de penetração e o avanço. As forças de usinagem são minimizadas na estratégia sem lubrificação e maiores com a utilização de nitrogênio líquido.
- Quando o dispositivo de mistura é utilizado com nitrogênio líquido, Etanol e CO₂ promove benefícios ecológicos, benefícios à saúde e aplicação sustentável.
- A nova aplicação de mistura MQL Etanol (100%) + Grafite (5%) possibilitou um acabamento superficial semelhante à aplicação de nitrogênio líquido.
- As rugosidades conseguidas com a aplicação de Álcool Etílico Hidratado + CO₂ foram próximas às obtidas pela aplicação criogênica. O maior valor rugosidade ($S_a = 1,17 \mu\text{m}$) ficou a cargo da usinagem sem lubrificação. O menor valor encontrado foi de $S_a = 0,18 \mu\text{m}$ obtido com a estratégia Grafite + Etanol. O menor valor de rugosidade obtido com a utilização de nitrogênio líquido foi de $S_a = 0,19 \mu\text{m}$.
- Não houve variação de micro dureza entre as estratégias de lubrificação/ resfriamento adotadas.
- Não foram encontradas micro deformações superficiais nas amostras obtidas pela lubrificação com Etanol + Grafite. As maiores micro deformações superficiais encontradas foram na estratégia sem lubrificação.
- Todos os insertos de corte obtiveram desgaste de flanco. A adesão foi encontrada nos insertos utilizados com lubrificação com óleo, Álcool Etílico hidratado + CO₂, Etanol + CO₂, Grafite + Etanol e na condição a seco.
- A estratégia com nitrogênio líquido propiciou maior vida do inserto de corte.
- A utilização de CO₂ na forma sólida na combinação com Álcool Etílico hidratado e Etanol (100%) contribuiu para a minimização dos esforços de corte quando comparados com a estratégia usando óleo e óleo + grafite.
- Com a programação e configuração da plataforma remota Ubidots foi possível realizar ensaios de usinagem e de coleta de dados de forma remota.
- As redes neurais artificiais e o planejamento fatorial, fizeram a predição das respostas (variáveis dependentes) de forma semelhante, comprovadas por meio da análise de variância.
- A possibilidade de escolha de infinitas proporções de misturas torna o dispositivo desenvolvido neste trabalho uma ferramenta excelente para pesquisa e aplicações.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização do dispositivo MQL para novas propostas de misturas de lubrificantes e aplicações em outros processos de usinagem.
- Investigação da influência de diferentes porcentagens de mistura de Grafite e Etanol.
- Utilização do dispositivo de mistura para aplicação em outros materiais e outras ferramentas de corte.
- Proposta de uma usinagem com a mistura de lubrificantes sólidos e nitrogênio líquido.
- Investigar o efeito de variação e posicionamento do diâmetro do bico de saída na usinagem.
- Estudar a influência de variação de pressão de entrega do lubrificante no acabamento superficial.
- Investigar as regiões de deformação plástica severa, maclação mecânica e a influência no acabamento superficial, tensões residuais e dureza.

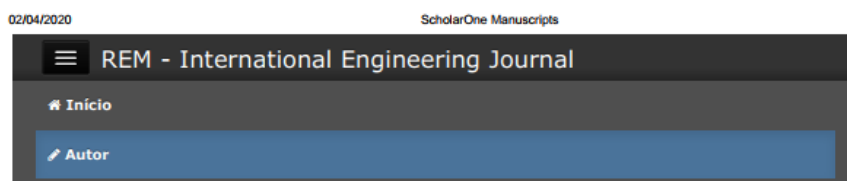
9 PUBLICAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DESTE ESTUDO

Artigos publicados:

- Paschoalinoto, N.W.; Batalha, G.F.; Bordinassi, E.C.; Ferrer, J.A.G.; Filho, A.F.d.L.; Ribeiro, G.d.L.X.; Cardoso, C. MQL Strategies Applied in Ti-6Al-4V Alloy Milling—Comparative Analysis between Experimental Design and Artificial Neural Networks. *Materials* 2020, 13, 3828. <https://doi.org/10.3390/ma13173828>
- Paschoalinoto, N.W., Batalha, G.F., Ladivez, P.S. et al. Development of a cyclic liquid nitrogen injection system and its application to minimum quantity lubrication milling of the Ti-6Al-4V alloy. *Int J Adv Manuf Technol* 118, 1529–1552 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07994-4>.

Artigos submetidos:

- Applying Lubricant Mixing Valve to the Milling of Ti-6Al-4V



Confirmação da submissão

Imprimir

Obrigado pela sua submissão

Submetido para

REM - International Engineering Journal

ID do manuscrito

REMI-2020-0047

Título

Applying Lubricant Mixing Valve to the Milling of Ti-6Al-4V Alloy

Autores

Paschoalinoto, Nelson

Batalha, Gilmar

Ferrer, Jorge

Filho, Aderval

Bordinassi, Éd

Data da submissão

02-abr-2020

Congressos

- 21st International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies. Lubricant fluid mixture for machining Ti-6Al-4V alloy. Dublin City University, Ireland, 4th - 7th September 2018.
- 11^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Aplicação de uma válvula MQL e análise de rugosidade S_p e S_v no fresamento da liga Ti-6Al-4V. 24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil
- 4^o MEC3F – Aceitação de resumo. Válvula de mistura MQL de baixo custo para lubrificação em processos de usinagem.



Anais do Congresso de Engenharia e Ciências Aplicadas nas Três Fronteiras – MEC3F 2019
Actas del Congreso de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en las Tres Fronteras - MEC3F 2019

ISSN 2675-4452

VÁLVULA DE MISTURA MQL DE BAIXO CUSTO PARA LUBRIFICAÇÃO EM PROCESSOS DE USINAGEM

Nelson W. Paschoalinoto^{1,2,3}; Gilmar F. Batalha¹; Jorge A. G. Ferrer²; Aderval F. de L. Filho²; Ed C. Bordinassi^{3,4}

1Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (SP), Brasil

2Faculdade Senai de Tecnologia Mecatrônica, São Caetano do Sul (SP), Brasil

3Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo (SP), Brasil

4Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo (SP), Brasil

nelson.paschoalinoto@maua.br

Depósito de Patente

- Dispositivo de mistura externa de lubrificantes criogênicos para usinagem.



10/05/2021 870210042144
11:07



29409161935065040

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 20 2021 009020 6

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: NELSON PASCHOALINOTO

REFERÊNCIAS

ABELE E; HASENFRATZ, C; HEEP, T. Estratégias de refrigeração na usinagem de ligas de titânio. Máquinas e Metais, ano 52, n. 610, nov.2016. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2016/11/28/estrategias_de_refrigeracao.html>. Acesso em 12/05/2021.

ABIODUN, Oludare Isaac et al. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon, v. 4, n. 11, p. e00938, 2018.

ACEVES, Maureen. Subsurface deformation micromechanisms induced during machining of titanium alloys at low temperatures, and a novel testing methodology to examine their machining behaviour. 2019. Tese de Doutorado. University of Sheffield.

ACCU-LUBE MANUFACTURING. Disponível em: < <https://www.accu-lube.com/en/products/lubricants/>>. Acesso em 12/12/2020.

AHMAD-YAZID, Aznijar; TAHA, Zahari; ALMANAR, Indra Putra. A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels. Scientific Research and Essays, v. 5, n. 5, p. 412-427, 2010.

ALVES, Ueliton Carvalho. Avaliação da força de usinagem, superfície e subsuperfície geradas no torneamento da liga Ti-6Al-4V produzida por manufatura aditiva. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas.

AN, Qinglong et al. Tool wear and machined surface characteristics in side milling Ti6Al4V under dry and supercritical CO₂ with MQL conditions. Tribology International, v. 151, p. 106511, 2020.

ANTONIALLI, Armando Ítalo Sette. Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V / Armando Ítalo Sette Antonialli. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009. Orientador: Anselmo Eduardo Diniz. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

ARAMCHAROEN, Ampara. Influence of cryogenic cooling on tool wear and chip formation in turning of titanium alloy. Procedia CIRP, v. 46, p. 83-86, 2016.

ARDUINO SWEEP. Disponível em:<<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Sweep>>.Acesso em 15 mar. 2018.

ARESTAS DE CORTE. Disponível em:<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges>. Acesso em: 12 jan. 2018.

ANSYS. Ansys fluid theory guide. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>. Acesso em 08/2019.

- ÁVILA, Ricardo Pereira de. Estudo fenomenológico e numérico do escoamento estratificado óleo-água ondulado e com mistura na interface. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BALDIN, Vitor et al. Effect of graphene addition in cutting fluids applied by Mql in end milling of Aisi 1045 steel. *Lubricants*, v. 9, n. 7, p. 70, 2021.
- BALDO, Dênison. Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica. Dissertação, 2013. Universidade Federal de São João Del-Rei.
- BANIN, José Roberto. Análise de Tensões Residuais, Integridade Superficial e Forças de Usinagem no Fresamento de Topo de Aço SAE 4340 Endurecido. 2007, 115f. Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo.
- BAYRAKTAR, Senol. Cryogenic cooling-based sustainable machining. In: *High Speed Machining*. Academic Press, 2020. p. 223-241.
- Bi, Z. Revisiting System Paradigms from the Viewpoint of Manufacturing Sustainability. *Sustainability*, 3(9), 1323–1340, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su3091323>>. Acesso em 12/2020.
- BIELOMATIK. Vantagens e benefícios do uso do MQL. *Usinagem Brasil*, 2012. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/6791-vantagens-e-beneficios-do-uso-do-mql/>> . Acesso em: 12/ 2020.
- BORTOLINI, Marco et al. Assembly System design in the Industry 4.0 era: a general framework. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 5700-5705, 2017.
- BOYER, R. R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science & Engineering*, v. A213, n. 1-2, p. 103-114, 1996.
- BOYER, R. R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. 1 ed. Materials Park: ASM International, 1994. 1176 p.
- BUHELDT, Erinson Danilo et al. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE VÓRTICE. XXIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 08 a 12/08/2016 – Teresina – PI.
- BÜRKERT. Coeficiente de vazão. (2021a). Disponível em: <<https://www.burkert.com.br/pt/Servico-e-Assistencia/Servico/Glossario/Calculadora-de-fluidos>>. Acesso em 09/07/2021.
- BÜRKERT. Calculadora de fluidos. (2021b). Disponível em: <<https://www.burkert.com.br/pt/calculator>>. Acesso em 09/07/2021.
- CAMPOS, D. Análise do efeito da rugosidade da superfície usinada no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio. Dissertação, 2014. Universidade Metodista de Piracicaba. Piracicaba.

CALLE OVIEDO, Francisco Javier; VALENCIA LESCANO, Jefferson Fabricio. Análisis comparativo de la influencia del sistema de mínima cantidad de lubricación con aceite vegetal y sintético en operaciones de fresado CNC del acero AISI 4140. 2020.. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidad Politécnica Salesiana, Equador.

CALZADO, M. J. Fabricación sostenible. Lubricación por cantidades mínimas (MQL). Canales Sectoriales, 2012. Disponível em: <[http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/98474-Fabricacion-sostenible-Lubricacion-por-cantidades-minimas-\(MQL\).html](http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/98474-Fabricacion-sostenible-Lubricacion-por-cantidades-minimas-(MQL).html)>. Acesso em: dez/2020.

COUTO, A. A. et al. Caracterização microestrutural da liga Ti-6Al-4V comercial utilizada como biomaterial. In: Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. 2006.

CAMPOS, D. I. F. de. Análise do efeito da rugosidade da superfície usinada no processo de fabricação de próteses em ligas de titânio. Universidade Metodista de Piracicaba. Faculdade de engenharia, arquitetura e urbanismo. Santa Bárbara do Oeste. Dissertação, 2014.

CHETAN, Sudarsan Ghosh, P. VENKATESWARA Rao, Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review, Journal of Cleaner Production, Volume 100, 2015, Pages 17-34, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.039>.

COELHO, V. Planejamento e controle da capacidade produtiva. Curso: Módulo 1. Núcleo de educação à distância. IETEC, 2017.

CONNOR, Nick. O que é o efeito Leidenfrost – Ponto Leidenfrost – Definição. 2019. Thermal Engineering. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-efeito-leidenfrost-ponto-leidenfrost-definicao/>. Acesso em 12, dez, 2020.

CORDES, Susanne; HÜBNER, Fabian; SCHAARSCHMIDT, Thomas. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. Procedia Cirp, v. 14, p. 401-405, 2014

CSA SCIENTIFIC. Chem-Supply Pty Ltd, Commerce Vison, 2019. Disponível em: <<https://www.chemsupply.com.au/laboratory-reagents>>. Acesso: dez, 2020.

ÇETINDAĞ, Hüseyin Alp; ÇIÇEK, Adem; UÇAK, Necati. The effects of CryoMQL conditions on tool wear and surface integrity in hard turning of AISI 52100 bearing steel. Journal of Manufacturing Processes, v. 56, p. 463-473, 2020.

DA SILVA BRIGUENTE, Luciana Aparecida Narciso et al. Avaliação do comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V com estrutura martensítica e equiaxial a 600c. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 10, n. 4, 2013.

DAVIS, Brian; SCHUELLER, John K.; HUANG, Yong. Study of ionic liquid as an effective additive for minimum quantity lubrication during titanium machining. Manufacturing Letters, v. 5, p. 1-6, 2015.

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of cleaner production*, v. 83, p. 33-47, 2014.

DESHPANDE, Soham; DESHPANDE, Yogesh . A Review On Cooling Systems Used In Machining Processes, *Materials Today: Proceedings*, Volume 18, Part 7, 2019, Pages 5019-5031, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.496>.

DHAR, N. R. et al. Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jets on tool wear, surface finish and dimensional deviation in turning different steels. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 1, n. 1, p. 115-131, 2006a.

DHAR, N. R. et al. 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*, v. 171, n. 1, p. 93-99, 2006b.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 7.ed. São Paulo: Artliber, 2010. 262 p.

DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. ASM international, 2ªEd. 216p. 2000.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. *Wear*, v. 178, n. 1-2, p. 29-43, 1994.

DUC, Tran Minh et al. Performance evaluation of MQL parameters using Al₂O₃ and MoS₂ nanofluids in hard turning 90CrSi steel. *Lubricants*, v. 7, n. 5, p. 40, 2019.

ECO-UNIFESP. Princípio dos 3R's. Disponível em: <https://dgi.unifesp.br/ecounifesp/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=8>. Acesso em 12/07/2021.

ENGINEERING TOOLBOX. Nitrogen - Thermophysical Properties, 2008. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d_1421.html>. Acesso em 15/05/2021.

ENGINEERING TOOLBOX. Carbon Dioxide - Thermophysical Properties. 2018. . Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/CO2-carbon-dioxide-properties-d_2017.html>. Acesso em 15/05/2021.

EURECICLO. Reciclagem sem escândalo. Disponível em: <<http://reciclagemsemescandalo.com.br/2021/05/6-rs-da-sustentabilidade/>>. Acesso em 12/07/2021

EYMARD, Robert ; GALLOUËT, Thierry; HERBIN, Raphaèle. *Finite Volume Methods*. Disponível em: < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02100732v2/document>>. Acesso em 06/07/2021.

E2ESOFT. *Camera Measure*. Disponível em: < <https://www.e2esoft.com/camm/>>. Acesso em 03/2021.

FARIAS, A. Avanços na Usinagem de Ligas de Titânio. In: Congresso Nacional de Engenharia de Fabricação, 6., 2011, Caxias do Sul. Anais... Caxias do Sul: [s.n.], 2011.

FARIAS, Adalto de. Avaliação do processamento por atrito linear em chapas da liga de titânio Ti-6Al-4V. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FERRARESI, D. Fundamentos de usinagem dos metais. São Paulo: Ed. Blucher, 1977.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S.; HODZIC, A. Evaluation of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication effects on machining GLARE laminates using design of experiments. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 533-548, 2016.

GIRALDO, S. A. C. Modelo Matemático de un Tanque de Nivel. Disponível em: <<https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/tanque-nivel/>>. Acesso em 21/12/2020.

GRANTA EDUPACK. (2020). GRANTA Edupack 2020 Versão: 20.1.1. Copyright © Granta Design Limited. Subsidiado por ANSYS.

GRGURAŠ, Damir et al. A novel cryogenic machining concept based on a lubricated liquid carbon dioxide. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 145, p. 103456, 2019.

GUENZA, J. E. Análise do desempenho do fresamento em altas velocidades de corte do ferro fundido GG25 em aplicação industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dissertação, 2008.

HADAD, Mohammadjafar; BEIGI, Mohammad. A novel approach to improve environmentally friendly machining processes using ultrasonic nozzle–minimum quantity lubrication system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 114, n. 3, p. 741-756, 2021.

HANIEF, M.; WANI, M.F. Artificial neural network and regression-based models for prediction of surface roughness during turning of red brass (C23000). *J. Mech. Eng. Sci.* 2016, 10, 1835–1845.

HANIEF, M.; WANI, M. F.; CHAROO, M. S. Modeling and prediction of cutting forces during the turning of red brass (C23000) using ANN and regression analysis. *Engineering science and technology, an international journal*, v. 20, n. 3, p. 1220-1226, 2017.

HE, Zi-He; ZHANG, Xiao-Ming; DING, Han. Comparison of residual stresses in cryogenic and dry machining of Inconel 718. *Procedia CIRP*, v. 46, p. 19-22, 2016.

HONG, Shane Y ; DING, Yucheng. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 10, 2001, Pages 1417-1437, ISSN 0890-6955, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00026-8).

ISAKSON, Simon; SADIK, M. Ibrahim ; MALAKIZADI, Amir ; KRAJNIK, Peter .Effect of cryogenic cooling and tool wear on surface integrity of turned Ti-6Al-4V, *Procedia CIRP*,

Volume 71, 2018, Pages 254-259, ISSN 2212-8271,
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.061>

IESSS. Curso de Modelagem computacional de Escoamentos Multifásicos com ANSYS CFD. Instituto ESSS, 2019. Disponível em: <https://pt.esssvirtual.com/courses/curso-de-modelagem-computacional-de-escoamentos-multifasicos-com-ansys-cfd>>. Acesso em 15/12/2019.

JAMES, S. Johnny; ANNAMALAI, A. Raja. Machinability study of developed composite AA6061-ZrO₂ and analysis of influence of MQL. *Metals*, v. 8, n. 7, p. 472, 2018.

JAWAHIR, I. S. et al. Total life-cycle considerations in product design for sustainability: A framework for comprehensive evaluation. In: Proceedings of the 10th international research/expert conference, Barcelona, Spain. 2006. p. 1-10.

JAWAHIR, I. S.; PULEO, D. A.; SCHOOP, J. Cryogenic machining of biomedical implant materials for improved functional performance, life and sustainability. *Procedia CIRP*, v. 46, p. 7-14, 2016b.

JAWAHIR, I. S., ATTIA, H., BIERMANN, D., DUFLOU, J., KLOCKE, F., MEYER, D., ... & SCHULZE, V. (2016). Cryogenic manufacturing processes. *CIRP annals*, 65(2), 713-736, 2016a.

JESUÍNO, G. A., et al. “Propriedades mecânicas e resistência à corrosão da liga Ti-4Al-4V obtida da reciclagem da liga Ti-6Al-4V”. *Materials Research*, vol. 4, no 2, 2001, p. 63–69. SciELO, doi:10.1590/S1516-14392001000200004.

JEROLD, B. Dilip; KUMAR, M. Pradeep. The influence of cryogenic coolants in machining of Ti–6Al–4V. *Journal of manufacturing science and engineering*, v. 135, n. 3, 2013.

JOHNSON MATTHEY PIEZO PRODUCTS (2021). Atomizador ultrassônico piezoelétrico. Disponível em: < <https://www.piezoproducts.com/pt/products-solutions/ultrasonic-atomizers/>>. Acesso em 12/05/2021.

KALIDASS, S.; PALANISAMY, P.; MUTHUKUMARAN, V. Prediction of tool wear using regression and artificial neural network models in end milling of AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, v. 1, n. 2, p. 29-35, 2012.

KALTENBRUNNER, T. et al. Differences in evolution of temperature, plastic deformation and wear in milling tools when up-milling and down-milling Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 77, p. 75-86, 2022.

KARKALOS, N. E.; GALANIS, N. I.; MARKOPOULOS, A. P. Surface roughness prediction for the milling of Ti–6Al–4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques. *Measurement*, v. 90, p. 25-35, 2016.

KECHAGIAS, John et al. Optimizing ANN performance using DOE: Application on turning of a titanium alloy. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. p. 01017.

KHATRI, Ashutosh; JAHAN, Muhammd P. Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions. *Procedia Manufacturing*, v. 26, p. 434-445, 2018.

KHATRI, Ashutosh; JAHAN, Muhammd P.; MA, Jianfeng. Assessment of tool wear and microstructural alteration of the cutting tools in conventional and sustainable slot milling of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, n. 7, p. 2799-2814, 2019.

KHORASANI, Amir Mahyar; YAZDI, Mohammad Reza Soleymani; SAFIZADEH, Mir Saeed. Tool Life Prediction in Face Milling Machining of 7075 Al by Using Artificial Neural Networks (ANN) and Taguchi Design of Experiment (DOE). *International Journal of Engineering and Technology*, v. 3, n. 1, p. 30, 2011.

KRISHNAMURTHY, G., BHOWMICK, S., ALTENHOF, W., and ALPAS, A.T., 2017. Increasing efficiency of Ti-alloy machining by cryogenic cooling and using ethanol in MRF[Online]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, pp.159–172. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.01.001>> Acesso em 08/06/2022.

KUHLMAN, G. W. Forging of Titanium Alloys. In: *Metals Handbook*, v. 14 – Forming and Forging, 9 ed. Materials Park: ASM International, 1988. p. 267-287.

KULL NETO, Henrique. Uma contribuição ao estudo do fresamento de liga de titânio: vida de ferramenta, forças de corte e rugosidade da peça. Campinas, SP: [s.n.], 2013.

KUMMAMKANDATH, Anshab et al. Investigation on residual stresses in milling of Ti-6Al-4V for both rake and flank application of different MWF strategies. *Procedia CIRP*, v. 87, p. 131-136, 2020.

KYOCERA Componentes industriais LTDA. Fresas de topo e faceamento de alta eficiência. Série MEC. Catálogo técnico. 2018.

KISTLER. Catálogo dinamômetro. Disponível em: <<https://www.kistler.com/pt/>>. Acesso em 05/2018.

LANDUCI, M. C. Caracterização das propriedades mecânicas de biomateriais metálicos. Dissertação, 2016. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Bauru - SP.

LAWAL, Sunday Albert; CHOUDHURY, Imtiaz Ahmed; NUKMAN, Yusoff. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 210-221, 2013.

LEE, Kwangho et al. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication. *Tribology Letters*, v. 35, n. 2, p. 127-131, 2009.

LEYENS, Christoph, PETERS, Manfred. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Copyright © 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-30534-3.

LU, Tao. A metrics-based sustainability assessment of cryogenic machining using modeling and optimization of process performance. University of Kentucky, 2014.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. Titanium. 2. ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., Da SILVA, M.B., Teoria da Usinagem dos Metais, 3ª Ed, Ed. Blucher, 2015.

MAG. SPECHT® MACHINE SERIES. High-Performance CNC System Machines. (2018). Disponível em: https://ffg-ea.com/fileadmin/user_upload/PDF/Broschueren/EN/180903_FFG_MAG_SPECHT_Baureihe_en_200dpi_RGB.pdf. Acesso em : 12/2020

MELO, Alexandre Lyrio Viana de. Análise das propriedades de chapas de titânio ASTM grau 5 (Ti6Al4V) soldadas a laser. – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2007. 119p.:il.,graf.,tab. Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro.

MENDONÇA, L. de O. S.; SANTOS, D. A. dos; ALVES, V. do N. de J.; AVELAR, H. J. Levantamento da Curva Característica de uma Válvula de Vazão. XVI CEEL- ISSN 2178-8308. Universidade Federal de Uberlândia, 05-09 de novembro de 2018.

MIA, M., RAZI, M. H., AHMAD, I., MOSTAFA, R., RAHMAN, S. M. S., AHMED, D. H., et al. (2017). Effect of time-controlled MQL pulsing on surface roughness in hard turning by statistical analysis and artificial neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9), 3211–3223. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9978-1>>. Acesso em 07/06/2021.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Applied Statistics and Probability for engineers, 3rd ed. Arizona State University, John Wiley & Son, 2003.

MORALES TAMAYO, Yoandrys et al. Comparison of two methods for predicting surface roughness in turning stainless steel AISI 316L. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, v. 26, n. 1, p. 97-105, 2018.

MORCELLI, Aparecido Edilson. Estudo dos micromecanismos de deformação e fratura da liga de Titânio Ti-6Al-4V utilizando-se técnicas de microscopia eletrônica e difração de Raios-X. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOURA, Ricardo R. et al. The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, v. 332, p. 762-771, 2015.

MOURA, Ricardo Ribeiro. Usinagem da liga Ti6Al4V com aplicação de lubrificantes sólidos no torneamento. 2017. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.88>.

MOVIMENTO VERDADES SUSTENTÁVEIS. 3R's: quais as alternativas para o gerenciamento de resíduos? Disponível em: <<https://verdadessustentaveis.com/3-rs-quais-as-alternativas-para-o-gerenciamento-de-residuos/>>. Acesso em: 12/07/2021.

MUSFIRAH, A. H. et al. Effect of cutting parameters on cutting zone in cryogenic high speed milling of inconel 718 alloy. *Jurnal Teknologi*, v. 77, n. 27, p. 1-7, 2015.

NEX FLOW. Tubos de Vórtice. Nexflow air products corp. Disponível em: <<https://www.nexflow.com/pt-br/vortex-tubes/>>. Acesso em 20/12/2020.

NOUARI, Mohammed; MAKICH, Hamid. Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 41, p. 259-269, 2013.

NOUARI, Mohammed; MAKICH, Hamid. On the physics of machining titanium alloys: interactions between cutting parameters, microstructure and tool wear. *Metals*, v. 4, n. 3, p. 335-358, 2014.

OLIVEIRA, A.R.F., CÂNDIDO, B. H., MACHADO, A.R., Quantificação do Desgaste da Ferramenta de Corte por Varredura Óptica no Torneamento do Aço ABNT 1050, Salvador, BA, 8º COBEF, 2015b.

OLIVEIRA, A. R. F.; PAULA, G. C. de.; TEIXEIRA, I. C.; MACHADO, A. R. Estudo da vida da ferramenta de corte de metal duro no torneamento do aço ABNT 1045. POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 18 e 19 de novembro de 2015.

OOSTHUIZEN, G. A. et al. The effect of cutting parameters on surface integrity in milling Ti6Al4V. *South African Journal of Industrial Engineering*, v. 27, n. 4, p. 115-123, 2016.

OVIEDO, C; JAVIER, V. L; FABRICIO, J. Análisis comparativo de la influencia del sistema de mínima cantidad de lubricación con aceite vegetal y sintético en operaciones de fresado CNC del acero AISI 4140. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2020. Disponível em: <<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18913>>. Acesso em: dez/ 2020.

PARK, Kyung-Hee et al. A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 50, n. 9, p. 824-833, 2010.

PASCHOALINOTO, Nelson Wilson et al. MQL Strategies Applied in Ti-6Al-4V Alloy Milling - Comparative Analysis between Experimental Design and Artificial Neural Networks. *Materials*, v. 13, n. 17, p. 3828, 2020.

PASCHOALINOTO, Nelson W. et al. Development of a cyclic liquid nitrogen injection system and its application to minimum quantity lubrication milling of the Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 118, n. 5, p. 1529-1552, 2022.

PASETTI, G. Válvulas de Controle. Instituto Federal Catarinense. Disponível em: <<http://professor.luzerna.ifc.edu.br/giovani-pasetti/wp->

content/uploads/sites/35/2018/10/Instrumenta%C3%A7%C3%A3o-Parte-8-V%C3%A1lvulas.pdf> . Acesso em 20/12/2020.

PATEL, S. K., PATEL, H. A review of cryogenics based manufacturing processes. Disponível em:

<https://www.ijsr.in/upload/276814423Chapter_7.pdf>. Acesso em 21/03/2018.

PENSADOR. Madre Teresa de Calcutá. Disponível em: <

https://www.pensador.com/madre_teresa_de_calcuta/2/>. Acesso em 19/09/2020.

PIMENOV, Danil Yu et al. Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. *Journal of materials research and technology*, v. 11, p. 719-753, 2021.

PMT-USP. PMT3402 - Aula Prática 11: Titânio. Disponível em: <<http://pmt.usp.br/pmt3402/lab/aula11.html>>. Acesso em 07/07/2021.

POLISHETTY, Ashwin et al. A preliminary assessment of machinability of titanium alloy ti 6al 4 v during thin wall machining using trochoidal milling. *Procedia Engineering*, v. 97, p. 357-364, 2014.

PONTES, Fabrício José et al. A DOE based approach for the design of RBF artificial neural networks applied to prediction of surface roughness in AISI 52100 hardened steel turning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 32, n. spe, p. 503-510, 2010a.

PONTES, Fabrício J. et al. Artificial neural networks for machining processes surface roughness modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 49, n. 9-12, p. 879-902, 2010b.

PONTES, Fabrício José et al. Design of experiments and focused grid search for neural network parameter optimization. *Neurocomputing*, v. 186, p. 22-34, 2016.

PORTAL MET@LICA. Fresamento e suas finalidades. Disponível em:

<<http://wwwo.metalica.com.br/fresamento-e-suas-finalidades>>. Acesso em 20/05/2018.

PUŠAVEC, Franci; KOPAČ, Janez. Sustainability assessment: cryogenic machining of Inconel 718. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, v. 57, n. 9, p. 637-647, 2011.

QUIMATIC/TAPMATIC. Disponível em:<

http://www.quimatic.com.br/conteudo/boletim/ft_Super_Fluido_3.pdf>. Acesso em 15 fev. 2018.

RAHMATI, Bizhan; SARHAN, Ahmed AD; SAYUTI, M. Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication in end milling machining. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 685-691, 2014.

RAMOS, B. D'L. O; LIMA, L. F de O.; PÁDUA, V. E. de M. Tubo de vórtice Ranque-Hilsch: separação de temperatura sem dispositivos móveis – EM974: Métodos

Computacionais Aplicados à Engenharia Térmica e Ambiental. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2015. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-15/TURMA%20A/GRUPO-4-Ranque-Hilsch%20tubo-vortice/Grupo4Projeto/Grupo2TextoFinal.pdf>>. Acesso em 20/12/2020.

RANIYO. Pegler Yorkshire – Gate Valve – 1068. Disponível em: <<https://www.raniyo.com/products/pegler-1068-gate-valve-sri-lanka>>. Acesso em 09/07/2021.

RAYES, Ammar; SALAM, Samer. Internet of things from hype to reality. The road to Digitization, v. 2, 2017.

RCR AMBIENTAL. 3R's da Sustentabilidade: como utilizá-los em sua empresa. Disponível em: <<https://rcrambiental.com.br/3-rs-da-sustentabilidade/>>. Acesso em 12/07/2021

RENEWABLE LUBRICANTS INC., RENEWABLE LUBRICANTS, Lansing Web Desing, 2019. Disponível em:< <https://renewablelube.com>>. Acesso em 12/12/2020.

RIBEIRO, José Luiz Silva; ABRÃO, Alexandre Mendes; SALES, Wisley Falco. Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes. Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brasil, 2006.

RIBEIRO, José Luiz Silva. Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes. Moldes injeção de plásticos. Disponível em: < <http://moldesinjecao plasticos.com.br/forcas-de-usinagem-no-fresamento/>>. Acesso em 20/05/2021.

RODRIGUES, Alessandro Roger et al. Rugosidade e microestrutura da peça no fresamento do aço vp100 para moldes. In: Proceedings of the 7th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering, Penedo, Itatiaia, RJ, Brazil. 2013. p. 15-19.

SADIK, M. Ibrahim et al. Influence of coolant flow rate on tool life and wear development in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V. Procedia CIRP, v. 46, p. 91-94, 2016.

SAHOO, A.; ROUT, A.; DAS, D. Response surface and artificial neural network prediction model and optimization for surface roughness in machining. International Journal of Industrial Engineering Computations, v. 6, n. 2, p. 229-240, 2015.

SANDVIK. Fórmulas e definições de fresamento. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx?Country=br>>. Acesso em 20/05/2018.

SARHAN, Ahmed AD; SAYUTI, Mohd; HAMDY, Mohd. Reduction of power and lubricant oil consumption in the milling process using a new SiO₂ nanolubrication system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 63, n. 5-8, p. 505-512, 2012.

SARTORI S., GHIOTTI A. and BRUSCHI S. “Hybrid lubricating/cooling strategies to reduce the tool wear in finishing turning of difficult-to-cut alloys”, Wear, vol. 376, pp.107-114, 2017.

SAYUTI, Mohd; SARHAN, Ahmed AD; SALEM, Faheem. Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption. *Journal of Cleaner Production*, v. 67, p. 265-276, 2014b

SAYUTI, Mohd et al. Investigation on the morphology of the machined surface in end milling of aerospace AL6061-T6 for novel uses of SiO₂ nanolubrication system. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 655-663, 2014a.

SCHOOP J., SALES W.F. and JAWAHIR I.S., “High speed cryogenic finish machining of Ti-6Al4V with polycrystalline diamond tools,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 250, pp.1-8, 2017.

SCHROETER, Rolf Bertrand; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; MACEDO, Sérgio Eduardo M. Análise de forças no fresamento de topo reto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação-COBEF. 2001.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE JARDIM- CE. Educação ambiental – 6R’s ecológicos. Disponível em: < <http://secretariameioambientejardim-ce.blogspot.com/2010/09/educacao-ambiental-6-rs-ecologicos.html>>. Acesso em: 12/07/2021.

SEZER, Omer Berat et al. An extended iot framework with semantics, big data, and analytics. In: 2016 IEEE international conference on big data (big data). IEEE, 2016. p. 1849-1856.

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*, v. 127, p. 1-18, 2016.

SHOKRANI, Alborz; DHOKIA, Vimal; NEWMAN, Stephen T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 57, p. 83-101, 2012.

SHOKRANI, V. Dhokia, S.T. Newman, R. Imani-Asrai, An Initial Study of the Effect of Using Liquid Nitrogen Coolant on the Surface Roughness of Inconel 718 Nickel-Based Alloy in CNC Milling, *Procedia CIRP*, V 3, 2012, Pages 121-125, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.022>.

SHOKRANI, Alborz; DHOKIA, Vimal; NEWMAN, Stephen T. Comparative investigation on using cryogenic machining in CNC milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Machining Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. 475-494, 2016.

SHOKRANI, Alborz; NEWMAN, Stephen T. A new cutting tool design for cryogenic machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Materials*, v. 12, n. 3, p. 477, 2019.

SHOKOOHI, Yousef; KHOSROJERDI, Ehsan; SHIADHI, BH Rassolian. Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation. *Journal of Cleaner Production*, v. 94, p. 330-339, 2015.

- SINGH, Gurraj et al. Investigations of machining characteristics in the upgraded MQL-assisted turning of pure titanium alloys using evolutionary algorithms. *Materials*, v. 12, n. 6, p. 999, 2019.
- SILVA, E. L. da. Modelagem da força de usinagem no fresamento de faceamento de alto avanço do aço ABNT 1045. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação, 2014.
- SPRAYING SYSTEMS CO. Catalog table of contents (2021a). Disponível em: <https://www.spray.com.br/Assets/SPRAY/CAT75HYD_METRIC.pdf>. Acesso em: 03/2021.
- SPRAYING SYSTEMS CO. A importância do tamanho da gota (2021b). Disponível em: <https://www.spray.com.br/Literature_PDFs/Portuguese/LI017-BR_Importancia-tamanho-de-gota.pdf>. Acesso em: 03/2021.
- SUN, Ying. The Influence of Cryogenic Machining on Surface Integrity and Functional Performance of Titanium Alloys for Biomedical and Aerospace Applications. 2020.
- SU, Y HE, N LI L., LI X. L., An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in highspeed end milling of Ti-6Al-4V. *Wear*, 261(7-8) (2006) 760-766.
- TAHRI, Chawki, et al. “CFD Simulation and Optimize of N₂L Flow Inside Channels Used for Cryogenic Machining: Application to Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V”. *Procedia CIRP*, vol. 58, 2017, p. 584–89. Crossref, doi:10.1016/j.procir.2017.03.230.
- TAPOGLOU N., LOPES, M.I.A, COOK I. and TAYLOR C.M., “Investigation of the Influence of CO₂ Cryogenic Coolant Application on Tool Wear,” *Procedia CIRP*, vol. 63, pp.745-749, 2017.
- TAZEHKANDI, Ahmadreza Hosseini; SHABGARD, Mohammadreza; PILEHVARIAN, Farid. Application of liquid nitrogen and spray mode of biodegradable vegetable cutting fluid with compressed air in order to reduce cutting fluid consumption in turning Inconel 740. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 90-103, 2015.
- THOMAS POTTER. (2021) Bronze gate valve. Disponível em <<http://www.thomaspotter.com/bronze-gate-valve>>. Acesso em 09/07/2021.
- TRAPPEY, Amy JC et al. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, v. 33, p. 208-229, 2017.
- TREVELIN, R. Influência dos parâmetros do processo de fresamento sobre a integridade superficial e forças de corte do aço AISI H13 endurecido. Dissertação, 2011. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo-SP.
- TSCHIPTSCHIN, A. P. Titânio e suas ligas. Disponível em: <http://pmt.usp.br/pmt3402/material/ligas_Ti.pdf>. Acesso em 15/03/2018.

TURNAD, L. et al. Tool wear morphology and chip segmentation in end milling titanium alloy Ti-6Al-4V. 2008. CUTSE International Conference 2008, 24-27 November 2008, Miri, Sarawak, Malaysia.

UBIDOTS. Disponível em: <<https://ubidots.com/>>. Acesso em 15/11/2020.

UCUN, İrfan; ASLANTAŞ, Kubilay; BEDİR, Fevzi. The effect of minimum quantity lubrication and cryogenic pre-cooling on cutting performance in the micro milling of Inconel 718. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 229, n. 12, p. 2134-2143, 2015.

UNDA, Andrés GR; LIN, Vanessa FC; DE GODOY, Geralda Cristina Durães. Metodologia para a aplicação da análise topográfica ao estudo de processos de superfície. Matéria (Rio de Janeiro), v. 12, n. 4, p. 589-596, 2007.

VAN LIMBEEK, Michiel A. J; NES, Thomas H.; VANAPALLI, Srinivas. Impact dynamics and heat transfer characteristics of liquid nitrogen drops on a sapphire prism. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 148, p. 118999, 2020.

VICENTIN, G. Porta-ferramenta para usinagem com refrigeração interna com mudança de fase do fluido. III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Unesp – Bauru. Disponível em: <<http://www2.feb.unesp.br/pos/seminario/IIISeminario/anais/AC-GilmarCavalcanteVicentim.pdf>> Acesso em 06/04/2018.

VINER BRASIL TECNOLOGIA. Titânio Grade 5. Disponível em: <http://www.vbtec.com.br/site/>. Acesso em 10/05/2018.

VOITTO, 2021. Conheça os 8 desperdícios do Lean Manufacturing. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/8-desperdicios-lean>>. Acesso em: 12/07/2021.

WCED, SPECIAL WORKING SESSION. World Commission on Environment and Development. Our common future, 1987.

XAVIER, Sandro Everaldo Dutra. Análise de efeitos da criogenia na usinagem de anéis de rolamento. p. 81 Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva), 2010- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

XU, Leilei. MMS Systemvergleich, MMS-Anlagen und deren Einsatz für Extremwerkstoffe mit kritischen Bearbeitungsprozessen. p. 108 Tese (Studiengang Maschinenbau), 2010- Hochschule Kempten.

YILDIZ, Yakup; NALBANT, Muammer. A review of cryogenic cooling in machining processes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 48, n. 9, p. 947-964, 2008.

WANG, Fuzeng; JI, Kaixun; GUO, Ziyu. Microstructural analysis of failure progression for coated carbide tools during high-speed milling of Ti-6Al-4V. **Wear**, v. 456, p. 203356, 2020.

WÜRTH. Würth Uruguay, Agile Works, 2019. Disponível em: <<https://www.wurth.com.uy/aceite-de-corte-multi-woc-5lts>>. Acesso em 15/12/2020.

ZHAO, Wei et al. Experimental study on chip deformation of Ti-6Al-4V titanium alloy in cryogenic cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, n. 9-12, p. 4021-4027, 2018.

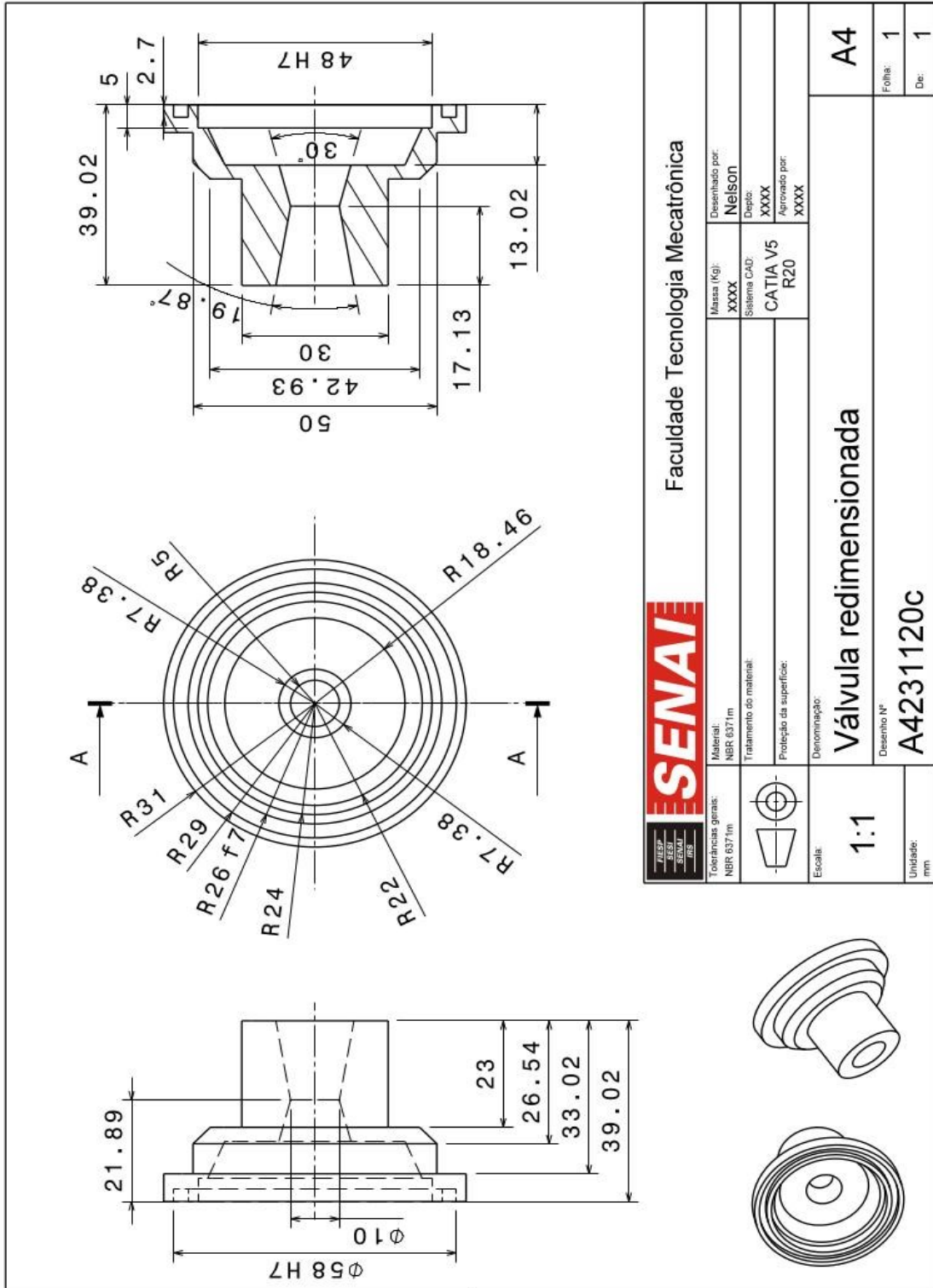
ZEILMANN, Rodrigo Panosso. Furação da Liga de Titânio TiAl4V com mínimas quantidades de fluido de corte. Tese de Doutorado, 2003. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

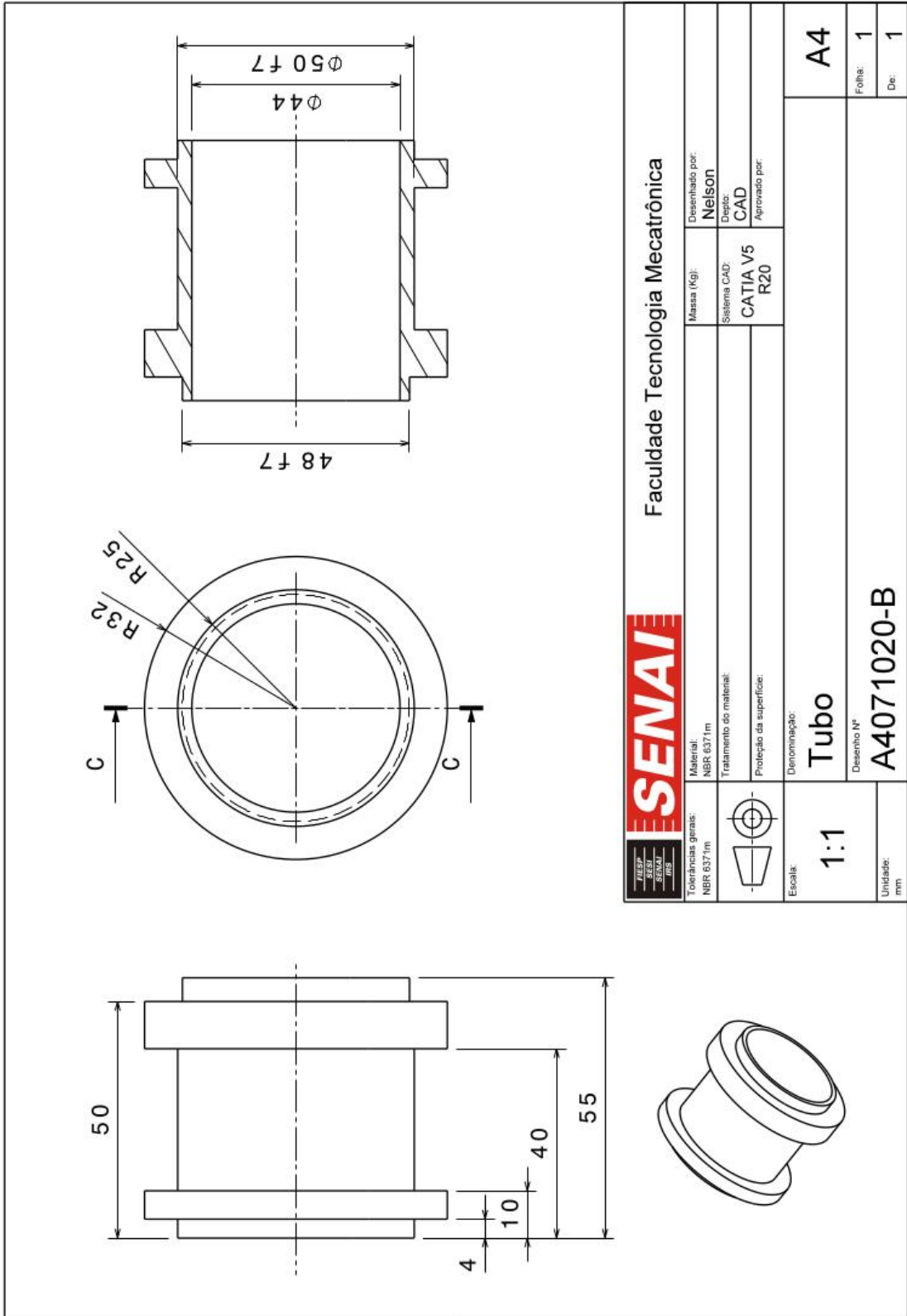
ZELINSKI, P. (2011) The 400° Difference-Cryogenic Machining. *Modern Machine Shop*. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/the-400-difference>>. Acesso em 14/12/2020.

ZUCKERMAN, N.; LIOR, N. Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling. *Advances in heat transfer*, v. 39, p. 565-631, 2006.⁸

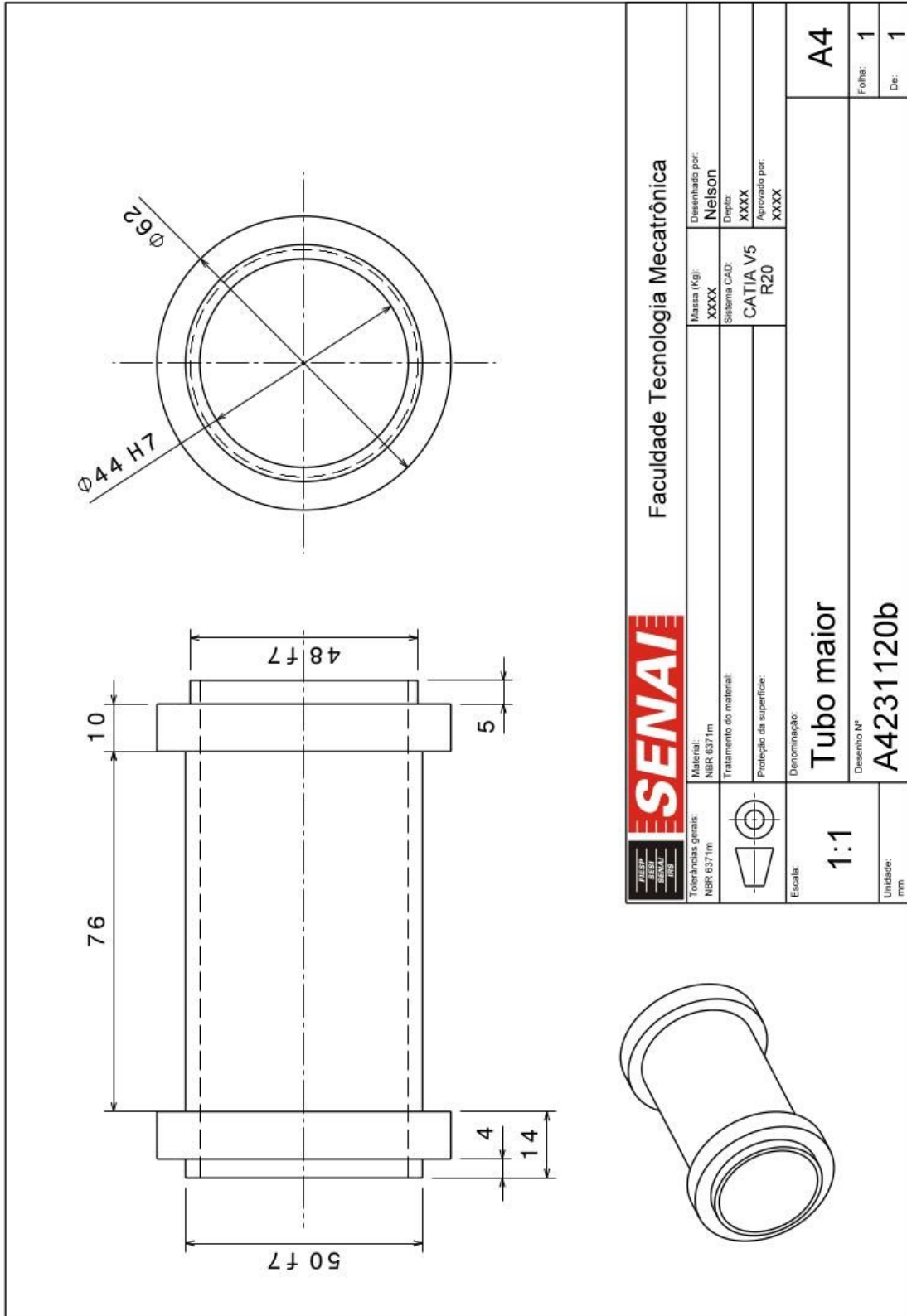
⁸ 1De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

APÊNDICE A – DESENHOS DO DISPOSITIVO

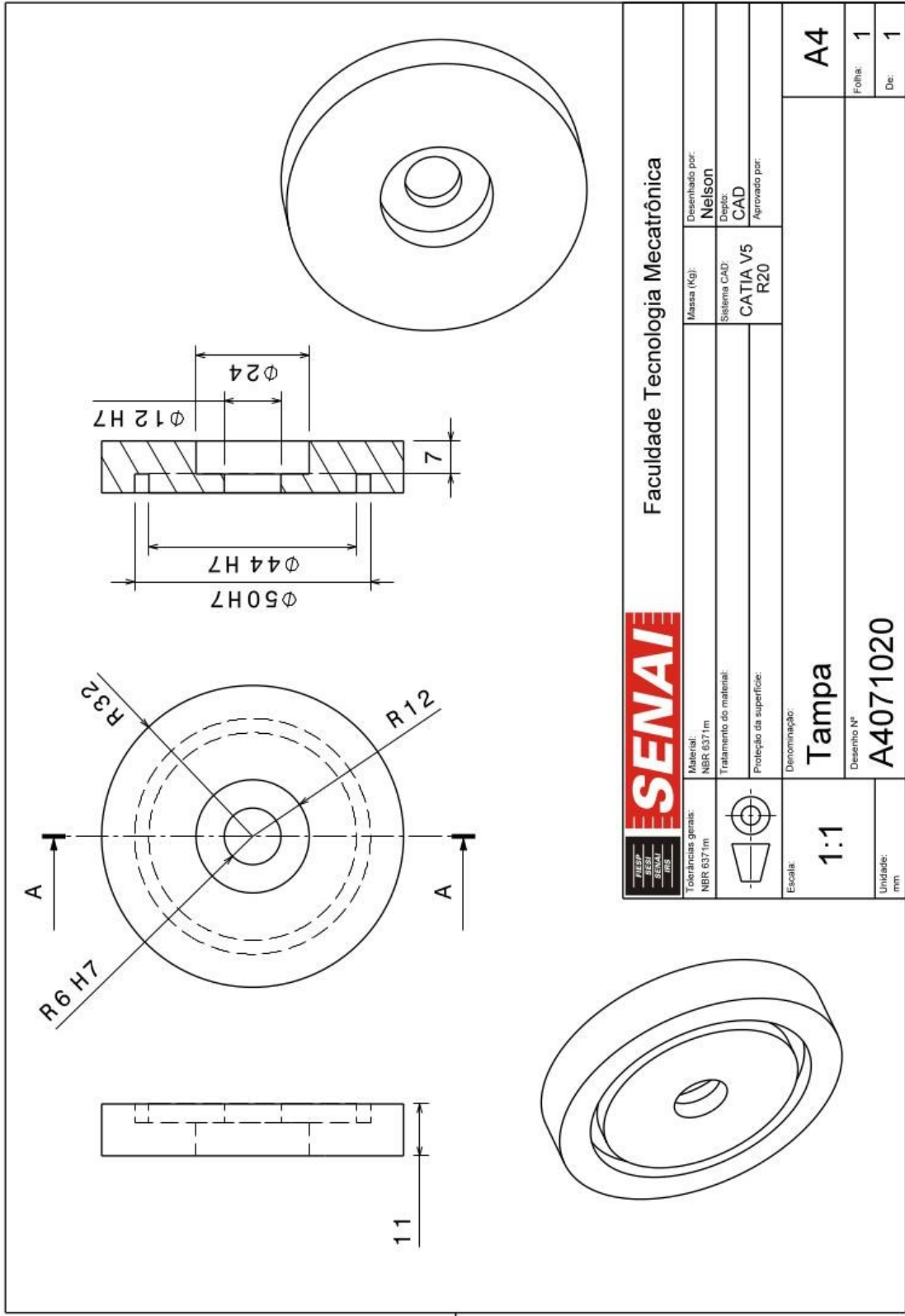





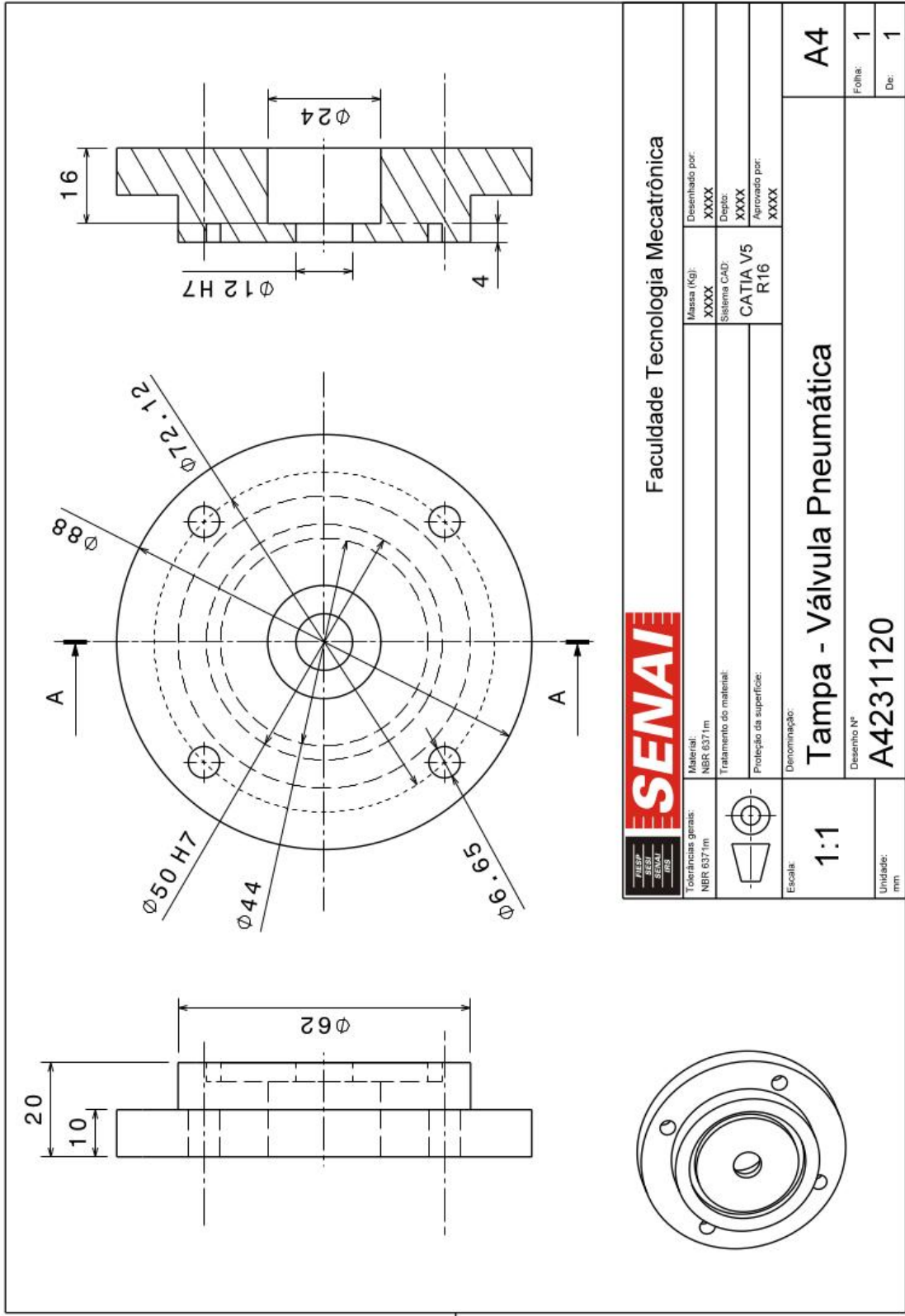
SENAI		Faculdade Tecnologia Mecatrônica	
Tolerâncias gerais: NBR 6171m	Material: NBR 6171m	Massa (kg): Nelson	Desenhado por: Nelson
	Tratamento do material:	Sistema CAD: CATIA V5 R20	Desenho: CAD
	Proteção da superfície:	Aprovado por:	
Escala: 1:1	Denominação: Tubo	A4	
Unidade: mm	Desenho N° A4071020-B	Folha: 1	De: 1



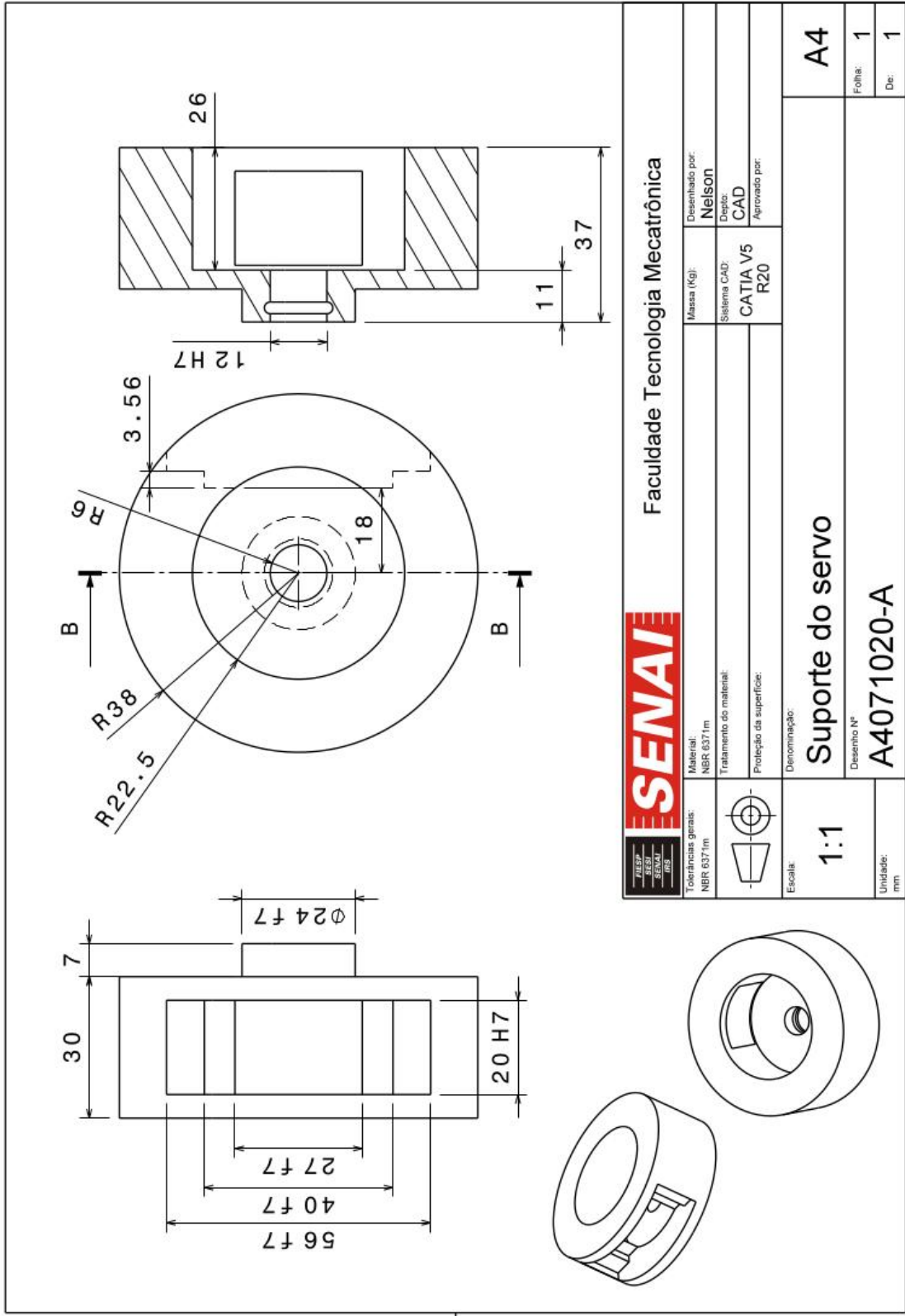
		SENAI		Faculdade Tecnologia Mecatrônica	
Tolerâncias gerais: NBR 637.1m	Material: NBR 637.1m	Massa (kg): XXXX	Desenhado por: Nelson		
	Tratamento do material: Proteção da superfície:	Sistema CAD: CATIA V5 R20	Desido: XXXX		
Escala: 1:1	Denominação: Tubo maior	Aprovado por: XXXX	XXXX		
Unidade: mm	Desenho N°: A4231120b			A4	
				Folha: 1	De: 1



		SENAI		Faculdade Tecnologia Mecatrônica	
Escala: 1:1	Denominação: Tampa	Proteção da superfície: CATIA V5 R20	Sistema CAD: CAD	Desenhado por: Nelson	Massa (kg):
Unidade: mm	Desenho N°: A4071020	Tratamento do material:	Aprovado por:	Folha: 1	De: 1

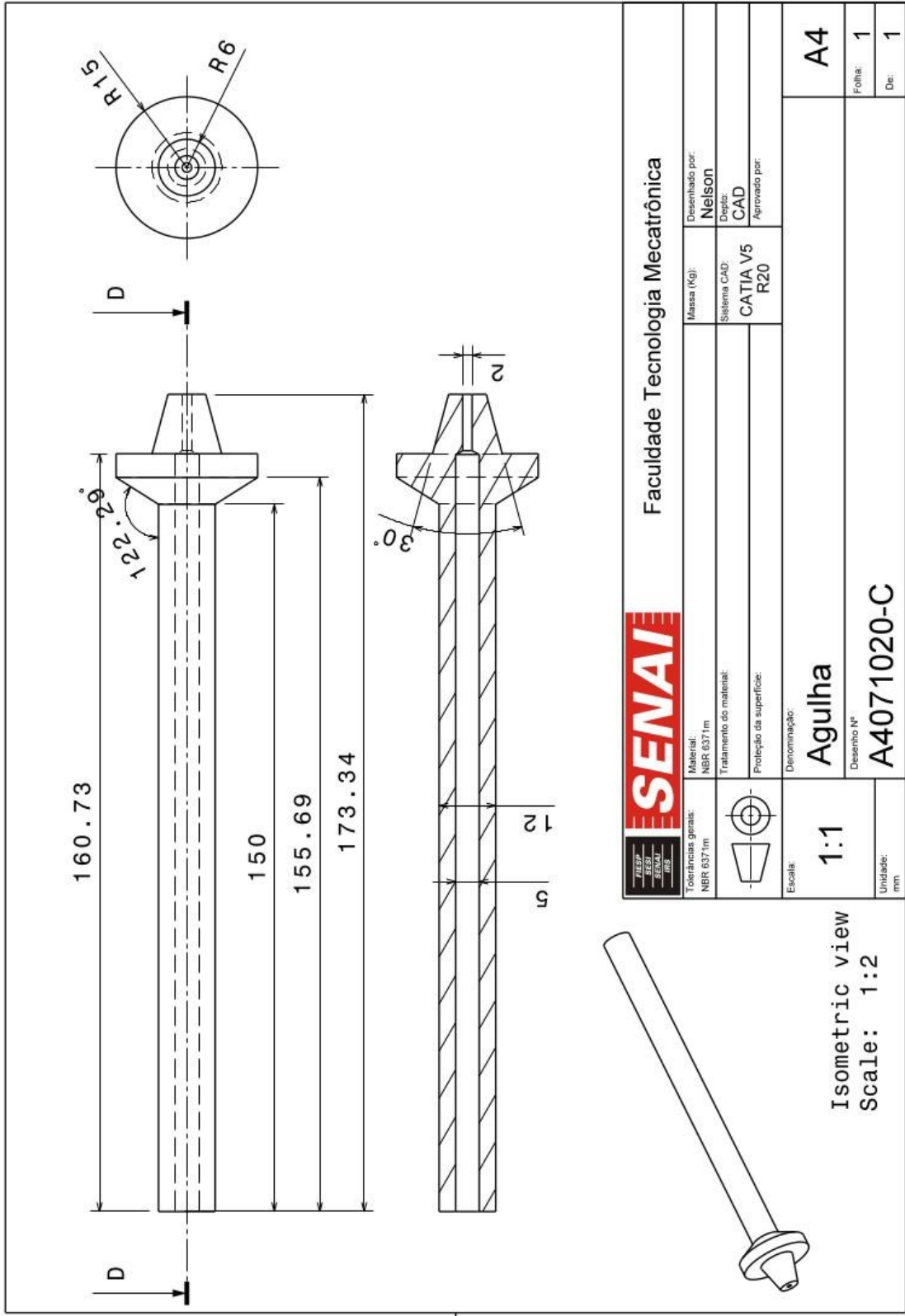


SENAI		Faculdade Tecnologia Mecatrônica	
Tolerâncias gerais: NER 637 fm	Material: NBR 637 fm	Massa (kg): XXXX	Desenhado por: XXXX
	Tratamento do material:	Sistema CAD: CATIA V5	Desenho: XXXX
	Proteção da superfície:	R16	Aprovado por: XXXX
Denominação:	Tampa - Válvula Pneumática		
Escala: 1:1	Desenho N° A4231120		
Unidade: mm	Folha: 1		
	De: 1		



Faculdade Tecnologia Mecatrônica

Tolerâncias gerais: NBR 6371m		Massa (kg): Nelson	
Tolerâncias gerais: NBR 6371m		Desenhado por: Nelson	
Tratamento do material:		Sistema CAD: CAD	
Proteção da superfície:		Desenho: CAD	
Denominação:		Aprovado por:	
Denominação: Suporte do servo		A4	
Desenho N°: A4071020-A		Folha: 1	
Unidade: mm		De: 1	
Escala: 1:1			



Faculdade Tecnologia Mecatrônica

Tolerâncias gerais: NBR 6171m		Material: NBR 6371m		Massa (Kg): Nelson	
		Tratamento do material:		Sistema CAD: CATIA V5 R20	
		Proteção da superfície:		Despo: CAD	
Denominação: Agulha		Desenho N°: A4071020-C		Aprovado por:	
Escala: 1:1		Unidade: mm		Folha: 1	
Isometric view Scale: 1:2		Denominação: Agulha		De: 1	

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO

Para a simulação de abertura e fechamento da válvula por meio do servo contou-se com a programação abaixo.

```
#include <Servo.h>

Servo myservo; // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards

int pos = 0;    // variable to store the servo position

void setup() {
  myservo.attach(8); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}

void loop() {
  for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
    // in steps of 1 degree
    myservo.write(pos);                // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(1);                          // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
  for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
    myservo.write(pos);                // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(1);                          // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
}
```

PROGRAMAÇÃO ESP32 (sensores)

```
/******
 * Bibliotecas
 *****/

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#define WIFISSID "***"
#define PASSWORD "*****"
#define TOKEN "BBFF-zxLtRjH9Sr98ArSwDJ739aYTWcBlum" // TOKEN nwpnwp =XxXXXXX
// #define TOKEN "BBFF-XMO7fQIMHdboQ501YWQZgFGGhEOHTo" // TOKEN nelsonnw
// #define TOKEN "BBFF-TEKsWxXKbO0wHf6NsPfnPoVjZqdMnY" // npaschoalinoto
#define MQTT_CLIENT_NAME "Placa1";

/******
 * Variáveis
 *****/

#define DEVICE_LABEL "esp32"
#define VARIABLE_LABEL1 "TERMOPAR1"
#define VARIABLE_LABEL2 "TERMOPAR2"
#define VARIABLE_LABEL3 "NIVEL"
```



```

//#define SENSOR 34 //
#define tp 34 // Termopar 1
#define tp2 35 // Termopar 1
#define nv 39 // nível

//Definições para MQTT
char mqttBroker[] = "industrial.api.ubidots.com";
char payload[100];
char topic[150];

//Declaração das variáveis
String str_termopar1, str_termopar2, str_nivel; // para envio via mqtt
unsigned long tempo_ligado_vz = 0;
unsigned long tempo_ligado_tp = 0;
unsigned long tempo_ligado_tp2 = 0;
unsigned long tempo_ligado_nv = 0;
unsigned long tempo_vz = 1000;
unsigned long tempo_tp = 1000;
unsigned long tempo_tp2 = 1000;
unsigned long tempo_nv = 500;
unsigned long tempo_atual;

/*****
* Funções auxiliares
*****/
WiFiClient ubidots;
PubSubClient client(ubidots);

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  char p[length + 1];
  memcpy(p, payload, length);
  p[length] = NULL;
  String message(p);
  Serial.write(payload, length);
  Serial.println(topic);
}

void reconnect() {
  // Loop até conexão
  while (!client.connected()) {
    Serial.println("Conectando MQTT...");
    // Tentativa de conexão
    if (client.connect(MQTT_CLIENT_NAME, TOKEN, "")) {
      Serial.println("Conectado");
    } else {
      Serial.print("Failed, rc=");

```

```

    Serial.print(client.state());
    Serial.println("tente novamente em 2 segundos");
    delay(2000);
  }
}
}

/*****
* Funções principais
*****/

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin(WIFISSID, PASSWORD);

  //pinMode(SENSOR, INPUT); // definir o pino como input

  Serial.println();
  Serial.print("Procurando por WiFi...");

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    delay(500);
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi Conectado");
  Serial.println("Endereço IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  client.setServer(mqttBroker, 1883);
  client.setCallback(callback);
}

void loop()
{
  //calibração anterior
  int temp = analogRead(tp);
  int temp2 = analogRead(tp2);
  int nivel = analogRead(nv);
  // int vazao = analogRead(vz);
  // Temperatura Termopar (Nitrogênio Líquido)
  float Vout = temp * (0.0008866); // Cálculo da voltagem 3.3/4096
  float temperaturaLN2 = (Vout - 1.25) / 0.005;

  // Temperatura Termopar2 (Barra de Titânio)
  float Vout2 = temp2 * (0.0008866); // Cálculo da voltagem 3.3/4096

```

```

float temperaturatitanio = (Vout2 - 1.25) / 0.005;

// Sensor nível
float cmValue = 13*pow(nivel * 0.001220703125 , -1);
//Sensor vazão – inserir se desejado.
tempo_atual = millis();
// if (tempo_atual - tempo_ligado_vz > tempo_vz){
// Serial.println("TESTE_A");
// tempo_ligado_vz = millis();
// }

if (tempo_atual - tempo_ligado_tp > tempo_tp){
  Serial.print("Temperatura do Nitrogênio líquido --->");
  Serial.println(temperaturaLN2);
  Serial.print("Voltagem / LN2 --->");
  Serial.println(Vout);
  tempo_ligado_tp = millis();
}

if (tempo_atual - tempo_ligado_tp2 > tempo_tp2){
  Serial.print("Temperatura do Titânio --->");
  Serial.println(temperaturatitanio);
  Serial.print("Voltagem / Titânio --->");
  Serial.println(Vout2);
  tempo_ligado_tp2 = millis();
}

// if (tempo_atual - tempo_ligado_nv > tempo_vz){
// Serial.println(vazao);
// Serial.println(cmValue);
// Serial.println(str_termopar1);
// Serial.println(str_termopar2);
// Serial.println( str_nivel);
// tempo_ligado_nv = millis();
// }

//fim da calibração anterior

//convertendo dados lidos de INT para String
str_termopar1 = temperaturatitanio;
str_termopar2 = temperaturaLN2;
str_nivel = cmValue;

//enviar dados via MQTT
if (!client.connected()) {
  reconnect();
}

```

```

    }
    sprintf(topic, "%s%s", "/v1.6/devices/", DEVICE_LABEL);
    //montando primeira parte do envio
    sprintf(payload, "%s", ""); // Limpar o payload
    sprintf(payload, "{\\"%s\\":%s,", VARIABLE_LABEL1, str_termopar1); // Adiciona o nome da variável1 e seu
valor.
    sprintf(payload, "%s \\"%s\\":%s,", payload, VARIABLE_LABEL2, str_termopar2); // Adiciona o nome da
variável2 e seu valor.
    sprintf(payload, "%s \\"%s\\":%s}", payload, VARIABLE_LABEL3, str_nivel); // Adiciona o nome da variável3 e
seu valor.
    Serial.println("Publicando dados na Ubidots Cloud");
    Serial.println(payload);
    client.publish(topic, payload);
    client.loop();
    delay(1000);
}

```

PROGRAMA PULSO DA VÁLVULA

```

/*****
// Programa : Pulso válvula
// Autor : Adaptado de FILIPEFLOP
*****/

void setup()
{
    pinMode(13, OUTPUT); //Define a porta 13 como saída do sinal de 5V
}
void loop()
{
    digitalWrite(13, HIGH); //Atua na válvula
    delay(2000); //Aguarda intervalo de tempo [milissegundos]
    digitalWrite(13, LOW); //Apaga o led
    //Aguarda intervalo de tempo [milissegundos]
    delay(2000);
}

```

PROGRAMAÇÃO NODEMCU8266 (Relés)

```

/*****
* Bibliotecas
*****/
#include "UbidotsESPMQTT.h"
//#include "Ubidots.h"
/*****

```

```

* VARIÁVEIS
*****/

//define TOKEN "BBFF-TEKsWxXKbO0wHf6NsPfnPoVjZqdMnY" // TOKEN npaschoalinoto
#define TOKEN "BBFF-XMO7fQIMHdboQ501YWQZgFGGhEOHTo" // TOKEN nelsonwp
//define TOKEN "BBFF-zxLtRjH9Sr98ArSwDJ739aYTWcBlum" // TOKEN nwpnwp =3e4644IT
#define WIFINAME "***"
#define WIFIPASS "*****"
#define MQTTCLIENTNAME "Placa2"

int state;
int compressor = D1;
int bomba = D2;
int infrared = D3;
int releM = D4;
int linha;

//int nivel=map(analogRead(A0), 0, 850, 0, 100);

//Ubidots ubidots(TOKEN, MQTTCLIENTNAME);
Ubidots client(TOKEN, MQTTCLIENTNAME);
/*****/

* FUNÇÃO AUXILIAR - RELÉS
*****/

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived [");
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  for (int i=0;i<length;i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }

  if ((char)payload[0]=='0'){
    digitalWrite(compressor, HIGH);
  }
  else if ((char)payload[0]=='1'){
    digitalWrite(compressor, LOW);
  }
  if ((char)payload[0]=='2'){
    digitalWrite(bomba, HIGH);
  }
  else if ((char)payload[0]=='3'){
    digitalWrite(bomba, LOW);
  }
  if ((char)payload[0]=='4'){
    digitalWrite(infrared, HIGH);
  }
}

```

```

}
else if ((char)payload[0]=='5'){
  digitalWrite(infrared, LOW);
}
if ((char)payload[0]=='6'){
  digitalWrite(releM, HIGH);
}
else if ((char)payload[0]=='7'){
  digitalWrite(releM, LOW);
}
}
Serial.println();
}

/*****
FUNÇÃO PRINCIPAL
*****/

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  client.setDebug(true);
  client.wifiConnection(WIFINAME, WIFIPASS);
  client.begin(callback);
  pinMode(compressor, OUTPUT);
  digitalWrite(compressor, HIGH); //MÓDULO RELÉ DO COMPRESSOR INICIA DESLIGADO
  pinMode(bomba, OUTPUT);
  digitalWrite(bomba, HIGH); //MÓDULO RELÉ DA BOMBA INICIA DESLIGADO
  pinMode(infrared, OUTPUT);
  digitalWrite(infrared, HIGH); //MÓDULO RELÉ SOBRESSALENTE INICIA DESLIGADO
  pinMode(releM, OUTPUT);
  digitalWrite(releM, HIGH); //MÓDULO RELÉ SOBRESSALENTE INICIA DESLIGADO
  //pinMode (, OUTPUT); //LED do sensor de nível
  // pinMode (nivel, INPUT);
  client.ubidotsSubscribe("NODEMCU8266","compressor");
  client.ubidotsSubscribe("NODEMCU8266","bomba");
  client.ubidotsSubscribe("NODEMCU8266","infrared");
  client.ubidotsSubscribe("NODEMCU8266","releM");
}

/*****
REPEAT LABEL - RELÉS
*****/

void loop() {

  // Início do Programa...

```

```

if(!client.connected())
{
  client.reconnect();

  if (state == 0)
  {
    digitalWrite(compressor, HIGH);

  }
  else
  {
    digitalWrite(compressor, LOW);

  }
  client.ubidotsSubscribe("NODEMCU8266","compressor");
  client.ubidotsPublish("Sensores");
}

/*****
SENSOR ALTERNATIVO
*****/
//int nivel=map(analogRead(A0), 0, 850, 0, 100);
//int data= nivel;
//client.add ("nivel",data);
//client.ubidotsPublish("Sensores");

/*****
// *LED Nível de nitrogênio líquido
*****/
//if(nivel>60){
// digitalWrite(4,HIGH);
//}else if (nivel<59){
// digitalWrite(4,LOW);
//} //

client.loop();
delay(1000);

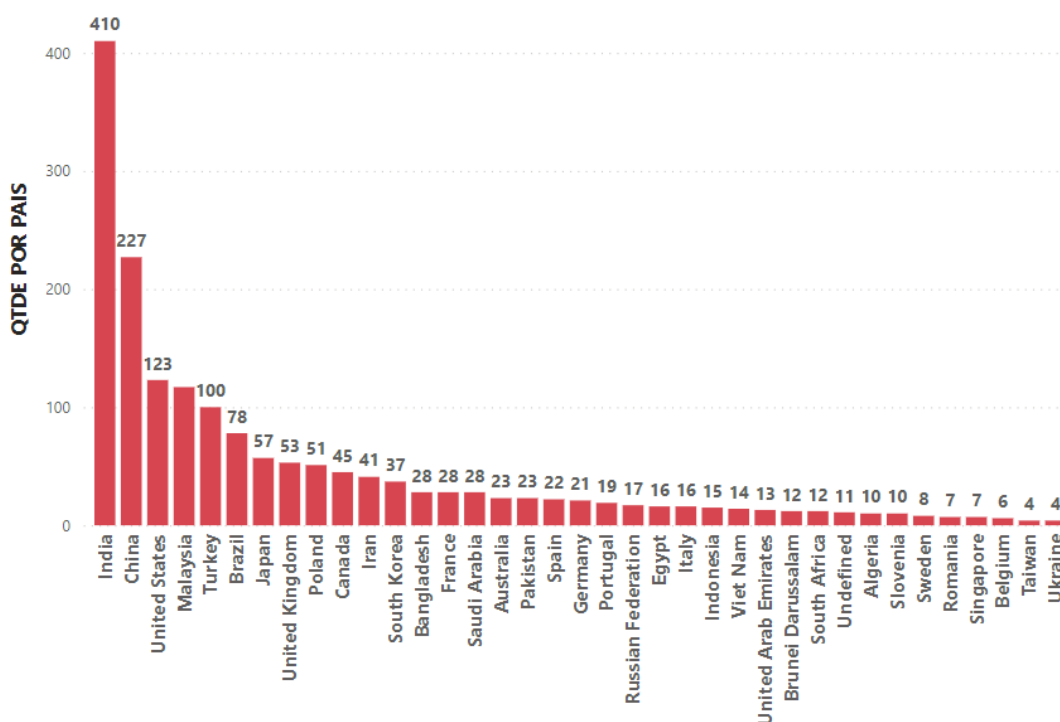
```


APÊNDICE C – PANORAMA DE PESQUISA

MQL – Panorama de pesquisa.

Com o intuito de verificar as pesquisas e publicações em jornais e congressos envolvendo a abordagem MQL, utilizou-se como referência a base de dados Scopus. Nesta foi possível pesquisar por meio de palavras chaves como “MQL machining”, “minimum quantity of lubrication”, “quantidade mínima de lubrificante” e suas inter-relações. Nota-se grande quantidade de resultados para países asiáticos. O Brasil encontra-se na 6ª colocação. A Figura x mostra o histórico de publicações sobre o tema a partir de 1998. Analisou-se também os periódicos que receberam um maior número de submissões sobre o tema. As Figuras mostram os países e os periódicos que mais publicaram sobre o assunto e a quantidade de publicações nos últimos 20 anos . Esta análise torna clara a importância do tema.

Países x Quantidade de publicações

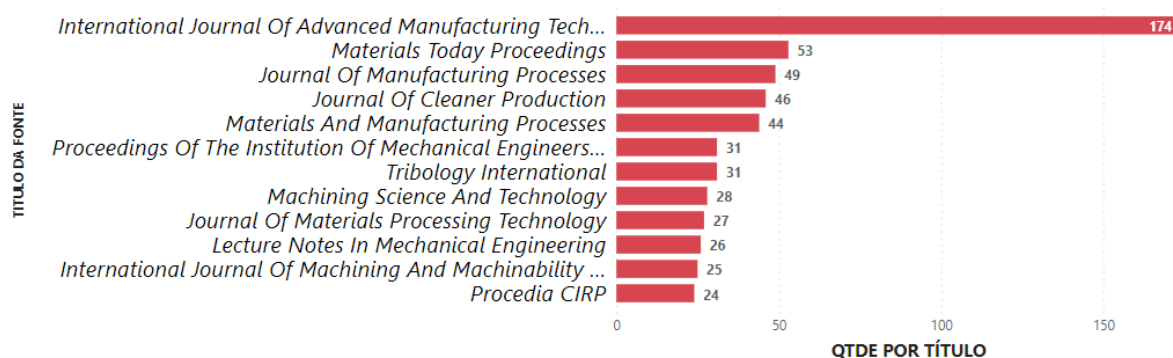


Fonte: Dados do autor.



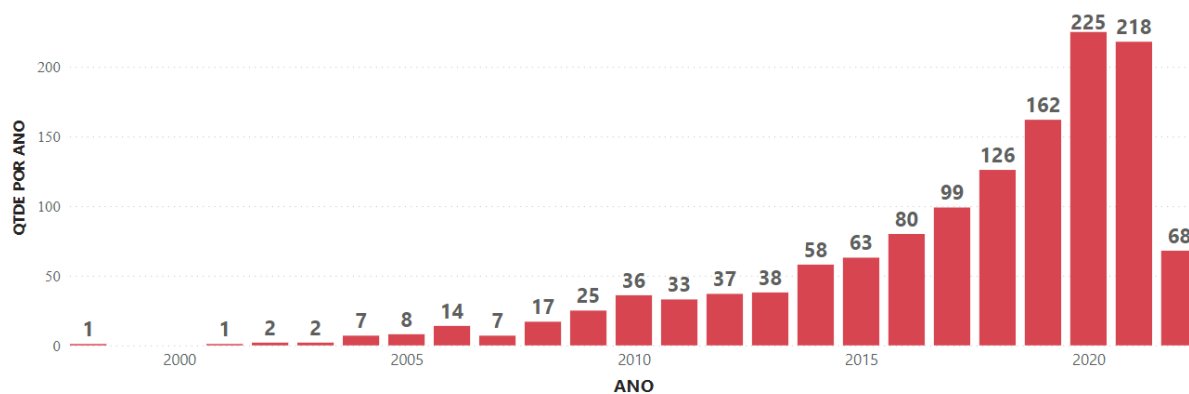
Fonte: Dados do autor.

Periódicos x quantidades de publicações



Fonte: Dados do autor.

Publicações por Ano



Fonte: Dados do autor.

APENDICE D - SISTEMAS MQL

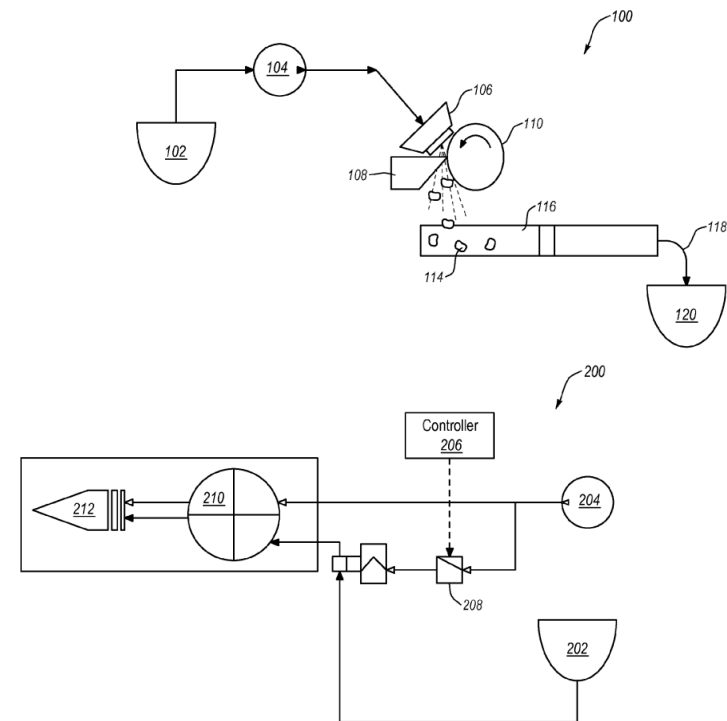
Patentes sobre MQL dos últimos 10 anos. (Internacional)

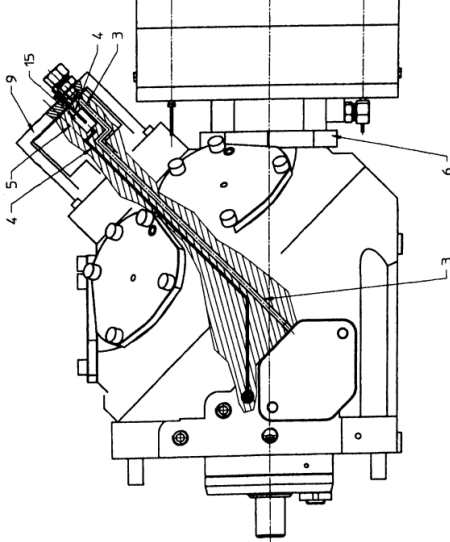
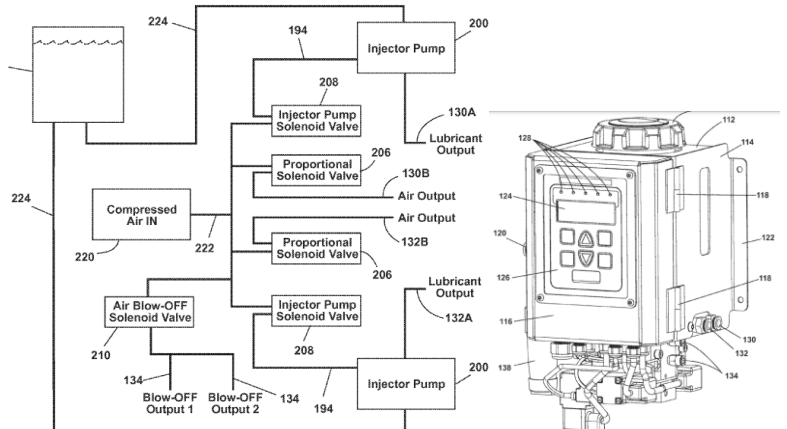
PATENTE	TÍTULO	DESCRIÇÃO	SISTEMA
<p>US20170066097A 1 – 2019 EUA</p>	<p>Minimum quantity lubrication system with air blow off</p>	<p>Um sistema MQL com dois fluxos de ar (mistura de lubrificante atomizado com ar e com um segundo fluxo de ar maior que o primeiro), suficiente para soprar cavacos da interface metal x ferramenta</p>	

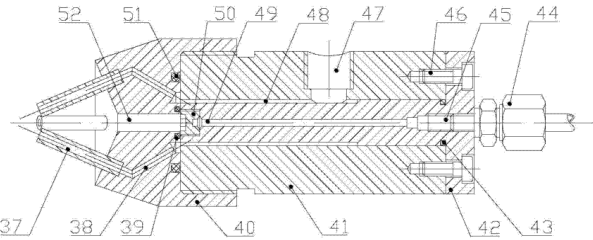
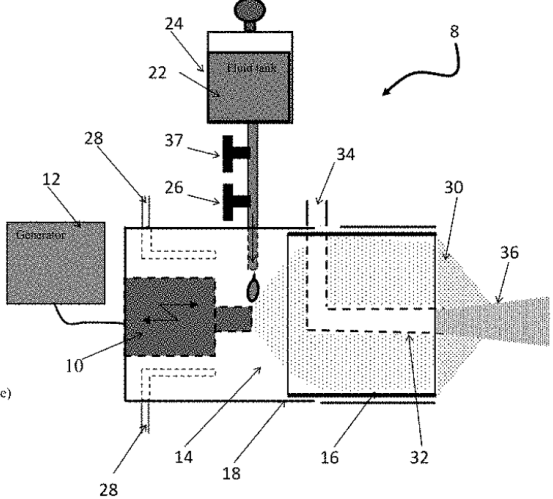
US20140196273A
1 - 2017
EUA - Concedida

System and method for dispensing a minimum quantity of cutting fluid

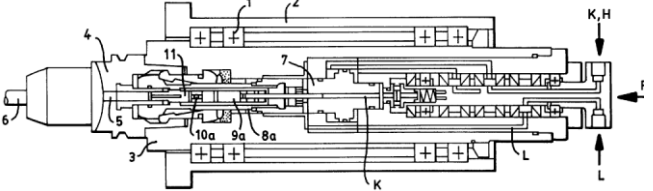
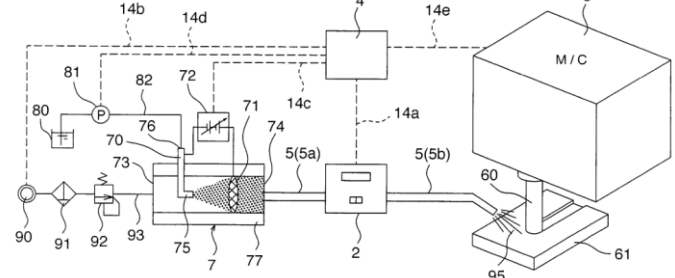
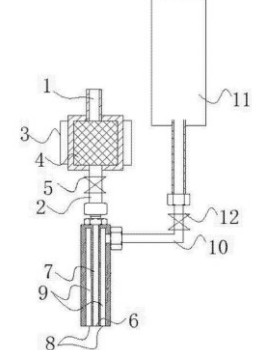
Podem incluir o controle de vários fluidos com possibilidade de alteração das taxas de fluxo. Em algumas modalidades, um circuito de feedback ou entrada pode ser fornecido para obter e/ou fornecer informações sobre a operação de usinagem— e modificar automaticamente e/ou independentemente as taxas de fluxo de fluido.



<p>DE112005001632 B4 - 2015 Alemanha Concedida</p>	<p>Machine tool with a turret and a system for minimum quantity lubrication</p>	<p>Máquina-ferramenta que possui um sistema de fixação para uma ferramenta associada ao motor de acionamento e que possui um sistema de MQL: uma primeira linha de ar comprimido e outra conectada a uma fonte de lubrificante</p>	
<p>2015 US8934998B1 - EUA - Concedida</p>	<p>Method and apparatus for delivery of minimum quantity lubrication</p>	<p>Método de controle de fluxo MQL para um sistema de usinagem controlado por computador numérico (CNC).</p>	

<p>2014</p> <p>CN102658526B - China - Concedida</p>	<p>Nanoparticle jet flow minimum quantity lubrication grinding lubricant supply system</p>	<p>MQL é preparado pela adição de partículas sólidas em nanoescala. Gotas de líquido são pulverizadas em região em forma de jato sob a ação de uma camada isolante de ar formada por gás de alta pressão.</p>	
<p>2017</p> <p>US9808815B2- EUA - Concedida</p>	<p>Atomizing-based cutting fluid delivery system and method</p>	<p>Um spray é criado dentro de uma câmara. É fornecido fluido de corte ao atomizador. Um bocal é configurado para fornecer um gás de alta velocidade para arrastar o fluxo de gotículas</p>	

<p>2016</p> <p>CN203156449U - China - Concedida</p>	<p>Minimum-quantity lubrication device</p>	<p>Compreende uma placa de instalação, uma base, uma junta de entrada de óleo, uma caixa de distribuição, um motor, um módulo de conexão, uma bomba de engrenagem, uma válvula de descarga, uma válvula de transbordamento e uma junta de saída de óleo. Possui estrutura estável no transporte de óleo, a condição de que o óleo seja produzido em um modo intermitente não pode ocorrer.</p>	<p>图 1</p> <p>图 2</p>
<p>2010</p> <p>CN100577352C - China - Concedida</p>	<p>Near dry cutting liquid supply apparatus</p>	<p>Possui uma câmara dividida, uma válvula de ajuste, uma câmara híbrida, um tubo de drenagem, tubos externos e internos, uma entrada para gás comprimido e um bocal para conter diferentes lubrificantes. Estes entram na tubulação sob a ação do ar comprimido. Uma válvula permite a dosagem dos fluidos. O dispositivo pode ser usado para lubrificação sem óleo, corte de baixa temperatura e resfriamento e processo de nitrogênio.</p>	<p>压缩气体</p> <p>压缩气体</p> <p>气体</p> <p>润滑剂</p> <p>气体</p>

<p>2000 US6050756A - USA - Concedida</p>	<p>Method of cooling and lubricating a tool and/or workpiece and a working spindle for carrying out the method</p>	<p>Um lubrificante e um gás são alimentados separadamente em um eixo de ferramenta, reunidos dentro do fuso de trabalho rotativo o mais próximo possível da zona de corte e direcionados através de dutos de alimentação integrados para a zona de corte.</p>	
<p>DE102006030651 B4 - 2009 Alemanha - Concedida</p>	<p>System operating with a minimal amount of lubricant</p>	<p>Um sistema de lubrificação mínima, em que uma quantidade de fluido de trabalho (54) fornecida a uma peça de trabalho (61) é ajustada para um valor apropriado durante a usinagem da peça de trabalho (61)</p>	
<p>2017 CN206716262U - China - Concedida</p>	<p>A kind of high precision cutting fluid shower nozzle</p>	<p>O modelo de utilidade fornece um tipo de bico de chuveiro de fluido de corte de alta precisão. A saída de gás 8 é geralmente alinhada no mesmo plano com a saída de líquido 6.</p>	

<p>2012 CN101574631B - China - Concedida</p>	<p>Oil-gas mixing regulating distributor</p>	<p>Distribuidor regulador de mistura óleo-gás, contendo um corpo e um canal; uma barra de cone reguladora está disposta na parte superior do dispositivo para regular o gás. O método de resfriamento de gás comprimido é usado para substituir o fluido de resfriamento na usinagem de metais tradicionais, sendo capaz de pulverizar lubrificante com precisão nos locais que precisam ser lubrificados, com alta eficiência de lubrificação.</p>	
<p>DE102012017505 B4 - 2014 Alemanha - Concedida</p>	<p>Milling head with minimum quantity lubrication, motor-driven hand milling device and hand milling system</p>	<p>Um cabeçote de fresamento possui uma base (11) na qual uma fresa (13) é disposta. Um dispositivo de lubrificação é fornecido para produzir um lubrificante de resfriamento para a ferramenta. O bocal de saída 14 tem um orifício de saída na extremidade 14' orientado para que os insertos possam ser molhados com o lubrificante.</p>	

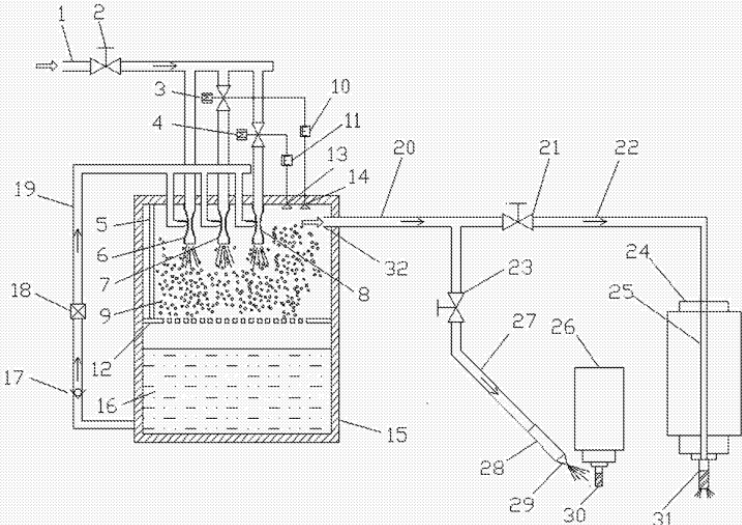
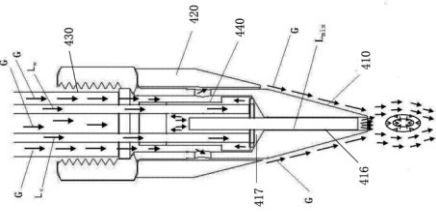
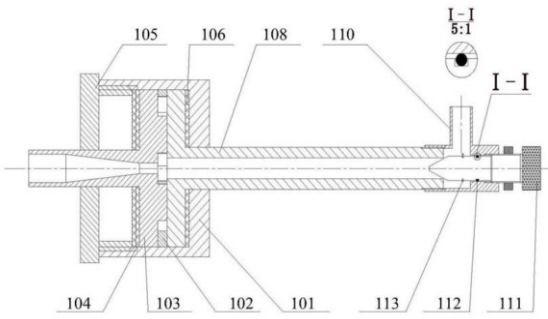
<p>WO2003106104A1 -2003 WIPO (PCT)</p>	<p>Coaxial lubrication system</p>	<p>O ar lubrificado e pressurizado é fornecido a um ponto relativamente profundo em uma peça de trabalho. O ar pressurizado entra em um caminho de fluxo anular (S1) e o lubrificante pressurizado entra em um caminho de fluxo coaxial central (S2) que termina perto da ferramenta (2) e da peça de trabalho.</p>	
<p>CN102844150B - 2016 China</p>	<p>Mql system</p>	<p>Sistema MQL para torno ou ferramenta manual. Este sistema inclui pelo menos uma unidade de vibração (58) e um recipiente para fluido lubrificante e pelo menos um bocal (50). Este bocal é utilizado para atomizar o fluido lubrificante (30).</p>	

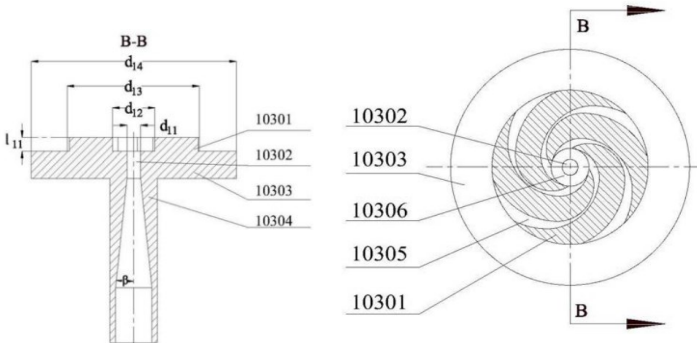
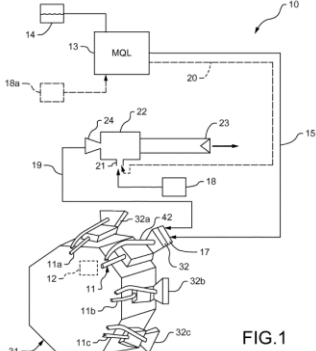
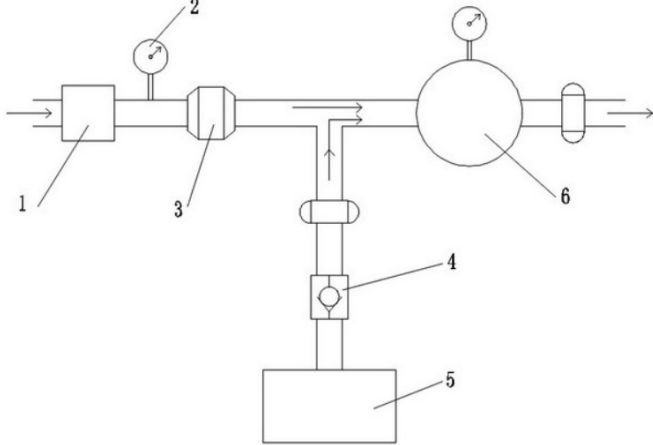
<p>2014 US8786455B2 - USA - Concedida</p>	<p>Tool lubrication delivery monitoring system and method</p>	<p>Um sistema de monitoramento de entrega de lubrificação de ferramentas e um método de controle. Um acelerômetro é fornecido para detectar uma posição de uma válvula e fluxo de fluido através desta. Os dados do acelerômetro podem ser comparados a um perfil para determinar se o fluxo de fluido ou a operação da válvula está dentro dos parâmetros estabelecidos.</p>	
<p>2020 US10576596B2 - EUA - Concedida</p>	<p>Minimum quantity lubrication system</p>	<p>Conta com um sistema MQL que pode incluir medição e controle de volume e pressão de ar fornecidos durante a usinagem. A atomização do fluido lubrificante com o ar pode ser controlada.</p>	

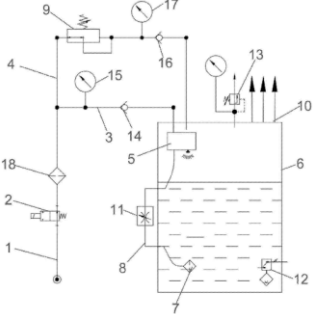
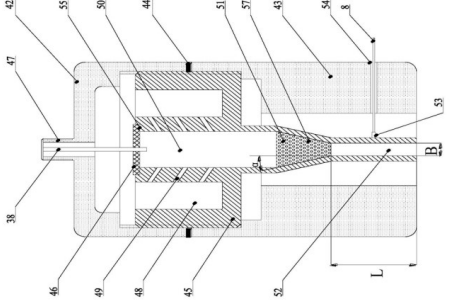
<p>2021 US10969058B2 – EUA - Concedida</p>	<p>Continuous supply precision minimum quantity lubrication pump supporting different lubrication conditions</p>	<p>Inclui um sistema de acionamento bombas de água acionadas respectivamente por dois motores de passo</p>	
<p>2021 US10252390B2 – EUA - Concedida</p>	<p>Lubrication system comprising a spindle and an aerosol dispenser</p>	<p>Sistema de lubrificação de quantidade mínima de duto único, que possui um gerador de aerossol, um fuso, um prendedor de ferramentas disposto no fuso e uma passagem rotativa disposta na lateral do fuso.</p>	

<p>2015</p> <p>AT514936A4 - Áustria - Concedida</p>	<p>Workpiece machining head with minimum quantity lubrication</p>	<p>Cabeçote de usinagem que possui uma linha de distribuição de 2 canais (16) para lubrificação de quantidade mínima</p>	<p>Fig.1</p>
<p>2017</p> <p>CN104209806B - China - Concedida</p>	<p>Nanofluid minimum quantity lubrication electrostatic atomization controllable jet flow turning system</p>	<p>Sistema de jato controlável por atomização eletrostática de lubrificação de quantidade mínima de nano fluido, que compreende uma fonte de alimentação de polos múltiplos negativos ajustável</p>	

<p>2014</p> <p>CN203726262U - China - Concedida</p>	<p>Energy-saving minimum quantity lubrication system</p>	<p>Sistema que compreende um reservatório de óleo, um bocal, uma válvula manual, uma válvula de ajuste de pressão, uma válvula de controle de fluido e uma válvula de fluxo de gás. De acordo com o sistema, a válvula de fluxo de gás e a válvula de controle de fluido são dispostas no reservatório de óleo. A proporção de mistura pode ser controlada com precisão.</p>	
<p>2013</p> <p>CN203236358U - China - Concedida</p>	<p>Low-temperature cooling and nano particle jet flow minimum quantity lubrication coupling grinding medium supplying system</p>	<p>O sistema é localizado na face lateral da tampa do rebolo de um rebolo e combinada com a peça de trabalho. Compreende um jato para a e um jato de resfriamento.</p>	

<p>2017</p> <p>CN104476318B - China - Concedida</p>	<p>Minimum quantity lubrication supply system capable of automatically regulating oil mist quantity for machine tool processing</p>	<p>Sistema capaz de regular automaticamente a quantidade de névoa de óleo. Compreende um interruptor de transporte de gás, interruptor eletromagnético, uma válvula unidirecional, uma válvula de controle de vazão e uma câmara de atomização.</p>	
<p>2014</p> <p>CN203726263U - China - Concedida</p>	<p>Oil-water-gas three-phase energy-saving minimal quantity lubrication system</p>	<p>Sistema de lubrificação trifásico óleo-água-gás. Possui um dispositivo de injeção de combustível, um dispositivo de injeção de água e um bico de pulverização.</p>	
<p>2019</p> <p>CN106737203B - China - Concedida</p>	<p>Supersonic flow nozzle vortex tube refrigeration couples feed system with nano-fluid micro lubricating</p>	<p>O sistema consiste em refrigeração de tubo de vórtice (fluxo supersônico) para acoplar o fornecimento com o sistema de micro lubrificação de nano fluido, além de possuir um dispositivo de geração de gás criogênico, sistema de alimentação de micro lubrificação de nano</p>	

		<p>fluido e válvula de controle de divisão de gás.</p>	
<p>2017 US9803801B2 United States</p>	<p>Cooled minimum quantity lubrication for machining</p>	<p>Possui uma fonte de lubrificante e ar frio. O lubrificante e o ar frio passam através de um acoplador rotativo que fornece o lubrificante e o ar frio para um bico direcionado para a máquina-ferramenta.</p>	
<p>2019 CN208967437U China - Concedida</p>	<p>A kind of non-pump type minimum quantity lubrication device</p>	<p>Tipo de dispositivo de lubrificação sem bomba, incluindo tubo em T.</p>	

<p>2016</p> <p>CN205765251U - China - Concedida</p>	<p>A kind of minimum quantity lubrication device</p>	<p>O modelo de utilidade propõe um tipo de dispositivo MQL, incluindo circuito de gás principal.</p>	
<p>2019</p> <p>CN209615205U - China - Concedida</p>	<p>A kind of electrostatic atomizer and controllable jet micro lubricating grinding system</p>	<p>A presente divulgação fornece um tipo de atomizador eletrostático em sistemas de retificação com jato controlável.</p>	

<p>2015</p> <p>CN104710610B - China - Concedida</p>	<p>Nested type water, oily gentle three-phase mixing nozzle and comprise the nozzle system of this nozzle</p>	<p>Tipo de bocal de mistura trifásica. O bocal fornecido pela presente invenção é instalado no dispositivo de lubrificação de usinagem de metal, possibilitando a lubrificação localizada.</p> <p>Tubo de entrada de gás - 410 Tubulação de água- 421 Tubo de óleo - 422</p>	
<p>2019</p> <p>CN106392764B - China</p>	<p>High-speed milling micro lubricating feed flow nozzle arrangements, separation and recovering mechanism and system</p>	<p>Trata de arranjo de bocal de fluxo. O gás circula em uma tubulação. O óleo lubrificante passa por uma segunda tubulação. A mistura passa pela configuração fixa do processo e a lubrificação é realizada.</p>	

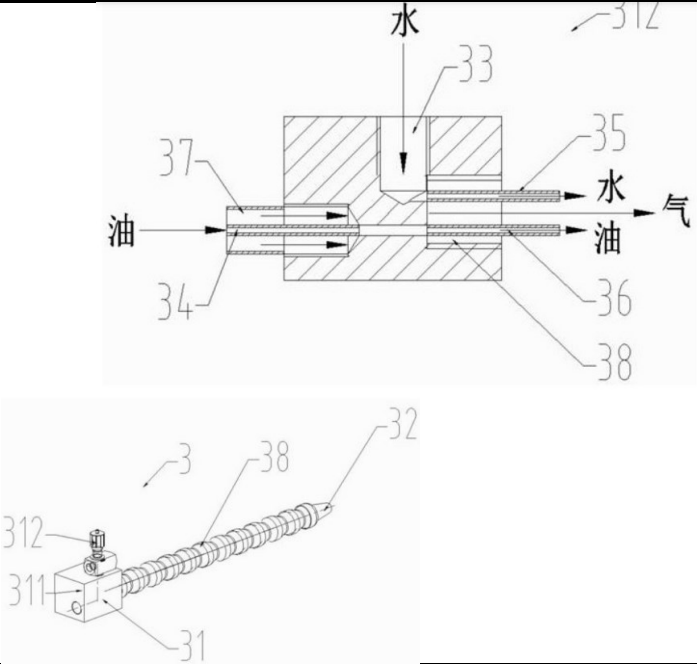
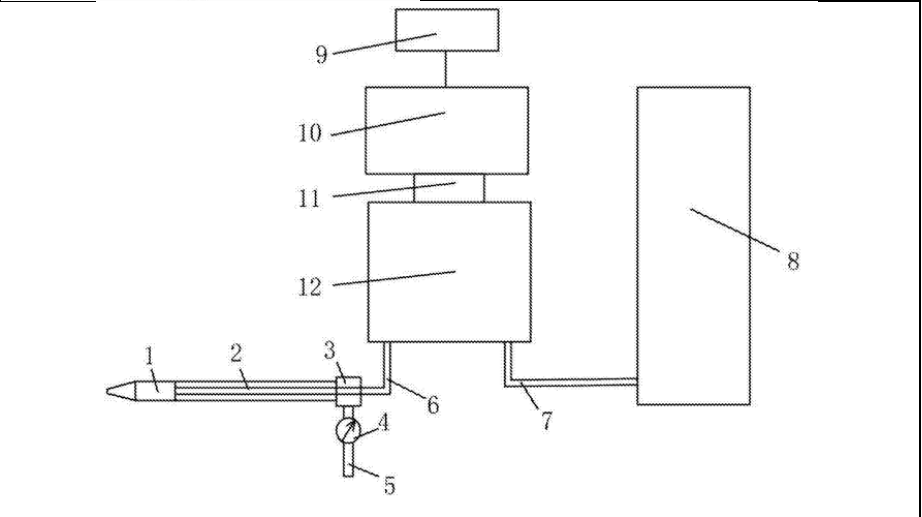
<p>2018</p> <p>CN106514495B - China - Concedida</p>	<p>Expanding machine drives refrigeration low-temperature to cool down nano-particle jet stream micro lubricating feed system</p>	<p>A corrente de jato de nanopartículas é misturada com gás criogênico no exterior do bocal em que o nano fluido é ajustado para ser atomizado. O gás criogênico carrega gotículas de óleo finas após a atomização que são ejetadas na área de usinagem.</p>	
---	---	--	--

<p>2020 2021 Office</p> <p>CN107580666B - China – Concedida</p> <p>EP3291945B1 - European Patent</p>	<p>System for minimal lubrication</p>	<p>Sistema MQL para uma máquina de usinagem com fuso rotativo que possui uma junta rotativa através da qual ar comprimido e lubrificante podem ser fornecidos. 82 -ar 86 - óleo</p>	
--	---------------------------------------	---	--

<p>2016 CN103084919B - China - Concedida</p>	<p>Cutting fluid aerosol micro lubricating method and apparatus</p>	<p>Ar comprimido e fluido de corte são fornecidos ao bocal e são misturados para formar aerossol de fluido de corte. O bocal possui um eletrodo de carga eletrostática. O aerossol de fluido de corte carregado é pulverizado na região de usinagem. 27 - Fluido 28 - Gás</p>	
<p>2016 EP2832493B1 - European Patent Office - Concedida</p>	<p>Machining device and method for machining workpieces</p>	<p>Aparato para refrigeração interna.</p>	

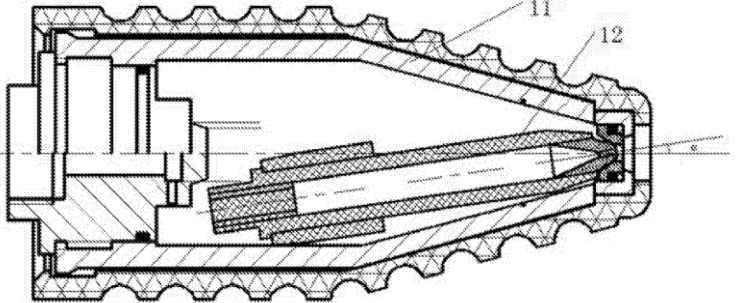
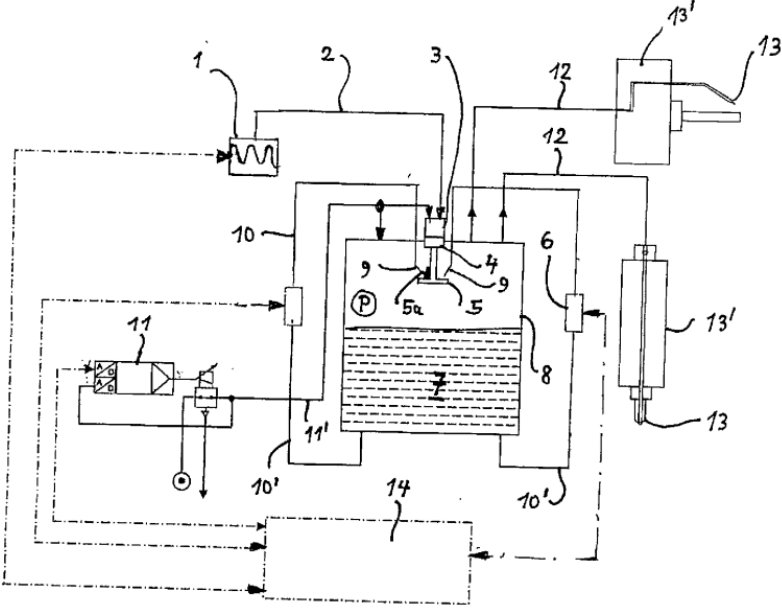
<p>2020 EP3313610B1 - European Patent Office - Concedida</p>	<p>A lubrication and cooling device and a method for lubricating and cooling a work piece</p>	<p>Dispositivo de lubrificação e refrigeração compreendendo um reservatório de fluido de resfriamento (3), e reservatório de fluido lubrificante (9) conectado a um trocador de calor (15), que compreende: um circuito de resfriamento (17) e um circuito de distribuição de lubrificante (19). Possui como característica a utilização de um fluido criogênico (-50°C a cerca de -200°C) para resfriamento.</p>	<p>Fig 1</p>
--	---	---	--------------

<p>2018</p> <p>CN107042165B - China - Concedida</p>	<p>A kind of lubricating system with trace amount energy-conserving spray nozzle</p>	<p>Caracterizado por incluir rasgos dispuestos no bico de injeção. O interior do corpo do bocal está equipado com cavidade de ar e pelo menos dois canais de fluido. Entrada de óleo – 3 Entrada de água – 4</p>	
<p>2017</p> <p>CN104985477B - China - Concedida</p>	<p>Oil-water-gas three-phase mixing nozzle and the nozzle system comprising the nozzle</p>	<p>Bico de mistura trifásico de óleo-água-gás</p>	

<p>2019</p> <p>CN104924148B - China - Concedida</p>	<p>Oil-water-gas three-phase micro lubricating cooling system</p>	<p>Sistema de resfriamento micro lubrificante trifásico óleo-água-gás. Entrada de gás – 37 Entrada de óleo – 33 Entrada de água –34</p>	
<p>2017</p> <p>CN206802727U - China - Concedida</p>	<p>A kind of lubricating system with trace amount</p>	<p>Tipo de sistema de lubrificação com utilização de uma microbomba esférica. Bocal de saída - 1 Tubo de drenagem - 6 Tubo de alimentação - 7 Cilindro de armazenamento de líquido - 8 Controlador - 9 Motor – 10 Acoplamento do eixo - 11 Microbomba esférica - 12</p>	

<p>2021 Espanha Concedida</p>	<p>ES2887085T3 - Device and method for cooling and lubrication of tools in machining processes</p>	<p>Dispositivo de refrigeração e lubrificação para ferramentas em processos de usinagem, capaz de injetar na área de usinagem CO₂ em estado líquido e/ ou micropartículas de um fluido de corte na forma de aerossol simultaneamente</p> <p>4, 5 – Regulador de pressão. 7, 8, 9 e 10– Válvula solenoide 11 – Regulador de pressão 12 - Acoplamento 15 e 16 – válvula de retenção. 17 – Válvula de segurança 20 – Canal para condução de ar comprimido e óleo de corte</p>	
---------------------------------------	--	---	--

<p>2018</p> <p>CN208132046U - China - Concedida</p>	<p>A kind of minimum quantity lubrication device</p>	<p>Dispositivo de lubrificação MQL que promove efeito micro lubrificante.</p> <p>Possui: Reservatório do lubrificante - 1 Ar comprimido - 4 Rotor multicanal - 7 Tubo de jato de saída - 8. Além do grupo de mangueiras trançadas e bomba.</p>	
<p>2019</p> <p>JP6590919B2 - Japão - Concedida</p>	<p>Tool holder with fluid supply</p>	<p>Porta-ferramentas que possui fornecimento de refrigerante até o orifício do eixo da ferramenta.</p>	

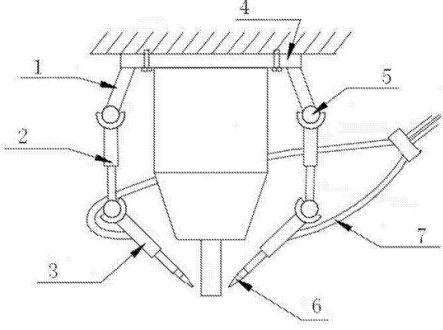
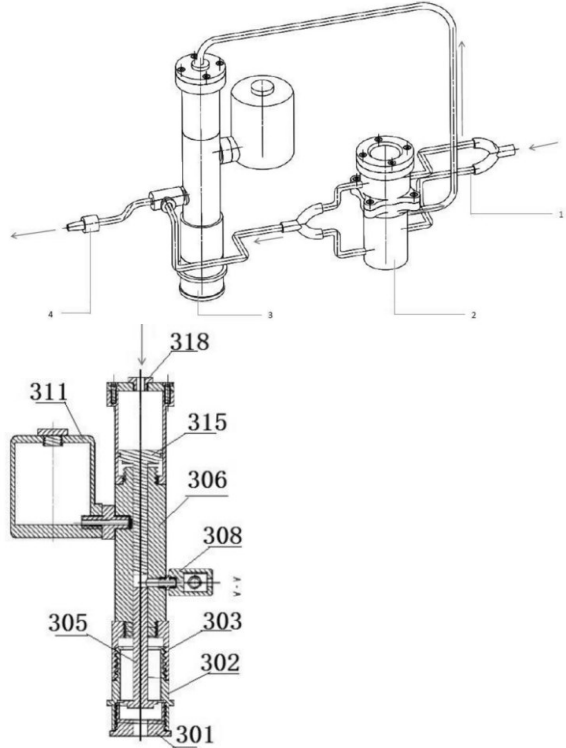
<p>2016 CN103567811B - China - Concedida</p>	<p>A kind of minimum quantity lubrication device for bull gear turnery processing</p>	<p>O bocal 11 é um bocal auto rotativo. Quando o líquido atomizado entra no bocal rotativo a diferença de pressão faz com que o núcleo da boca gire constantemente.</p>	
<p>DE102013108458 B3 - 2014 Alemanha Concedida</p>	<p>Device for aerosol production</p>	<p>Um dispositivo para a produção de aerossol a partir de um meio fluido (7) em um recipiente de pressão (8), com uma bomba (6) que transporta o meio fluido para o recipiente de pressão através de uma linha de alimentação (10). É caracterizado por um gerador de ultrassom (1) para gerar vibrações elétricas de alta frequência, conectada a um sistema de vibração mecânica (3, 4, 5) para gerar vibrações ultrassônicas, que se projeta na pressão recipiente. Esse meio fluido transportado pela bomba é pulverizado sobre a superfície vibratória no recipiente e a partir daí por atomização pode ser gerado aerossol no</p>	

		<p>recipiente de pressão, que então é transportado para a saída de aerossol através de uma linha própria.</p>	
<p>2018 US10052694B2 - EUA - Concedida</p>	<p>Apparatus and method for cooling a cutting tool using supercritical carbon dioxide</p>	<p>Porta-ferramentas com bolsões e seção de encaixe e fixação. Uma peça é montada de forma inversa e possui um encaixe para local um inserto. A peça montada invertida inclui uma ou mais ranhuras de refrigeração que direcionam o dióxido de carbono supercrítico para uma interface ferramenta de corte/peça.</p>	
<p>2020 US10710165B2 - EUA - Concedida</p>	<p>Metal cutting tool holder comprising fluid passages</p>	<p>Um suporte de ferramenta de corte de metal inclui um corpo de suporte de ferramenta tendo passagens para lubrificação e resfriamento. 9 – Passagem de fluido curvada. 10 – Primeira entrada de fluido 11 – Primeira saída 12 – Segunda entrada 13 – Segunda saída</p>	

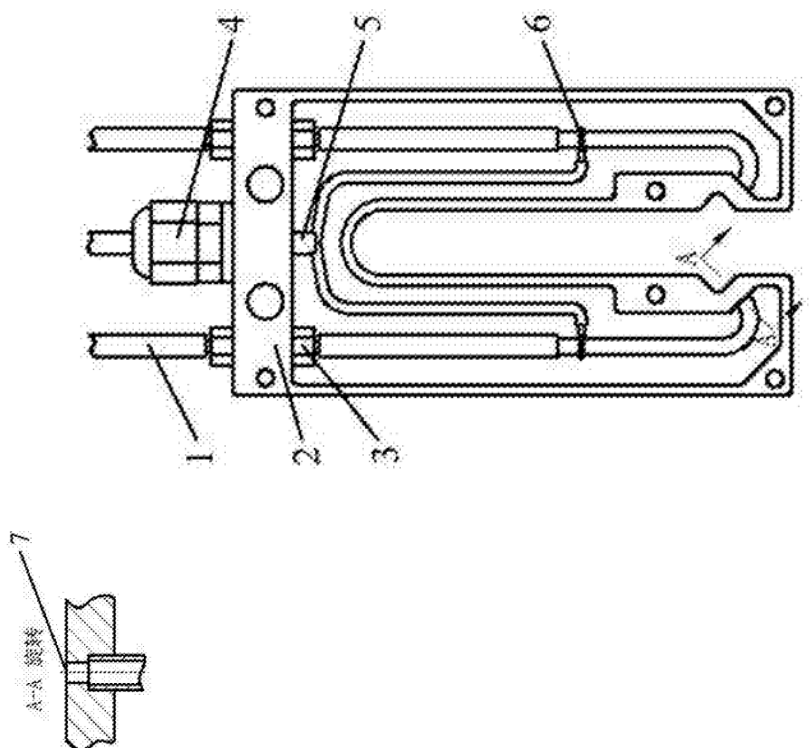
			<p>Fig. 12</p>
<p>KR102218659B1 - 2021 Coreia do Sul - Concedida</p>	<p>Oil mist spraying apparatus and mql system having the same</p>	<p>Dispositivo de pulverização de névoa de óleo. Possui um reservatório, um bico de óleo e um bico de pulverização. O reservatório inclui uma primeira abertura para a injeção do ar e uma segunda abertura do outro lado para descarregar a névoa de óleo. O bico de óleo pulveriza a névoa de óleo dentro da carcaça. O bocal de injeção é fixado na segunda abertura do alojamento.</p>	

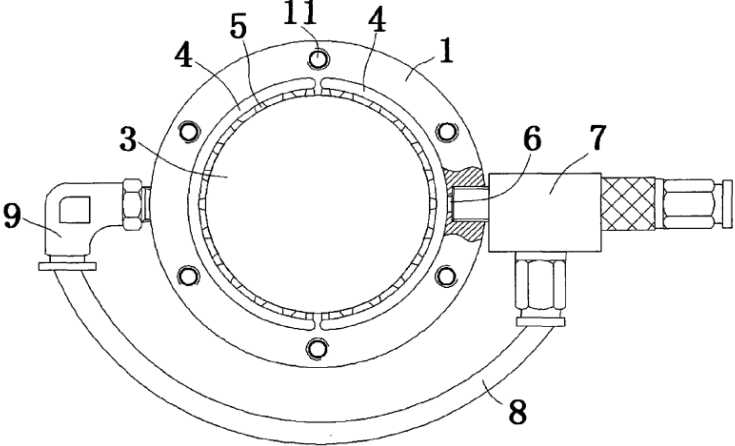
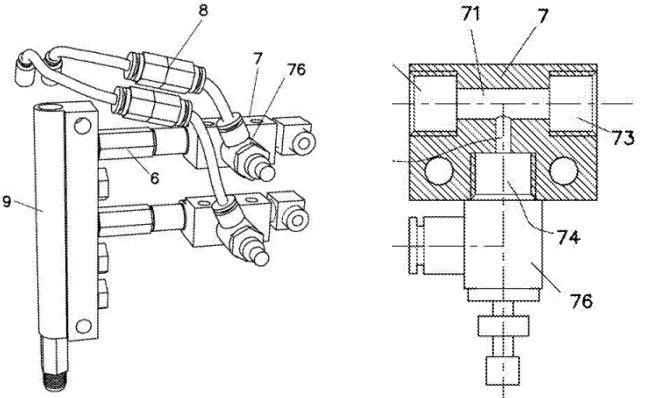
<p>2020</p> <p>CN212192338U - China - Concedida</p>	<p>Intelligent trace lubricating oil mist system</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Câmara de atomização (4); - Possui 6 cabeçotes de atomização (5A), (5B), (5C) - Abertura de ramificação de névoa de óleo com válvulas esféricas (22A), (22B) e (22C) que podem ser dispostas em diferentes configurações para a lubrificação/resfriamento. - Válvula manual de drenagem de óleo (8) é comunicada com a cavidade de óleo e é usada para uso de emergência quando o módulo de controle (13) - Válvula eletromagnética de saída de óleo (9) - Placa defletora (29) - Medidor de pressão (18) - Sensor de pressão (21) - Fonte de entrada de ar (19) 	
---	--	--	--

<p>2021</p> <p>CN111423929B - China - Concedida</p>	<p>Nano-fluid magnetic grinding fluid and magnetic field auxiliary micro-lubricating system</p>	<p>A invenção fornece um fluido de composição magnética que é preparado a partir de água destilada, desoxicolato de sódio (0,3-1,0% em peso%), etilenoglicol (1,0-5,0% em peso%) e óxido ferroférico (Fe_3O_4). As nanopartículas e o pó de grafeno são preparados, e o fluido preparado contém Fe_3O_4 magnético.</p> <p>Constituintes principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonte de ar (1) - Bomba (5) - Controle de frequência variável (12) - Unidade de controle (Controla o tamanho da ação do campo magnético (13)) - Polos magnéticos laterais (14) - Peça de trabalho (15) - Polo magnético da extremidade traseira (17) - Uma bobina de cobre (22) - Por um núcleo de ferro (23) 	
---	---	---	--

<p>2017</p> <p>CN206811621U - China - Concedida</p>	<p>Nozzle placement system and lathe</p>	<p>Sistema e posicionamento de bicos injetores em torno.</p>	
<p>2019</p> <p>CN107584326B - China - Concedida</p>	<p>A kind of lubricating system with trace amount device</p>	<p>Componentes principais: 1- Canal de ar, 2 -Motor 3- Componente de acionamento de óleo e gás 4- Sistema de pulverização 305- Pistão B 308- Cavidade de mistura ar-combustível 311- Reservatório 315- Pistão A 318- Conexões do tubo de entrada de ar A.</p>	

<p>2018</p> <p>CN208179105U - China - Concedida</p>	<p>The aerosol charge device of electrostatic micro lubricating</p>	<p>Dispositivo gerador de aerossol de micro lubrificação eletrostática. Componentes principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Corpo 4, - Imã 2 - Terminal de fio de transporte eletrostático 6, - Cabeçote de conexão de alta tensão 5, - Eletrodo carregado 3 - Traqueia 8, - Tubo de líquido 9 - Bocal 1 - Gabinete 4 - Orifício guia do cabeçote de conexão de alta tensão 10 - Rosca do tubo 12 - Slot magnético 15, - Canal de infusão 13 - Canal de distribuição de gás 14 - Canal de infusão 13 - Furo guia do eletrodo 11; 	
---	---	---	--

2018 CN208178574U - China - Concedida	The charged u-shaped nozzle of aerosol	Principais componentes: - Tubo de aerossol 1, - Corpo de concha em forma de U 2, - Conector 3, - Terminal de alimentação 4, - Fio de transporte eletrostático de alta tensão 5, - Eletrodo carregado 6 - Saída de aerossol 7	
---	--	---	--

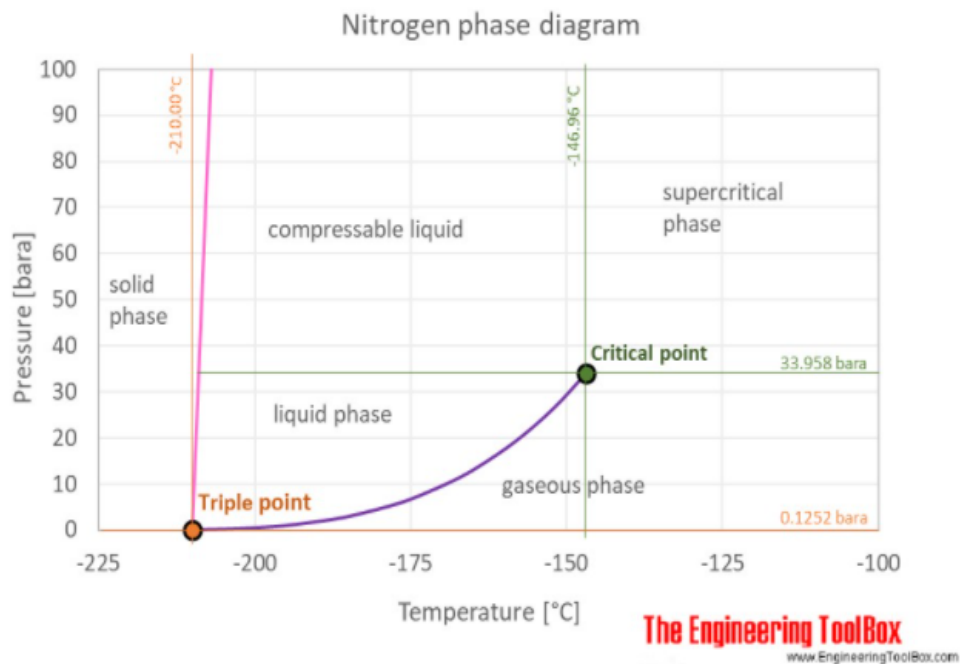
<p>2015</p> <p>CN204284886U - China - Concedida</p>	<p>Micro lubricating annular oilier</p>	<p>Dispositivo com bicos de óleo simultâneos distribuídos igualmente ao redor da peça a ser lubrificada e na peça de trabalho.</p> <p>Componentes principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dutos de óleo em arco 4 - Furos para jatos distribuídos 5 - Abertura de enchimento 6 - Separador de óleo 7 - Tubulação 8 - Abertura de enchimento 9 	
<p>2018</p> <p>CN208196362U - China - Concedida</p>	<p>A kind of novel micro lubricating arrangement</p>	<p>Componentes principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> distribuidor de gás (8), distribuidor de óleo (9), válvula de medição (6), misturador de óleo-gás (7) Misturador ar/óleo (71) Atomização (73) 	

<p>2015</p> <p>CN102873584B - China - Concedida</p>	<p>High-frequency pulsation type micro-cutting lubricating device</p>	<p>Dispositivo de lubrificação com pulsação de alta frequência. Possui como itens principais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonte de alimentação alternada de alta frequência (1) -conexão de energia elétrica (2) - peça geradora de névoa de óleo (3) - suprimento de óleo (4) - Bico de pulverização de seção variável (5) - Suportes 6 e 7 - Painéis de cerâmica (piezoelétrica) (8) - transdutor (11) e pistão (12) <p>A fonte de alimentação gera sinais elétricos alternados de alta frequência que são emitidos para a parte geradora de névoa de óleo.</p>	
---	---	--	--

<p>2019 CN209793270U - China - Concedida</p>	<p>Lubrificação de quantidade mínima eletrostática</p>	<p>Dispositivo de micro lubrificação eletrostática. Componentes principais: - Cabo de alimentação (13) - Tubo de gás (14) - Tubo de líquido (15) - Fio de transmissão (16) dispositivo de carregamento (18) - Bocal (19), - Tubo de carregamento (22). O dispositivo inclui um gerador de eletricidade estática e um fio de transmissão, alimentado por uma fonte de energia e transmite eletricidade de alta tensão para a confluência de eletricidade gás-líquido</p>	
--	--	---	--

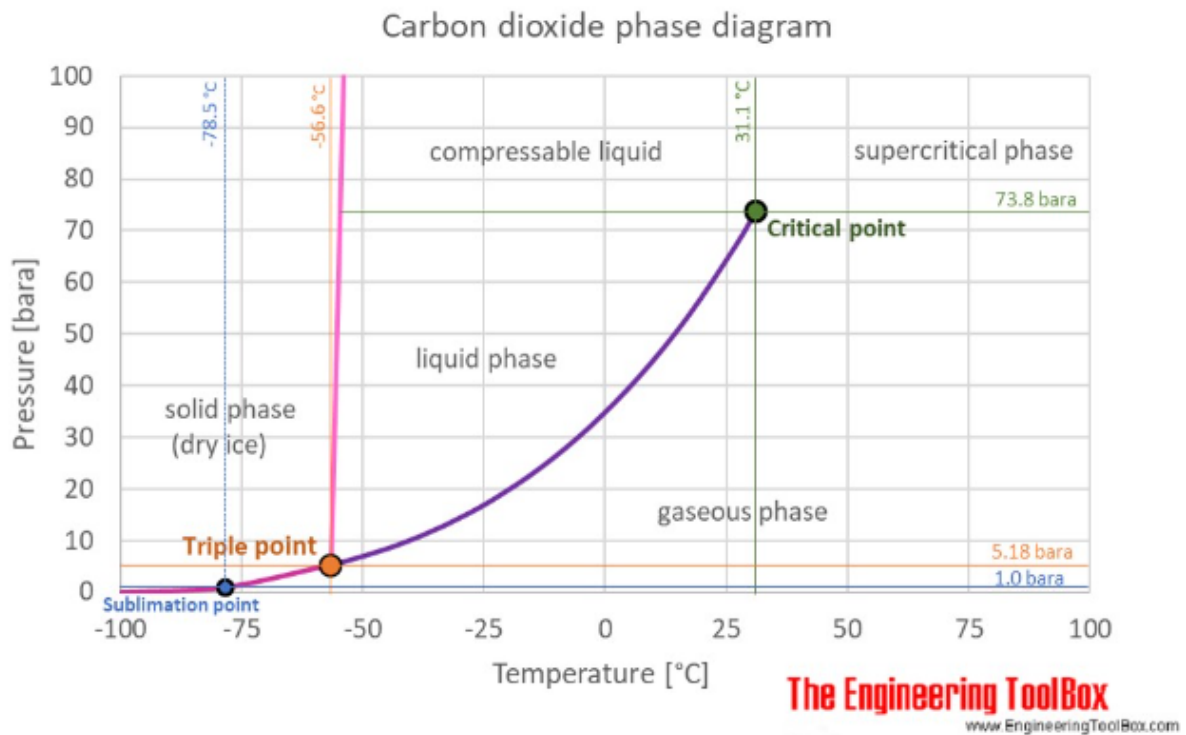
ANEXO A – PROPRIEDADES - N₂ E CO₂

Propriedades do Nitrogênio	
Peso molecular	28,013
Gravidade específica / ar=1	0,967
Volume específico [ft ³ /lb - kg/m ³]	13,98 / 0,872
Densidade do líquido na pressão atmosférica [ft ³ /lb - kg/m ³]	50,46 / 808,4
Viscosidade Absoluta [lbm/ft s - centipoises]	12,1*10 ⁻⁶ / 0,018
Calor específico cp - (Btu/lb°F or cal/g°C - J/kgK)	0,249 / 1040
Razão calor específico - cp/cv	1,4
Constante de gás – R- (ft lb/lb°R - J/kg°C)	55,2 / 297
Condutividade térmica (Btu/hr ft °F - W/m°C)	0,0015 / 0,026
Ponto de ebulição – saturação em 14.7 psi e 760mm Hg (°F, °C)	-320,4 / -195,8
Calor latente de evaporação no ponto de ebulição (Btu/lb, J/kg)	85,5 / 199000
Ponto de congelamento ou fusão em 1 atm (°F, °C)	-246 / -210
Calor latente de fusão (Btu/lb, J/kg)	11,1 / 25800
Temperatura crítica (°F, °C)	-232,6 / -147
Pressão crítica (psia - MN/m ²)	493 / 3,40
Volume crítico (ft ³ /lb, m ³ /kg)	0,051 / 0,00318
Inflamável	Não



Fonte: Engineering ToolBox, (2008). Nitrogen - Thermophysical Properties.

Propriedades do CO ₂	
Peso molecular	44,0 g/mol
Gravidade específica / ar=1	1,53
Densidade [kg/m ³]	1,795
Viscosidade Absoluta [centipoises]	1,495
Calor específico cp - (Btu/lb°F or cal/g°C - kJ/kgK)	0,203 / 0,849
Razão calor específico - cp/cv	1,29
Constante de gás – R- (ft lb/lb°R - J/kg°C)	35,11 / 188,92
Condutividade térmica (Btu/hr ft °F - W/m°C)	0,009609 / 0,01663
Ponto de ebulição (K, °C)	194,68/ -78,46
Temperatura crítica (°F, °C)	87,76 / 30,98
Tensão superficial (dynes/cm)	16,2



Fonte: Engineering ToolBox, (2018). *Carbon Dioxide - Thermophysical Properties*