UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

LUIZ ROBERTO MUÑOZ DIAS

Utilização de Usinagem Submersa em Processo de Fresamento

CAMPINAS
2024

LUIZ ROBERTO MUÑOZ DIAS

Utilização de Usinagem Submersa em Processo de Fresamento

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO(A) ALUNO (A) **LUIZ ROBERTO MUÑOZ DIAS**..... ....., E ORIENTADA PELO(A) PROF(A). DR(A).**ANSELMO EDUARDO DINIZ**..... .....

CAMPINAS
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Muñoz Dias, Luiz Roberto, 1983-
M926u Utilização de usinagem submersa em processo de fresamento / Luiz Roberto Muñoz Dias. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem submersa. 2. Metais - Usinabilidade. 3. Fresamento. 4. Fluidos de corte. 5. Lubrificação e lubrificantes. 6. Resfriamento. I. Diniz, Anselmo Eduardo, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Application of submerged machining in milling process
Palavras-chave em inglês:
Submerged machining
Metals' Machinability
Milling
Cutting fluids
Lubrication and lubricants
Cooling
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica
Banca examinadora:
Anselmo Eduardo Diniz [Orientador]
Olívio Novaski
Milla Carolina Gomes
Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez
Alessandro Roger
Data de defesa: 11-06-2024
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: https://orcid.org/0009-0003-0078-767
- Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/3702628066810245

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO

Utilização de Usinagem Submersa em Processo de Fresamento

Autor: Luiz Roberto Muñoz Dias

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
DEF / FEM / Unicamp

Prof. Dra. Milla Caroline Gomes
DEF / FEM / Unicamp

Prof. Dr. Olivio Novaski
DEF / FEM / Unicamp

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues
EESC / USP São Carlos

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez
FEB / UNESP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 11 de junho de 2024.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meu pai, Jose Eugenio Muñoz (in memoriam), meu herói e maior incentivador desde o início. Sem ele nada seria possível. Hoje entendo suas palavras, pai: “O mundo está em suas mãos, basta você querer”. O senhor tinha razão.

E também à minha mãe, Neide Dias, rainha de nosso lar e pilar fundamental em nossa educação. Foi ela quem me ensinou a escrever.

Agradecimentos

A Deus, por nunca ter me deixado sozinho, mesmo nos momentos mais difíceis de solidão, quando estava na África em um domingo à noite tendo que continuar a edição deste trabalho.

Ao professor Anselmo Eduardo Diniz, um verdadeiro amigo, e inspirador para este projeto. Buscou apoiar inclusive nos problemas extra-acadêmicos, quando tudo parecia impossível, dada à minha condição de morar e trabalhar na Alemanha e outros países. Ele realmente faz jus ao pensamento "Ninguém cresce na vida sem um professor". Tenho orgulho de ser o seu último aluno orientado. Espero ter correspondido pelo menos parcialmente.

À minha querida mãe, Neide, grande responsável pela motivação ao me acompanhar, mesmo que por vídeo chamadas, nesta trajetória. Obrigado Mãe!

Ao meu querido pai, por contribuir ativamente na execução do desenho e acompanhamento da produção do dispositivo, mesmo já estando um pouco debilitado. O senhor foi e ainda é um grande herói para mim.

Ao meu filho Javier, que compreendeu os momentos em que não podia lhe dar atenção. "Javier, você tem os mundos em suas mãos... Estude, queira e conquiste". À minha querida esposa, Mariana, que à sua maneira inusitada, fez com que eu me movesse e ainda se prontificou a revisar as partes finais de formatação e literaturas inseridas.

Ao meu tio Luiz Roberto Muñoz (in memoriam), cujo nome, carrego com orgulho, e que foi um dos executores do dispositivo desenhado pelo meu pai, a partir de minha idealização.

Aos meus primos Danilo e Mario Muñoz e amigo Wellington Ferreira por participarem na confecção do dispositivo, programa, preparação de máquina e outras soluções. À Usimetal, lugar perfeito para alunos de doutorado e mestrado realizarem seus trabalhos. São excelentes em oferecer todos os tipos de soluções em usinagem e dispositivos.

Aos meus familiares que me ajudaram de alguma forma, em especial ao meu irmão Eugenio Muñoz, meu sogro Pedro Mimbu e cunhado Rafael Mimbu que apoiaram inclusive com o transporte de óleo, dispositivos e outras necessidades durante a parte prática.

Aos colegas da Blaser Swiss Lube do Brasil Ltda, em especial ao senhor Marcelo Kuroda, por todo apoio recebido, principalmente científico.

Ao Dr. Markus Thannhuber, CTO da Einhell, que quando soube da minha dificuldade em terminar o projeto pela distância de minha moradia à Unicamp, tentou de todas as formas

conseguir uma solução, inclusive com a faculdade THD em Deggendorf. Também ao colega Georg Gschaider, por tentar ajudar a encontrar uma máquina para a realização dos testes.

Ao Sr. Heinz Hoffmann por igualmente ceder soluções e espaço em meu trabalho para que isso fosse possível. Aos meus colegas de trabalho, em especial Sandra Miedl e Andrea Rohrmaier pelo interesse sobre a realização do trabalho e pelas cobranças que me fizeram ver que sim, que era possível. Ao senhor Andreas Kroiss, CEO da Einhell, por ensinar que o poder para as realizações está na mente de cada indivíduo.

"O presente trabalho foi realizado com apoio parcial da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, mediante bolsa de produtividade número 304031/2017-8"

A todos, muitíssimo obrigado!

Resumo

Diversos meios de lubrificação e/ou refrigeração, bem como diferentes formas de aplicação destes fluidos já foram implementadas na usinagem, de modo a economizar durante o processo de fabricação (por prolongar a vida da ferramenta), bem como não expor a saúde do operador a danos irreversíveis pela inalação do vapor do fluido. Devido a isso, este trabalho visa estudar um novo método de lubrificação e refrigeração com a aplicação de dois tipos de fluidos, nunca antes testado na usinagem de metais: o fresamento com fluxo contínuo de fluido com a peça submersa em óleo integral e submersa em fluido aquoso. Com isto espera-se diminuir a variação cíclica térmica do fresamento incentivada pelo uso de jato abundante de fluido aquoso, que acelera o desgaste/avaria da ferramenta de corte e que é reduzida a partir da submersão da peça nestes fluidos. Avaliou-se então a usinabilidade de fresamento de aço ABNT 1045 com fresa de metal duro e cobertura tripla, em termos de vida de ferramenta e respectivos mecanismos de desgaste, rugosidade da superfície usinada e potência de corte dentre 6 processos de lubri-refrigeração, a saber, submersa com óleo integral, submersa com fluido aquoso, fluido aquoso em abundância (jorro convencional da máquina), mínimo volume de óleo (MVO), mínima quantidade de fluido com ar comprimido (MQF) e corte a seco. Estes processos foram avaliados em duas diferentes velocidades de corte e diferentes larguras de usinagem (a_e). Os resultados mostraram que o processo submerso com óleo integral foi o que propiciou maior remoção de cavaco por vida da ferramenta (na ordem de 420% maior vida que o processo com pior resultado, a usinagem com mínimo volume de óleo), seguido pelo processo submerso com fluido aquoso (310% mais tempo de vida da ferramenta que o nível de pior resultado), o que correspondeu integralmente às expectativas desta pesquisa. Os mecanismos causadores do desgaste da ferramenta foram o *attrition*, a abrasão e, em processos com fluido aquoso, principalmente as trincas térmicas. Com relação à potência de corte, menores valores foram apresentados nos processos com melhor condição de lubrificação, pela redução do atrito na usinagem, a saber a condição submersa em óleo integral e a condição com usinagem MQF. Em relação à rugosidade de superfície, os valores obtidos foram pequenos (entre 0,17 μm e 0,43 μm), proporcionando excelentes resultados de acabamento para fresamento, entretanto a dispersão foi alta sendo difícil distinguir qual processo resultou melhor acabamento.

Palavras Chave:

- Usinabilidade, fresamento, fluido de corte, lubrificação, refrigeração, usinagem submersa

Abstract

Various means of lubrication and/or cooling, as well as different ways of applying these fluids have already been innovative in machining, in order to save costs during the manufacturing process (by prolonging the life of the tool), as well as not exposing the operator's health to irreversible damage due to inhalation of fluid vapor. Therefore, this work aims to study a new method of lubrication and cooling with the application of two types of fluids, never tested before in metal machining: milling with continuous fluid flow with the workpiece submerged in neat oil and submerged in aqueous fluid. As a consequence, it is expected to reduce the thermal cyclic variation of milling encouraged by the use of an abundant jet of aqueous fluid, which accelerates the wear/damage of the cutting tool, and which is reduced by submerging the workpiece in these fluids. The machinability the milling of ABNT 1045 steel with carbide cutter with triple coating was evaluated in terms of tool life and respective wear mechanisms, roughness of the machined surface and cutting power among 6 lubrication / cooling processes, namely, submerged with integral oil, submerged with aqueous fluid, aqueous fluid in abundance (conventional machine spout), minimum oil volume (MVO), minimum quantity of fluid with compressed air (MQF) and dry cutting. These processes were evaluated at two different cutting speeds and different cutting widths (a_e). The results demonstrated that the submerged process with full oil was the one that provided the greatest chip removal per tool life (in the order of 420% greater life than the process with the worst result, machining with minimum volume of oil - MVO), followed by the submerged process with aqueous fluid (310% longer tool life than the worst result level), which fully met the expectations of this research. The mechanisms causing tool wear were attrition, abrasion and, in processes with aqueous fluid, mainly thermal cracks. Regarding cutting power, lower values were presented in processes with better lubrication conditions, due to the reduction of friction during machining, namely the condition submerged in neat oil and the condition with MQF machining. In relation to surface roughness, the values obtained were small (between 0.17 μm and 0.43 μm), providing excellent finishing results for milling, however the dispersion was relatively high, and it was difficult to distinguish which process achieved the best finish.

Key Word:

- Machinability, milling, cutting fluid, lubrication, cooling, submerged machining

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Classificação de fluidos de corte (DESHPAND e DESCHPANDE, 2019) adaptada. 26
Figura 2.2 – Composição química dos óleos minerais (SHAW, 2005).....33
Figura 2.3 – Vida da ferramenta sob várias velocidades de corte e diferentes condições de lubri-refrigeração (MACHADO et al., 1997).....42
Figura 2.4 - Evolução da potência de corte em função do comprimento de avanço para os dois sistemas de lubrificação (BRAGA, 2001) 44
Figura 2.5 – Desgaste de flanco em função do comprimento de avanço para diferentes volumes de fluidos de corte (BRAGA, 2001).....45
Figura 2.6 – Vidas das ferramentas e dispersões para as diferentes condições de refrigeração (MAGRI et al., 2018) 47
Figura 2.7 – Evolução do desgaste principal de flanco (VB) com insertos do tipo SNMG (a) e SNMM (b) sob as condições de corte a seco e sob refrigeração de alta pressão -HPC (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009). 48
Figura 2.8 – Evolução da rugosidade de superfície R_a com insertos do tipo SNMG (a) e SNMM (b) sob corte a seco e refrigeração de alta pressão -HPC (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009) 49
Figura 2.9 – Esquema dos métodos de aplicação com seus respectivos valores de vazão e pressão (SANCHEZ et al., 2013) 50
Figura 2.10 – Esquema dos métodos de aplicação da refrigeração com seus respectivos valores de vazão e pressão (SANCHEZ et al., 2013) 51
Figura 2.11 – Esquema dos métodos de aplicação da refrigeração com seus respectivos valores temperatura e tempo de corte (SANCHEZ et al., 2013).....52
Figura 2.12 – Vida da ferramenta em volume de cavaco removido para testes com r_{ε}=0,4 mm (DINIZ; MICARONI, 2001) 54
Figura 2.13 – Vida da ferramenta em termos de volume de cavaco removido para testes com raio de ponta r_{ε}=0,4 mm e r_{ε}=0,8 mm e f = 0,14 / rotação (DINIZ; MICARONI, 2001).....55
Figura 2.14 – Diagrama esquemático de um sistema de MQF com o princípio de pressão (HEISEL et al., 1998). 59
Figura 2.15 – Conceitos de sistemas de MQF (Novaski e Dörr, 1999).....60
Figura 2.16 – Vida da Ferramenta em comprimento de corte para as diferentes condições de refrigeração /lubrificação para as três velocidades de corte ensaiadas (SCANDIFIO, 2000)..61

Figura 2.17 – Desgaste da ferramenta em função do tempo (DACAS et al., 2018) 65
Figura 2.18 – Rugosidade da peça ao longo do tempo de usinagem (DACAS et al., 2018).... 66
Figura 2.19 – Forma de aplicação de fluido de corte durante os testes – convergente, convergente - divergente (PEREIRA et al., 2015) 68
Figura 2.20 – Vida da Ferramenta em fresamento de Inconel 718 (PEREIRA et al., 2015) ... 68
Figura 2.21 – Variação cíclica da temperatura de corte no corte interrompido (PALMAI, 1987) 69
Figura 2.22 – Vida da ferramenta usinagem aço 15-5 PH (BRAGHINI et al., 2008)..... 70
Figura 2.23 – Foto MEV, operação de desbaste, V_C=140 m/min, a_p=4,0mm, a_e=13,3mm, com emulsão de óleo vegetal (Blaser Vasco 1000) em água sob a concentração de 7% (TEIXEIRA FILHO, 2006) 72
Figura 2.24 – Vida da ferramenta fresamento aço 15-5 PH com diferentes modos de aplicação de fluido de corte (TEIXEIRA FILHO, 2006) 73
Figura 2.25 – Ferramenta quebrada após um dos experimentos (SAADIEH, 2015) 74
Figura 2.26 – Formação de cavacos descontínuos que levaram a maiores rugosidades superficiais e em alguns casos quebra de ferramentas (SAADIEH, 2015) 75
Figura 2.27 – (a) Esquema de aplicação do MQL no fresamento de topo; representação da ação das partículas de óleo do MQL sob a ferramenta, peça e interface cavaco-ferramenta (KHATRI; JAHAM, 2018) 76
Figura 3.1 – Desenho rascunho do corpo de prova utilizado no ensaio 77
Figura 3.2 – Fresa de facear utilizada nos ensaios. 78
Figura 3.3 – inserto de metal duro com cobertura tripla utilizado nos ensaios. 79
Figura 3.4 – Desenho ilustrativo do dispositivo construído para usinagem submersa..... 79
Figura 3.5 Peça fixada ao dispositivo de usinagem submersa durante teste de fluxo. 80
Figura 3.6 – Dispositivo para usinagem submersa acoplado ao dispositivo tanque..... 81
Figura 3.7 – Esquema da usinagem nos níveis 1 (submersa em óleo integral) e 2 (submersa em fluido aquoso, emulsão)..... 82
Figura 3.8 – Usinagem submersa com óleo integral, nível 1. 82
Figura 3.9 – Usinagem submersa com fluido aquoso (emulsão de óleo em água) – nível 2. .83
Figura 3.10 – Usinagem com jato de fluido aquoso, convencional da máquina – nível 3. 83
Figura 3.11 – Esquema da usinagem para a nível 3 (usinagem convencional com jato de óleo). 84
Figura 3.12 – Nível 4, com mínimo volume de óleo (MVO). 85
Figura 3.13 – Nível 4, com mínimo volume de óleo em funcionamento e durante teste de fluxo.

.....85
Figura 3.14 – Montagem do reservatório de óleo integral para execução do nível 4, MVO. ..86
Figura 3.15 – Esquema do nível 5, MQF. 87
Figura 3.16 – Variável 5, Usinagem com MQF, Mínima Quantidade de Fluido. 87
Figura 3.17 – Medição de desgaste de vida de ferramenta com microscópio digital. 91
Figura 4.1 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm a_e = 70%D.....94
Figura 4.2 – Desgaste para cada nível de lubri-refrigeração testado, com V_C = 280 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa.....95
Figura 4.3 – Desgaste para cada nível de lubri-refrigeração testado, com V_C = 336 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa.....98
Figura 4.4 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm – V_C = 280 m/min 100
Figura 4.5 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite V_B = 0,3 mm – V_C = 336 m/min.....101
Figura 4.6 – Fases de evolução do desgaste (MACHADO et al., 2015). 102
Figura 4.7 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração e larguras de usinagem testadas para desgaste limite V_B = 0,3 mm – V_C = 280 m/min.....103
Figura 4.8 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração e larguras de usinagem testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm – V_C = 336 m/min 103
Figura 4.9 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da vida da ferramenta, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em cm^3 de volume de cavaco removido (95% de confiança) 104
Figura 4.10 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da vida da ferramenta, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm) medida em cm^3 de volume de cavaco removido (95% de confiança) 105
Figura 4.11 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da vida da ferramenta para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em cm^3 de volume de cavaco removido (95% de confiança).....106
Figura 4.12 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da vida da ferramenta, para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14

mm e a_e=20 mm), medida em cm³ de volume de cavaco removido (95% de confiança) 107
Figura 4.13 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) condição submersa óleo integral com velocidade de 280 m/min, com a_e= 70% do diâmetro da fresa 108
Figura 4.14 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) condição submersa óleo integral com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa 109
Figura 4.15 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS do nível 1 - submersa óleo integral com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa 110
Figura 4.16 – Foto do MEV do desgaste da ferramenta - condição submersa óleo integral com v_c = 336 m/min 111
Figura 4.17 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS do nível 1 - submersa óleo integral com v_c = 336 m/min e a_e= 70%D da fresa 112
Figura 4.18 – Foto do MEV - condição submersa em emulsão com v_c = 280 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa 113
Figura 4.19 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS da variável 2 - submersa em emulsão com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa..... 114
Figura 4.20 – Fotos do MEV da ferramenta (esquerda) e esta área ampliada (direita) - condição submersa em emulsão com v_c = 336 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa 115
Figura 4.21 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS da variável 2 - submersa em emulsão com V_C = 336 m/min e a_e= 70%D da fresa..... 116
Figura 4.22 – Foto do MEV ampliada – nível 3 – jato de fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D 117
Figura 4.23 – Foto do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) e análise EDS– nível 3 – jato de fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa 118
Figura 4.24 – Foto do MEV - variável 3 – jato de emulsão em abundância com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa 119
Figura 4.25 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS– nível 3 – jato fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa 120
Figura 4.26 – Foto do MEV ampliada em 150x – nível 6 – corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa 121
Figura 4.27 – Foto do MEV ampliada em 300x – nível 6 – corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa 122
Figura 4.28 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS – nível 6 –

corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa..... 122
Figura 4.29 – Foto do MEV– nível 6 – corte a seco – com velocidade de corte de 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa 124
Figura 4.30 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS – variável 6 – corte a seco - com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa..... 124
Figura 4.31– Rugosidades médias (Ra) obtidas após primeira passada em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem 126
Figura 4.32 – Rugosidades médias (Ra) obtidas após última passada, em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem 127
Figura 4.33 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em μm (95% de confiança), com largura de usinagem constante (a_e = 14 mm),..... 129
Figura 4.34 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da rugosidade média (Ra), medida em μm (95% de confiança), com largura de usinagem constante (ae=14 mm) 130
Figura 4.35 Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em μm (95% de confiança) para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem 130
Figura 4.36 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em μm (95% de confiança), para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e =14 mm e a_e =20 mm)..... 131
Figura 4.37 – Potência do fuso obtida após primeira passada, em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem 132
Figura 4.38 – Potência do fuso obtida após última passada (ferramenta desgastada), em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem 133
Figura 4.39 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da potência do fuso da máquina, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em W (95% de confiança)..... 136
Figura 4.40 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da potência do fuso da máquina, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em W (95% de confiança)..... 137
Figura 4.41– Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da potência do fuso da máquina para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em W (95% de confiança) 138
Figura 4.42 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da potência do fuso da máquina,

para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em W (95% de confiança)..... 138

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos (SCANDIFFIO, 2000) 34
Tabela 2.2 – Vantagens e Desvantagens da Usinagem Criogênica (T. LU; JAWAHIR JR, 2013) 64
Tabela 3. 1– Composição química de material utilizado nos ensaios, obtida mediante certificado do fabricante 77
Tabela 3.2 – Dados Técnicos do fluido de corte Vascomill 10 (BLASER 2017) 88
Tabela 3. 3 - Características típicas do óleo utilizado na emulsão (TERNEC, 2023) 89
Tabela 3. 4 – Dados Técnicos do fluido de corte Vacomill MMS FA2 (BLASER 2019) 89
Tabela 3. 5 – Matriz de ensaios, f_z=0,08mm, a_p=1mm 92

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

V_B	Desgaste de flanco	[mm]
V_C	Velocidade de corte	[m/min]
a_p	Profundidade de usinagem	[mm]
a_e	Largura de usinagem	[mm]
ks	Pressão específica de corte	[N/mm^2]
r_ε	Raio de ponta	[mm]
f_z	Avanço por dente	[mm/volta]
V_F	velocidade de avanço	[mm/min]

Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	*American Iron and Steel Institute*
AL_2O_3	Óxido de Alumínio
CAMQL	*Cooling Air with Minimum Quantity of Lubricant*
CBN	*Cubic Boron Nitride*
CNT	*Carbon Nano Tubes*
CO_2	Dióxido de Carbono
CVD	*Chemical Vapour Deposition*
EDS	*Energy Dispersive Spectroscopy*
EP	Extrema Pressão
HPC	*High Pressure Cooling*
ISO	International Standardization Organization
MEV	Microscópio Eletronico de Varredura
MQCF	*Minimum Quantity Cooling Fluid*
MQCL	*Minimum Quantity Cooling Lubrication*
MQF	Minimum Quantity Fluid
MQL	*Minimum Quantity Lubrication*
MVO	Mínimo Volume de Óleo
PCBN	*Polycristallyne Cubic Boron Nitride*
SAE	*Society of Automotive Engineers*

TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiNAl	Nitreto de Titânio Alumínio

Sumário

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 Considerações iniciais 21
1.2 Justificativa 22
1.3 Objetivos 23
1.4 Estruturação do trabalho 23
2 REVISÃO DA LITERATURA 24
2.1 Fluidos de corte na usinagem 24
2.1.1 Aspectos gerais 24
2.1.2 Classificação dos fluidos 26
2.1.2.1 Fluidos miscíveis em água 27
2.1.2.2 Soluções químicas sintéticas (fluidos sintéticos) 30
2.1.2.3 Fluidos baseados em óleos 31
2.1.2.4 Gases 37
2.1.3 Seleção de fluido de corte 38
2.2 Meios de aplicação de fluidos de corte 41
2.2.1 Fluido de corte em abundância 41
2.2.2 Corte a seco 52
2.2.3 Quantidade mínima de fluido de corte (MQF) 56
2.2.4 Usinagem criogênica 63
2.3 Problematica do uso de fluido de corte em fresamento 69
3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS 77
3.1 Materiais, equipamentos, instrumentos e ferramentas utilizados 77
3.1.1 Material utilizado 77
3.1.2 Máquina-ferramenta 78
3.1.3 Ferramenta de corte 78
3.1.4 Dispositivo de fixação e variáveis de lubri-refrigeração 79
3.1.5 Fluidos de corte 88
3.1.6 Metodologia e parâmetros de corte 89
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 93

4.1 Análise dos desgastes e da vida da ferramenta 93
4.1.1 Análise estatística dos resultados de vida da ferramenta 104
4.1.2 Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas 107
4.1.2.1 Usinagem submersa em óleo integral 108
4.1.2.2 Usinagem submersa em óleo solúvel 112
4.1.2.3 Usinagem com refrigeração convencional com jato de emulsão de óleo (fluido aquoso) 116
4.1.2.4 Usinagem a seco 120
4.2 Análise da usinabilidade pela rugosidade de superfície 125
4.2.1 Análise estatística dos resultados de rugosidade de superfície 128
4.3 Análise da usinabilidade pela potência de corte 132
4.3.1 Análise estatística dos resultados de potência de corte 135
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 139
Referências 142

1 INTRODUÇÃO

1.1 **Considerações iniciais**

Muitos métodos e meios de aplicação de fluidos de corte já foram testados em operações de usinagem com o objetivo de se obter maior tempo de vida de ferramenta em menor tempo de corte, bem como outras características, como melhor rugosidade de superfície. Muito se evoluiu tanto em aspecto tecnológico da ferramenta, bem como dos fluidos aplicados e meios de aplicação (TANG et al., 2022).

O comportamento térmico durante a usinagem tem sido objeto de estudo há mais de um século. Em 1883, estudos de Frederick W. Taylor mostraram uma maneira de reduzir o calor gerado no processo, mediante a elaboração de um sistema para injetar um fluxo pesado de água (saturado com soda) continuamente. Tal experimento resultou na possibilidade de aumentar a velocidade de corte em quase 40 % com o fluxo de água (BYERS, 2016 apud FERNANDES et al., 2022).

O uso de fluidos de corte em processos de usinagem é uma séria preocupação devido ao seu custo e aos efeitos ambientais e à saúde. Nas últimas décadas, esforços têm sido desenvolvidos para encontrar alternativas que superem suas principais desvantagens. O objetivo final é a supressão completa dos fluidos de corte. No entanto, devido aos exigentes requisitos dos processos de usinagem, em alguns casos não é possível utilizar condições de usinagem a seco. As razões podem ser encontradas no calor excessivo gerado no processo, o aumento do atrito entre a ferramenta e a peça ou a necessidade expulsar os cavacos gerados da zona de corte. (BENEDICTO et al. 2017).

Desde então, diferentes fluidos de corte em formas de solução, emulsão de diferentes origens como animal, vegetal, mineral, ou em forma de gases como nitrogênio líquido, bem como meios de aplicação (mínima quantidade fluido ou mínimo volume de óleo entre outros) foram aplicados na usinagem com o propósito firme de conseguir aumentar vida da ferramenta a partir da remoção do calor na zona de corte ou redução da geração deste a partir da redução do atrito (MACHADO et al., 2015).

Sharif et al. (2017) apontam a usinagem criogênica com a utilização de nitrogênio ou dióxido de carbono (ambos em forma de gás quando injetados sobre a peça e ferramenta) como

uma emergente solução sustentável para o setor de usinagem, apesar de estudos ainda demonstrarem numerosas inconsistências quanto aos resultados de usinabilidade. Estes resultados variaram consideravelmente em função das propriedades mecânicas dos materiais usinados e dos materiais das ferramentas de corte e serão demonstrados mais a frente neste trabalho no capítulo 2.2.3.

No processo específico do fresamento há a problemática da variação da temperatura nos dentes da ferramenta, pela alternância das fases ativa e inativa deste corte de natureza interrompida (PALMAI, 1987). Tal variação de temperatura, provocada pela função refrigerante do fluido de corte, gera efeito de choque térmico na aresta da ferramenta e isso, consequentemente, faz com esta tenha menor tempo de vida, quando comparados com processo que não utilizaram fluido de corte em abundância (BENEDICTO et al. 2017); (DESHPAND e DESCHPANDE, 2019), tais como, mínima quantidade fluido aplicada com ar comprimido, mínimo volume de óleo, corte a seco entre outros (BRAGHINI et al., 2008); (RAEL et al., 2004); (TEIXEIRA FILHO, 2006). Esta explicação será detalhada em capítulo à parte, neste trabalho.

1.2 **Justificativa**

A justificativa para este trabalho é testar um conceito novo de lubrificação e / ou refrigeração que tende a resolver ou diminuir os efeitos da problemática do fresamento supramencionada. Existe atualmente tendência da utilização de soluções com emissão baixo carbono, com a mínima utilização de fluidos de corte ou com a utilização de fluidos que pouco impactem o meio ambiente, como os nanofluidos, criogenia e outros métodos com baixo consumo de fluido de corte (TANG et al., 2022). Desta forma, uma segunda justificativa é que este trabalho pode ser também uma solução sustentável, uma vez que houve a utilização de óleo, composto por matérias-primas renováveis, prontamente biodegradáveis, para sobrepor o material e o seu consumo durante o processo foi baixo (apesar de não medido), mas serão precisos mais testes para comprovar a durabilidade do óleo e a eficácia ambiental do método.

1.3 **Objetivos**

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento, em termos de usinabilidade, de um novo método de lubrificação e refrigeração, até então não analisado na usinagem de metais, com dois tipos diferentes de fluidos: 1) usinagem submersa em óleo integral com fluxo contínuo de fluido e 2) usinagem submersa em fluido aquoso, bem como compará-lo em termos de vida de ferramenta e respectivos mecanismos de desgaste, rugosidade e potência de corte do fuso da máquina-ferramenta com alguns dos métodos de lubrificação e/ou refrigeração já analisados.

Apresenta-se, portanto, neste trabalho, a comparação deste novo método com diferentes formas de lubrificar e/ou refrigerar a ferramenta durante o processo de fresamento, quais sejam, o mínimo volume de óleo com vazão de 75 ml / hora, o MQF com vazão de 10 ml / hora, corte a seco e a refrigeração convencional da máquina (jato de emulsão de óleo).

Espera-se com este método proporcionar lubrificação ainda mais acentuada à ferramenta de corte (já que ela não recebe o jato de fluido somente quando está na parte inativa do corte, mas está sempre em contato com ele) e também diminuir o efeito danoso da refrigeração intermitente da aresta de corte, já que a ferramenta está em todo tempo submersa em ambiente com estável temperatura.

1.4 **Estruturação do trabalho**

Este trabalho se encontra dividido nas seguintes partes:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Revisão da literatura

Capítulo 3 – Materiais, equipamentos e procedimentos experimentais

Capítulo 4 – Resultados e discussão

Capítulo 5 – Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 **Fluidos de corte na usinagem**

2.1.1 **Aspectos gerais**

Os fluidos de corte têm sido incorporados ao processo de usinagem com o propósito de melhorar as características tribológicas correspondentes, tais como temperatura de usinagem, mecanismo de formação de cavaco, atrito e outros, presentes no contato da ferramenta com a peça e com o cavaco (SOKOVIC E MIJAMOVIC, 2001).

Shaw (2005) define como fluido de corte gases e líquidos utilizados nas operações de usinagem. Taylor apurou que com o uso da água, obteve-se 33% de aumento da velocidade de corte em relação ao corte sem nenhum fluido, sem diminuição da vida da ferramenta, pois conseguiu-se minimizar o efeito indesejado da temperatura sobre a ferramenta. Entretanto, em razão do alto potencial de oxidação da água, procurou-se por soluções aquosas (sais e cálcio), que molhassem melhor a peça, sem necessariamente provocar oxidação ou reduzindo o efeito desta, como também propiciar melhor propriedade lubrificante (ÁVILA e ABRAÃO, 2001, apud LIMA 2013).

Os Fluidos de corte devem possuir características e funções específicas como:

- ✓ Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde (DINIZ et al., 2014);
- ✓ Propiciar bom acabamento de superfície (MAMIDI; XAVIOR, 2012);
- ✓ Reduzir consumo de potência de usinagem, desgaste de ferramenta e calor gerado pelos processos afetados (MAMIDI; XAVIOR, 2012);
- ✓ Boas propriedades anti-fricção e anti-soldante (DINIZ et al., 2014);
- ✓ Alta condutividade térmica (BASETTI et al., 2024);
- ✓ Ausência de odores desagradáveis (DINIZ et al., 2014);
- ✓ Expulsar cavacos da área de corte ((BASETTI et al., 2024);
- ✓ Não manchar ou corroer a peça trabalhada e a máquina; (DINIZ et al., 2014);
- ✓ Não formar precipitados sólidos à temperatura de trabalho (BASETTI et al., 2024)
- ✓ Atender tolerâncias dimensionais, pela redução da temperatura (MAMIDI; XAVIOR, 2012);

- ✓ Não apresenta tendência à formação de fumaça (DINIZ et al., 2014);

A viscosidade dos fluidos também deve ser adequada, de forma a ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta para promover a ação de lubrificação. A condição ideal para a lubrificação é a formação um filme de fluido entre as partes de contato (DINIZ et al., 2014).

Basicamente os fluidos de corte tem duas funções na zona de corte, a redução de temperatura pela ação do resfriamento e a redução do atrito na interface ferramenta – cavaco pela ação da lubrificação (ASHMAWY et al., 2023) (CALLEGARO; CESAR, 2019).

Além de refrigerar a região de corte em altas velocidades e lubrificá-la em baixas velocidades e altas tensões, o fluido age também no sentido de reduzir a força de corte, melhorar a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça, de quebrar e transportar o cavaco e deixar uma camada protetora sobre as superfícies que ele tem contato, de tal maneira a proteger a máquina-ferramenta e a ferramenta contra a oxidação (TRENT; WRIGHT, 2000).

A redução de temperatura se explica pelo fato de o fluido de corte extrair uma grande parcela do calor gerado na zona de corte por mecanismos de transferência de calor como condução, convecção, evaporação e radiação. (ASHMAWY et al., 2023).

A redução na força de corte é explicada principalmente pela redução de atrito. As altas temperaturas e pressões no ponto de contato da ferramenta e do cavaco provocam uma reação química entre o fluido e a interface ferramenta-cavaco, resultando na deposição de um filme sólido nas duas superfícies que se torna o agente redutor de atrito (LAWAL et al., 2014).

O fluido de corte tem uma função adicional que é remover os cavacos da superfície da ferramenta. A remoção de cavacos evita a deterioração da superfície da peça que foi usinada. Isso explica a melhora do acabamento superficial informado por Trent e Wright (2000) (WICKRAMASINGHE et al., 2020).

Em cortes contínuos, a penetração do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta, que propiciaria a lubrificação, é muito difícil, devido à zona de aderência que não deixa espaço para esta ação, mesmo sob altas pressões (Diniz et al. 2014). Micaroni e Diniz (2007) injetaram fluido sob pressão (17 mPa) direcionados tanto à interface cavaco-ferramenta, quanto à interface ferramenta-peça em torneamento de aço ABNT 1045 com ferramenta de metal duro, classe P15, recoberta com tripla camada (TiCN, Al_2O_3 e TiN). Após a operação, eles observaram a região desgastada da ferramenta mediante fotos ampliadas em microscópio eletrônico de varredura e análises de EDS em diversos pontos desta região. Os pesquisadores, detectaram elementos químicos do fluido de corte nas bordas destas regiões, mas não dentro

delas, o que comprova que não houve penetração nestas interfaces, portanto, não houve lubrificação.

2.1.2 **Classificação dos fluidos de corte**

Conforme Figura 2.1, os fluidos de corte podem ser classificados em óleos integrais, miscíveis em água e criogênicos. Os miscíveis em água se subdividem em subcategorias.

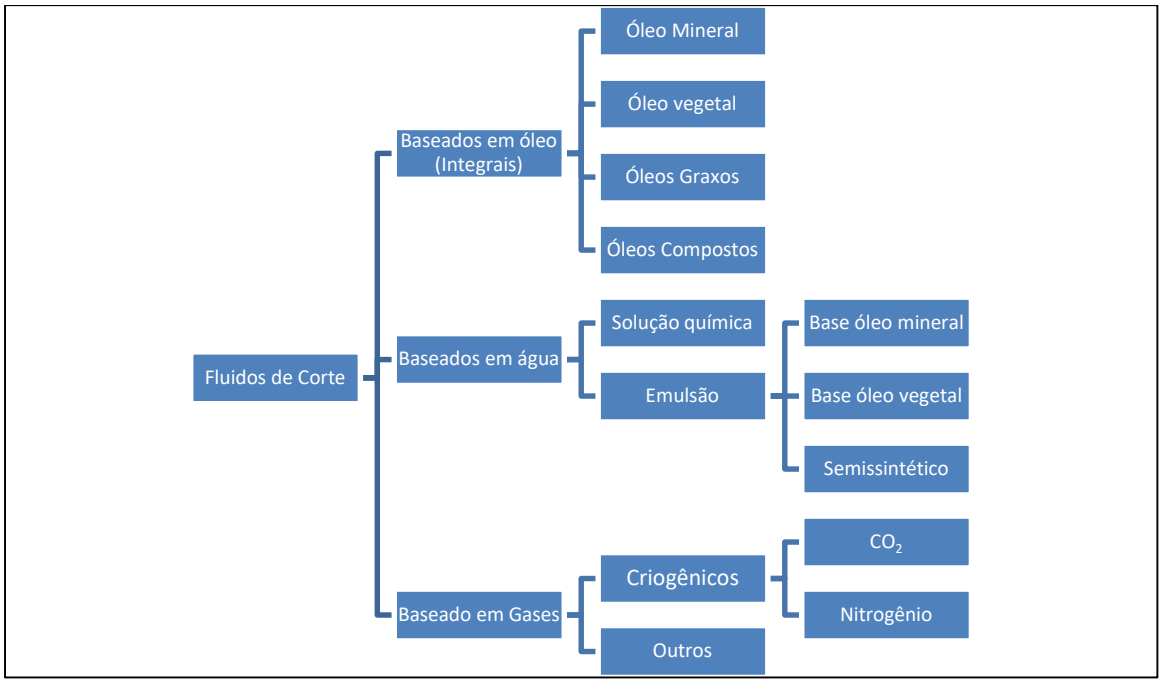


Figura 2.1 – Classificação de fluidos de corte (DESHPAND e DESCHPANDE, 2019) adaptada.

Além dos citados na Figura 2.1, Bertolli (2023) ainda cita o ar, que é utilizado algumas vezes em operações de usinagem com o intuito de remover cavacos da região de corte e para fornecer ação refrigerante. Para melhorar seu desempenho, pode-se utilizar ar comprimido com o fluxo direcionado à zona de corte com a finalidade de remover mais calor através da convecção forçada, além de facilitar o arraste de cavaco da zona de corte (MIRANDA, 2003).

2.1.2.1 **Fluidos baseados em água**

Os fluidos miscíveis em água foram introduzidos na década de 1940 e desenvolvidos com o crescimento das ferramentas de metal duro e consequente aumento da velocidade de corte nos processos de usinagem (SHENG et al., 1997). Shaw (2005) esclarece que, uma vez que a água tem o maior calor específico de todos os líquidos, é natural utilizar este elemento como principal componente do fluido de corte em usinagens de alta velocidade, em que a refrigeração é o efeito mais importante.

Como mostrado na Figura 2.1 e também citado por Debnath et al. (2019), os fluidos miscíveis em água são classificados em dois grupos: emulsões e soluções. As emulsões podem ser a base de óleos vegetais ou minerais e as soluções a base de fluido sintético, já que óleo não forma solução com água. Entre estas duas divisões estão os fluidos semissintéticos que são misturas de emulsões (com óleo) e solução (com fluido sintético).

a) Emulsões

Emulsões são em sua maioria dispersões finas de óleo em água. São de especial interesse em processos de usinagem, pois as emulsões óleo-em-água combinam as propriedades de resfriamento da água com as propriedades lubrificantes do óleo e cuidam da remoção de cavacos, além de auxiliar na diminuição do desgaste da ferramenta (PEVEC et al., 2023).

Quando utilizados em fluidos de corte, as emulsões são compostas de óleos minerais ou vegetais misturados com emulsificadores. Quando a mistura é adicionada em água e agitada, uma dispersão de pequenas gotas de óleo em uma fase contínua de água é produzida, formando uma emulsão de óleo em água (TEIXEIRA FILHO, 2006).

As emulsões combinam propriedades lubrificantes e antioxidantes dos óleos com propriedades refrigerantes da água. São utilizadas principalmente em operações de alta velocidade de corte e baixas pressões, nas quais se tem considerável geração de calor. A faixa de concentração da emulsão é bastante ampla e depende da severidade da operação. Óleos emulsionáveis podem ser utilizados em praticamente todas as operações de corte leves e moderadas e em algumas mais severas (LIMA, 2013).

Sheng et al. (1997) citam como componentes primários de uma emulsão:

Água – As propriedades de dureza e corrosão são fatores negativos para os processos de usinagem. Rocol (2012) define a dureza da água como a quantidade de componentes de cálcio e magnésio presentes na mesma, expressa em miligramas de carbonato de cálcio por litro de

água ou em partes por milhão (ppm). Água com valor de dureza abaixo de 70 ppm é considerada macia e pode resultar na formação da espuma no fluido de corte, ao passo que, para valores de dureza maiores que 300 ppm, pode comprometer o desempenho do fluido e comprometer a integridade do reservatório. Os minerais presentes no fluido reagem com os emulsificantes químicos e causam instabilidade da emulsão. Isto pode resultar num fraco desempenho de corte, proteção reduzida contra corrosão e tendência ao fluido se dividir (separar-se novamente em óleo e água). Eles também podem reagir com vários outros aditivos e levar à geração de sabão ou espuma em água dura. A dureza recomendada da água para fluido de corte é 90 ppm (ROCOL, 2012).

Óleo – A concentração do óleo na água é determinada pela severidade da operação e da necessidade de lubrificação. O óleo usado pode ser mineral ou vegetal e a adição de gorduras animais ou vegetais, óleos ou ésteres produzem emulsões mais gordurosas com maior poder de lubrificação (SHENG et al., 1997).

Emulsificadores ou emulgadores – Devido à alta tensão interfacial entre a água e o óleo, as emulsões podem existir somente com a adição de emulsificadores. Estas moléculas são de característica bipolar e se alinham de um lado com o óleo e do lado oposto com a água. O emulsificador predominante é o sulfanato de sódio, que é usado com sabões ácido graxo, ésteres e agentes de ligação para abastecer uma emulsão branca com o mínimo de óleo separado depois da mistura com a água. Como os polos se repelem, o óleo atomizado circula na solução, mas suas gotas nunca colidem entre si, dentro da emulsão. Assim, a emulsão permanece estável. As gotas de óleos menores na emulsão tendem a ter mais alta estabilidade. Emulsões com gotas de óleo maiores são mais fáceis de tratar os resíduos e tendem a espumar menos.

Aditivos – Os mais importantes são os de extrema pressão, inibidores de corrosão, biocidas e antiespumantes (SHENG et al., 1997).

As emulsões apresentam as seguintes vantagens em relação ao óleo mineral puro (EL BARADIE, 1996): maiores taxas de redução do calor, redução da geração da névoa de óleo (emissão de hidrocarboneto), condições mais limpas no ambiente de trabalho, mais econômicas, pois a diluição com água diminui custos e benefícios quanto à segurança e saúde do operador.

Segundo Drozda e Wick, (1983), os óleos emulsionáveis podem ser divididos em emulsão com base mineral, emulsão com base vegetal e emulsão de óleo semissintética. E ainda há os óleos emulsionáveis extrema-pressão, que são subtipos de óleos formados a partir das emulsões supracitadas, com adição de aditivos específicos para suportar operações mais severas (EL BARADIE, 1996).

Emulsão com base mineral

Óleos minerais emulsionáveis: compostos de óleo leve e aditivos para torná-los emulsionáveis em água. Dispõem de boa capacidade antioxidante e lubrificação satisfatória (MIRANDA, 2003). De acordo com Debnath et al., 2019, o óleo mineral emulsionável consiste em óleo mineral acompanhado de emulsificadores que permitirão a dispersão do óleo na água. Estes tipos de óleo unem as propriedades de prevenção à corrosão e lubrificação dos óleos minerais com o efeito refrigerante da água (SHOKRANI et al., 2012).

Emulsão com base vegetal

Óleos Vegetais emulsionáveis são formulados a base de ésteres, oleatos, amidas ou vários outros vegetais sintetizados. São óleos que apresentam alta resistência microbiológica, elevado poder refrigerante, lubrificação e grande estabilidade química (CIMM, 2019).

Karupannasamy et al. (2019) observaram menor desgaste de ferramenta, em processo de torneamento de aço EN8 com emulsões de óleo vegetal à base de rícino em comparação com outros óleos vegetais e com óleo mineral do mercado, todos sobre concentração de 5%. Os autores atribuíram melhor penetração do fluido à base de rícino à zona de corte em função da viscosidade.

D' Amato et al., 2019 compararam a eficiência, em termos de potência de usinagem e temperatura média da ferramenta (medida por câmera térmica), de emulsão de óleo vegetal composto por sementes prensadas da árvore Pinhão-manso (nome científico *Jatropha Curcas L.*) em água sob concentração de 5%, com emulsão de óleo mineral (mesma concentração) e corte a seco, durante fresamento facial de aço AISI 50 e alumínio AA2030. A temperatura média do ambiente refrigerado pela emulsão de óleo vegetal foi menor em 2 graus Célsius em comparação com a emulsão de óleo mineral e 20 graus menor que corte a seco. Em relação à potência de usinagem, o óleo vegetal apresentou valores levemente menores em relação ao óleo mineral e corte a seco na usinagem do alumínio, mas o óleo mineral apresentou menores valores em relação ao óleo vegetal e corte a seco, na ordem de 10%, durante a usinagem do aço.

Emulsão de óleo semissintética

Este tipo de óleo corresponde à categoria predominante dentre os fluidos de corte existentes no mercado. (BASSETI et al., 2024) As emulsões semissintéticas são fluidos de formação bastante complexa, de óleo em água com outros produtos químicos dissolvidos que são posteriormente diluídos em água antes do uso (RAYNOR et al., 2005). Essa complexidade surge da combinação de uma base aquosa que fornece propriedades de resfriamento, com óleo

que contribui com características lubrificantes, mediante emulsificantes que garantem a estabilidade da emulsão e aditivos que conferem propriedades adicionais com base nos requisitos específicos (BASSETI et al., 2024). As emulsões semissintéticas são soluções químicas que se caracterizam por apresentarem de 5% a 50% de óleo mineral no fluido concentrado, aditivos e compostos químicos que verdadeiramente dissolvem-se na água formando moléculas individuais (EL BARADIE, 1996).

A maioria dos fluidos de corte são utilizados durante meses ou anos antes de serem substituídos. Durante este período, os fluidos muitas vezes ficam contaminados com sujeira, partículas metálicas, micro-organismos e óleos residuais (RAYNOR et al., 2005).

Ávila e Abrão (2001, apud DE PAULA, 2012) compararam diferentes fluidos de corte durante torneamento do aço AISI 4340 com ferramenta cerâmica mista (Al_2O_3 + TiC). Nos testes de desbaste e de acabamento os melhores resultados de vida da ferramenta foram para a utilização de emulsão semissintética de graxa não mineral em água, com compostos químicos, seguido do corte a seco, do fluido sintético e da emulsão com óleo mineral. O melhor desempenho para esta emulsão é atribuído à presença de graxa na sua composição, que é responsável pela melhor ação lubrificante na maioria das operações de corte. Os pesquisadores também variaram a concentração dos fluidos, porém não obtiveram alterações relevantes no resultado.

De acordo com Debnath et al. (2019), estes tipos de óleos combinam as propriedades de aditivos químicos com as de óleo mineral, o que faz com que sejam melhores lubrificantes em comparação às soluções químicas sintéticas.

Óleos emulsionáveis extrema-pressão

Óleos emulsionáveis extrema-pressão: Para operações mais severas de usinagem nas quais não podem ser utilizados os fluidos de corte anteriormente citados, são adicionados aditivos como cloro, enxofre, fósforo, gordura animal e vegetal, sulfonados de sódio, potássio, lítio, cálcio, magnésio e aminas carboxílicas, que fornecerão ao fluido de corte características extrema-pressão próprias para essas operações (EL BARADIE, 1996).

2.1.2.2 **Soluções químicas sintéticas (fluidos sintéticos)**

São compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas completamente na água,

não havendo, nesse caso a necessidade de atuação de elementos emulgadores, pois os compostos reagem quimicamente ao formar fases únicas (DINIZ et al., 2014). Baseiam-se em substâncias químicas que formam uma solução com a água, como sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, , inibidores de corrosão, antiespumantes, entre outros (DEBNATH ET. AL.et al., 2019); (ASTAKHOV, 2006).

As soluções químicas contêm lubrificantes sintéticos solúveis em água, aditivos de alta pressão, inibidores de corrosão, sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas e antiespumantes. São geralmente considerados como refrigerantes, com baixo poder de lubrificação, e, portanto, mais recomendados para operações que exigem menores forças de corte (SHOKRANI et al., 2012); (DINIZ et al., 2014).

Outra questão geral dos lubrificantes sintéticos é a sua menor compatibilidade com elastômeros e tintas. Especialmente os fluidos de baixa viscosidade são muito agressivos para muitos selantes e materiais isolantes das máquinas (LEYERS, 2020). As soluções sintéticas mais comuns oferecem proteção anticorrosiva e refrigeração. Os mais complexos são de uso geral, com boas propriedades lubrificantes e refrigerantes. (MIRANDA, 2003).

2.1.2.3 **Fluidos baseados em óleos**

Ainda são predominantemente óleos minerais, mas os óleos vegetais ou hidrocarbonetos sintéticos também são utilizados. Podem ser usados totalmente puros (sem mistura) ou combinados (misturados com aditivos). De modo geral eles têm excelentes propriedades lubrificantes, apresentam bom controle de oxidação e vida longa, mas não refrigeram de forma similar aos fluidos miscíveis em água (SHENG et al., 1997).

Os óleos de corte deste tipo são normalmente utilizados para lubrificar (reduzir o atrito e o calor gerado nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça). A redução no atrito pode resultar em forças de corte mais baixas, menos desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta e outros tipos de desgastes da ferramenta gerados termicamente em certas condições de usinagem. Também auxiliam ao minimizar o atrito das partes móveis, bem como ao reduzir a oxidação e corrosão das superfícies da máquina e ferramentas (EL BARADIE, 1996).

De acordo com Sheng et al. (1997) aos componentes básicos do óleo são adicionados vários tipos de aditivos, sendo os polares os principais, pois formam um filme orgânico para ligarem-se quimicamente à superfície da ferramenta e da peça. Este filme promove a união ao metal

mais forte que a pura barreira física das moléculas de óleo sozinhas. Isto aumenta a capacidade umectante do fluido e diminui os desgastes da ferramenta devido à abrasão. Estes aditivos são compostos que podem ser adicionados aos óleos minerais, os quais alteram suas características físicas e químicas, a fim de adequá-las à aplicação que se deseja. Os aditivos mais comuns são (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001):

- ✓ Agentes de extrema pressão;
- ✓ Agentes antiespumantes;
- ✓ Material anti-névoa;
- ✓ Melhoradores de índice de viscosidade;
- ✓ Aditivos que agem contra desgaste, que formam filme lubrificante;
- ✓ Agentes antioxidantes, que reduzem a formação de substâncias ácidas ao reduzir a quantidade de oxigênio no óleo;
- ✓ Biocidas, que reduzem o odor.

Miranda (2003), por sua vez, ao pesquisar bibliografia referente a óleos integrais, os classifica e define em óleos minerais, óleos graxos, óleos compostos e óleos de extrema pressão. Segundo este autor, o óleo mineral puro tem seu calor específico equivalente à metade da água, o que reduz intensamente o poder de refrigeração, apesar de sua capacidade de lubrificação ser muito maior.

Óleos minerais

O óleo mineral é uma mistura de hidrocarbonetos líquidos obtidos a partir do refino de combustíveis fósseis, como o petróleo. De acordo com fonte de sua matéria-prima o petróleo, pode ser dividido em dois tipos: à base de parafina e à base de naftênicos (WU et al., 2021). Shaw (2005) acrescenta os óleos de base mineral aromáticos a esta lista.

Ao se adicionar elementos mais gordurosos, as características dos óleos minerais poderão ser enriquecidas. Estes aditivos de alta pressão contêm cloro, sulfato e fosfato, que também possuem propriedades de alterar o índice de viscosidade, modificam a espessura e agem como odorizadores (EL BARADIE, 1996).

Abdulkareem et al. (2020) compararam, durante torneamento de aço com 0,86% de carbono, utilizando três diferentes condições de lubri-refrigeração (corte a seco, usinagem convencional com emulsão de óleo em água aplicada em alto volume e usinagem com óleo mineral de motor usado) e observaram o menor valor de evolução do desgaste de flanco com a condição que utilizou o óleo usado do motor. Tal resultado foi atribuído ao fato que o óleo de motor, além da lubrificação também propiciou resfriamento, pois a temperatura média de corte

medida foi somente 2° K maior que a condição que utilizou a emulsão.

De acordo com Oberg et al. (2016), geralmente fluidos de corte com maior capacidade de lubrificação são aplicados para vários processos de usinagem em baixas velocidades de corte e ligas com dificuldades de usinabilidade. Para Baradie (1996), estes tipos de óleo têm habilidade para lubrificar e resistência à corrosão, mas não conseguem manter suas propriedades em altas temperaturas. Devido a este fato, não são recomendados para usinagem de alumínios, magnésio e aços de baixo carbono. Os óleos minerais compostos são substancialmente indicados para operações como rosqueamento, brochamento e outros processos de baixa velocidade de corte.

Nestes tipos de operação, estes óleos formam um filme lubrificante entre as superfícies deslizantes, resultando em menor atrito. É também importante que não exista reações químicas com a superfície usinada, que é, por exemplo, o que ocorre na usinagem de ligas de titânio, se o cloro é usado como aditivo (DONACHIE, 2000, apud Sharif et al. 2017).

Os óleos minerais dividem-se em três tipos principais, que têm suas cadeias atômicas representadas na Figura 2.2 (SHAW, 2005):

a) Parafínicos: constituídos por hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta, reta ou ramificada (Figura 2.2.a);
b) Naftênicos: também conhecidos como ciclo de parafinas, apresentam cadeias cíclicas saturadas, ou seja, possuem apenas ligações simples (Figura 2.2.b);
c) Aromáticos: predominância de cadeias aromáticas, ou seja, compostos cíclicos insaturados, ou seja, hidrocarbonetos que possuem ligações duplas (Figura 2.2.c)

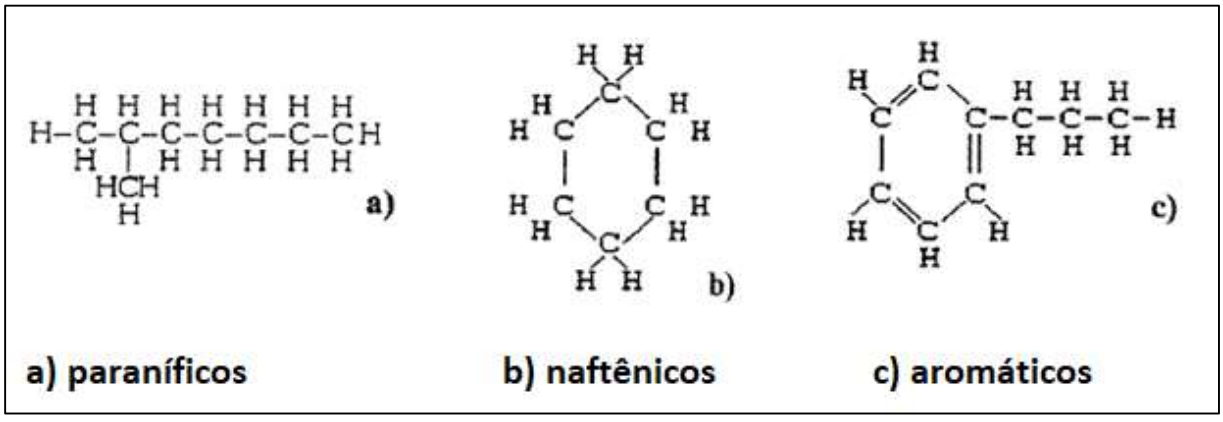


Figura 2.2 – Composição química dos óleos minerais (SHAW, 2005)

Os óleos parafínicos oferecem melhor estabilidade quanto à oxidação e tendem a ser menos reativos. Os óleos naftênicos proporcionam uma mistura mais homogênea (TOLBERT et al., 1992 apud TEIXEIRA FILHO, 2006). Polajnar et al. (2022) mostraram redução do

coeficiente de atrito em comparação com o processo a seco, de óleos parafínicos e naftênicos com baixa (aproximadamente 2.9 mm^2/s a 40°C) e alta viscosidade (aproximadamente 22 mm^2/s a 40°C) em processo de estampagem de chapa fina de aço. Ambos os tipos de óleos mostram redução deste coeficiente na ordem de 67% sob alta viscosidade, com leve vantagem ao óleo naftênico. Com baixa viscosidade, o óleo naftênico também proporcionou redução de atrito em torno de 64% comparado ao processo a seco, enquanto o óleo parafínico com baixa viscosidade foi o pior resultado e não apresentou redução do coeficiente de atrito. Os autores atribuem isso à boa capacidade de umectação deste óleo, que permite espalhar-se bem sobre a peça, porém com forças coesivas muito baixas (ou seja, não aderem e não se mantem sob alta forças de carga), o que acarretou lubrificação pobre sob a superfície do material estampado.

São considerados óleos naftênicos os que possuem mais de 70% de moléculas naftênicas. Esses óleos são isentos de cera e facilmente emulsionáveis, sendo utilizados na produção de óleos básicos com viscosidade de baixa a média. Seu uso tem sido reduzido em função de ter apresentado problemas à saúde humana (cadeias cíclicas saturadas). Já os óleos minerais de base aromática não são empregados na fabricação de fluidos de corte (MICARONI, 2001).

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos (SCANDIFFIO, 2000).

Tabela 2.1 – Comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos (SCANDIFFIO, 2000)

Parafínicos	**Naftênicos**
Alto ponto de fluidez	Baixo ponto de fluidez
Viscosidades mais altas	Menores viscosidades
Maior resistência à oxidação	Menor resistência à oxidação
Menor resíduo de carbono	Maior resíduo de carbono
Menor oleosidade ou poder lubrificante	Maior oleosidade ou poder lubrificante
Menor emulgabilidade	Maior emulgabilidade

Óleos graxos

São óleos de origem animal ou vegetal e têm boa capacidade lubrificante, mas sua capacidade anti-soldante é baixa, sendo utilizados geralmente para melhorar o acabamento superficial na usinagem de aços carbono, latão, cobre e alumínio, entre outros. (EL BARADIE, 1996).

De acordo com Rael (2004), os óleos graxos vegetais apresentam propriedades de fluidez, capacidade de reduzir atrito e desgaste da ferramenta de corte, ponto de fulgor elevado, boa resistência ao cisalhamento, inexistência de toxidade e biodegradabilidade. No entanto, possuem alta capacidade de oxidação e alto custo e, sob forma aromatizada, têm baixa propensão à formação de névoa, além de não ser reciclável.

Óleos vegetais

Nos últimos anos, foi demonstrado que o uso de óleos vegetais como fluido de corte sem dúvida melhorou o desempenho da usinagem (D'AMMATO et al., 2019). No geral óleos a base vegetal não são danosos ao meio ambiente, renováveis, altamente biodegradáveis e não tóxicos à natureza (DEBNATH e REDDY, 2019). Estes óleos melhoram significativamente o desempenho, em termos ecológicos, comparados aos fluidos de corte minerais, aos processos a seco e aos processos de usinagem com mínimo quantidade de lubrificação (MQL) (DEBNATH et al., 2014). Kaur et al., 2018, estudaram o comportamento de três diferentes óleos vegetais (óleo de canola, óleo de soja e óleo de girassol) durante torneamento de aço SAE 1018. Resultados apontaram menor rugosidade e menor desgaste de flanco para o processo que utilizou óleo de canola como meio de lubri-refrigeração.

Óleos compostos

São elaborados a partir da mistura de óleo mineral com aditivos polares e/ou aditivos quimicamente ativos. Os óleos minerais compostos podem ser de base parafínica, naftênica ou mistura de ambas. Os óleos de base parafínica possuem alto teor de parafinas (ceras), o que resulta em excelentes propriedades lubrificantes. Possuem alta viscosidade, boa resistência à corrosão, causando menores prejuízos à pele humana que os óleos de base naftênica (DROZDA e WICK, 1983). São também menos agressivos à borracha e ao plástico presentes na máquina ferramenta, além de serem de menor custo devido à sua maior abundância. São recomendados para a usinagem de cobre e suas ligas e também para fresamento e furação (EL BARADIE, 1996). Possuem a vantagem dos óleos graxos (boa capacidade de molhar o material da peça e ferramenta) e ainda apresentam maior estabilidade química, não se deterioram ou se tornam mais viscosos com o tempo e sua viscosidade pode ser ajustada pelo teor de óleo mineral (SCANDIFFIO, 2000).

Óleos de extrema pressão

São óleos que têm incorporados em sua composição aditivos de extrema-pressão. Os agentes de extrema pressão podem ser divididos em dois tipos: um é capaz de reação química direta com a superfície do metal para formar uma película reativa, como compostos contendo enxofre ou cloro, sulfetos metálicos e cloretos metálicos. Os demais formam filmes por degradação térmica durante o processamento, como bissulfeto de fosfato e compostos orgânicos contendo fósforo. Os aditivos de extrema pressão formam uma película lubrificante que suportam alta pressão na superfície da peça de trabalho para que o fluido de corte possa ser usado sob condições extremas, como alta temperatura e alta pressão, o que amplia o escopo de aplicação do fluido de corte (WU et al., 2021).

A função básica dos aditivos de extrema pressão é formar um composto na superfície de contato com uma resistência ao cisalhamento inferior àquela do metal em trabalho, evitando a soldagem e o aparecimento da aresta postiça de corte (DINIZ et al., 2014). Os óleos puros de corte com aditivos EP são mais eficazes em operações com baixas velocidades de corte e cortes profundos. A eficiência dos aditivos EP pode reduzir à medida em que se aumentam as velocidades de corte, porque os ingredientes reativos teriam menos tempo para penetrar na zona de corte e reagir de modo a formar uma película sólida lubrificante. Em geral, os óleos com maior viscosidade ou com alta concentração de aditivos de extrema pressão tendem a aumentar o desgaste da ferramenta por ação corrosiva (MICARONI, 2001).

Dentre os tipos de agentes de extrema pressão, destacam-se:

- Matéria graxa: constituída por ácidos graxos, majoritariamente, que podem ser de origem vegetal ou animal e, graças a seus agrupamentos polares, formam películas que são excelentes lubrificantes e contribuem para bom acabamento da peça sendo usinada, mas tem seu uso restrito a trabalhos leves, uma vez que as camadas não resistem a cargas elevadas (SCANDIFFIO, 2000).
- Fósforo: Apresenta-se sob várias formas, podendo vir combinado com ésteres, e também como ditiodifosfato de zinco, que age como antioxidante e, principalmente, como antidesgastante.
- Enxofre: muito utilizado para trabalhos mais severos devido ao sulfeto metálico formado durante o processo de corte. Por essa razão só pode ser utilizado na usinagem de aços e metais ferrosos. Porém, pode causar manchas em ligas de cobre e, com as ligas de níquel, pode formar eutéticos de baixo ponto de fusão (SCANDIFFIO, 2000).

- Cloro: É adicionado ao óleo sob a forma de parafina clorada; é bastante eficiente em operações severas com aço, formando cloretos na superfície do metal. Este agente de alta pressão tem o seu uso restrito devido aos danos que pode causar, se não for descartado corretamente (MIRANDA,2003).

Nanofluidos

Os nanofluidos na usinagem ganharam um renovado interesse por causa de suas excepcionais propriedades de resfriamento. Nanofluidos são compostos de dispersão de nano partículas (1-100 nm) com o fluido base, que melhora o desempenho em relação aos fluidos de corte convencionais (PRABHU; VINAYAGAM apud SHARMIN et al., 2020).

Sharmin et al. (2020) compararam, para o fresamento de aço liga 42CrMo4 endurecido, em termos de vida da ferramenta (desgaste), temperatura de corte, rugosidade e força de corte, a refrigeração contendo água desmineralizada e composto de nanotubos de carbono (CNT), com a refrigeração convencional com emulsão de óleo em água e o corte a seco. O nanofluido foi entregue internamente na zona de corte usando um aplicador de líquido projetado. Foram observados em favor do fluido com CNT, a redução de 29% na temperatura de corte, 34% de redução na rugosidade da superfície, 33% de redução na força de corte e redução de 39% no desgaste da ferramenta em comparação com o segundo melhor procedimento do teste (refrigeração convencional da máquina).

2.1.2.4 **Gases**

O ar é o mais comum dos fluidos gasosos. Está presente em pressão atmosférica para operações secas e também está presente quando os fluidos de corte líquidos são usados. O ar pode ser comprimido para melhorar a sua capacidade de refrigeração; um jato de ar direcionado para a zona de corte pode remover o calor por convecção forçada. Um exemplo de aplicação do ar comprimido é no fresamento de rasgos e de cavidades, com a função de expulsar o cavaco próximo à ferramenta, a fim de evitar que ela o traga de volta à região de corte (DINIZ et al., 2014). Gases como o argônio, hélio e nitrogênio podem ser usados para prevenir a oxidação da peça. A vantagem dos gases inertes inclui boa capacidade de refrigeração, aumento da vida da ferramenta, visão clara da operação, eliminação da névoa e nenhuma contaminação da peça, cavaco ou lubrificante da máquina (TEIXEIRA FILHO, 2006).

El Baradie (1996) reuniu testes de usinagem realizados por diversos pesquisadores que trabalharam com diferentes gases. Ele cita Olson (1948) que afirma que no fresamento, usando ar resfriado obteve-se vida de ferramenta 400% maior que o ar em temperatura ambiente. Porém, no torneamento a utilização de ar em diferentes temperaturas representou pouca diferença na vida da ferramenta. Em outros testes, ele cita Pahlitzsch, que em 1953 descobriu que o uso de dióxido de carbono aumenta a vida da ferramenta em 150% e usando nitrogênio o aumento foi de 240%. Entretanto, nos mesmos testes observou-se que o dióxido de carbono usado em diversas temperaturas não foi significativo sobre a vida da ferramenta.

Em operações de fresamento, Nakagawa (2000, apud TEIXEIRA FILHO, 2006) comprovou um aumento da vida da ferramenta quando utilizou ar comprimido a –30°C e –45°C. Os resultados encontrados podem ser explicados pelo maior efeito refrigerante no processo de usinagem, uma vez que a ferramenta resiste melhor à abrasão. Contudo, quando a resistência à abrasão não for a principal característica do material da ferramenta, deve-se lembrar que a resistência do material da peça aumenta com a diminuição da temperatura, aumentando, portanto, os esforços de corte no processo. Isso pode gerar instabilidade do conjunto máquina, peça e ferramenta, com danos para outras variáveis de interesse que expressam a qualidade do produto.

Pahlitzsch, testou, em 1951, o ar refrigerado sob temperaturas entre -40°C e –60°C para operações de fresamento em velocidade de corte de 30 m/min. Neste caso, a vida da ferramenta foi 400% maior em relação a fluidos líquidos utilizados na época. No mesmo teste, porém a –8°C, a vida foi maior em 40%, o que levou à conclusão de que a capacidade de refrigeração se elevou devido ao fato de refrigerar o ar para uso (SHAW, 2005).

2.1.3 **Seleção de fluido de corte**

Baseado nas características desejáveis para um fluido de corte, El Baradie (1996) aponta alguns critérios de seleção: usinabilidade (capacidade do fluido de corte em contribuir para gerar a forma desejada, tamanho e acabamento da peça e também estender a vida da ferramenta), compatibilidade, aceitabilidade (pelo operador quanto ao odor, tato e aparência), descartabilidade (facilidade e custo para descartar o fluido), retorno financeiro (influência do fluido de corte sobre os custos de produção), ter alta condutividade térmica e alto calor específico, não deve ser inflamável, deve ser de fácil reciclagem.

Os principais fatores de escolha do fluido adequado são o material da peça, o material da ferramenta e o processo de usinagem (TEIXEIRA FILHO, 2006).

Material da peça

O aço e suas variações, incluindo aqui os do tipo inoxidável, concentram o maior volume de material usado industrialmente. Assim, todos os tipos de fluidos podem ser usados. A escolha depende da severidade da operação e da resistência do aço (TEIXEIRA FILHO, 2006).

Ferro fundido cinzento, que produz cavacos de ruptura, é normalmente usinado sem o uso de fluidos (MIRANDA, 2003), pois tem como elemento a grafita, que já tem efeito lubrificante, eliminando assim a necessidade de utilização de fluido de corte (DINIZ et al., 2014). Pode também ser usinado com aplicação de fluidos semissintéticos para auxiliar a remoção dos cavacos. De acordo com Miranda (2003), o fluido de corte pode conduzir o cavaco do ferro fundido cinzento para as partes móveis da máquina e reduzir sua durabilidade. Já o ferro fundido branco exige aditivo com extrema pressão para que a ferramenta tenha maior vida (TEIXEIRA FILHO, 2006).

Os metais não ferrosos podem ser usinados a seco no caso de latão, bronze e cobre (pois estas ligas são geralmente usinadas mais facilmente que outros materiais, devido ao fato de terem maior ductilidade e menor resistência mecânica) (DINIZ et al., 2014) ou com fluidos semissintéticos com aditivação correta, sem enxofre, para proteção contra manchas. Nestes metais, o enxofre livre tem a tendência de provocar manchas na superfície do material (MIRANDA, 2003).

O alumínio pode muitas vezes ser usinado a seco, devido à boa usinabilidade de boa parte de suas ligas, porém, às vezes por ser material muito dúctil e empastar nas ferramentas de corte, formando a aresta postiça de corte, ou em razão de possíveis problemas com a tolerância dimensional do material, em função da sua alta condutividade térmica e baixa capacidade de resistir ao calor, exige a utilização de fluido com boas características lubrificantes. Portanto, as emulsões e as micro emulsões são, neste caso, indicadas. Exceção é feita à liga alumínio–silício que tem apresentado ótimos resultados em sistemas de usinagem que utilizam fluidos sintéticos aditivados com agentes de extrema pressão (TEIXEIRA FILHO, 2006).

Há um interesse crescente no uso do magnésio nas indústrias automobilística e aeroespacial, devido sua baixa densidade e a alta relação entre resistência e peso, entretanto, sua usinabilidade se resulta difícil, pois fluidos de corte à base de água podem gerar atmosfera inflamável e velocidades de corte mais altas proporcionam a queima dos pequenos cavacos gerados (VISWANATHAN et al., 2018).

Material de ferramenta

A escolha de um material de ferramenta para uma dada aplicação está ligada às solicitações que serão encontradas durante o processo de usinagem em que ela estará envolvida. Sendo assim, as ferramentas de aço-rápido e metal duro, podem ser utilizadas com qualquer tipo de óleo, desde que o mesmo apresente propriedades anticorrosivas (aço-rápido oxida com facilidade) (ÇAKIR et al., 2007).

Variações bruscas de temperatura são prejudiciais às ferramentas de composição cerâmica à base de óxidos. Portanto, os fluidos de usinagem de qualquer composição não são indicados, já que o uso de fluido, muitas vezes, implica em variação de temperatura, devido à dificuldade de se manter direcionamento e vazão constante do jato de fluido. As ferramentas com alta resistência ao calor (cerâmicas, com cobertura de óxido de alumínio, nitreto cúbico de boro e diamante policristalino) a princípio não precisam de refrigeração, mas esta algumas vezes é utilizada para evitar danos ao dimensional da peça (MAMIDI et al., 2012).

Processo de usinagem

A severidade da operação de usinagem e as condições da máquina é que vão nortear a escolha do melhor tipo de fluido de usinagem. Fluidos com alta carga de agentes lubrificantes são indicados para operações severas (brochamento, mandrilhamento, corte de dentes de engrenagem etc.), fluidos extremamente refrigerantes são indicados para operações em alta velocidade ou com alta geração de calor (retificação) (DINIZ et al., 2014).

Na furação profunda, quando o fluido é introduzido por um canal interno à broca e despejado com alta pressão na superfície de folga da ferramenta, é necessário que ele possua baixa viscosidade para remover o cavaco de dentro do furo e também alguma capacidade de lubrificação. Desta forma, os fluidos aquosos com aditivos de extrema pressão são preferidos (DINIZ et al., 2014). A não remoção dos cavacos, neste processo, provoca o entupimento dos canais da broca, prejudicando o acabamento superficial do furo, que num caso mais extremo, pode provocar a quebra da broca (NOVASKI E DÖRR, 1999).

Em operações de torneamento, em função do contato contínuo entre ferramenta e peça e, consequentemente, do acesso restrito do fluido à interface cavaco-ferramenta, recomenda-se a utilização de emulsão ou solução de óleo de baixo peso molecular, devido a seu efeito predominantemente refrigerante (NACHTMAN, 1995 apud MACHADO et al., 2015).

Em operações de fresamento, a lubrificação é prioritária e o acesso do fluido às interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça é facilitado pela intermitência da operação, e, por isso,

óleos e emulsões concentrados são indicados. Entretanto, corre-se o risco de acentuar o gradiente térmico e promover trincas térmicas na ferramenta de corte (MACHADO et al., 2015). Este trabalho abordará em capítulo à parte a problemática do uso de fluido nos processos de fresamento.

2.2 **Métodos de aplicação de fluidos de corte**

Dentre os diversos meios de aplicação de fluidos de corte, estão a usinagem com fluido de corte em abundância, a quantidade mínima de fluido de corte (também conhecida como MQF), quantidade mínima de fluido de corte com ar frio (MQCL) e fluido com alta pressão.

Além destas possibilidades, existem também, a usinagem com fluidos de corte ou lubrificantes com gás, a usinagem a seco (sem utilização de nenhum tipo de fluido), a usinagem criogênica e a usinagem com lubrificantes sólidos.

2.2.1 **Fluido de corte em abundância**

Previamente detalhado neste trabalho, em relação às propriedades e classificação, o fluido de corte tem sido durante anos na usinagem regularmente aplicado para propiciar melhor produtividade, melhor acabamento superficial, reduzir custos e, consequentemente, aumentar a lucratividade (ASTHAKOV, 2012).

O emprego de fluidos de corte pode auxiliar na melhora da vida da ferramenta ao prevenir, por exemplo, a formação da APC (Aresta Postiça de Corte), ou ao reduzir as forças de corte e melhorar o acabamento superficial. É também comum encontrar maiores atritos e temperatura de usinagem no corte a seco em comparação com processos que utilizam fluido. A presença de altas temperaturas durante o corte pode resultar em menor vida da ferramenta, acabamento superficial ruim e desvios geométricos na superfície usinada (SREEJITH E NGOI, 2000).

Usinagem com ferramenta de baixa resistência à temperatura, por exemplo, ferramenta de aço rápido, exige o fluido de corte em abundância. Isto ocorre, porque o calor gerado, durante o corte aumenta muito a temperatura da ferramenta, o que reduz sua resistência mecânica e capacidade de corte, bem como facilita sua deformação plástica e, por conseguinte, resulta em

falha completa do processo de corte. Desta forma, o uso de fluido de corte reduz a temperatura e, assim, dificulta a perda de resistência da ferramenta, tornando possível a utilização de velocidades de corte mais altas (SALLES et al., 2001).

Machado et al., 1997, estudaram uma variedade de fluidos de corte e o corte a seco durante torneamento de aço AISI 8640, com ferramenta de metal duro P35 com tripla cobertura (TiC, Al_2O_3 e TiN). As variáveis utilizadas em termos de fluidos de lubri-refrigeração foram:

- S3: fluido sintético com concentração de 3%;
- SS3: fluido semissintético com concentração de 3%
- M3: óleo mineral, emulsão em água com concentração de 3%
- M10: óleo mineral, emulsão com concentração de 10%
- D: corte a seco

Conforme a Figura 2.3, eles demonstraram que ao utilizar fluidos sintéticos e semissintéticos, obteve-se melhor vida da ferramenta em comparação com as emulsões de origem mineral. O corte a seco apresentou o pior resultado. Isto ocorreu porque os fluidos sintéticos ou semissintéticos têm melhores habilidades de refrigeração (efeito desejado em corte contínuo) em comparação aos óleos minerais. O fluido sintético teve melhor desempenho em termos de vida da ferramenta comparado com o semissintético em velocidades de corte baixas, até 250 m/min, ao passo que, para velocidades de corte maiores, o contrário foi observado, com maior vida de ferramenta para o fluido semissintético.

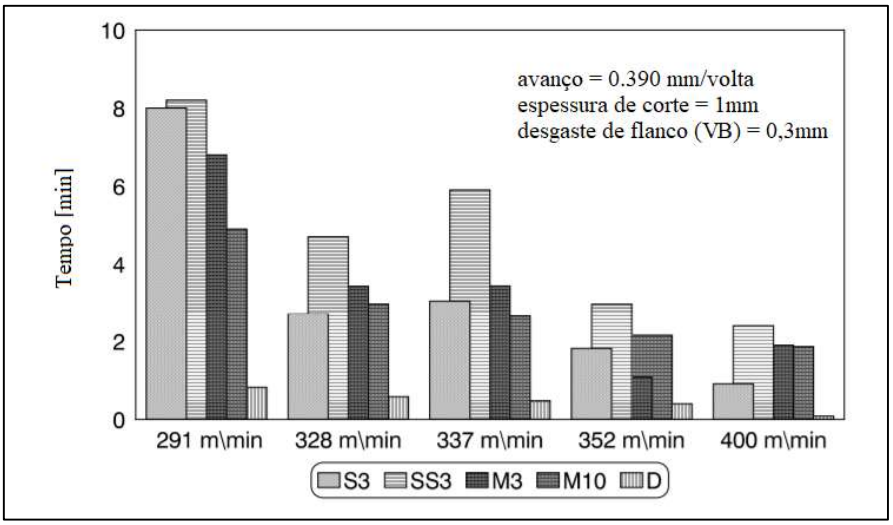


Figura 2.3 – Vida da ferramenta sob várias velocidades de corte e diferentes condições de lubri-refrigeração (MACHADO et al., 1997)

Observou-se nesta pesquisa que, para baixas velocidades de corte, a difusão foi o principal

mecanismo causador do desgaste da ferramenta, enquanto para altas velocidades de corte foi a deformação plástica da ferramenta. Isso explica o fato dos fluidos sintético ou semissintético com baixa concentração apresentarem melhores resultados que o óleo mineral com concentração em 10% ou o corte a seco sob baixas velocidades de corte. A difusão, principal mecanismo de desgaste para as velocidades de corte mais baixas, é influenciada com o aumento da temperatura, e os fluidos de corte com baixa concentração de óleo (maior capacidade de refrigeração) removem o calor gerado. Sob altas velocidades de corte, a temperatura pode apresentar diferentes relações com a deformação plástica, mecanismo causador da falha da ferramenta neste caso. Os fluidos podem favorecer a usinagem do material ao reduzir a temperatura da ferramenta, no caso da falha causada por deformação plástica, se esta redução não deixar que a resistência da ferramenta diminua, mas pode prejudicar a usinagem se promover um aumento da tensão compressiva agindo na superfície de saída da ferramenta, com o aumento da resistência de cisalhamento da peça. Neste caso, o primeiro efeito foi observado.

Os torneamentos com o fluido de corte apresentaram maiores forças de corte. A usinagem com fluido sintético foi a que apresentou as maiores forças de corte, seguido pelo uso do semissintético, emulsão de óleo mineral com 10% de concentração e emulsão de óleo mineral em água com 3% de concentração equiparável com o corte a seco. A razão principal para estes resultados é que maiores temperaturas reduzem a tensão de cisalhamento do material de trabalho e, consequentemente, menores forças de corte foram observadas conforme fluidos com menor capacidade de refrigeração eram utilizados (MACHADO et al., 1997).

Os resultados de vida da ferramenta e forças de corte observados foram fiéis às expectativas dos fluidos, com a exceção da inversão do óleo mineral M3 e M10, uma vez, que se esperava que o M3 apresentasse maior vida de ferramenta e maior força de corte que o M10, mas o inverso ocorreu. Uma possível razão, é que a lubrificação do M10, com a sua capacidade de não deixar o calor ser gerado, prevaleceu sobre a maior capacidade de remoção do calor do M3, tanto na vida da ferramenta ou dos esforços de corte. Em termos de rugosidade, os diferentes fluidos aplicados não apresentaram diferenças significativas. Apesar de serem esperadas melhores rugosidades com a lubri-refrigeração, uma possível explicação é que o poder lubrificante dos fluidos utilizados não foi suficiente para adentrar a interface cavaco-ferramenta de modo a reduzir a fricção, o que permitiria obter melhores rugosidades superficiais (MACHADO et al., 1997).

Braga et al. (2002) investigaram o processo de furação de alumínio com 7% de silício sob usinagem convencional com óleo em abundância e usinagem com MQF (mínima quantidade de fluido) atomizada sob pressão de 450 kPa e fluxo de 10 ml/h de óleo lubrificante em termos

de acabamento, tolerâncias dimensionais, desgastes de flanco e forças de corte. A ferramenta utilizada foi broca de metal duro (tipo ISO K10) com e sem revestimento de diamante.

O teste constituía em realizar aproximadamente 612 furos em corpo de prova (tempo efetivo de corte de 22 minutos) em cada condição testada. As forças de corte eram medidas a cada 33 furos, além disso, mediu-se o diâmetro e o acabamento superficial dos furos. Os parâmetros de corte utilizados, determinados em testes preliminares, foram velocidade de corte de 300 m/min e avanço de 0,1 mm/rotação.

Dentre os resultados, Braga (2002) destaca que:

- Não houve diferenças em termos de tolerância dimensionais e rugosidade superficiais para as condições de lubri-refrigeração aplicadas.
- As potências de corte sempre foram consideravelmente maiores para a condição de lubri-refrigeração emulsionada em comparação com a variante MQF, como também o desgaste de flanco foi minimamente maior nas condições em que o fluido era utilizado com abundância. A razão principal para isso, foi que, com o fluido em abundância em corte contínuo, a temperatura da peça não se eleva muito e isso faz com que o material mantenha propriedades de dureza e resistência ao corte. As Figuras 2.4 e 2.5 demonstram as variações de potência de corte e de desgaste de flanco respectivamente para cada variável testada.

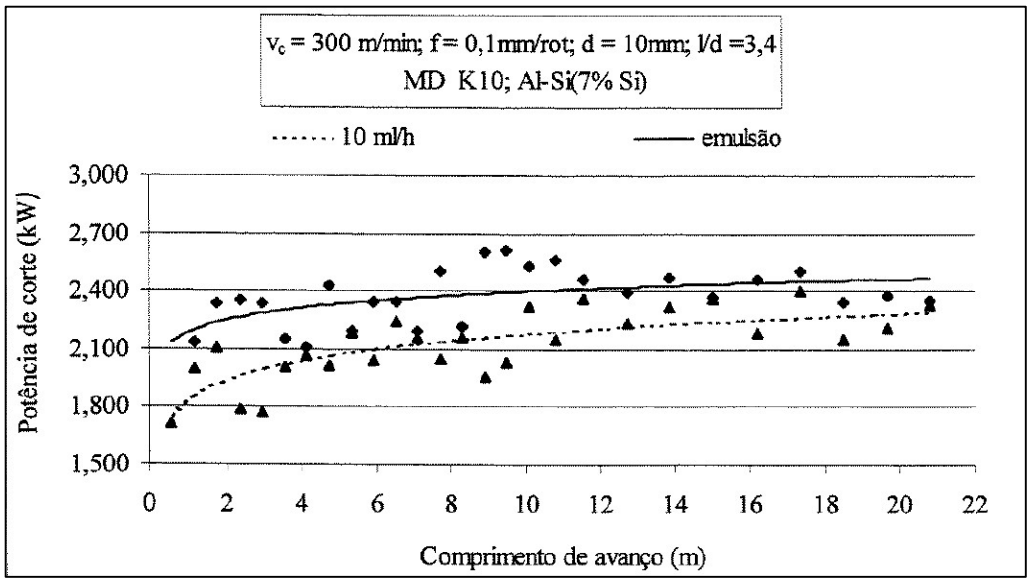


Figura 2.4 - Evolução da potência de corte em função do comprimento de avanço para os dois sistemas de lubrificação (BRAGA, 2001)

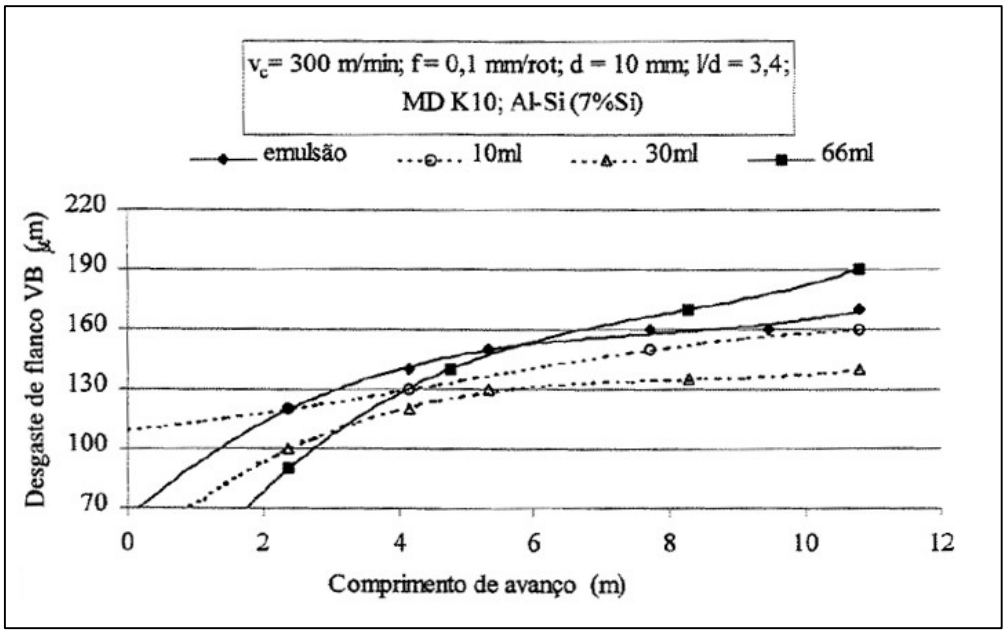


Figura 2.5 – Desgaste de flanco em função do comprimento de avanço para diferentes volumes de fluidos de corte (BRAGA, 2001)

Aplicação com alta pressão

O uso de refrigeração com alta pressão é uma técnica que pode ser empregada em operações de usinagem de materiais exigentes, tais como os aços inoxidáveis e os materiais resistentes ao calor, como ligas à base de níquel ou à base de titânio entre outras consideradas de baixa usinabilidade, com o objetivo de aumentar a vida das ferramentas e a produtividade dos processos (SANDVIK, 2013). Se o fluido for estrategicamente aplicado, em jatos bem direcionados com alta pressão, ele pode ser vantajoso em várias aplicações, podendo reduzir os esforços de usinagem, consequentemente reduzindo a potência elétrica consumida pela máquina, melhorando o acabamento superficial e contribuindo para a precisão dimensional e geométrica de peças usinadas (NAVES e SILVA, 2017).

Naves e Silva (2017) investigaram o torneamento do aço inoxidável ABNT 316 com fluido de corte em alta pressão. Para isso, foi observado o desgaste da ferramenta após a usinagem de aproximadamente 250cm³ de cavaco, com fluido de corte (emulsão) aplicado com jorro abundante, sob pressão de 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa e a seco. Como resultado, observou-se que a ferramenta de corte apresentou menores desgastes de flanco sob condições de alta pressão, seguida pela condição a seco e condição convencional, com emulsão (denominado jorro pelos autores). As variações da pressão de injeção de fluido nas condições em alta pressão não influenciaram na vida da ferramenta. O mecanismo causador do desgaste da ferramenta foi a adesão. De acordo com Naves e Silva (2017), tais melhoras foram alcançadas em função da capacidade de penetração do jato, o que reduz o ângulo do plano de cisalhamento primário

através de sua atuação sobre o cavaco e cria uma cunha hidráulica entre a ferramenta e a peça. Dessa maneira é importante que o jato seja forçado a atingir a aresta de corte com alta pressão e força de impacto suficiente para diminuir a curvatura do cavaco, o que facilita a sua quebra.

Pigott e Collwell (1952, apud SANCHEZ et al., 2013) desenvolveram um sistema de alta pressão com jato de óleo a 2,75 MPa para alcançar efeito refrigerante em operação de usinagem de metal. Os resultados observados foram da ordem de vida de ferramenta entre 7 e 8 vezes mais longa que aplicação com fluido em abundância, bem como notou-se sensível melhora no acabamento superficial. O estudo também apontou como uma das causas a não formação das arestas postiças de corte.

Iyengar e Salmon (1965) conduziram experimentos de torneamento sob a refrigeração de jato de óleo em alta pressão e observaram decréscimo das forças de corte na ordem de 60% em comparação com o processo convencional de emulsão de óleo. Mazurkiewicz et al. (1989) observaram também, durante fresamento de aço AISI 1020, melhora do acabamento superficial e redução do coeficiente de atrito.

Magri et al. (2018) pesquisaram as condições de vida de ferramenta e rugosidade em torneamento de liga com níquel Inconel 625, com diferentes direcionamentos do jato do fluido de corte e condições de refrigeração. Neste experimento foram testadas a refrigeração em abundância (convencional da máquina, com volume de 8 litros por minuto e com baixa pressão), refrigeração de alta pressão (7 MPa) e alto volume (80 l/min) com direcionamento do jato à superfície de flanco da ferramenta, refrigeração de alta pressão e alto volume, com direcionamento do jato à superfície de saída da ferramenta e refrigeração de alta pressão e alto volume, com direcionamento simultâneo ao flanco e à superfície de saída da ferramenta.

As condições de corte utilizadas foram: velocidade de corte v_c= 65m/min, avanço f= 0,08 mm/volta e profundidade de usinagem a_p =1 mm. A cada 3 minutos, a usinagem era interrompida, para análise microscópica do inserto e o limite de vida da ferramenta foi estipulado após a ferramenta alcançar desgaste de flanco V_B=0,3 mm.

Conforme mostra a Figura 2.6, os maiores volumes de material removido por vida da ferramenta foram observados com a refrigeração de alta pressão e volume com direcionamento de jato à superfície de saída e com a refrigeração de alta pressão e volume com direcionamento do jato de fluido de corte à superfície de folga, em detrimento da refrigeração convencional e refrigeração de alta pressão e volume com direcionamento de jato simultâneo às superfícies de saída e superfície de flanco. A explicação para este resultado reside na maior capacidade de refrigeração desta condição (maior pressão e maior volume de fluido de corte), que faz com que haja menor desgaste de entalhe (que era o tipo de desgaste que causou o fim da vida da

ferramenta) e, portanto, maior vida da ferramenta (MAGRI et al., 2018).

Quando a refrigeração convencional foi utilizada, o desgaste de entalhe causou o fim da vida da ferramenta, ocasionado pelo sulcamento da camada de cobertura da ferramenta gerado pela rebarba de alta dureza, que criou espaço para que parte do cavaco em formação fosse extrudado entre ferramenta e peça e, consequentemente, aderisse ao sulco formado, aumentando este sulco pelo mecanismo de *"attrition"* (aderência da ferramenta ao material usinado, seguida de remoção de partículas da mesma) (MAGRI et al., 2018).

Nas condições de alta pressão, a alta eficiência de refrigeração evitou perda de dureza do revestimento da ferramenta pela temperatura e, consequentemente, a fez mais resistente ao efeito de sulcamento da rebarba de alta dureza observada neste torneamento. Desta forma, não ocorreu desgaste de entalhe e o *attrition* foi o principal mecanismo causador de desgaste de flanco da ferramenta nestes cortes (MAGRI et al., 2018).

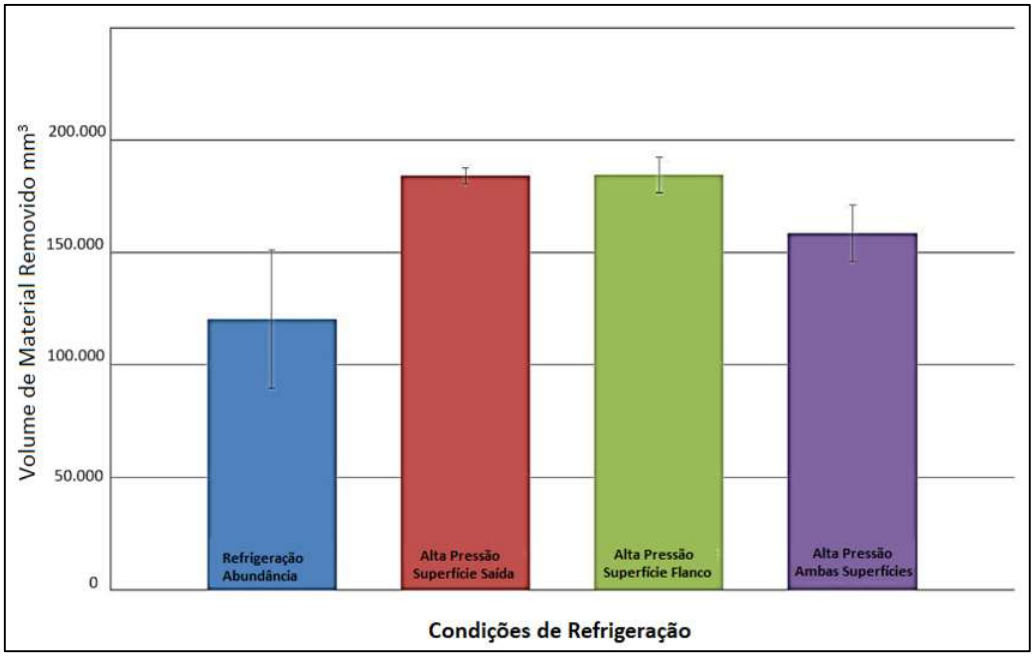


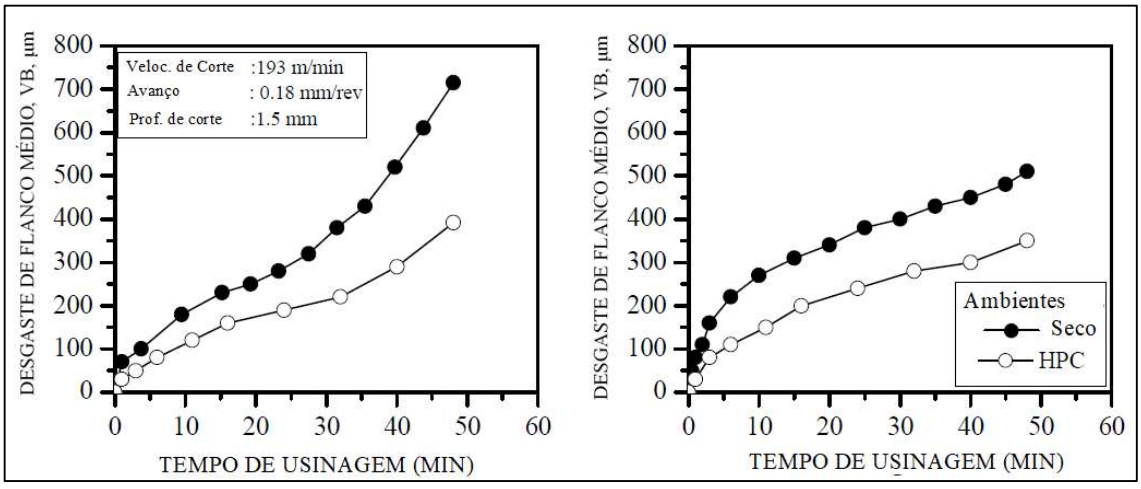
Figura 2.6 – Vidas das ferramentas e dispersões para as diferentes condições de refrigeração (MAGRI et al., 2018)

Em termos de rugosidade da peça, a condição que apresentou melhores resultados (menor rugosidade) no início e fim da vida da ferramenta, foi a refrigeração de alta pressão e volume com direcionamento de jato à superfície de flanco. Em outras condições, como por exemplo, aquela com direcionamento de jato à superfície de saída, formaram-se trincas na ponta da ferramenta, o que gerou aumento significativo da rugosidade da peça ao longo do torneamento (MAGRI et al., 2018).

Kamrruzzaman e Dhar (2009) afirmam que ao direcionar o jato de fluido de corte com pressão, boa parte do calor gerado pode ser removido de forma drástica da área de corte. Este grau de resfriamento também possibilita que a ferramenta de corte remova maiores quantidades de material, ao melhorar, portanto, o ciclo de vida da ferramenta. Adicionalmente o jato de óleo com pressão ajuda a quebrar o cavaco e a removê-los da área de corte de forma mais eficiente. A combinação de calor reduzido na zona de corte com mais eficiente evacuação de cavaco prolonga a vida da ferramenta e torna as trocas de ferramentas mais previsíveis, uma vez que a ferramenta terá seu fim de vida natural e não causado por falha prematura em função de danos provenientes do calor excessivo ou lascas.

Estes mesmos autores investigaram a usinagem com jato de óleo sob alta pressão e o corte a seco em processo de torneamento de aço AISI 1060. Durante o experimento, variou-se a velocidade de corte, o avanço e testou-se dois tipos diferentes de insertos sem cobertura. Dentre os resultados deste trabalho, observou-se com a opção de refrigeração sob alta pressão (HPC) menor desgaste de flanco (Figura 2.7) em todos os avanços e velocidades de corte testadas quando comparado com o corte a seco. Ao se reduzir a temperatura na área de corte pelo eficiente resfriamento, consegue-se manter a cunha de corte por mais tempo sem deformações, o que melhora também a vida da ferramenta (KAMRRUZZAMAN e DHAR, 2009).

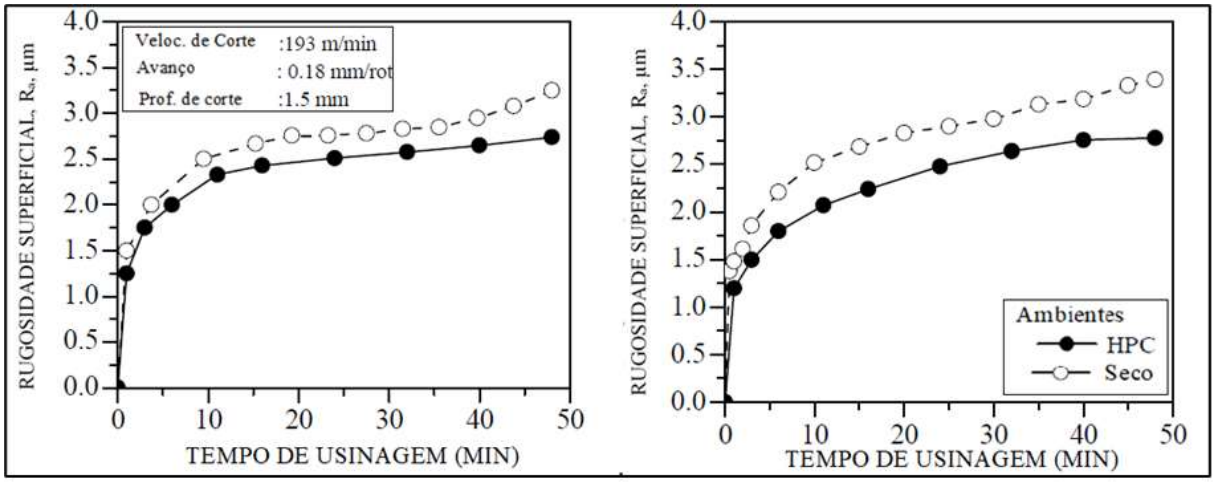
Os autores comentam que as forças principal e de avanço também foram menores com a refrigeração sob alta pressão, devido principalmente à melhor interação cavaco-ferramenta, em função da refrigeração mais efetiva (KAMRRUZZAMAN e DHAR, 2009).



(a) (b)

Figura 2.7 – Evolução do desgaste principal de flanco (VB) com insertos do tipo SNMG (a) e SNMM (b) sob as condições de corte a seco e sob refrigeração de alta pressão -HPC (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009).

Da mesma forma, com a utilização da HPC também se obteve melhores resultados em termos de rugosidade da peça, principalmente pela redução do calor e remoção de cavaco mais eficiente, pois a superfície da peça também é menos danificada pelos cavacos ou distorcida pelo calor gerado na zona de corte (Figura 2.8) (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009).



(a) (b)

Figura 2.8 – Evolução da rugosidade de superfície R_a com insertos do tipo SNMG (a) e SNMM (b) sob corte a seco e refrigeração de alta pressão -HPC (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009)

Sanchez et al. (2013) testaram diferentes métodos de aplicação do fluido de corte em operação de torneamento de aço de difícil usinabilidade (SAE EV-89), sob as mesmas condições de corte, ou seja, profundidade de usinagem de 0,5 mm, velocidade de corte (v_c) = 170 m/min e avanço (f) = 0,1 mm por volta, com ferramenta de metal duro, com cobertura tripla de carbonitreto de titânio (TiCN), alumina (Al_2O_3) e nitreto de titânio (TiN), de geometria triangular. Um primeiro grupo de testes foi realizado sob os seguintes métodos: convencional com fluido em abundância (solução com concentração de 5% de solução semissintética em água), pulverizado (mesma solução semissintética, com vazão de 1,12 l/min), MQCF (Quantidade Mínima de Fluido de Corte – utilizou a mesma solução semissintética com vazão de 2,78 x 10^{-5} l/min) e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante, este vegetal desenvolvido para esta técnica, aplicado sob vazão de 2,78 x 10^{-5} l/min). Todos os fluidos testados têm como característica comum a baixa pressão (de 0,05 MPa para o fluido convencional e 0,4 MPa para a pulverização, MQL e MQCL), necessária para estes tipos de aplicações.

No segundo grupo, foram testados diferentes direcionamentos do fluido de corte aplicado

sob alta pressão (3,0 MPa): aplicação direcionada sob a interface cavaco-ferramenta (denominado jato C/T), sob a superfície do cavaco, ou seja, entre o cavaco e a ferramenta (neste trabalho chamado de jato W/C), direcionamento do jato sob o contato entre a ferramenta e a peça, na zona de flanco da ferramenta (jato T/W). Após este segundo grupo, houve ainda a combinação de alguns métodos como o método convencional de aplicação de fluido de corte do primeiro grupo com o método do jato W/C e a aplicação simultânea dos três direcionamentos do jato de fluido de corte (W/C, C/T e T/W).

A Figura 2.9 ilustra os diferentes métodos de aplicação do fluido de corte com as correspondentes pressões e volume de cada aplicação. Para cada método de aplicação foi avaliada a vida da ferramenta (fim de vida determinado quando desgaste de flanco V_B atingia 0,3 mm), temperatura da ferramenta de corte, morfologia do cavaco formado, grau de recalque, força de corte, rugosidade de superfície e microestrutura de amostra usinada.

No primeiro grupo, o método convencional foi aquele em que a ferramenta de corte apresentou vida mais longa, ao passo que a menor vida de ferramenta foi observada com o método MQCF. Os métodos de pulverização e MQL obtiveram posições intermediárias em termos de vida de ferramenta, não sendo possível determinar estatisticamente qual destes dois métodos apresentou melhor vida de ferramenta. Tais resultados podem ser observados com a Figura 2.10. Sanchez et al. (2013) observaram que em cortes do primeiro grupo, ou seja, com baixa pressão, o volume de fluido de corte é muito importante (SANCHEZ et al., 2013).

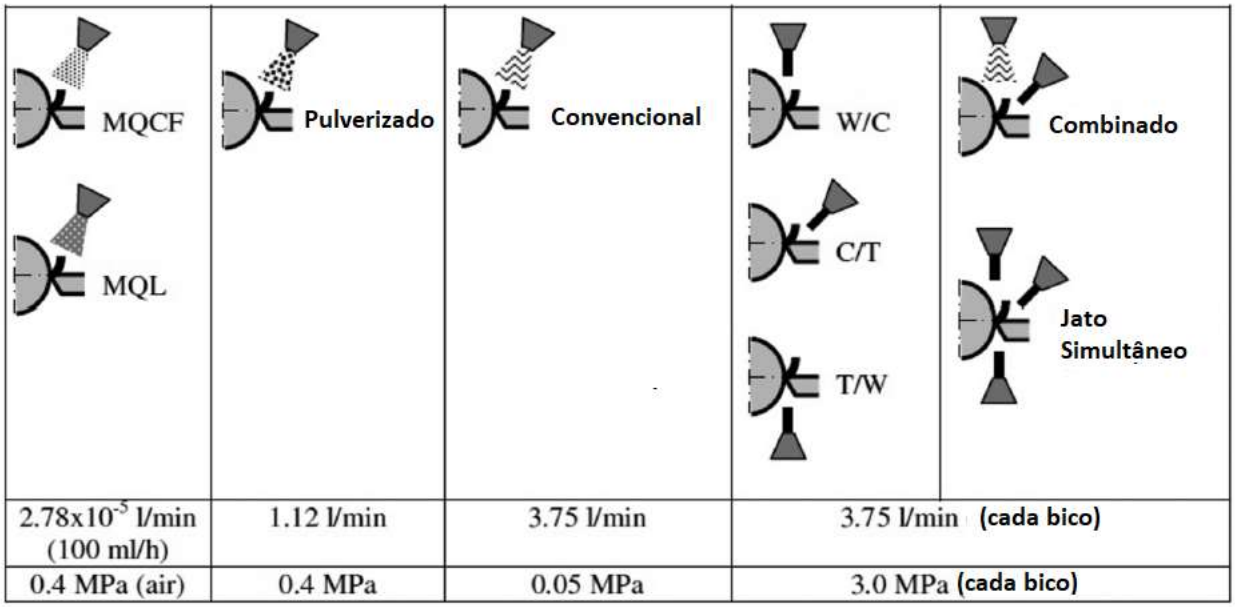


Figura 2.9 – Esquema dos métodos de aplicação com seus respectivos valores de vazão e pressão (SANCHEZ et al., 2013)

Já os métodos do grupo 2 apresentaram melhores resultados em termos de vida de ferramenta, muito provavelmente porque a temperatura influencia na vida da ferramenta e em corte contínuo o maior volume de fluido faz com que se obtenha melhores valores de vida da ferramenta e temperatura de corte. Dentro deste grupo, os melhores resultados em termos de vida de ferramenta foram obtidos com os métodos de jato simultâneo (3 bicos aplicando óleo em três posições diferentes) e combinado (dois bicos em duas direções diferentes simultaneamente), ou seja, mais um forte indício que o volume de fluido teve influência muito significativa na vida da ferramenta, uma vez que estes dois métodos utilizam o dobro e o triplo de fluido respectivamente. Desta forma, observa-se que entre a vazão e a pressão, a primeira foi mais importante para este trabalho (SANCHEZ et al., 2013).

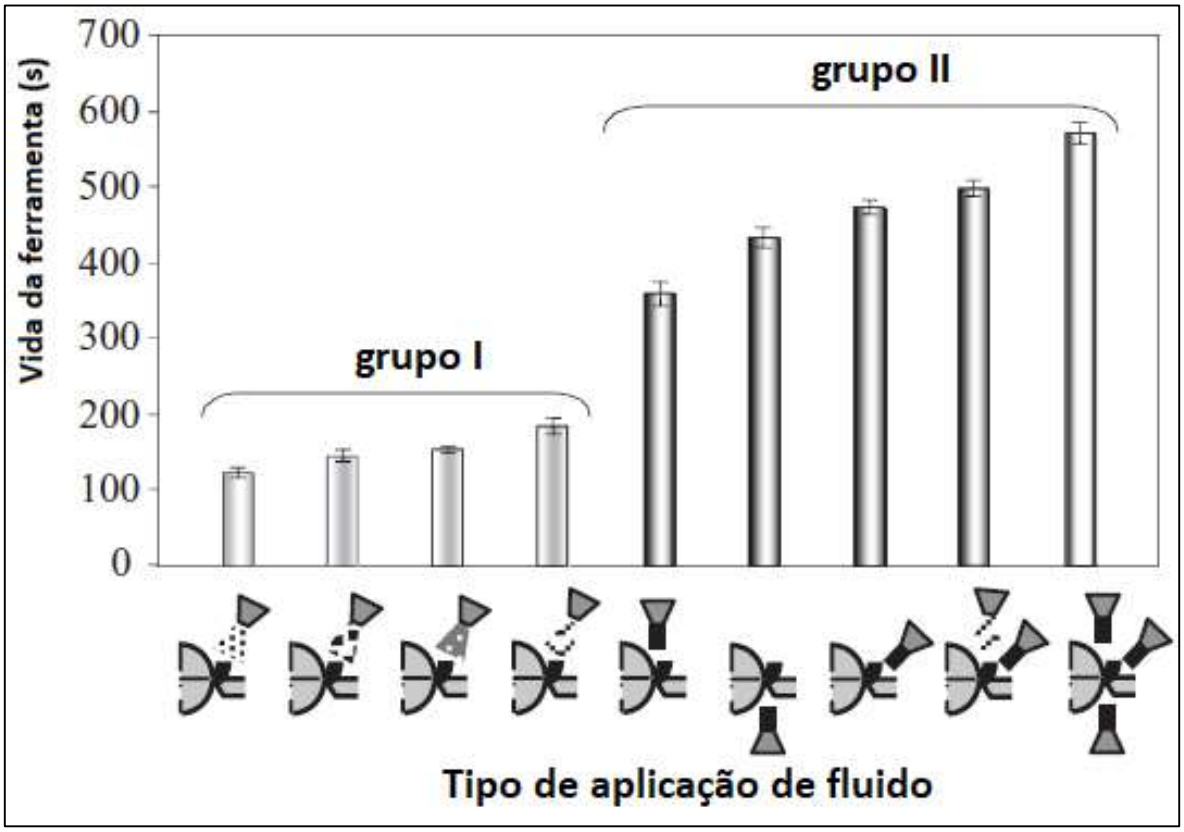


Figura 2.10 – Esquema dos métodos de aplicação da refrigeração com seus respectivos valores de vazão e pressão (SANCHEZ et al., 2013)

As temperaturas de corte observadas (Figura 2.11) foram também maiores nos cortes cujos volumes de fluido de corte eram menores, que é o caso do MQL. Apesar disso não foi o método que apresentou menor vida de ferramenta, o que demonstra que a lubrificação,

conforme Sanchez et al. (2013), tem importante papel nas condições tribológicas de usinagem em métodos de aplicação de fluido de corte de baixa pressão.

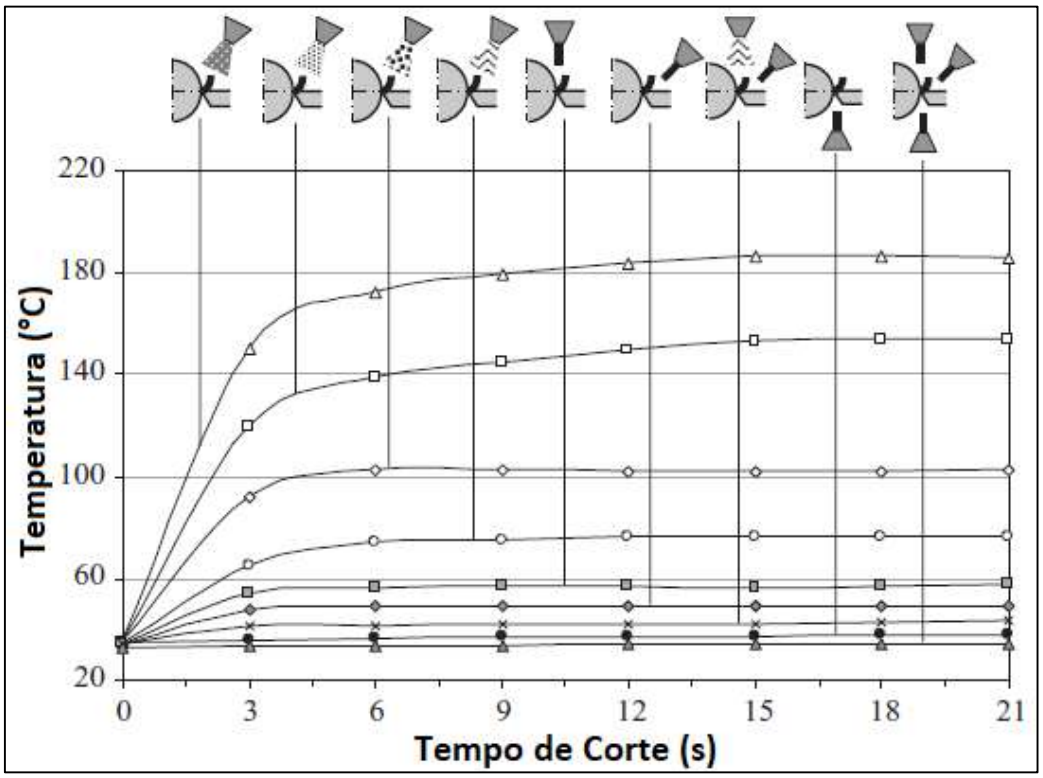


Figura 2.11 – Esquema dos métodos de aplicação da refrigeração com seus respectivos valores temperatura e tempo de corte (SANCHEZ et al., 2013)

2.2.2 **Corte a seco**

O corte a seco é uma das medidas adotadas para diminuir a utilização de fluidos de corte nos processos de corte e, com isso, auxiliar na redução de custos de usinagem e nos temas relacionados ao ambiente (KLOCKE E EISENBLATTER, 1997).

A usinagem a seco resolve os problemas expostos anteriormente, mas também elimina dos processos de corte a influência positiva dos fluidos de corte na usinagem, como maior vida da ferramenta, menor dilatação térmica da peça e, com isso, maior facilidade de obtenção de tolerâncias apertadas, maior estabilidade térmica da máquina-ferramenta, o que facilita a precisão geométrica e dimensional das peças etc. (KLOCKE et al., 1998).

Alguns efeitos positivos durante o corte a seco são a existência de menos trincas térmicas e melhora da vida da ferramenta sob algumas circunstâncias (SREEJITH E NGOI, 2000).

Técnicas diferentes também foram aplicadas para evitar o uso de fluido de corte nas operações de usinagem. Tais técnicas envolveram dissipação indireta de calor, ao melhorar propriedades de ferramentas de corte utilizando novas coberturas ou geometrias de ferramentas e levaram à necessidade de explorar materiais avançados de ferramentas, como ferramentas com cobertura de várias camadas com alta dureza e resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito, ferramentas de Nitreto de Boro Cúbico (também conhecido por CBN), Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN), Diamante Policristalino (PCD), cermet e ferramentas de cerâmicas (SHARIF et al., 2017).

A alteração do processo de trabalho da refrigeração em abundância para o corte a seco, requer ajustes em suas condições de usinagem. Em geral, para se aproximar a vida da ferramenta do corte a seco daquela obtida com o corte com fluido em abundância, primeiramente se reduz a velocidade de corte, isto pelo fato dela ser a variável que mais influencia a vida da ferramenta. Assim, para se manter o volume de cavaco removido na unidade de tempo, deve-se aumentar o avanço na mesma proporção da redução da velocidade de corte, ocorrendo assim, aproximadamente o mesmo com o calor gerado na unidade de tempo, porém com maior área da ferramenta para receber este calor, devido ao aumento do avanço. Com o aumento do avanço, causa-se automaticamente, a piora do acabamento superficial. Em operações de acabamento, recomenda-se aumentar o raio de ponta da ferramenta para manter a rugosidade da peça dentro da conformidade aceitável, como na condição anterior (DINIZ e MICARONI, 2002).

Diniz e Micaroni (2002) testaram a usinabilidade com fluido de corte em comparação com o corte a seco, em termos de acabamento superficial, volume de cavaco removido e esforços de corte (medição neste caso da corrente elétrica do motor), durante torneamento de aço ABNT 1045. Para os experimentos foram utilizadas duas ferramentas classe P15, de metal duro, com revestimento de Carboneto de Titânio (TiC), Alumina (Al_2O_3) e nitreto de Titânio (TiN), com diferentes raios de ponta (uma com r_ε=0,4 mm e outra com r_ε=0,8 mm). Também foram variadas as velocidades de corte no experimento (430 m/min e 540 m/min) e os avanços (0,1 mm/rotação e 0,14 mm/rotação). O fluido de corte utilizado foi solução com 6% de óleo sintético e água aplicados sob vazão de 4,2 l/min, ou seja, a recomendada para operações de torneamento leve. O fim de vida da ferramenta foi determinado, quando o desgaste de flanco atingisse V_B = 0,3 mm.

Os resultados dos testes para raio de ponta com r_ε=0,4 mm demostraram, conforme Figura 2.12, que o volume de cavaco removido para o fim de vida da ferramenta foi maior na condição

com fluido de corte em todas as variáveis. Para menores taxas de avanço, a proporção do volume de cavaco removido da condição sem fluido sobre a condição com fluido (neste trabalho denominado Tcwf / Tcf) foi de 0,35 para a condição com velocidade de corte 430 m/min e 0,55 para a condição com velocidade de corte 540 m/min, ao passo que para maiores taxas de avanço, esta diferença foi entre as duas condições foi muito menor (Aproximadamente 0,70) para as duas velocidades de corte. Observou-se também que para avanços maiores, maiores volumes de cavaco foram removidos para a mesma vida de ferramenta.

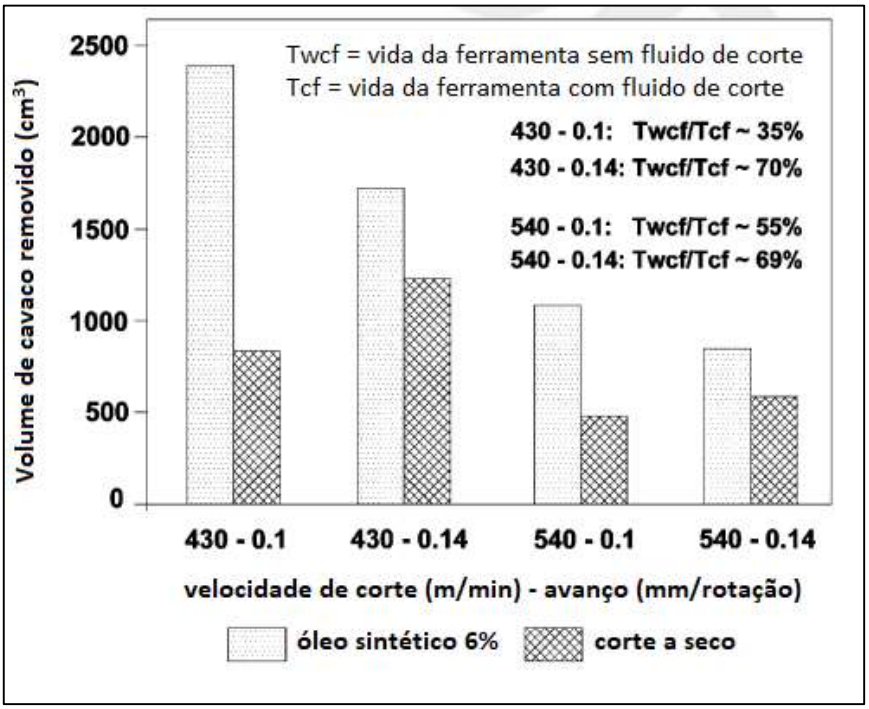


Figura 2.12 – Vida da ferramenta em volume de cavaco removido para testes com r_{ε}=0,4 mm (DINIZ; MICARONI, 2001)

Tais fatos ocorreram porque, para maiores taxas de avanço o calor gerado aumenta, mas também aumenta a área da ferramenta em que o calor será dissipado. Entretanto, quando a taxa de avanço aumenta, a forca específica de corte diminui (força por unidade de área de seção transversal do cavaco – ks). Desta forma, o calor gerado não cresceu na mesma proporção que o crescimento do avanço e, como a área da ferramenta que recebe este calor cresceu na mesma proporção do avanço, a temperatura da ferramenta deve ter diminuído, o que facilitou o corte para a condição sem fluido de corte. Além disso, o aumento do avanço gera o aumento do calor gerado pelo tempo, mas também diminui o tempo para cortar um determinado volume de cavaco. Como o primeiro aumenta menos que a diminuição do tempo de corte (devido à redução da força específica de corte *ks*), o total do calor gerado para um certo volume de cavaco

removido deve ter diminuído. Em resumo, quando o avanço é maior, a dissipação de calor é mais fácil, o que faz com que o resfriamento proporcionado pelo fluido de corte não seja tão necessário.

Diniz e Micaroni (2001) também testaram a usinagem com ferramenta de raio de ponta de 0,8 mm, para o avanço de 0,14 mm/volta, e para as duas velocidades de corte anteriormente utilizadas. Em termos de vida de ferramenta, e ao se comparar com os testes realizados anteriormente com a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm, observou-se maior volume de cavaco removido para a ferramenta com maior raio de ponta. Também foi possível observar, tal qual ocorreu com os primeiros testes, que a condição com fluido foi melhor que a condição a seco, em termos de volume de cavaco removido para o critério selecionado como fim de vida de ferramenta (V_B = 0,3 mm).

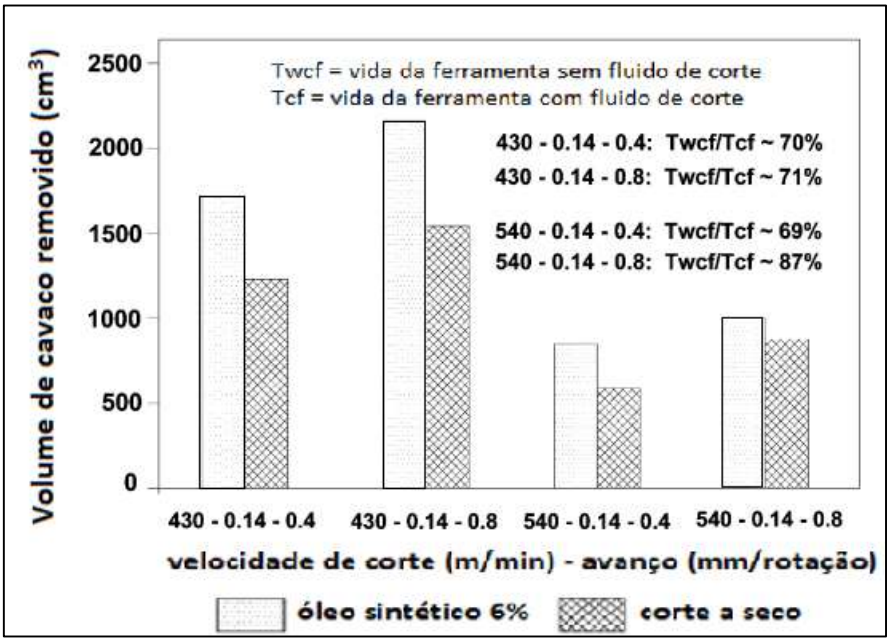


Figura 2.13 – Vida da ferramenta em termos de volume de cavaco removido para testes com raio de ponta r_{ε}=0,4 mm e r_{ε}=0,8 mm e f = 0,14 / rotação (DINIZ; MICARONI, 2001)

A proporção da vida de ferramenta obtida entre a condição a seco e a condição com fluido, tal qual como ocorreu com o raio de ponta de 0,4 mm, foi próxima a 70% também para o raio de ponta de 0,8 mm, com a velocidade de corte de 430 m/min . Entretanto, para a velocidade de corte de 540 m/min, esta proporção foi de 87%, ou seja, o volume de cavaco removido pelo torneamento a seco foi mais próximo do torneamento com fluido de corte. A razão para isso, é que além do maior valor de avanço, o maior raio de ponta da ferramenta (e consequentemente maior comprimento de contato entre a aresta da ferramenta e peça) ajuda a dissipar o calor.

Ao se comparar as Figuras 2.12 e 2.13 observa-se que a condição com V_C = 430 m/min, f = 0,14 mm/volta, r_ε=0,8 mm e corte a seco da Figura 2.13 obteve 30% melhor vida de ferramenta que sob a condição v_c = 540 m/min, f = 0,1 mm/volta, r_ε=0,4 mm e corte com fluido de corte da Figura 2.12. Isso significa, que ao se retirar o fluido de corte da operação de torneamento, deve-se também considerar aumentar o avanço, o raio de ponta e diminuir a velocidade de corte, se o critério de fim de vida de ferramenta for mais importante para a usinagem em questão (DINIZ; MICARONI, 2001).

2.2.3 **Mínima quantidade de fluido de corte (MQF)**

A quantidade mínima de fluido, em inglês *Minimun Quantity of Fluid* (MQF) é uma alternativa ao corte com fluido em abundância, em que poucas gotas de óleos são aplicadas na área de corte sob a forma de partículas mistas. Em outras palavras, uma vazão bem pequena de óleo (de 30 a 100 ml/h) é pulverizada num jato de ar comprimido e injetada na direção da região de corte. A bem direcionada penetração destas partículas reduz o atrito na interface de corte, portanto reduz a temperatura, rugosidade da peça e o custo da operação (DHAR et al. 2008).

Diniz et al. (2014), afirmam que as limitações do corte a seco podem ser diminuídas com a técnica de mínima quantidade de fluido. O sistema MQF pode ser aplicado em situações em que, por razões ambientais se deseja evitar a utilização de fluido em abundância e que a operação de corte a seco não possibilita o atingimento de vida da ferramenta longa o suficiente (DHAR et al. 2008).

A capacidade de lubrificação tem uma forte ligação com a viscosidade do óleo de corte utilizado. Teoricamente falando, óleos de corte mais viscosos deveriam ter melhor desempenho no sistema MQF. No entanto, os óleos de corte mais viscosos têm dificuldade de penetrar na zona de corte (interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça). Isso significa que somente com o nível adequado da viscosidade dos fluidos de corte se consegue alcançar a zona de corte e lubrificar ao mesmo tempo (SHARIF et al., 2017).

Nesta técnica a função de lubrificação se dá pelo óleo pulverizado e a da refrigeração principalmente pelo ar comprimido (TEIXEIRA FILHO, 2006). Em relação à aplicação convencional do fluido (abundante), Heisel et al. (1998), citam algumas vantagens:

- A quantidade de fluido utilizada é bem menor;
- Redução de custos de manutenção e descarte do fluido;

- Podem ser evitados materiais de filtragem e reciclagens da manutenção dos lubrificantes;

- As peças ficam quase secas, eliminando uma operação de lavagem subsequente;

- O baixo conteúdo de óleo que permanece nos cavacos não justifica sua recuperação;

- A aplicação de biocidas e preservativos pode ser eliminada, porque apenas a quantidade de fluido que será usada em um turno de trabalho deve ser colocada no reservatório do sistema de quantidade mínima.

Ao se comparar com a refrigeração abundante, esta técnica não apresenta as perdas, emissões e prejuízo ao meio ambiente, além de outras vantagens substanciais (CSELLE; 2001):

- Efeitos de lubrificação melhores que com emulsão;

- Choque térmico evitado;

- O aerossol só fica particulado na alimentação em circuito fechado e é absorvido por exaustores;

Diniz et al. (2014) sugerem que apesar de o tema usinagem com MQF despertar o interesse de grupos de pesquisas de diversas partes do mundo, há ainda algumas desvantagens desta modalidade que devem ser discutidas mais apropriadamente para sua consolidação:

- Poluição ambiental: apesar de muitas vezes o pretexto da utilização desta técnica ser por motivos ambientais, a pulverização levanta no ambiente atmosférico local muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais, antes da implantação do sistema. O mínimo que se exige é uma máquina totalmente fechada com guardas de proteção e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas.

-Consumo: A aplicação do fluido por névoa é considerada sem retorno, isto é, com perda total do fluido. Mesmo com baixos níveis de vazão (<50 ml/ hora), o consumo de fluido deve ser considerado. Tais casos proporcionariam ainda maior consumo que se comparados com óleo sintético em solução normal com concentração de 5%, uma vez que este último é sempre reaproveitado e dura na máquina por períodos de 6 meses normalmente. Então, para a aplicação de MQF é também desejável se ter, no sistema de exaustão dos gases da máquina, um condensador que faça com que o óleo em suspensão retorne para seu tanque.

- Ruido: Na pulverização ainda é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitente durante todo o processo, que gera muito ruído, normalmente com potência superior àquelas máximas permitidas para o ouvido humano (limite de 80 decibéis, para exposição de até 8 horas).

Sharif et al. (2017) afirmam que a baixa capacidade de resfriamento do MQF limita sua efetividade em cortar materiais de difícil usinabilidade, em que a geração de calor é o maior

obstáculo, como é o caso de ligas de níquel ou ligas de titânio.

O sistema MQF é composto de compressor, regulador de pressão, rotômetro, dosador e bico aspersor. Ar e óleo são conduzidos separadamente até o bico e podem ser ajustados independentemente. O posicionamento do bico aspersor durante a usinagem pode afetar significativamente a capacidade de refrigeração e lubrificação, tendo como consequência o desgaste prematuro da ferramenta de corte (JUNIOR et al., 2001).

Em determinados centros de usinagem, em que constantemente se usam ferramentas de diferentes dimensões, quando se trabalha com MQF alimentada externamente à ferramenta, deve-se regular o bico aspersor a cada troca. Algumas máquinas adaptadas ao uso externo de MQF, possuem dispositivo elétrico de posicionamento dos ejetores, assim como a cada ferramenta trocada, os bicos por meio de giro, se deslocam do raio do braço do trocador de ferramenta, e, quando terminada a troca, os mesmos se posicionam de maneira angular se ajustando ao comprimento da nova ferramenta (DÖRR E SAHM, 2000).

Segundo Heisel et al. (1998), existem três tipos diferentes de sistemas MQF. No primeiro tipo estão os sistemas de pulverização de baixa pressão, em que o fluido de corte aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa na forma de uma mistura. Esses sistemas se diferenciam por um fluxo volumétrico de fluido de aproximadamente 0,5 a 10 litros por hora. Eles são usados principalmente para a refrigeração com emulsões, produzem uma atomização notável e somente podem ser dosados grosseiramente.

O segundo tipo usa bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante para a superfície ativa, sem utilização de ar comprimido. As taxas de fluxo são ajustáveis numa faixa entre 0,1 e 1 ml por ciclo, com até 260 ciclos por minuto. Estes sistemas são utilizados geralmente em processos intermitentes de corte, como fresamento, por exemplo.

O terceiro e mais usado tipo de sistema de mínima quantidade de refrigeração, é o de pressão, em que o fluido de corte é bombeado para o bocal através de uma tubulação de suprimento em separado. Ali ele é misturado com o ar comprimido fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente. Este tipo de sistema é um importante método, porque possibilita a combinação da funcionalidade da refrigeração com um consumo de óleo extremamente baixo, na faixa de 10 a 100 ml/h. A Figura 2.14 mostra um esquema de um sistema MQF com o princípio de pressão.

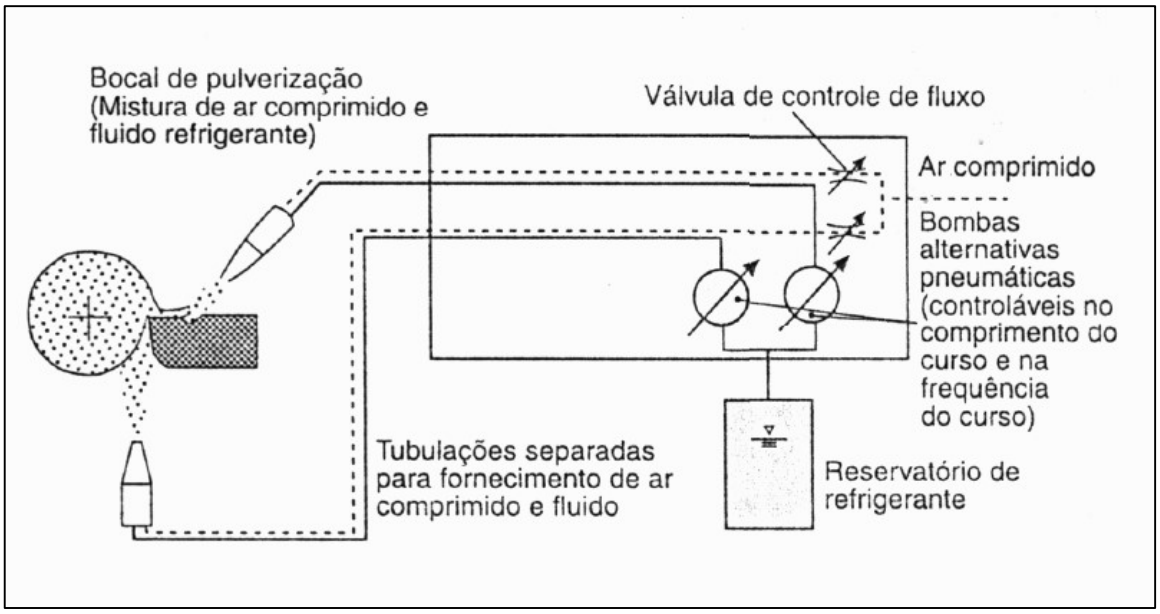


Figura **2.14** – Diagrama esquemático de um sistema de MQF com o princípio de pressão (HEISEL et al., 1998).

Nos casos ideais, os dispositivos são integrados aos comandos das máquinas, o que permite o uso da concentração correta de óleo no fluxo de ar para a respectiva usinagem. A alimentação pode ser interrompida para os tempos mortos, o que leva a um menor consumo de ar comprimido e de óleo. Nesses sistemas são usados geralmente fluidos ecologicamente corretos, a exemplo do álcool graxo, éster ou óleos naturais. Esses meios especiais devem evitar riscos para a saúde, principalmente para os pulmões, por causa dos aerossóis (DÖRR E SAHM, 2000).

Segundo Novaski e Dörr (1999) os sistemas de MQF podem ser divididos em 2 grupos: injeção do fluido de corte externo, por meio de jatos separados, e interno, através de orifícios na ferramenta. Os sistemas externos de mínima lubrificação são vantajosos porque permitem a utilização em máquinas existentes, com baixo custo e esforço. Um problema consiste na adaptação da posição do injetor após a troca automática da ferramenta. A Figura 2.15 mostra os grupos de sistemas MQF disponíveis comercialmente.

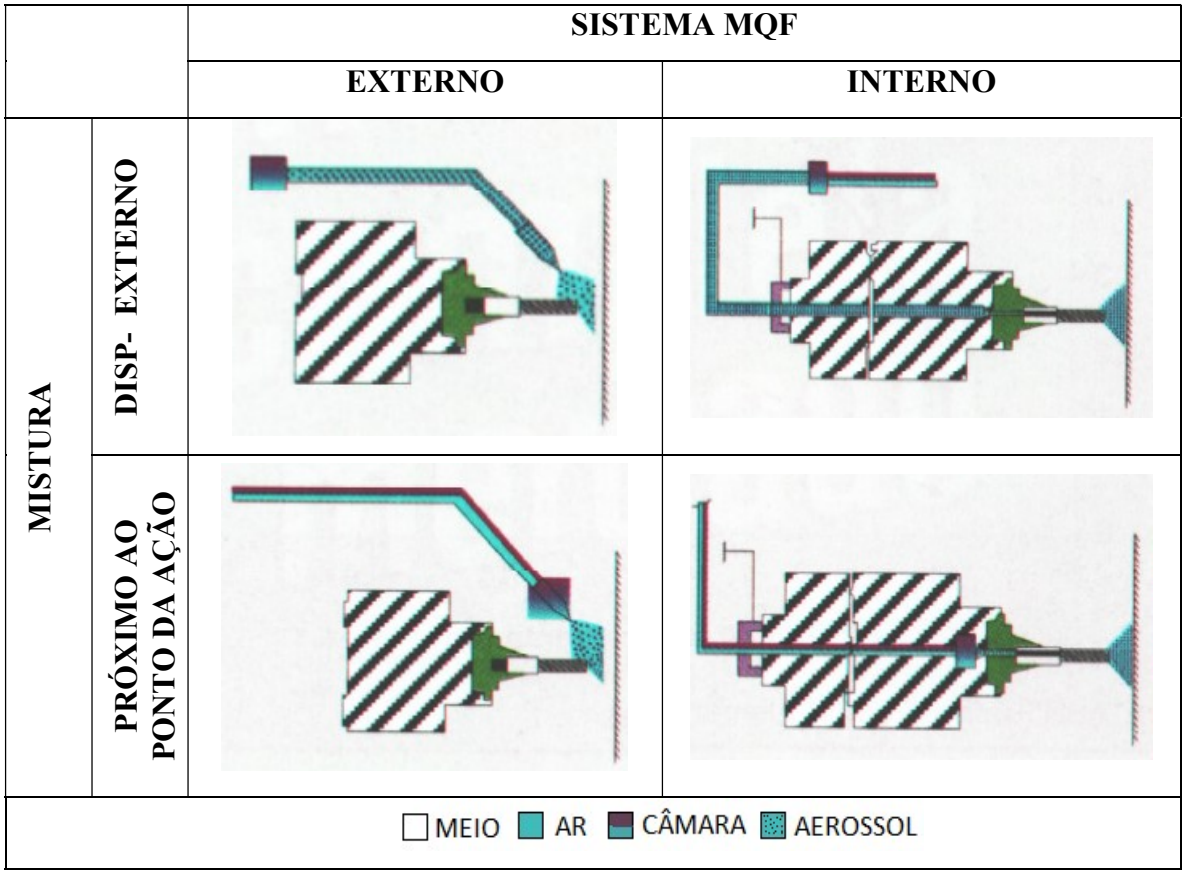


Figura 2.15 – Conceitos de sistemas de MQF (Novaski e Dörr, 1999).

Scandiffio (2000) pesquisou a usinabilidade de aço SAE 1045, durante operação de torneamento, sob diferentes condições de lubri-refrigeração, a saber: corte a seco, corte com fluido (emulsão de óleo sintético, com concentração de 5%) e mínima quantidade de fluido com ar comprimido (óleo integral aplicado com ar sob vazão de 10ml/h). Para o teste foram consideradas 3 diferentes velocidades de corte (360, 445 e 530 m/min), avanço (f) de 0,15 mm/volta e profundidade de usinagem (a_p) 0,7 mm. O fim de vida da ferramenta foi determinado quando o desgaste de flanco alcançasse V_B=0,3 mm. Em geral, neste estudo, a condição MQF (mínima quantidade de fluido) obteve os piores resultados em termos de vida de ferramenta conforme detalhamento a seguir.

De acordo com os resultados demonstrados na Figura 2.16, a condição com emulsão de óleo em água (chamada no seu trabalho de solúvel) apresentou menor desgaste de ferramenta sob a velocidade de corte de 360 m/min (menor do teste) e 530 m/min (maior do teste), seguido do corte a seco e do MQF, que apresentou os piores resultados. A mistura de ar e óleo obteve o pior resultado pela dificuldade de penetração do óleo na região de contato da ferramenta com a peça, devido ao deslocamento de ar em torno da mesma durante o processo de torneamento. Esta condição, além de não refrigerar (pois a capacidade de refrigeração é muito baixa), também

não foi capaz de lubrificar, pois o fluxo da mistura colocado em sentido contrário à rotação da peça, não consegue atingir a região de contato da superfície de folga da ferramenta com a peça, o que causou instabilidade térmica na ferramenta, que por sua vez, incentivou o desgaste.

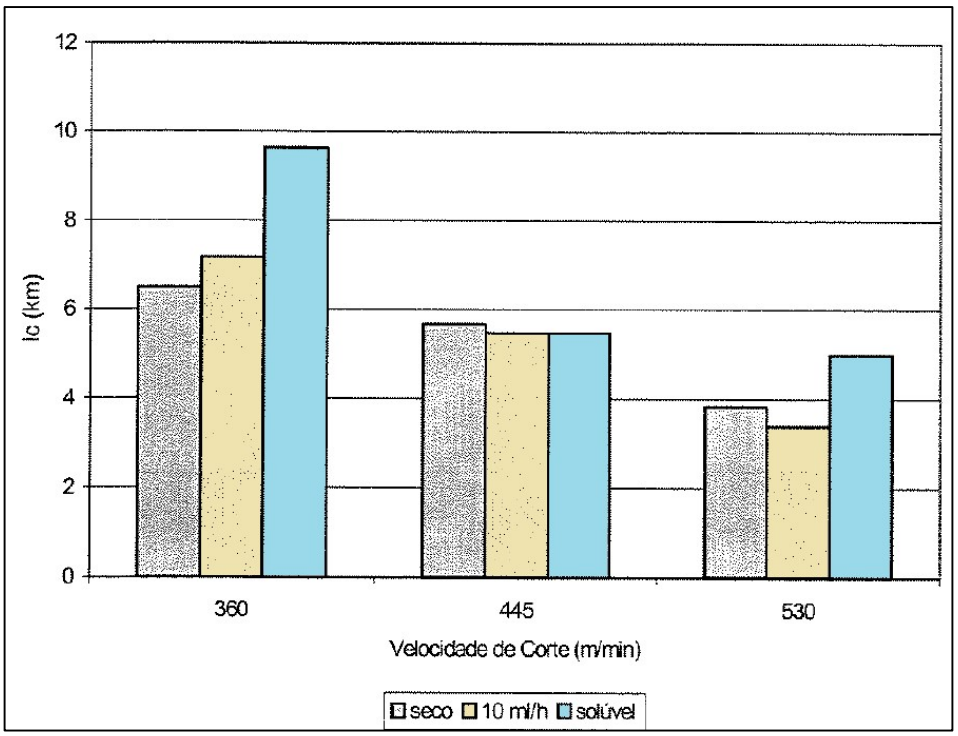


Figura 2.16 – Vida da Ferramenta em comprimento de corte para as diferentes condições de refrigeração /lubrificação para as três velocidades de corte ensaiadas (SCANDIFIO, 2000)

A condição com emulsão atingiu o menor desgaste e, portanto, maior comprimento usinado para o critério de fim de vida de ferramenta, pois para operações de corte contínuo a refrigeração tem papel bastante importante, e esta condição com fluido tem alta capacidade de refrigeração. Sob a velocidade de corte intermediária do teste, Scandifio (2000) observou que a vida da ferramenta foi igual sob as três condições de lubrificação / refrigeração testadas. Provavelmente este fato deve ter ocorrido devido a uma instabilidade térmica da ferramenta utilizada no corte com emulsão, comprometendo seu desempenho e igualando-se com as outras condições, que não tem poder de refrigeração. Outra hipótese para se explicar esta ocorrência é que, nas condições a seco e MQF a temperatura da região de corte era mais elevada, provocando o amolecimento do material a ser torneado, o que ocasionou um desgaste reduzido da ferramenta, diferentemente do que ocorre na usinagem com emulsão. Não foi possível, porém explicar, porque estes fatores ocorreram em velocidade intermediária.

Miranda (2003), por sua vez, realizou testes de furação de aço ABNT 4340, com broca

de metal duro P40, cobertura TiAlN, diâmetro de 10mm e diferentes meios de aplicação de fluido de corte, a saber, lubrificação MQL com vazão de 20ml/h em ar comprimido à pressão de 450 kPa, fluido de corte emulsionável (proporção 1:20) e condição a seco. Este autor mediu a rugosidade dos furos, a vida da ferramenta em termos de volume de cavaco gerado após ferramenta atingir determinado desgaste de flanco e a potência corte. Adicionalmente foram controlados a cilindricidade e o diâmetro do furo em seus 32 mm de profundidade.

O autor concluiu que a condição de MQL apresentou melhor desempenho em relação à força de avanço, potência, rugosidade e vida da ferramenta em relação à furação com fluido em abundância e corte a seco (esta que apresentou piores resultados). As variações dimensionais se mantiveram dentro das tolerâncias desejáveis do processo (índices de tolerância IT10 e IT11 dentro da norma ISO).

Ao furar materiais dúcteis, como o alumínio e o magnésio, Davim et al (2016) testaram três condições de lubrificação/ refrigeração (emulsão de óleo, corte a seco e MQL) e observaram que o MQL apresentou forças de corte estáveis, menores temperaturas na zona de corte que o corte a seco e maior temperatura que a emulsão. Também foi observada menor adesão de material da peça na ferramenta (formação de aresta postiça de corte) no método com quantidade mínima de fluido, principalmente em função do efeito lubrificante gerado por este método.

Pervaiz et al. (2013) estudaram três condições de lubrificação /refrigeração ao tornear de liga de titânio Ti6Al4V com insertos de cermet: emulsão em óleo, corte a seco, e mínima quantidade de fluido (óleo vegetal) em fluxo de ar comprimido em baixa temperatura (entre 0 e -4°C), com fluxo de 4,6 ml/h. Apesar dos insertos não terem obtido bom desempenho ao usinar este tipo de material, foi observado durante os experimentos, que a técnica MQL com ar comprimido frio apresentou melhores resultados em termos de desgaste em todos os avanços e velocidades de cortes testadas em comparação com o corte a seco.

Entretanto, a técnica que usou emulsão abundante de óleo apresentou melhores resultados em comparação à técnica MQL com ar comprimido frio. Normalmente o uso do MQL não é adequado à liga de titânio, pois o lubrificante se evapora rapidamente em função das altas temperaturas geradas na área de corte. Neste estudo, a técnica MQL apresentou melhores resultados pela utilização do ar em baixas temperaturas, o que demonstrou potencial para este método substituir futuramente a emulsão em óleo. Observou-se também com este trabalho que as temperaturas na zona de corte durante a usinagem com MQL foram menores em 26,6%, 17,9% e 17,5% em comparação com o corte a seco nas velocidades de corte de 90, 120 e 150 m/min respectivamente (PERVAIZ et al., 2013).

Viswanathan et al. (2018) pesquisaram torneamento de liga de magnésio com ferramenta de metal duro, sem revestimento, sob corte a seco e MQL e analisou os resultados usando a técnica Taguchi e método de Análise Relacional de Gray. De ambas as análises estatísticas melhores resultados foram obtidos para MQL.

Em outro ponto mais a frente neste trabalho vai se analisar o uso do MQF em operações de fresamento.

2.2.4 **Usinagem criogênica**

O resfriamento criogênico é outra alternativa de técnica de resfriamento sustentável. No resfriamento criogênico, o nitrogênio líquido (LN2) em -196°C, dióxido de carbono (CO2) ou gelo seco a -78,5°C são normalmente usados como meio refrigerante no processo. Esses refrigerantes facilmente evaporam para a atmosfera sem quaisquer efeitos nocivos (SULTANA et al., 2019

Neste método, um gás, que pode ser hélio, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, néon ou dióxido de carbono é injetado na zona de corte. Nitrogênio e dióxido de carbono são os preferidos entre estes gases, porém o uso do gás dióxido de carbono causa certas dificuldades, pelo fato de ser gelo seco em estado sólido, difícil de controlar e mais pesado que o ar (HONG SY, 2001 apud YILDIRIN et al. 2020).

O nitrogênio líquido mais frequentemente utilizado na usinagem criogênica é limpo para o meio ambiente, não tóxico e seguro. Assim não agride o meio ambiente e, ao mesmo tempo, não é nocivo à saúde do operador. Ao usinar materiais mais duros, a usinagem criogênica normalmente oferece melhores vida de ferramenta e acabamento superficial em comparação à usinagem convencional com emulsão de óleo e alternativas existentes de resfriamento (HONG SY; DING, 2001 apud YILDIRIN et al. 2020).

Na técnica criogênica ocorre, além da diminuição da temperatura, alterações nas propriedades da peça e ferramenta de corte. Observa-se que devido à redução da temperatura, há aumento na resistência e dureza do material a ser usinado, o que provoca consequentemente o aumento de sua fragilidade (KAKINUMA et al. apud SHARIF et al., 2017).

Outrossim, em virtude do resfriamento, a dureza da ferramenta também aumenta o que provoca o aumento de sua vida (YILDIRIN et al., 2020). Por outro lado, o alto custo do nitrogênio líquido comparado a outro meio lubrificante, o fato que este fluido não retorna para

o tanque para ser reutilizado e problemas com tolerâncias dimensionais do material usinado têm trazido questionamentos a esta técnica, pois o uso abundante de nitrogênio líquido (por exemplo), reduz a temperatura não somente na zona de corte, mas também no restante da peça, bem como da ferramenta. Tais reduções podem levar a erro de cálculo e consequente erros de tolerâncias dimensionais (T. LU; JAWAHIR JR, 2013). Além disso, este método requer equipamentos especiais, com tamanho significante ao lado da máquina ferramenta (VICENTIN e SANCHEZ, 2009) A Tabela 2.2 resume as vantagens e desvantagens da técnica criogênica:

Tabela 2.2 – Vantagens e Desvantagens da Usinagem Criogênica (T. LU; JAWAHIR JR, 2013)

	Vantagens	**Desvantagens Potenciais**
Custo	Para altas velocidades de corte e maior vida da ferramenta	Alto custo
Qualidade do Produto	Menor rugosidade de superfície	Precisão dimensional baixa
Meio Ambiente e Sociedade	Operação sustentável e limpa	Ameaça de congelamento

A usinagem criogênica e a usinagem com a mínima quantidade de fluido (MQL) tem melhorado a usinabilidade do aço em certa medida sob condições normais de corte. Também se tem reportado que, embora o índice de usinabilidade do aço tenha melhorado, esta prática tem uso limitado em escala industrial devido ao alto custo do nitrogênio e acentuado desgaste de entalhe sob atmosfera rica de nitrogênio. (KAMRRUZZAMAN E DHAR, 2009). Outra importante limitação é que esta técnica é melhor para resfriamento, mas não adequada para lubrificação (SULTANA et al., 2019).

Entretanto, o resfriamento criogênico tem-se mostrado recentemente eficaz, que propicia ambiente limpo de trabalho, e isto fez esta técnica popular, de forma a ser aplicada em determinados ramos da indústria, como por exemplo na usinagem de ligas de titânio de motores de avião (SULTANA et al., 2019).

Pušavec e Kopač (2011) elaboraram holisticamente uma comparação em termos de sustentabilidade e impactos ao meio ambiente, entre a usinagem criogênica e a usinagem convencional com emulsão de óleo. O estudo avaliou, pelo período de um ano, aspectos sustentáveis de ambos os tipos de usinagem como acidificação, resíduos sólidos, emissão de gás de efeito estufa, consumo de água, uso da terra e uso da energia. O estudo revelou que,

enquanto a usinagem convencional gera preocupações sob os aspectos de acidificação, uso de água, emissão de gás de efeito estufa e geração de resíduos sólidos, a usinagem criogênica apresenta problema apenas em relação ao alto consumo de energia, o que também torna este método bastante custoso. Gupta et al. (2023) cita ainda que a criogenia mantém e até melhora as propriedades do material da peça, o que evita danos metalúrgicos à superfície usinada, que é prioritário quando se usina ligas que vão ser utilizadas em situações crítica.

Dacas et al (2018) realizaram testes de torneamento de aço inoxidável martensítico AISI 440C com inserto de metal duro com cobertura TiCN+Al2O3+TiN, e compararam três modalidades de refrigeração / lubrificação: usinagem a seco, usinagem com emulsão de óleo semissintético (proporção 20 litros de água para 1 de óleo) e usinagem criogênica com fluxo contínuo de nitrogênio na pressão de 1 bar.

Foram medidas, durante os ensaios, vida da ferramenta em termos de desgaste de flanco e rugosidade. Como resultados, observaram que o método criogênico foi o que apresentou menor desgaste da ferramenta, pois a refrigeração proporcionada proporcionou extração eficiente do calor da zona de corte, conforme observado na Figura 2.17.

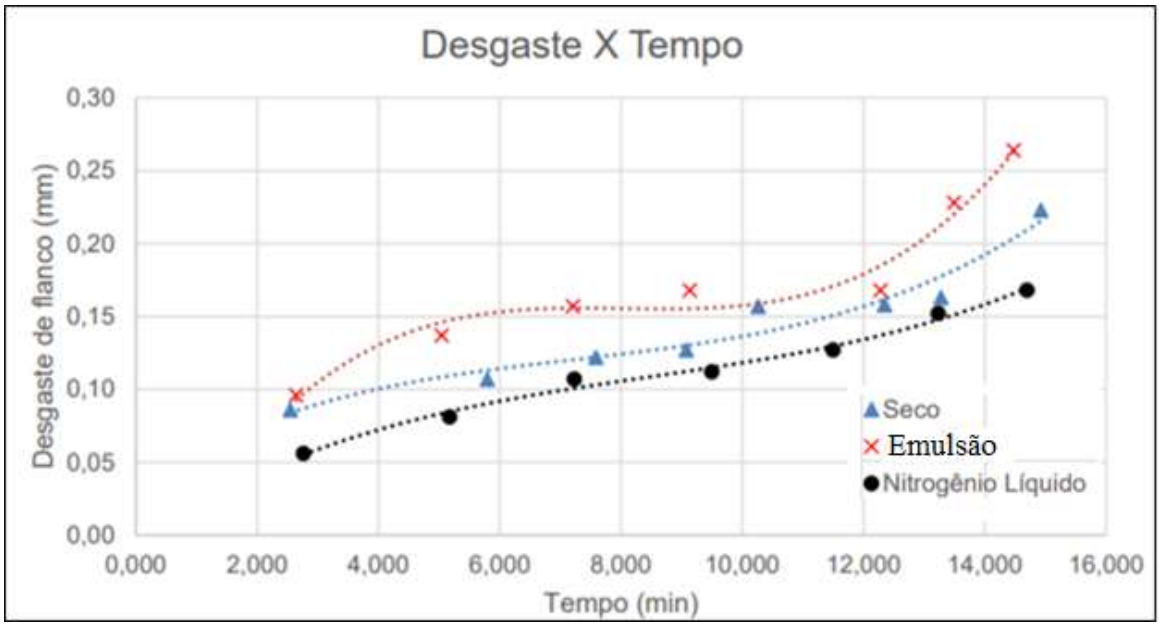


Figura 2.17 – Desgaste da ferramenta em função do tempo (DACAS et al., 2018)

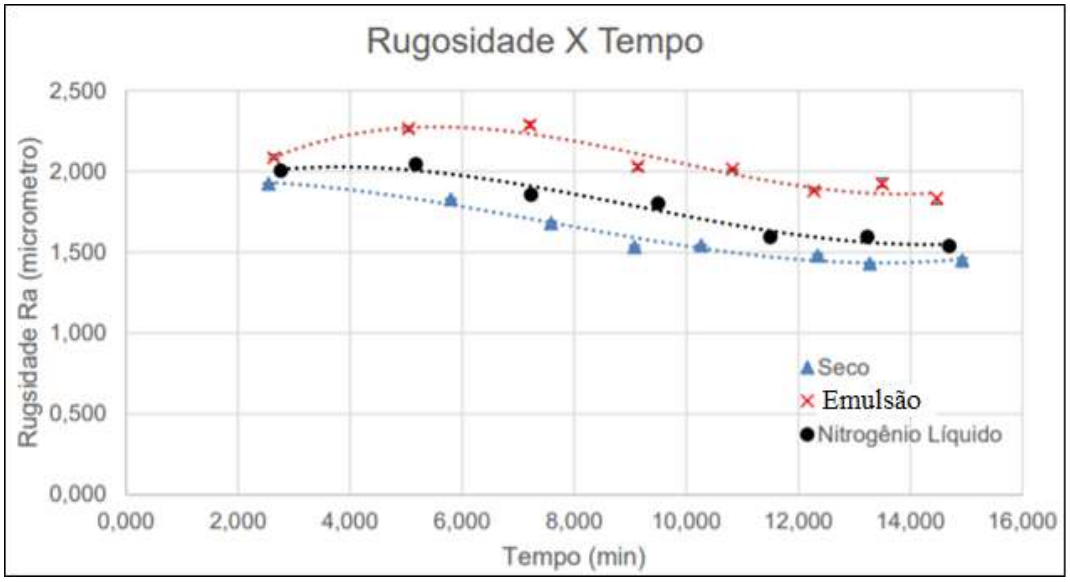


Figura 2.18 – Rugosidade da peça ao longo do tempo de usinagem (DACAS et al., 2018)

À medida que o desgaste e tempo de corte cresciam, os valores de rugosidade decresciam, conforme mostrado na Figura 2.18, resultado oposto ao normalmente esperado, já que ferramentas desgastadas tendem proporcionar pior acabamento. Isso ocorreu provavelmente pelo atrito inicial gerado na remoção dos cavacos com os primeiros passes, e ao arredondamento da aresta de corte, que tende ao alisamento do material usinado AISI 440C, pois uma parte da aresta acaba por conformar o material e isso reduz a rugosidade. O corte a seco foi o que apresentou a melhor rugosidade. Isso pode ter relação com o maior arredondamento e alisamento da aresta de corte nesta condição. Já o corte com refrigeração criogênica ficou em posição intermediária, pois acredita-se que a baixa temperatura do nitrogênio líquido confere uma estabilização térmica do corte, e isso, de certa forma, pode ter contribuído com uma maior fragilização do cavaco a cada ciclo de usinagem. A fragilização tem relação com características metalúrgicas do material AISI 440C (DACAS et al., 2018).

SU et al., 2007 (SHARIF et al., 2017) realizaram experimentos no fresamento da superliga Inconel 718. O estudo examinou diferentes condições de lubrificação e refrigeração, como corte a seco, quantidade mínima de fluido e mínima quantidade de fluido com ar frio (CAMQL) em termos de acabamento superficial e mecanismo de desgaste da ferramenta. Como resultado, os autores observaram que a condição CAMQL apresentou vida de ferramenta 124% mais longa e menor rugosidade em relação à condição de corte a seco, pior resultado do teste.

Venugopal et al. (2007) realizaram testes em torneamento de barras de ligas de titânio Ti-6Al-4V, com inserto de metal duro sem cobertura, sob velocidades de corte de 70-100 m/min e observaram menor desgaste da ferramenta durante a usinagem criogênica em comparação com

a usinagem a seco e a usinagem com emulsão de óleo. Em relação à usinagem a seco (modalidade que apresentou pior resultado), a usinagem criogênica apresentou 77% menos desgaste. Os menores desgastes foram observados na seguinte ordem: usinagem criogênica, usinagem com emulsão de óleo e usinagem a seco. A explicação dos resultados obtidos consiste em que durante a usinagem criogênica há também a redução de fenômenos de adesão, dissolução e difusão em função do melhor controle da temperatura na zona de corte.

Pereira et al. (2015) estudaram o fresamento da liga INCONEL 718, com fresa de topo com ponta esférica, em termos de vida da ferramenta (neste teste quando desgaste de flanco atinge 0,2 mm) sob diferentes condições de lubrificação e refrigeração. Uma destas condições utilizava (usando para isto um bico próprio para pulverização - Figura 2.24) uma condição híbrida ao combinar o método de lubrificação de mínima quantidade de fluido (MQL) com método criogênico de refrigeração, neste caso com o gás carbônico (CO_2). Além disso testaram também a usinagem a seco, usinagem criogênica pura com gás carbônico, mínima quantidade de fluido e emulsão de óleo em água.

Foram inicialmente desenvolvidos dois adaptadores diferentes na forma de injetar o gás com as micropartículas do óleo pulverizadas pelo MQL, para que se pudesse determinar aquele que oferecesse melhor penetração na zona de corte. A ideia era obter a mais alta velocidade possível de CO_2 com óleo alcançando a zona de corte. Ambos os adaptadores têm conexão central para fixar o adaptador aos bicos padrões do MQL. A diferença entre ambos os adaptadores está que, no primeiro caso, (Figura 2.19 a), a saída do gás carbônico é convergente (reduzida), pois de acordo com o clássico da dinâmica de fluidos, uma seção menor promove maior velocidade do fluido. Já no segundo caso (Figura 2.19 b), o objetivo era alcançar a velocidade do som com redução posterior no prolongamento do tubo de saída do gás injetado (convergente – divergente). O bico convergente, após simulações, foi o escolhido como o modelo a ser comparado com os demais níveis de lubri-refrigeração, pois apesar de apresentar menor velocidade de fluxo, demonstrou maior alcance fluido na zona de corte. Assim este método foi chamado de CO_2 + MQL neste trabalho (PEREIRA et al., 2015).

Neste experimento, a melhor condição observada foi a emulsão, seguida pelo método híbrido escolhido (modelo convergente), como se observa na Figura 2.20, o jato de óleo aplicado em grande volume foi mais eficaz em reduzir a temperatura na região do corte.

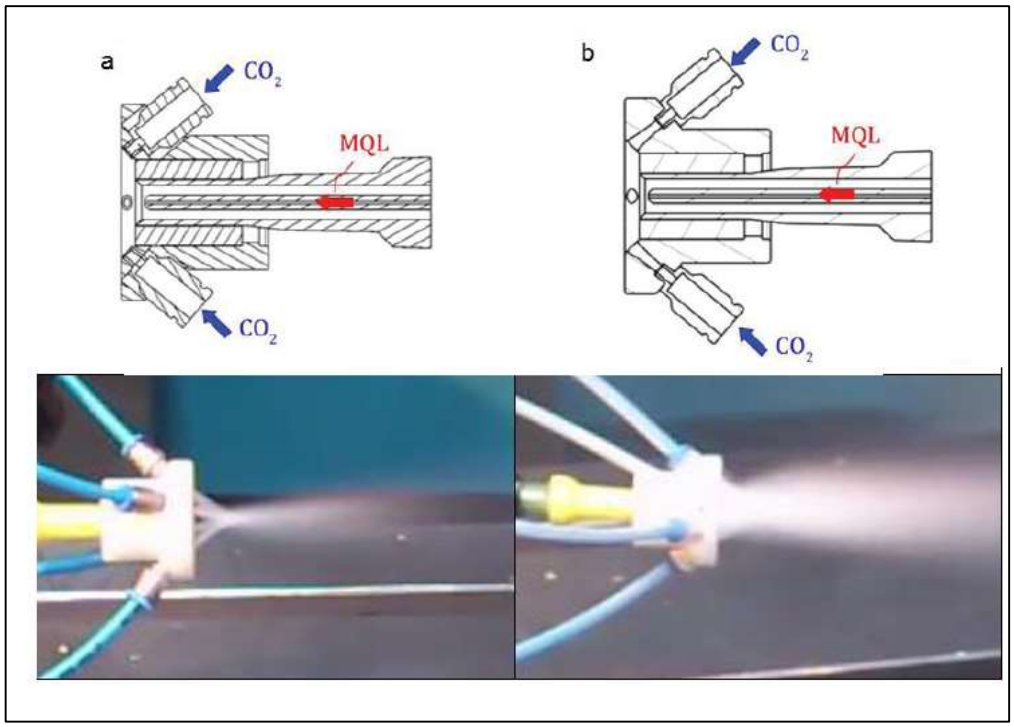


Figura 2.19 – Forma de aplicação de fluido de corte durante os testes – convergente, convergente - divergente (PEREIRA et al., 2015)

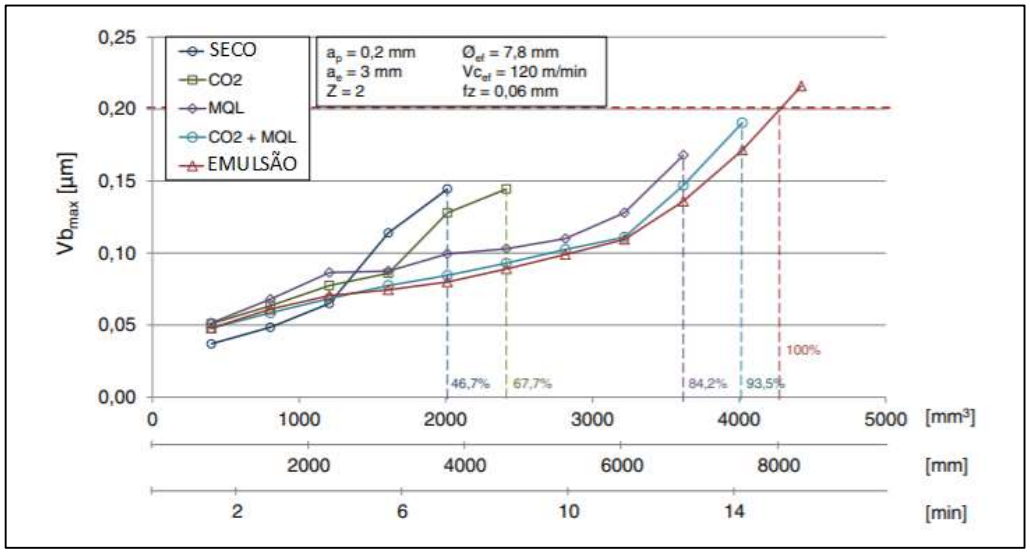


Figura 2.20 – Vida da Ferramenta em fresamento de Inconel 718 (PEREIRA et al., 2015)

Tapoglou et al. (2017) estudaram a usinabilidade de processos de criogenia com CO_2, MQL, corte a seco, mistura de MQL com criogênica com CO_2 e emulsão de óleo em água sob concentração entre 6 e 8% aplicada sob alta pressão e emulsão de óleo na mesma concentração aplicada sob média pressão, durante fresamento sob velocidade de corte de 100 m/min de liga de titânio Ti-6Al-4V utilizada na confecção de peças da indústria aeroespacial. Neste

experimento a maior vida de ferramenta foi obtida quando a emulsão de óleo aplicada de forma abundante foi utilizada. A ferramenta em 30 minutos de corte atingiu o desgaste de flanco de 0,15 mm, ao passo que a maioria das demais aplicações 0,2 mm antes de 18 minutos de corte. O segundo melhor resultado foi a emulsão aplicada sob menor pressão, seguida da mistura de MQL com CO_2. Para os autores, o resultado é atribuído à forma de desgaste observada nestas operações. Enquanto as ferramentas apresentaram desgaste arredondado e constante sob a aplicação das emulsões, os demais processos demonstram severos arranchamentos de partículas (corte a seco) bem como evolução acelerado do desgaste com a presença de trincas térmicas (MQL e processos com criogenia).

2.3 **Problemática do uso de fluido de corte em fresamento**

Segundo Palmai (1987), as temperaturas em uma aresta de corte variam ciclicamente no corte interrompido (como o fresamento) durante uma revolução da ferramenta. A temperatura da ferramenta aumenta durante seu tempo ativo (tempo em contato com peça e cavaco), e diminui durante o tempo em que não está em corte, em cada revolução da ferramenta. A variação cíclica desta temperatura é ilustrada na Figura 2.21. Nesta figura, a curva (a) representa o corte contínuo, em que a temperatura sobe rapidamente entrando em regime, a curva (b) mostra como o resfriamento ocorre após cessar o corte, enquanto a curva (c) representa o corte interrompido em que, durante o ciclo ativo, há geração de calor, aumentando a temperatura da ferramenta, seguido do ciclo inativo, que a resfria.

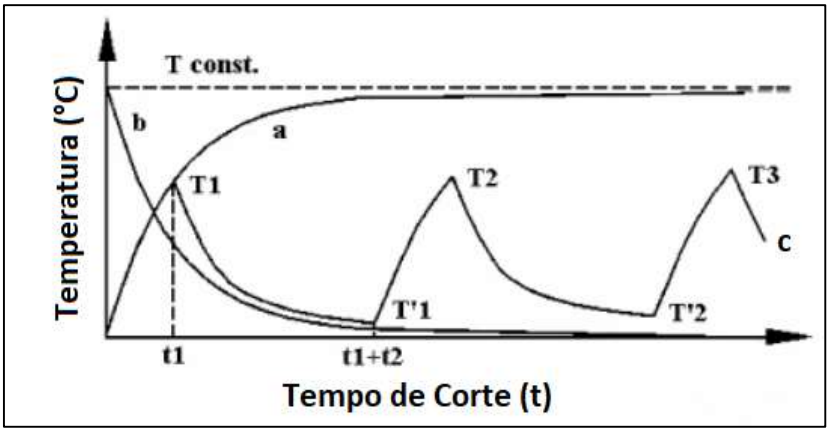


Figura 2.21 – Variação cíclica da temperatura de corte no corte interrompido (PALMAI, 1987)

Braghini et al., 2008, verificaram o desgaste das ferramentas de corte em processo de fresamento de liga de aço inoxidável 15-5 PH, com diferentes condições de lubrificação, tais quais: emulsão de óleo vegetal (no trabalho identificado como VE, com concentração de 7% e fluxo de 45L/min), baixa quantidade de óleo vegetal puro (identificado como VO, na vazão de 250 ml/min), mínima quantidade de fluido com óleo puro (no trabalho identificado como VO-MQL, com vazão de 35ml/h em corrente de ar comprimido a 6 bar de pressão) e corte a seco (identificado como "Seco").

Os parâmetros que não se alteraram durantes estes testes, foram a profundidade radial de corte (13,33 mm ou 70% do diâmetro total da fresa), profundidade axial de corte de 1 mm, avanço por dente de 0,08 mm e velocidade de corte de 120 m/min. A vida da ferramenta tinha seu fim determinado quando o desgaste de flanco atingia 0,2 mm. A Figura 2.22 mostra os resultados de vida de ferramenta obtidos neste trabalho.

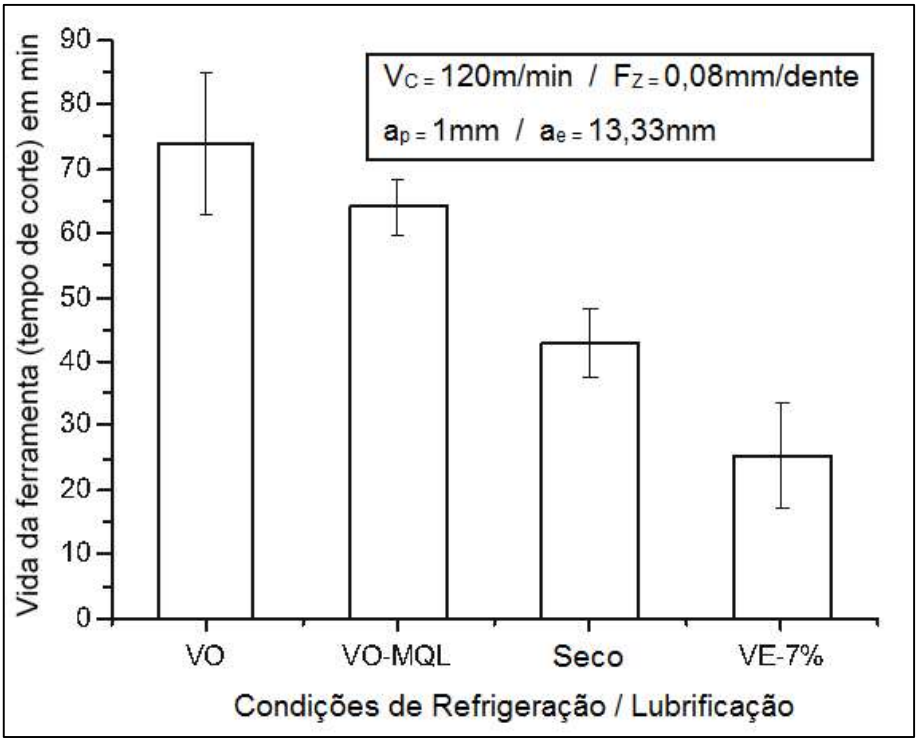


Figura 2.22 – Vida da ferramenta usinagem aço 15-5 PH (BRAGHINI et al., 2008)

Vê-se nesta figura que o corte a seco apresentou maior vida da ferramenta que o corte com emulsão em abundância, mas quando se utilizou óleo integral com baixa vazão (MQL ou VO) a vida da ferramenta foi maior que no corte a seco. Assim, os autores concluíram que, em processos com corte interrompido como o fresamento, deve-se evitar a refrigeração da ferramenta (que é o que ocorreu quando se utilizou emulsão em abundância), pois ela acentua

a variação da temperatura e, com isso, ocorre diminuição de sua vida, mas deve-se sim lubrificá-la (que foi o que ocorreu quando se utilizou as técnicas MQF e VO). A lubrificação é facilitada no processo de fresamento, já que o óleo atinge as superfícies de desgaste da ferramenta no tempo em que ela está inativa durante cada revolução. Este óleo é consumido durante o tempo ativo, mas como este tempo é bem curto, a lubrificação pode ocorrer.

A combinação entre os mecanismos de desgaste adesão e arrastamento, fenômeno conhecido como *attrition*, definido por Trent e Wright (2000), como a adesão de porção do cavaco em formação sobre a ferramenta com posterior remoção deste cavaco conjuntamente com partículas da ferramenta, que provoca tal desgaste, foi a principal causa determinante do fim de vida em todas as condições de lubrificação testadas. Ainda de acordo com Braghini et al. (2008), houve diferenças na forma como o desgaste determinou o fim de vida das ferramentas. No corte com emulsão de óleo (VE), maiores resistências da camada aderida à ferramenta foram responsáveis por maiores remoções de partículas das ferramentas, enquanto no VO-MQL e VO, o óleo puro minimizou este efeito e a vida da ferramenta foi maior que nos outros tipos de lubrificação testados.

Rael (2004) experimentou, durante fresamento, em condição de desbaste em alta velocidade, de matriz de forjamento de biela de aço endurecido, três sistemas distintos de refrigeração/ lubrificação: corte a seco, usinagem convencional com emulsão de óleo em abundância e técnica da mínima quantidade de fluido (MQL) com óleo vegetal no fluxo de ar comprimido na proporção de 14 ml/h. Durante os ensaios foram mensuradas a vida da ferramenta, em número de cavidades usinadas em cada condição e a potência consumida.

Como resultados dos testes, observou-se que:

1) O MQL proporcionou a maior vida de ferramenta entre todos os sistemas testados, seguidos pelo corte a seco e pela emulsão de óleo e água;
2) Quanto maior a profundidade de usinagem, menor o número de cavidades usinadas com uma vida de ferramenta;
3) A menor vida da ferramenta para fluido em abundância já era esperada, pois conforme Diniz et al. (apud Rael 2004), o uso desta modalidade de lubri-refrigeração em operações de corte interrompido, como fresamento, prejudica a vida da ferramenta, como já citado, devido à variação da temperatura em cada revolução da temperatura;
4) Em relação ao corte a seco, a amplitude da variação térmica é menor, e menor é a tensão da origem térmica na ferramenta, por isso melhor vida da ferramenta em relação ao corte com fluido em abundância;
5) O MQL apresentou melhor vida de ferramenta, justamente por este processo

proporcionar efeito predominantemente lubrificante e não refrigerante. O tempo que cada aresta rotacionava em vazio em contato com o óleo proporcionado pelo sistema, foram suficientes para que a cada entrada da ferramenta na peça, aquela estivesse suficientemente lubrificada para diminuir o calor gerado no processo.

6) O MQL apresentou o menor consumo de potência dentre todos os sistemas testados, seguido pelo fluido de corte em abundância e finalmente pelo corte a seco. A explicação consiste na lubrificação presente na usinagem com MQL e com o fluido de corte em abundância (em menor quantidade), ausente no corte a seco.

Teixeira Filho (2006) pesquisou o comportamento do fresamento de aço inoxidável endurecível por precipitação 15-5 PH (UNS 15500) com ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN em diversas condições de usinagem e constatou que o fresamento sem fluido de corte sempre gerou maior vida da ferramenta quando comparado com a usinagem com emulsão, independente da velocidade de corte, da classe de metal duro utilizada e da maneira de injeção da emulsão. Isso ocorreu porque o principal mecanismo causador do desgaste de ferramenta durante o processo com fluido de corte foi o *attrition,* ou seja, remoção de partículas da ferramenta causada pela adesão do material da peça na região desgastada da ferramenta. Este mecanismo, quando se usa fluido em abundância, é mais danoso à vida da ferramenta que a adesão, devido à alta diferença de temperatura causada pelo efeito de refrigeração da emulsão. Também foram observadas trincas térmicas, conforme demonstra Figura 2.23.

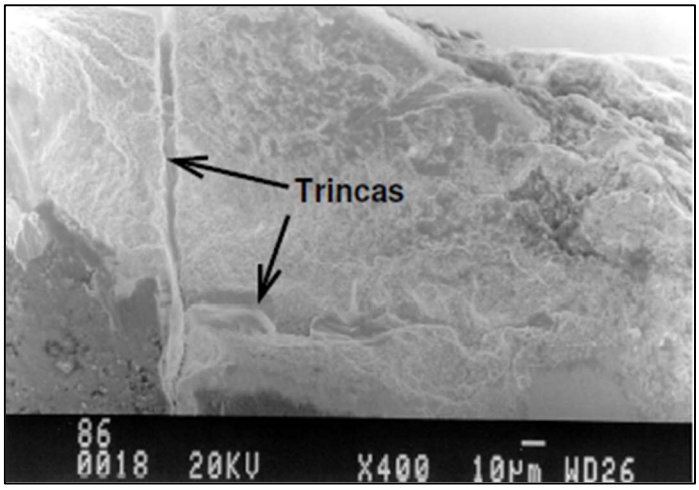


Figura 2.23 – Foto MEV, operação de desbaste, V_C=140 m/min, a_p=4,0mm, a_e=13,3mm, com emulsão de óleo vegetal (Blaser Vasco 1000) em água sob a concentração de 7% (TEIXEIRA FILHO, 2006)

A Figura 2.24 demonstra estes resultados, e a partir dela é possível observar que para

velocidades de corte maiores, como por exemplo a 140 m/min, o volume de cavaco removido por vida da ferramenta da condição a seco, ou seja 1200 cm^3, é cerca de 5 vezes maior que a condição com emulsão de óleo sob velocidade de corte menor (120 m/min), no qual foram removidos aproximadamente 250 cm^3. Isto é devido ao aumento da energia que é imputada ao processo com o aumento da velocidade de corte. A temperatura na região de corte é maior e a queda de temperatura na ferramenta quando ela não está cortando é maior, reduzindo drasticamente a vida da ferramenta e o volume de cavaco removido, devido à capacidade do fluido de corte de retirar calor da região de corte.

Como observado na literatura, no fresamento, para inúmeros casos, condições de lubrificação, com o objetivo de reduzir o atrito e, consequentemente, o calor gerado, apresentaram melhores resultados que métodos de refrigeração em que se visa retirar o calor gerado da zona de corte. O principal problema está relacionado às fases ativas e inativas do corte interrompido do fresamento já devidamente explicado neste capítulo, o que causa diferenças de temperatura da ferramenta, e por conseguinte redução de sua vida, ora por *attrition* ou por avarias, como trincas térmicas ou lascamento.

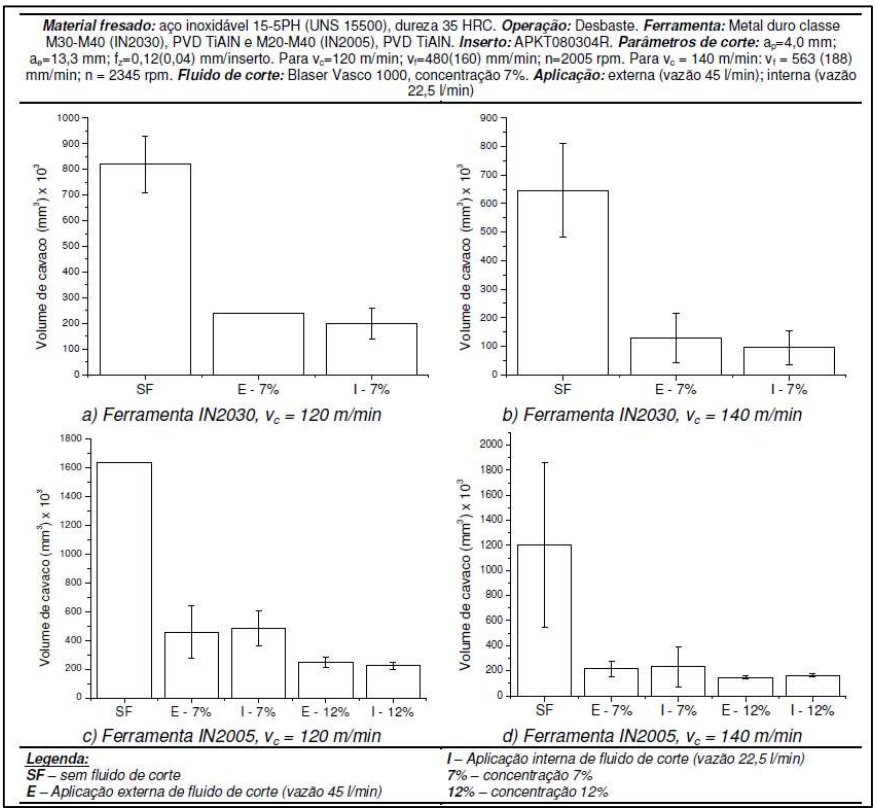


Figura 2.24 – Vida da ferramenta fresamento aço 15-5 PH com diferentes modos de aplicação de fluido de corte (TEIXEIRA FILHO, 2006)

Saadieh (2015) estudou os efeitos de temperatura e rugosidade durante fresamento de aço CK 45 e alumínio 6015, sob condição submersa em um tanque com 1,5 litro de emulsão de óleo em água. O processo consistia em fresar um passe e medir rugosidade aritmética, aplicar o segundo passe e medir novamente até alcançar a totalidade de 8 passes. Este trabalho teve como variáveis a profundidade de usinagem, avanço da mesa, velocidade de corte e número de passes.

Foi observado que quanto a maior a profundidade de usinagem e avanço, maior a rugosidade. A este resultado foi atribuído a formação do cavaco como causa, já que a baixos valores os cavacos formados foram contínuos, ocorrendo menos atrito entre a peça e a ferramenta. Maiores valores de avanço proporcionaram também formação de cavacos descontínuos que por um lado prejudicou o acabamento e, em alguns casos, não permitiu o término do teste devido ao acúmulo destes cavacos na fresa levando à ruptura mesma ou interrupção do fresamento por atingir os limites da máquina devido ao travamento. As Figuras 2.25 e 2.26 mostram um dos casos que houve a ruptura da fresa utilizada e também o acúmulo de cavaco sobre a peça logo após um passe, respectivamente. Tal fato ocorreu pois o autor não providenciou fluxo contínuo de fluido para expulsão do cavaco (SAADIEH, 2015). Quanto maior a velocidade de corte, também foi observado que os cavacos tinham menos chance de se acumular entre peça e ferramenta durante um passo, o que ocasionou menor atrito e menor rugosidade superficial (SAADIEH, 2015).

Não foram apresentadas as medições de temperatura durante o fresamento e este trabalho não comparou a submersão com outros níveis de lubri-refrigeração, bem como não houve resultados sob a vida da ferramenta.

Figura 2.25 – Ferramenta quebrada após um dos experimentos (SAADIEH, 2015)

Figura 2.26 – Formação de cavacos descontínuos que levaram a maiores rugosidades superficiais e em alguns casos quebra de ferramentas (SAADIEH, 2015**)**

Santos et al., 2022 compararam o MQF sob vazão de 10 e 20 ml/h com o corte sem fluido em fresamento facial de aço liga D2 endurecido, com dureza de 55 HRC. Após cada passe, os autores mediram evolução de desgaste e rugosidade de superfície. Após 6 passes analisavam o desgaste final da ferramenta para fins de comparação. Os autores apontam menores valores de rugosidade em termos de 50% para os processos MQF, em função do atrito reduzido pela lubrificação e observaram levemente menor número de ocorrências de desgaste para esta condição.

Khatri e Jaham (2018) investigaram os mecanismos de desgaste da ferramenta durante processo de fresamento de liga de Titânio Ti-6Al-4, com diferentes condições de lubri-refrigeração, a saber, o MQL, corte a seco e corte convencional (emulsão de óleo em água). O processo consistia em avaliar os desgastes e respectivos mecanismos de desgastes, após determinado número de passes (igual para todas as medições) para cada condição testada. O desgaste mais comum foi o desgaste de flanco, mas também foram observados desgastes na superfície de saída da ferramenta e aresta secundária de corte. Os mecanismos de desgaste mais observados foram a abrasão, seguida do lascamento e adesão. O MQL apresentou menor número de ocorrências de desgastes, pois, conforme Figura 2.27 (b), as partículas de óleo obtêm melhor alcance à zona de corte e não geram apenas o efeito de lubrificação, mas também propiciam, com certo limite, a refrigeração da ferramenta (KHATRI; JAHAM, 2018).

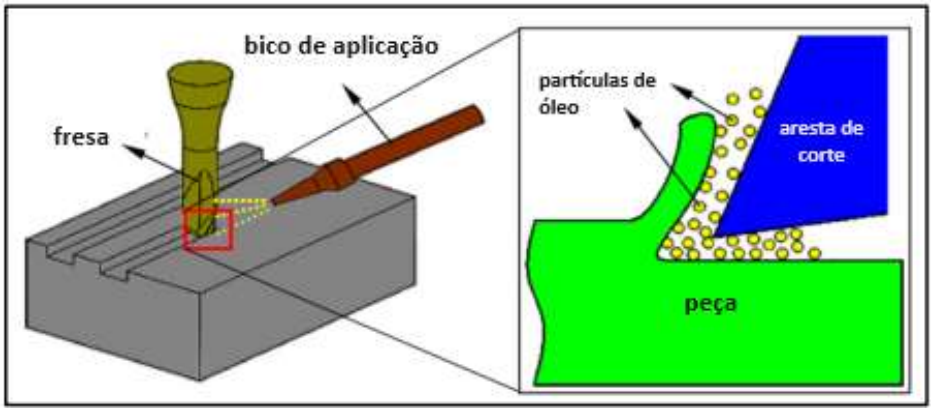


Figura 2.27 – (a) Esquema de aplicação do MQL no fresamento de topo; representação da ação das partículas de óleo do MQL sob a ferramenta, peça e interface cavaco-ferramenta (KHATRI; JAHAM, 2018)

As condições de corte a seco e convencional foram as que mais apresentaram ocorrências de desgastes respectivamente, porém quase que de forma igualitária. O corte a seco incentivou mais o desgaste de abrasão, adesão e deformação plástica, principalmente pelo calor gerado no corte, já que nesta condição não há meio refrigerante para a retirada de calor ou lubrificante para a diminuição do atrito e, ainda, a liga de titânio é considerada de difícil usinagem, principalmente pelo fato que o titânio é péssimo condutor de calor. No corte convencional, com fluido em abundância, os desgastes observados na ferramenta tiveram como principais mecanismos, a abrasão e o lascamento (foi o processo que mais apresentou este tipo de mecanismo). A abrasão foi observada majoritariamente nas três condições e é incentivada pelo atrito entre a ferramenta e peça. A abrasão tem seus efeitos aumentados, se os cavacos gerados no corte são lançados novamente na zona de corte. Já o lascamento está associado, na origem, a micro trincas térmicas que, por sua vez, são causadas pelas flutuações térmicas inerentes do processo de fresamento. No caso da condição convencional, com fluido abundante, a ferramenta é constantemente resfriada pelo fluido de corte, mas há a geração de calor pelo atrito durante o período ativo do fresamento o que causa a flutuação térmica, de forma mais intensa, favorecendo o lascamento observado (KHATRI; JAHAM, 2018).

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 **Materiais, equipamentos, instrumentos e ferramentas de corte utilizados.**

3.1.1 **Material utilizado**

O material utilizado foi o aço ABNT 1045, obtido no mercado em forma de barra laminada nas medidas de 101,6 x 101,6 mm e cortados em blocos de 76 mm. A Tabela 3.1 mostra a composição química da barra utilizada.

Tabela 3. 1– Composição química de material utilizado nos ensaios, obtida mediante certificado do fabricante

Composição química em valores percentuais				
C	Mn	P	S	Si
0.47	0.62	0.013	0.007	0.18

Para os testes, estes materiais foram cortados nas dimensões mostradas na Figura 3.1 e foram usinados rasgos laterais para permitir a fixação por grampos dentro do dispositivo também mostrados na Figura 3.1.

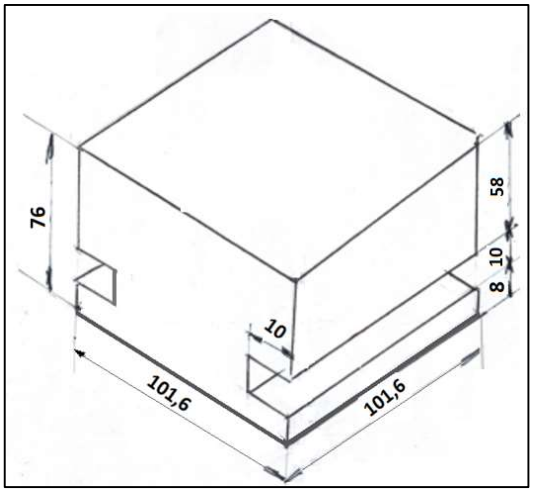


Figura 3.1 – Desenho rascunho do corpo de prova utilizado no ensaio

3.1.2 **Máquina-ferramenta**

Os ensaios foram realizados na empresa Usimetal Ltda em Sorocaba, especializada em serviços de ferramentaria e dispositivos, que disponibilizou o centro de usinagem da marca Romi, modelo Discovery D760, com corrente total de 52,5A (potência total instalada equivalente a 18,9 kW), corrente do eixo árvore de 35A (potência equivalente de 12,6 kW) e rotação máxima de 7.500 RPM. A máquina tem os seguintes cursos: 762 mm no eixo X, 406 mm no eixo Y e 508 mm no eixo Z.

3.1.3 **Ferramenta de corte**

A porta-ferramenta utilizada para os ensaios foi a Coromill código 490-020A16-08L, ou seja, fresa de facear, com ângulo de aresta de 90° de aço rápido com medida de 100 mm e com diâmetro de corte de 20 mm com as pastilhas. Esta haste permite a utilização de 2 pastilhas (arestas de corte), código 490R-08T304M-PL 4340, que compreende substrato de metal duro classe 4340, indicado para usinagem de material classe P, M, K (conforme norma ISO), com cobertura tripla aplicada pelo método CVD (*Chemical Vapour Deposition*, ou deposição química por vapor). A camada mais externa é o TiN (Nitreto de Titânio), seguido pela Al_2O3 (Alumina) e TiCN (Carbonitreto de Titânio) é a camada inferior, que tem contato com o substrato de metal duro. A pastilha possui ângulo de saída de 32°, ângulo de posição da aresta principal de corte de 90º, ângulo de folga de 15º e raio de ponta de 0,4 mm e é indicada para operações de fresamento de acabamento. A Figura 3.2 e 3.3 demonstram a ferramenta e pastilha, respectivamente.

Figura 3.2 – Fresa de facear utilizada nos ensaios.

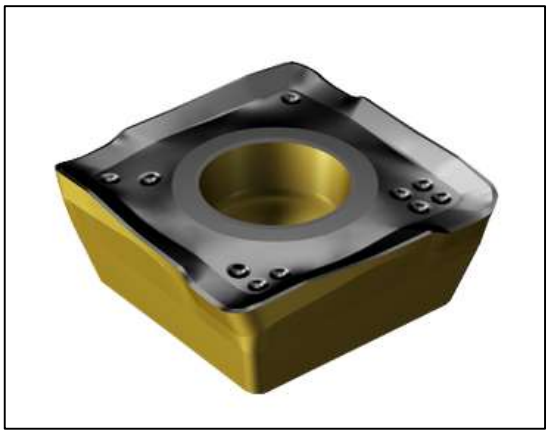


Figura 3.3 – inserto de metal duro com cobertura tripla utilizado nos ensaios.

3.1.4 **Dispositivo de fixação e variáveis de lubri-refrigeração**

Para tornar possível a realização dos testes, mais especificamente do método submerso, um dispositivo específico foi desenvolvido, e com o mesmo dispositivo, foram realizadas todas as usinagens deste trabalho, para que as condições de fixação permanecessem as mesmas de uma variável para a outra. Este dispositivo consiste em uma caixa metálica nas medidas de 240x240x110 mm. Em seu interior havia dois grampos para a fixação da peça de forma centralizada.

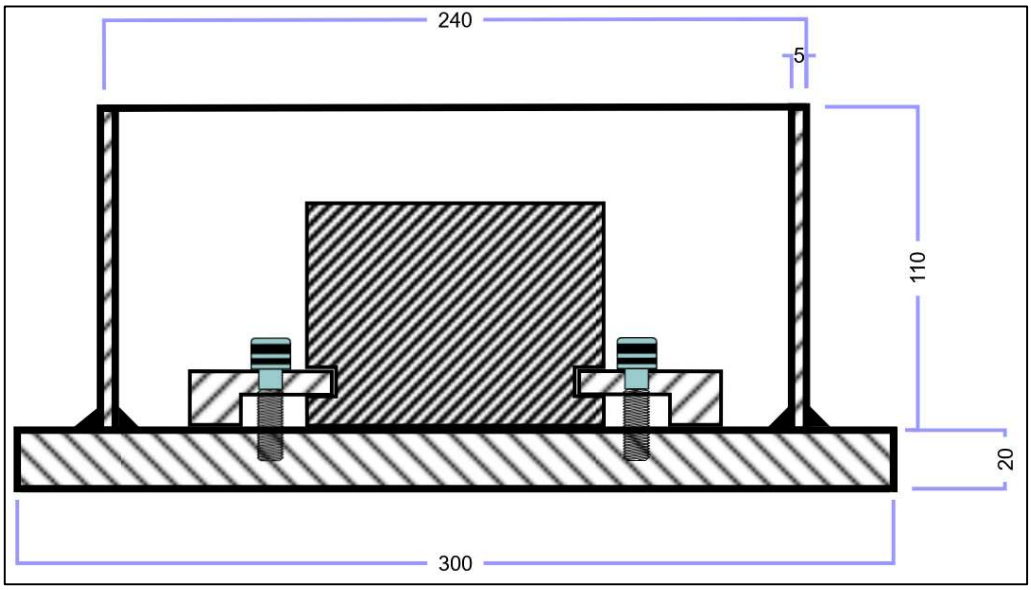


Figura 3.4 – Desenho ilustrativo do dispositivo construído para usinagem submersa.

Conforme Figura 3.4, o dispositivo foi projetado para prender a peça mediante grampos e parafusos Allen que facilitavam a troca de peça a cada ensaio realizado. A Figura 3.5 mostra a peça fixada ao dispositivo durante os primeiros testes de fluxo da bomba, realizados neste momento com água, para garantir funcionamento correto dos ensaios.

Figura 3.5 Peça fixada ao dispositivo de usinagem submersa durante teste de fluxo.

Para as usinagens submersas, um tanque de óleo (também desenvolvimento próprio para o trabalho, com separação de cavaco) conectado a uma bomba de retificadora, foram acoplados por intermédio de mangueiras e válvulas a este dispositivo. As funções destas conexões e do tanque eram garantir um fluxo de óleo permanente no dispositivo a fim de se evitar que o óleo lubrificante aquecesse durante os testes, garantir a expulsão do cavaco gerado durante o processo de corte pelo alto volume de óleo bombeado, para evitar quebra da fresa por travamento com o cavaco, e, não menos importante, manter a peça sempre submersa durante os cortes, objetivo principal nestes testes. A Figura 3.6 mostra o dispositivo de fixação da peça para usinagem submersa (caixa metálica da Figura 3.5) acoplado ao tanque e bomba em funcionamento. A variável “tipo de lubri-refrigeração” teve 6 níveis de aplicação de fluido de corte, que serão detalhados a seguir.

Figura 3.6 – Dispositivo para usinagem submersa acoplado ao dispositivo tanque.

Na Figura 3.7, pode-se observar um esquema do dispositivo quando se utilizou a peça submersa em óleo integral (nível 1 da variável lubri-refrigeração) e em fluido aquoso, ou seja, emulsão de óleo em água (nível 2). Para ambos os casos, foi utilizado o mesmo tanque, com limpeza adequada para evitar contaminação entre um fluido e outro.

Quando se utilizava qualquer um destes 2 sistemas de lubri-refrigeração, a bomba de óleo do tanque estava em pleno funcionamento, o fluxo e o retorno ao tanque são controlados mediante a regulagem das válvulas B e C, de forma a manter a peça sempre submersa e com fluxo de óleo contínuo. A vazão obtida durante o processo foi de 23,5 l/min. Os objetivos principais deste fluxo de óleo contínuo são a) evitar o sobreaquecimento dos fluidos utilizados e b) garantir a expulsão do cavaco da zona de corte para evitar bloqueio e consequente quebra da fresa utilizada.

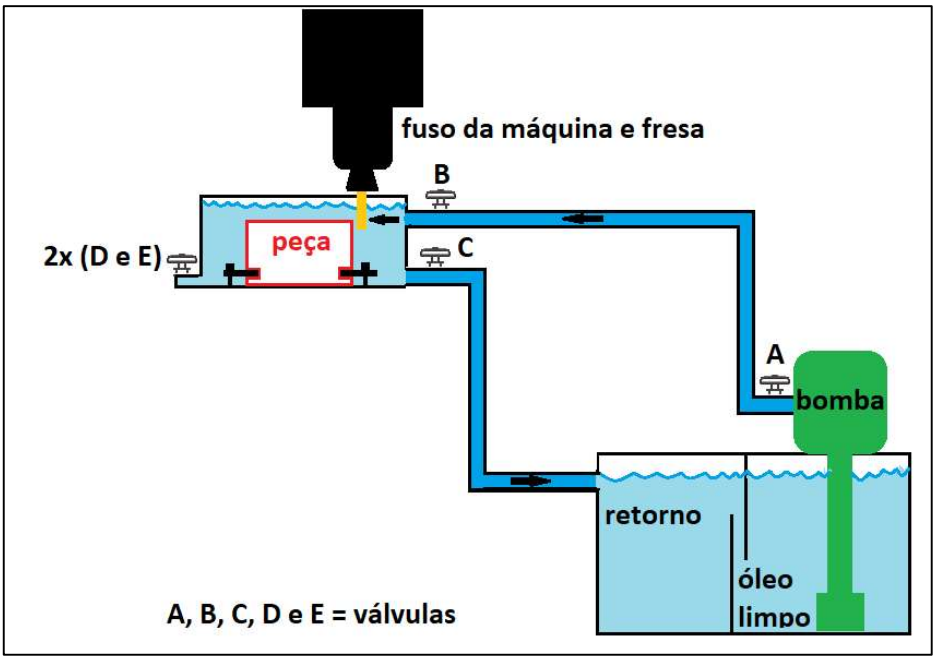


Figura 3.7 – Esquema da usinagem nos níveis 1 (submersa em óleo integral) e 2 (submersa em fluido aquoso, emulsão)

A Figura 3.8 mostra a usinagem submersa com óleo integral puro, bem como o tanque com a bomba que garantiram a entrega dos fluidos para a máquina. A Figura 3.9 mostra o tanque com emulsão de óleo (nível 2) e sua bomba em funcionamento, entregando 23,5 l/min (3.9a) e a usinagem submersa com este tipo de óleo (Figura 3.9b).

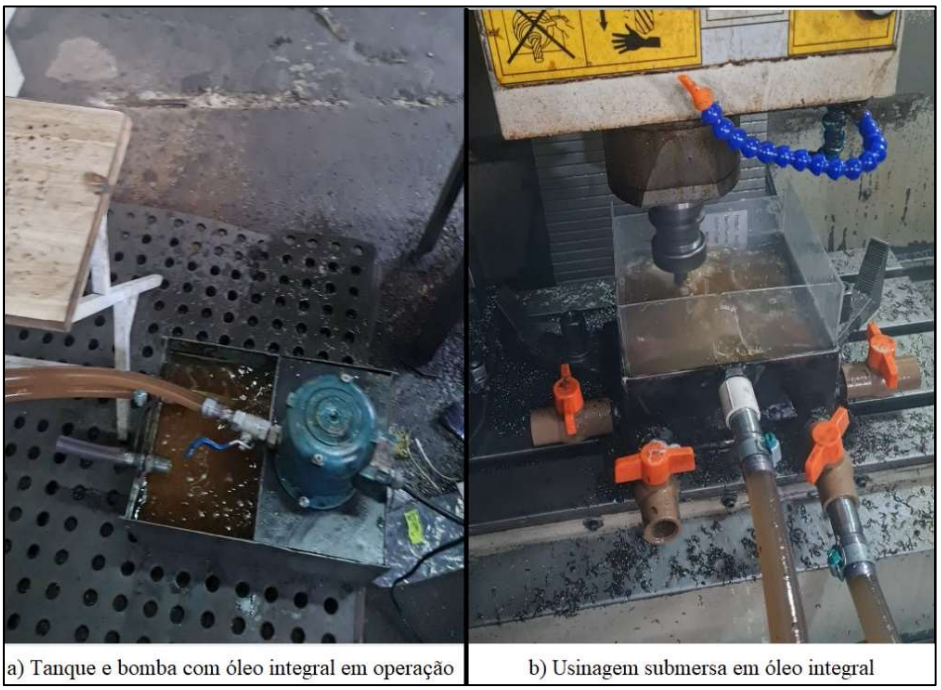


Figura 3.8 – Usinagem submersa com óleo integral, nível 1.

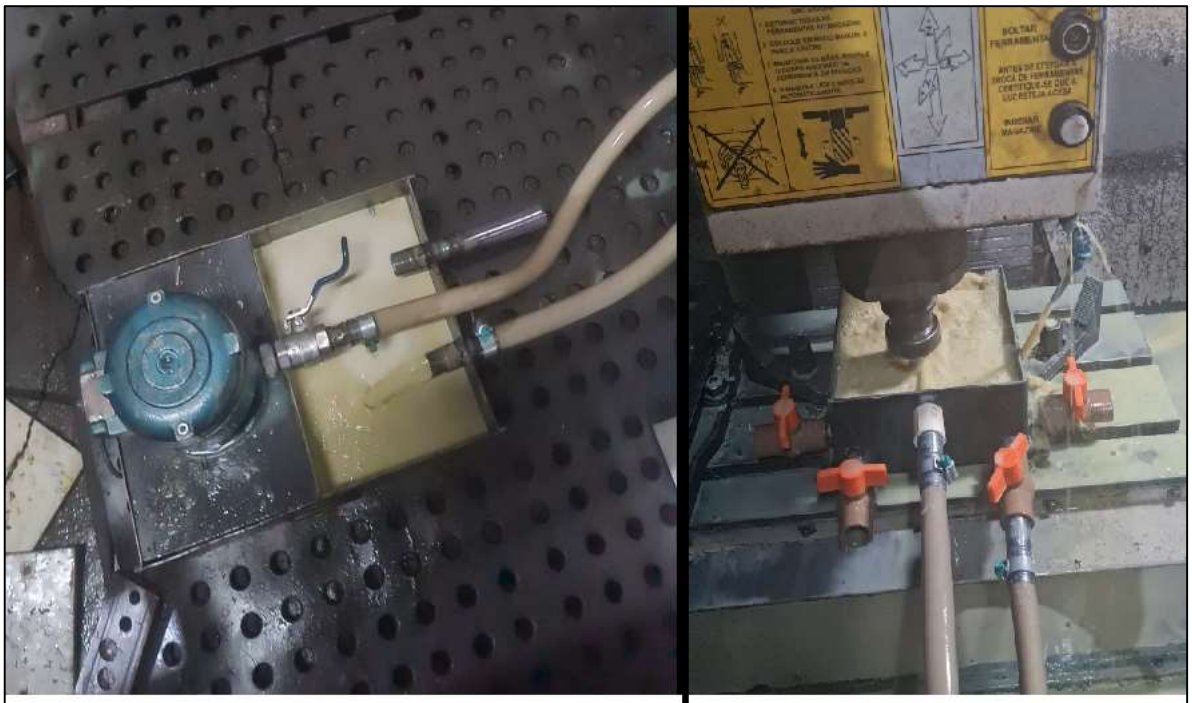


Figura 3.9 – Usinagem submersa com fluido aquoso (emulsão de óleo em água) – nível 2.

Com o mesmo dispositivo foram testadas as demais variáveis. A Figura 3.10 demonstra a usinagem convencional, no qual jorro de emulsão de óleo em água com concentração de 6% foi utilizada sob vazão de 7 l/min. Neste processo, a própria bomba de óleo da máquina provia óleo para a mangueira. Portanto a bomba do dispositivo permaneceu desligada.

Figura 3.10 – Usinagem com jato de fluido aquoso, convencional da máquina – nível 3.

Para tornar possível a usinagem com jato de emulsão de óleo (convencional da máquina, neste trabalho denominado “nível 3”), as válvulas A, B e C foram fechadas (Figura 3.11), ao passo que as válvulas D e E foram abertas, de modo a garantir que o fluido voltasse para a máquina e não sobrepusesse a peça em usinagem. Assim, foi possível obter usinagem convencional, utilizando exatamente as mesmas condições em termos de máquina, peça, dispositivo e ferramenta.

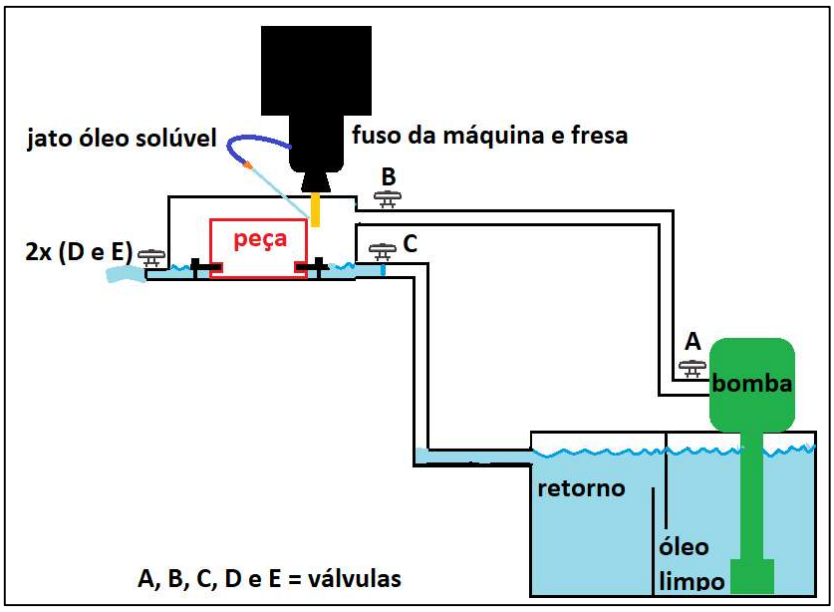


Figura 3.11 – Esquema da usinagem para a nível 3 (usinagem convencional com jato de óleo).

Para o nível 4, usinagem com MVO (Mínimo Volume de Óleo), foi adicionado um tanque de óleo integral na parte superior da máquina. Deste tanque uma mangueira com válvula provia por efeito da gravidade, óleo integral à zona de corte da ferramenta em quantidades mínimas (Fluxo de 75 ml/min). A Figura 3.12 ilustra o funcionamento deste processo, na qual foram utilizados o mesmo dispositivo e ferramenta.

A Figura 3.13 mostra a usinagem MQL (nível 4), neste trabalho chamada de MVO (Mínimo Volume de Óleo), na qual pode-se observar geração de névoa em grande quantidade, que é nociva à saúde do operador (fig. 3.13a) e o óleo integral aplicado por gravidade, mediante bocal posicionado em frente à ferramenta no sentido de seu avanço (fig.3.13b). A Figura 3.14 mostra o reservatório de óleo situado na parte superior da máquina.

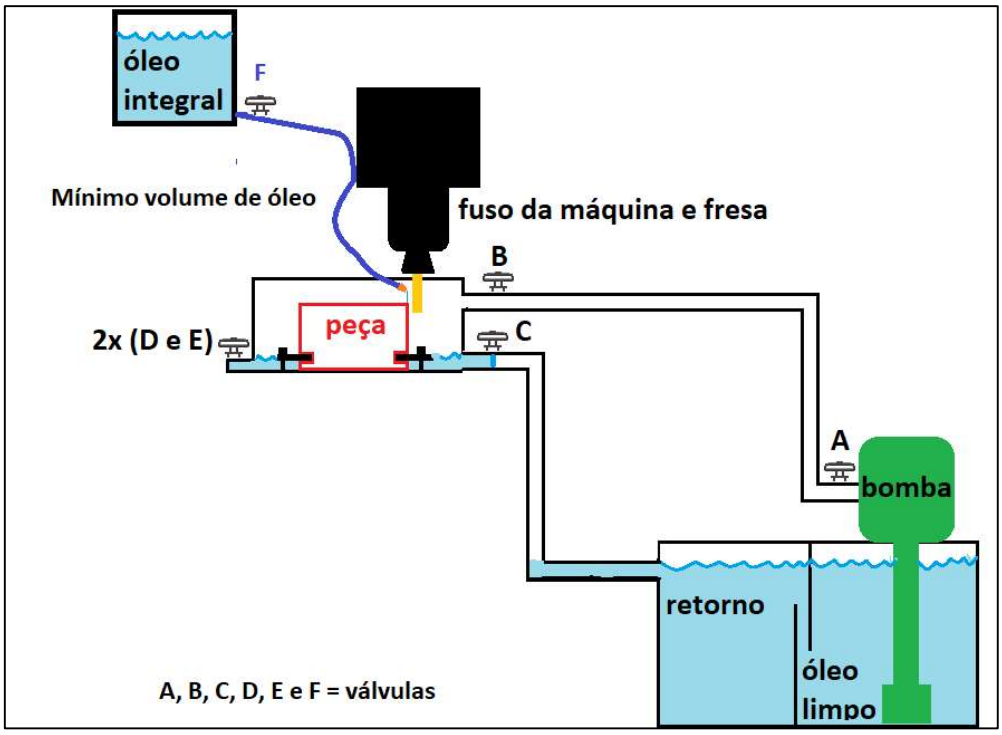


Figura 3.12 – Nível 4, com mínimo volume de óleo (MVO).

Figura 3.13 – Nível 4, com mínimo volume de óleo em funcionamento e durante teste de fluxo.

Figura 3.14 – Montagem do reservatório de óleo integral para execução do nível 4, MVO.

O quinto nível testado foi chamado, neste trabalho, de MQF (Mínima Quantidade de Fluido sob corrente de ar comprimido). Para que os resultados fossem comparáveis, o dispositivo MQF foi integrado ao dispositivo utilizado em todos os testes. Assim, nesta variável, o dispositivo da usinagem submersa ficou inativo (bomba desligada e todas as válvulas fechadas) enquanto o dispositivo MQF, de modelo Bielomatiq B1-210 provia a lubrificação de óleo sob corrente de ar, na proporção de 10ml/hora. A Figura 3.15 demonstra o esquema com o MQF interligado ao dispositivo.

Na Figura 3.16 é possível observar fotos do sistema MQF em funcionamento (3.16a), bem como o dispositivo utilizado que provia através da mangueira mais grossa (3.16b), a mistura de óleo e ar, na proporção de 10 ml/h e a usinagem com MQF, aplicados mediante bocal posicionado em frente à ferramenta no sentido de seu avanço (3.16c)

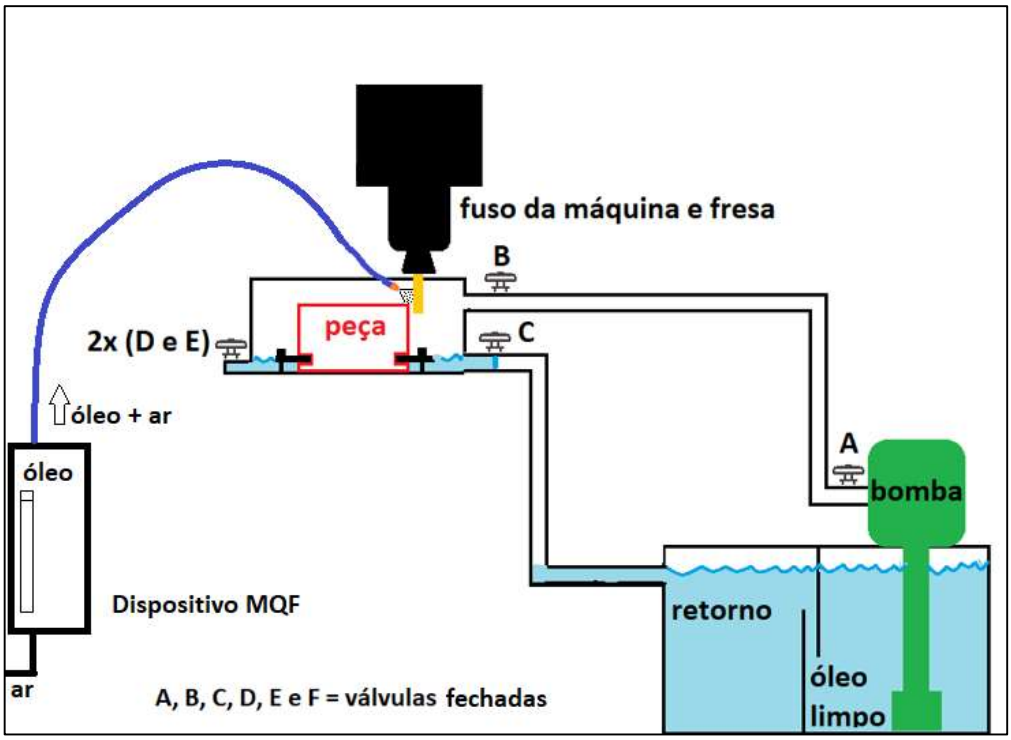


Figura 3.15 – Esquema do nível 5, MQF.

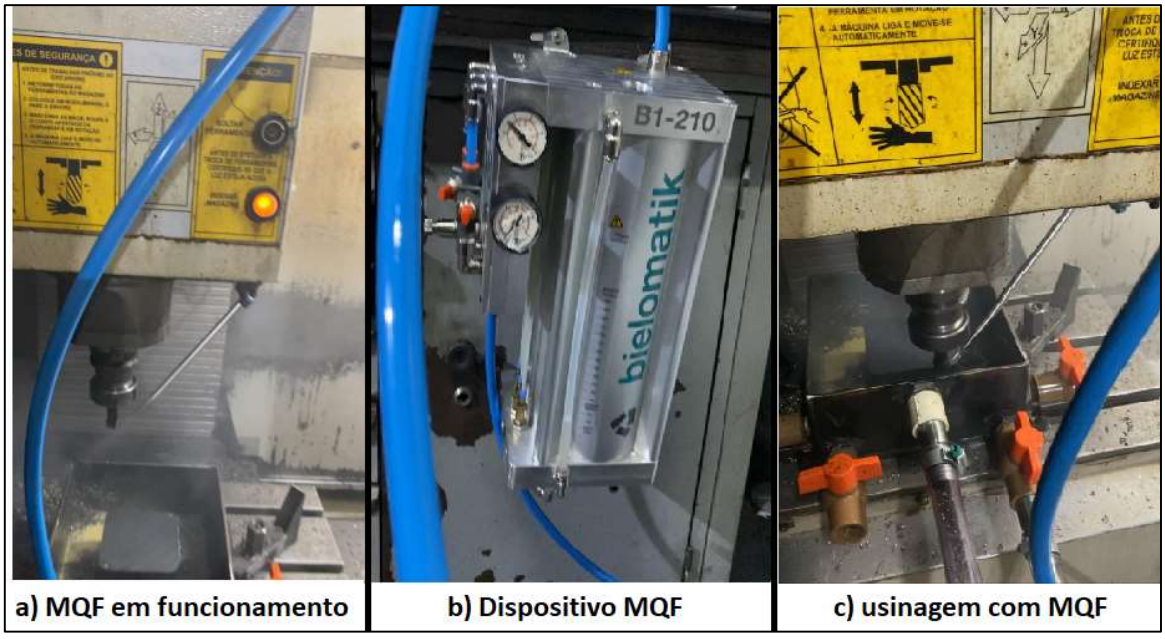


Figura 3.16 – Variável 5, Usinagem com MQF, Mínima Quantidade de Fluido.

O nível 6, último testado consistia em usinagem a seco, ou seja, o mesmo sistema máquina-ferramenta, dispositivo, ferramenta e peça dos testes anteriores, porém sem nenhum tipo de condição que envolva lubrificação ou refrigeração.

3.1.5 **Fluidos de corte**

Para os ensaios do nível 1 (usinagem submersa em óleo integral) e do nível 4 (usinagem com mínimo volume de óleo, MVO) da variável "condição de lubri-refrigeração" foi utilizado o fluido de corte Vascomill 10 da empresa Blaser Swisslube do Brasil, que é um fluido a base de estéreis vegetais, não miscível em água. Tem a vantagem de ser composto por matérias-primas renováveis, ser mais prontamente biodegradável e reduzir as emissões no ambiente de trabalho. Este fluido de corte é indicado para operações de fresamento em aço, com a vantagem de permitir boa qualidade de superfície usinada e maior vida das ferramentas. A Tabela 3.2 informa os dados técnicos deste fluido (BLASER, 2017).

Tabela 3.2 – Dados Técnicos do fluido de corte Vascomill 10 (BLASER 2017)

Dados Físicos e Químicos	**Especificação**
Viscosidade a 40°C	10 mm^2/s
Densidade a 20°C	0.90 g/cm^3
Ponto de fulgor	202° C
Parte vegetal	95%
Conteúdo de cloro	0%
Conteúdo de zinco	0%
Conteúdo de enxofre, total	1.7%
Corrosividade do cobre	1a (3h a 60° C)
Cor	Amarelo claro

Já para a usinagem submersa em emulsão de água e óleo (neste trabalho denominada "nível 2" da variável "condição de lubri-refrigeração") e para a usinagem convencional com jato de óleo (nível 3) foi utilizado o fluido de corte HCSS B/551 da empresa Ternec Lubrificantes, que é um óleo semissintético formulado com aditivos isentos de nitrilos e fenóis e que contém biocidas, que garantem ao óleo vida prolongada, possibilitando ótimo desempenho sem perda de características durante o processo operacional. Tal óleo é utilizado para operações de furação, fresamento, torneamento e retificação. É recomendada a concentração mínima de 5% (TERNEC, 2023). A concentração utilizada, conforme já informado neste trabalho foi de 6%. A Tabela 3.3 apresenta as demais características deste fluido.

Tabela 3. 3 - Características típicas do óleo utilizado na emulsão (TERNEC, 2023)

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS		
APARÊNCIA Líquido límpido	**COR** Esverdeado	**DENSIDADE 20/4°C** 1,015 g/mL
pH A 10% 9,0	**ASPECTO DA EMULSÃO** Translúcida	**FATOR DE REFRAÇÃO** 1,8

Para realizar os ensaios do nível 5 (mínima quantidade de fluido - MQF) foi utilizado o fluido de corte Vascomill MMS FA2 também da empresa Blaser Swisslube do Brasil, que é um produto isento de óleo mineral e cloro, apropriado para atender operações de lubrificação com mínima quantidade. Este fluido MQL, à base de álcool graxo, é um lubrificante altamente ativo por causa da estrutura polar das moléculas. É bastante indicado para fresamento de aços, alumínio, metais ferrosos, titânio e ligas de cobre. Tem como vantagens melhorar a qualidade superficial usinada e não deixar manchas ou resíduos na peça. A Tabela 3.4 informa os dados técnicos deste fluido (BLASER, 2019).

Tabela 3. 4 – Dados Técnicos do fluido de corte Vacomill MMS FA2 (BLASER 2019)

Dados Físicos e Químicos	Concentrado	Método
Viscosidade a 40°C	31 mm^2/s	ASTM D 445
Densidade a 20°C	0,85g/cm^3	ASTM D 1287
Ponto de fulgor	190°C	ASTM D 92
Conteúdo de éster	5%	
Conteúdo de cloro	0%	
Conteúdo de zinco	0%	
Conteúdo de enxofre, total	1,0%	
Corrosividade do cobre	1a (3h a 60°C)	
Cor	Amarelo	VISUAL

3.1.6 **Metodologia e parâmetros de corte**

Neste trabalho, foi avaliada a usinabilidade de aço ABNT 1045, em operação de fresamento de acabamento com profundidade de usinagem de 1 mm, sob diferentes condições de lubrificação e/ou refrigeração (6 níveis anteriormente mencionados), sob 2 velocidades de

corte (280 m/min, também considerada como “velocidade de corte normal” por ser a velocidade recomendada pelo fabricante da ferramenta e 336 m/min, também chamada neste trabalho de “velocidade de corte alta”, por exceder a velocidade recomendada em 20%), avanço constante de 0,08 mm por dente e para os dois melhores resultados (em termos de vida da ferramenta), também foram ensaiadas duas diferentes larguras de usinagem (corte com 70% da fresa, a_e = 14 mm e corte com 100% de entrada da fresa, a_e = 20 mm), para avaliar se o cavaco produzido iria bloquear o caminho da fresa de alguma forma quando esta estivesse submersa e com 100% de seu diâmetro em contato com a peça. Todos os parâmetros de corte foram determinados a partir de recomendação do fabricante da ferramenta.

A cada determinado número de passes (por um passe, entende-se como a retirada de 1 mm de material em toda a superfície da peça usinada, equivalente a 10,3 cm³ de cavaco removido) foram medidas a rugosidade de superfície no sentido do avanço fora da área de entrada e saída da ferramenta, mediante rugosímetro modelo Mitutoyo SJ 210 (calibrado com padrão fornecido com o equipamento, configurado para comprimento de amostragem, *cut-off* de 0,8 mm em comprimento de amostragem de 4mm). De tal forma, a cada vida de ferramenta foram obtidas pelo menos 5 medições de rugosidade.

Foram também medidos o desgaste de flanco da ferramenta com microscópio modelo Knup (Figura 3.17) e a potência de corte do fuso principal da máquina-ferramenta, ao se observar o gráfico do painel da própria máquina-ferramenta durante a entrada total da ferramenta na peça. Foi definido como critério de fim da ferramenta quando o desgaste de flanco de uma das arestas alcançava 0,3 mm, conforme estipulado pela norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) e o número de passadas para as referidas análises foi de tal forma que houvesse pelo menos de 4 a 5 medições por vida de ferramenta. As réplicas sempre foram realizadas, mas as tréplicas eram feitas com o propósito de confirmar resultados de vida de ferramenta que não estavam próximos estatisticamente, ou considerados inconsistentes pelo autor. Assim para a usinagem MVO, foram realizadas mais de 4 medições, porém todas coerentes estatisticamente. Foram medidas durante cada passada, as potências do fuso da máquina-ferramenta, quando a fresa estava em pleno corte na peça (ou seja, excluídas a entrada e a saída da mesma na peça). Para não haver erros de interpretação, mediu-se as potências registradas na máquina-ferramenta com rotação do eixo, mas sem contato da ferramenta com a peça (em vazio), de modo a descontar este valor, do valor encontrado e obter a potência efetivamente consumida durante a usinagem. Também foram medidas as potências com a fresa dentro e fora do tanque submerso, porém não foram observadas variações significativas nos resultados.

Para as ferramentas desgastadas, foram estudados os mecanismos de desgastes mediante

fotos do microscópio de varredura eletrônica e os elementos químicos encontrados por espectrometria de energia dispersiva (EDS). Para que se não tenha uma análise muito longa dos mecanismos de desgaste da ferramenta, o que não colaboraria para com os objetivos deste trabalho, somente fez-se a análise de condições representativas destes mecanismos. Assim, escolheu-se analisar as condições com usinagem submersa em fluido integral, submersa em fluido aquoso, fluido de corte em abundância e corte a seco.

Com o objetivo de se comprovar estatisticamente, os resultados obtidos acerca da vida da ferramenta em função do volume de cavaco removido, rugosidade e potência de corte, foram realizadas análises de variâncias (ANOVA) a um nível de significância de 5 %, mediante o software Minitab Statistical versão 21.4.1.0, com o qual também foram gerados gráficos de Pareto dos efeitos padronizados e gráficos de efeitos principais das variáveis estudadas.

Figura 3.17 – Medição de desgaste de vida de ferramenta com microscópio digital.

A Tabela 3.5 demonstra matriz de ensaios testados:

Tabela 3. 5 – Matriz de ensaios, f_z=0,08mm, a_p=1mm

Nível	Condição de lubrificação / refrigeração	Velocidade de corte (m/min)	a_e (largura de usinagem em % do diâmetro da fresa)
1	Submersa em óleo integral	v_{C1} = 280	70%
			100%
		v_{c2} = 336	70%
			100%
2	submersa em fluido aquoso (emulsão)	v_{C1} = 280	70%
			100%
		v_{c2} = 336	70%
			100%
3	refrigeração convencional - jorro de fluido aquoso (emulsão)	v_{C1} = 280	70%
		v_{c2} = 336	70%
4	Mínimo Volume de Óleo (integral)	v_{C1} = 280	70%
		v_{c2} = 336	70%
5	mínima quantidade de fluido (MQF)	v_{C1} = 280	70%
		v_{c2} = 336	70%
6	Seco	v_{C1} = 280	70%
		v_{c2} = 336	70%

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda os resultados dos ensaios em operações de fresamento em acabamento para as diferentes condições de lubri-refrigeração explicadas no capítulo 3.

Em um primeiro momento foi analisada a influência de cada tipo de lubrificação e refrigeração sobre o desgaste e vida da ferramenta testados para largura de usinagem de 70% do diâmetro da fresa. Para os dois melhores resultados em termos de vida de ferramenta, ou seja, para a usinagem submersa em óleo integral (nível 1) e para a usinagem submersa em emulsão de óleo em água (nível 2), também foram analisados os resultados obtidos para largura de usinagem de 100% do diâmetro da ferramenta.

Em um segundo momento, foi verificada a influência destas variáveis na rugosidade de cada superfície usinada. Também foi medida durante as usinagens, a potência sobre o fuso principal da máquina, dado que não era possível a medição da força de usinagem com dinamômetro, em função do dano que a usinagem submersa traria a este instrumento.

4.1 **Análise dos desgastes e da vida da ferramenta**

Conforme descrito no capítulo 3, foi definido o desgaste de flanco de 0,3 mm para determinar o fim da vida da ferramenta em cada experimento. A Figura 4.1 mostra o resultado após pelo menos uma usinagem e uma réplica de cada condição testada. O resultado é a média entre o teste e a réplica.

A condição submersa em óleo integral obteve o melhor resultado do teste ao alcançar o volume de 206,70 cm^3 sob velocidade de corte de 280 m/min, e 115,61 cm^3 sob velocidade de corte de 335 m/min. Sob as duas velocidades de corte, normal e alta, as variáveis que obtiveram o maior volume de cavaco usinado por ferramenta foram, nesta ordem: a já citada condição submersa em óleo integral, condição submersa em emulsão (140,9 cm^3 sob velocidade de corte normal e 93,9 cm^3 sob velocidade alta), MQF - mínima quantidade de fluido (volume de 130 cm^3 sob velocidade normal e 86,7 cm^3 sob velocidade alta), corte a seco (119,2 cm^3 sob velocidade de corte normal e 79,5 cm^3 sob velocidade alta), corte com fluido em abundância (93,9 cm^3 sob velocidade de corte normal e 75,9 cm^3 sob velocidade alta) e por último, o mínimo

volume de óleo (MVO) com apenas 39,7 cm^3 de cavaco removidos com a velocidade normal e 30,7 cm^3 sob velocidade alta.

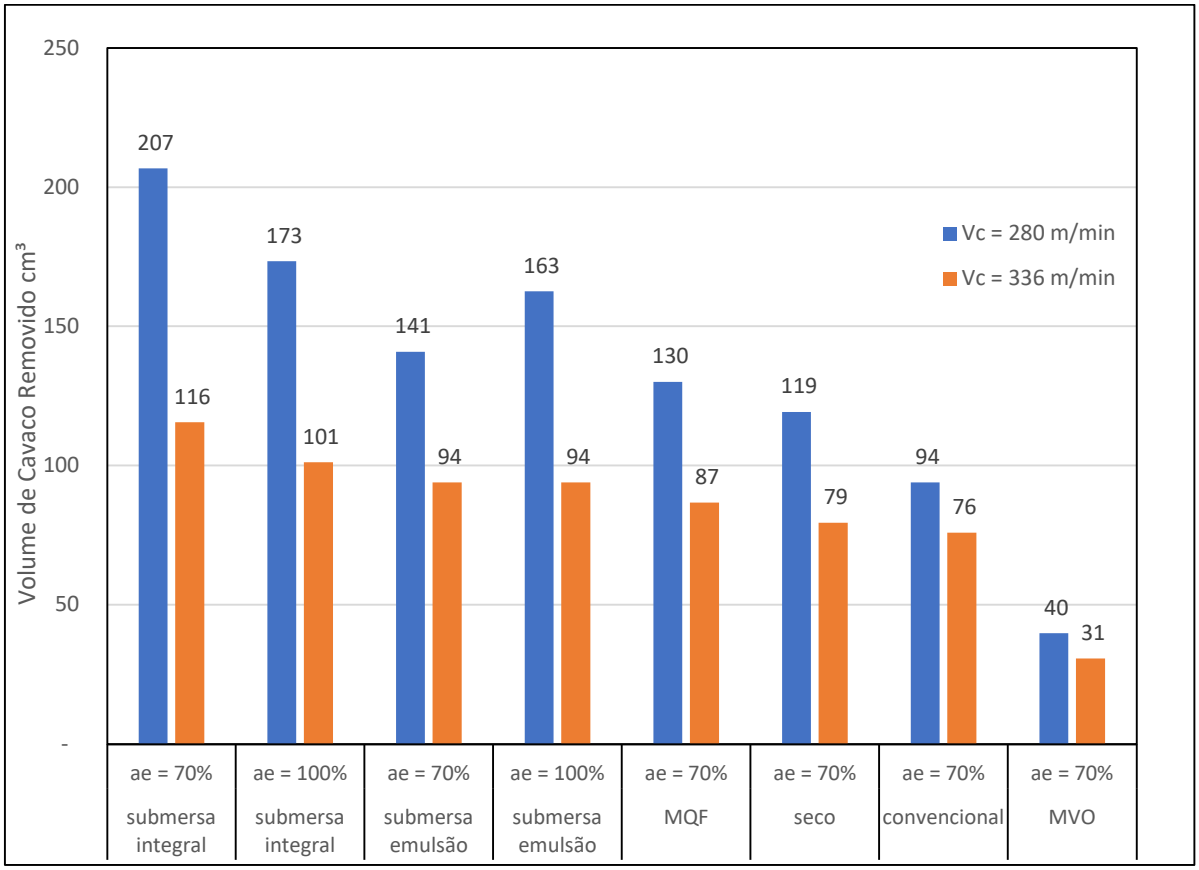


Figura 4.1 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm a_e = 70%D.

A condição submersa em óleo integral foi a melhor do teste, pois a lubrificação deve ter favorecido a redução do atrito na área de contato da ferramenta com a peça, o que permitiu maior volume de cavaco removido por vida da ferramenta. Além disso, por manter a ferramenta sempre debaixo de óleo, dificultou a ocorrência da variação de temperatura, que causaria trincas térmicas na ferramenta. A Figura 4.2 mostra fotos das regiões desgastadas da superfície de folga das ferramentas utilizadas nos experimentos. Nela é possível verificar que não houve trincas aparentes na ferramenta utilizada na condição submersa com óleo integral (nível 1).

A condição submersa com fluido aquoso (emulsão) apresentou o segundo melhor resultado (melhor até mesmo que outras condições de lubrificação como o MQF ou o MOV, o que não era esperado).

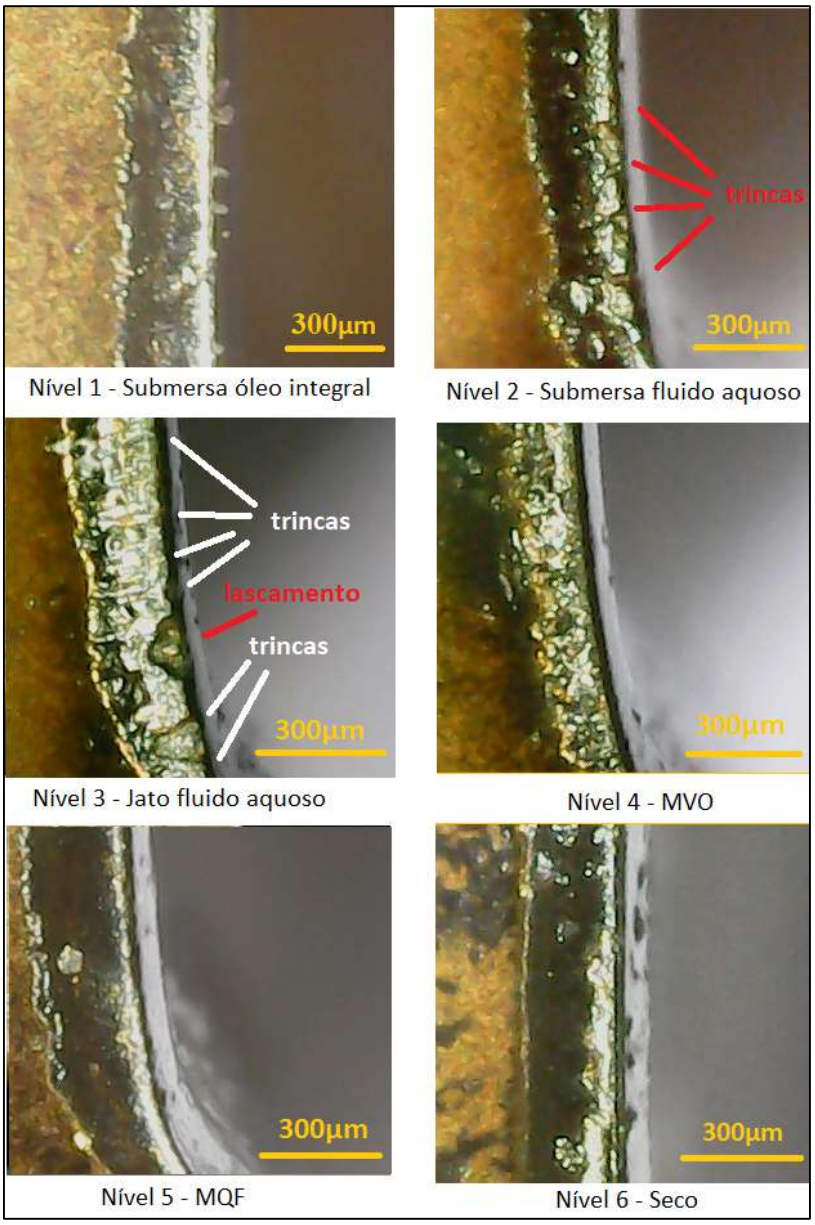


Figura 4.2 – Desgaste para cada nível de lubri-refrigeração testado, com V_C = 280 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa

Apesar da variação da temperatura de corte ser danosa à ferramenta em corte interrompido, com surgimento de trincas e outras avarias de origem térmica (pode-se ver algumas trincas pequenas na aresta de corte utilizada nesta condição na Figura 4.2, nível 2), e estes danos serem acentuados com o fluido aquoso (emulsão de óleo em água), em função da alternância da temperatura, em que os dentes ora estão em corte (período ativo com alta temperatura) e ora estão em rotação livre sem corte (período inativo com redução da temperatura), esta condição aparentemente permitiu a diminuição da temperatura como um todo da área da ferramenta em contato com a peça e o cavaco, pelo fato da peça e fresa estarem

mergulhadas em um ambiente com única e reduzida temperatura. Com isto, a variação da temperatura em cada revolução da ferramenta também foi menor, dificultando a ocorrência das trincas térmicas. Além disso, o óleo semissintético presente no fluido tem alguma capacidade lubrificante. Assim, nesta condição submersa, o fluido tem maiores possibilidades de penetrar nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça e, com isso, alguma lubrificação ocorreu e a vida da ferramenta foi mais longa em relação à maioria das condições de lubri-refrigeração testadas.

O MQF com a lubrificação sob corrente de ar obteve o terceiro melhor resultado em termos de vida da ferramenta. Conforme já demonstrado em alguns trabalhos anteriores (RAEL, 2004), o óleo integral pulverizado (que tem alta capacidade de lubrificação) sobre a ferramenta tem contato com ela principalmente no período inativo da aresta de corte em cada revolução. Este óleo é levado pela ferramenta quando esta entra na peça e a mantém lubrificada também durante o período ativo. Desta forma a aresta da ferramenta ao entrar em contato com a peça já está lubrificada, o que proporciona menor atrito e faz também que menor calor seja gerado no processo de corte. É uma hipótese que esta condição de lubri-refrigeração teve desempenho pior que a condição submersa com fluido aquoso pois, apesar de ter óleo de maior poder lubrificante, o acesso à região de corte durante o período ativo da aresta não foi tão eficiente.

O corte a seco foi o quarto melhor resultado, superior ao corte com refrigeração da máquina-ferramenta (fluido aquoso em abundância). No corte a seco tem-se menor variação de temperatura durante a revolução da ferramenta que no corte com fluido em abundância, o que minimiza as trincas térmicas, mas não se tem nenhuma lubrificação da aresta, o que faz com que a vida da ferramenta seja menor que aquelas que ocorreram nas condições em que a lubrificação foi mais intensa (usinagens submersas e MQF). De novo, pode-se ver na Figura 4.2 (nível 6), que não houve trincas na aresta quando esta condição foi utilizada.

A condição com jorro de fluido aquoso em abundância (convencional da máquina ferramenta) teve o quinto melhor resultado dentre todas as condições, como era de se esperar. Esta condição quase não propicia lubrificação, pois possui quantidade muito pequena de óleo integral e gera variação de temperatura muito alta, devido à presença de água no fluido, danificando a aresta de corte com trincas e lascamento, como foi visto no capítulo de revisão teórica deste trabalho. Estas avarias levaram a ferramenta ao seu fim de vida com menor volume de cavaco removido que o corte a seco. A Figura 4.2 (nível 3) mostra trincas presentes na aresta de corte usada na condição com jorro de fluido aquoso. Resultados mostrando o melhor desempenho do corte a seco com relação ao corte com fluido em abundância também foram obtidos em outros trabalhos, como os de Braghini et al (2008). O uso de fluido em abundância

incentiva a variação de temperatura devido ao alto resfriamento da aresta de corte no período inativo, o que causa choques térmicos e propicia formação de trincas e micro lascamentos, e estes levam ao lascamento com retirada de grande porção da ferramenta (RAEL, 2004), conforme está identificado na Figura 4.2 (nível 3).

Um fato inesperado neste trabalho foi com a condição de mínimo volume de óleo (MVO) em que um "filete" de óleo (em pressão atmosférica, sem direcionamento específico do jato de óleo) é aplicado sobre a ferramenta de corte durante o fresamento, com a intenção de lubrificá-la para gerar menor atrito e, portanto, menor calor. Esta condição já foi apresentada com excelentes resultados por Braghini et al. (2008), conforme descrito no capítulo 2 deste trabalho, mas o resultado não foi repetido neste trabalho. A possível explicação é que o volume de óleo aplicado na ordem de 75 ml/min foi muito baixo e, com isso, não houve a lubrificação da ferramenta e tampouco o atrito foi reduzido. Ainda pode ser que o líquido aplicado em volume mínimo pode ter reduzido o atrito de forma parcial e intermitente, criando um efeito de deslizamento da ferramenta na peça e isso de alguma forma pode ter provocado maiores variações térmicas na ferramenta (em comparação ao corte a seco) e maiores variações das tensões nesta zona. Em outras palavras, o baixo volume de óleo não foi capaz de proporcionar um filme de óleo contínuo entre ferramenta, peça e cavaco e, com isso, fez com que as condições de atrito fossem intermitentes, gerando variação de temperatura da ferramenta e diminuição de sua vida. Importante notar que esta condição apresentou desempenho pior que o corte a seco e que o corte com fluido em abundância via jorro. Portanto, esta condição refrigerou mais que o corte seco, em que a refrigeração somente ocorre pela rotação da fresa no ar no período inativo do corte (lembrando que a refrigeração intermitente da aresta de corte, típica do fresamento é danosa para a vida da ferramenta), mas não conseguiu lubrificar, devido ao baixo volume de óleo e ao fato de que este óleo estava caindo sobre a ferramenta por gravidade e não pelo seu correto direcionamento.

Em todos os níveis de lubri-refrigeração foram obtidas maiores vida da ferramenta para condições sob velocidade de corte normal (mais baixa). Este fato já era esperado, pois o aumento da velocidade de corte significa aumento de temperatura, que incentiva mecanismos de desgaste como difusão, oxidação e abrasão, bem como aumenta a velocidade de impacto dos dentes da ferramenta sobre a peça, principalmente em caso de corte interrompido como o fresamento, o que aumenta a força do impacto e aumenta a variação térmica ao longo de uma revolução da ferramenta, e, consequentemente, provoca a ocorrência de avarias como trincas e lascamento (RAEL, 2004) (KHATRI; JAHAM, 2018). Entretanto, a queda da vida de ferramenta foi mais acentuada (em torno de 47%) no corte com usinagem submersa com óleo

integral que nos outros cortes, que variaram de 20% (MVO e convencional com jato de emulsão de óleo em água) a 35% (usinagem a seco, usinagem submersa em fluido aquoso, usinagem MQF).

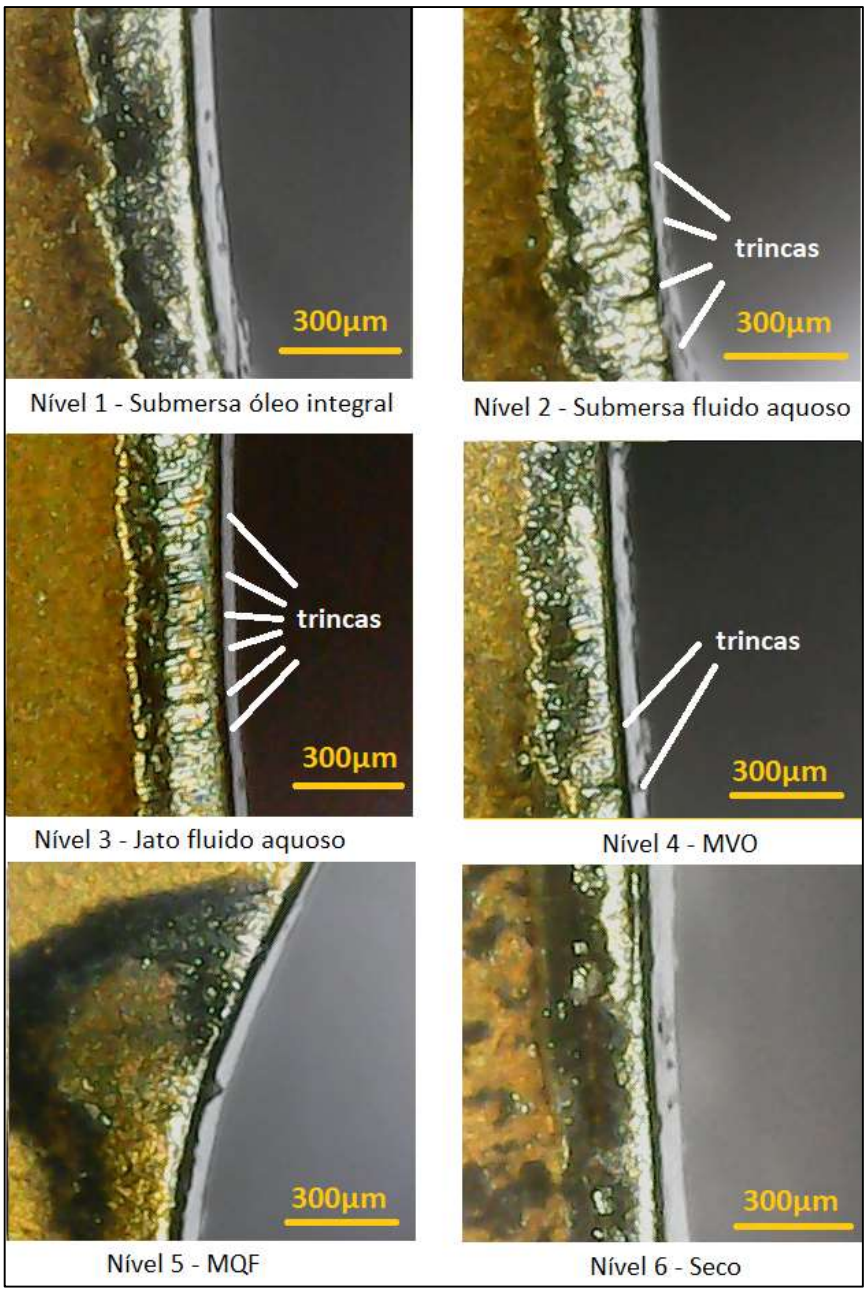


Figura 4.3 – Desgaste para cada nível de lubri-refrigeração testado, com V_C = 336 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa

No caso da usinagem submersa, aparentemente à medida que a velocidade de corte foi aumentada, a temperatura influenciou o mecanismo de desgaste de abrasão e *attrition* que causaram certos arrancamentos na pastilha determinando o aprofundamento mais rápido do

desgaste em relação à usinagem com velocidade normal. Pode-se aventar também a hipótese de que o aumento da rotação da fresa aumentou a turbulência do óleo em contato com a ferramenta, o que pode ter prejudicado a lubrificação na área de contato. Há que se notar, porém que, mesmo utilizando-se velocidade de corte mais alta, a condição de usinagem submersa com óleo integral ainda se mostrou a de melhor desempenho em termos de vida da ferramenta que as demais condições de lubri-refrigeração testadas. Pode-se verificar na Figura 4.3 que não houve ocorrência de trincas na aresta de corte utilizada nesta condição de lubri-refrigeração na velocidade de corte mais alta.

Na usinagem abundante de fluido aquoso ocorreu contribuição adicional de trincas térmicas nas duas velocidades observadas para formação do desgaste. As trincas que já foram mostradas na Figura 4.2 também podem ser vistas na Figura 4.3 quando se utilizou velocidade mais alta e refrigeração com jato de fluido aquoso. Assim, a usinagem com velocidade mais alta não apresentou bom resultado e não se distanciou muito da usinagem com velocidade normal. O mesmo ocorreu com o MVO, a menor redução da vida teve como causa a alta temperatura aliada à fadiga mecânica que ocorreu de forma agressiva já na velocidade menor. Por isso, a diferença de vida de uma velocidade para outra foi de "somente" 20%. A temperatura foi desde o início determinante nas duas velocidades de corte para o fim de vida da ferramenta.

Pode-se ver na Figura 4.3 algumas trincas térmicas na condição com usinagem submersa com fluido aquoso indicando que, nesta condição, a variação de temperatura da ferramenta foi intensa, o que contribuiu para que a ferramenta não tivesse vida tão longa quanto aquela utilizada na condição submersa e óleo integral.

Conforme explicado no capítulo 3 deste trabalho, para as duas melhores variáveis de lubri-refrigeração do teste, também foram analisadas duas diferentes larguras de usinagem (larguras fresadas), ou seja, a_e com 14 mm (70% do diâmetro da fresa) e a_e com 20 mm (diâmetro da fresa em sua totalidade). A Figura 4.1 mostra ainda que, para a usinagem submersa com óleo integral, foram removidos maiores volumes de cavacos para largura de usinagem de 14 mm que com 20 mm, sob as duas velocidades de corte. Este resultado já era de certa forma esperado, pois com menor largura de usinagem, a fresa passa menos tempo aquecendo e mais tempo esfriando em cada revolução da ferramenta que na condição com maior largura de usinagem, quando o contrário ocorre. Com isso a temperatura média de corte é mais baixa na condição com menor largura de usinagem, e a vida da ferramenta é maior.

Com a usinagem submersa com fluido aquoso o mesmo efeito (maior volume de cavaco removido por vida de ferramenta com a condição de menor a_e) não ocorreu. Para velocidade alta (336 m/min) o volume de cavaco removido foi o mesmo para as duas larguras de usinagem

e no caso da velocidade de corte normal (280f m/min), a condição com largura de usinagem de 20 mm obteve o melhor resultado. Uma possível explicação é que, apesar de larguras de usinagem maiores proporcionarem maiores temperaturas média de corte (DINIZ et al., 2014), conforme explicado previamente, como o ambiente era submerso em fluido aquoso que circulava constantemente, isso pode ter minimizado e muito este efeito superior da temperatura de corte, fazendo com que o impacto da variação cíclica da temperatura normalmente decorrente de operação de fresamento, em função do aumento do a_e, fosse menor.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram a evolução dos desgastes das ferramentas com o volume de cavaco removido nas velocidades de corte normal (280 m/min) e alta (336 m/min) respectivamente.

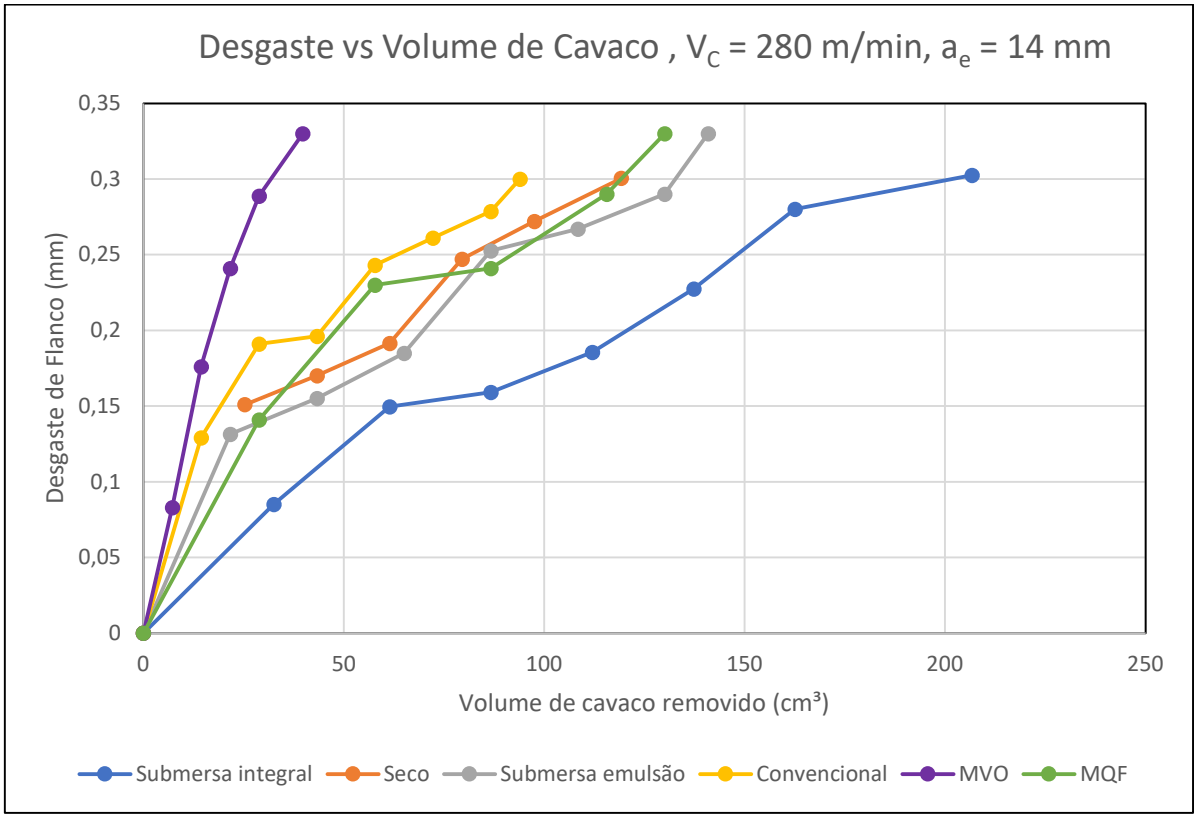


Figura 4.4 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm – V_C = 280 m/min

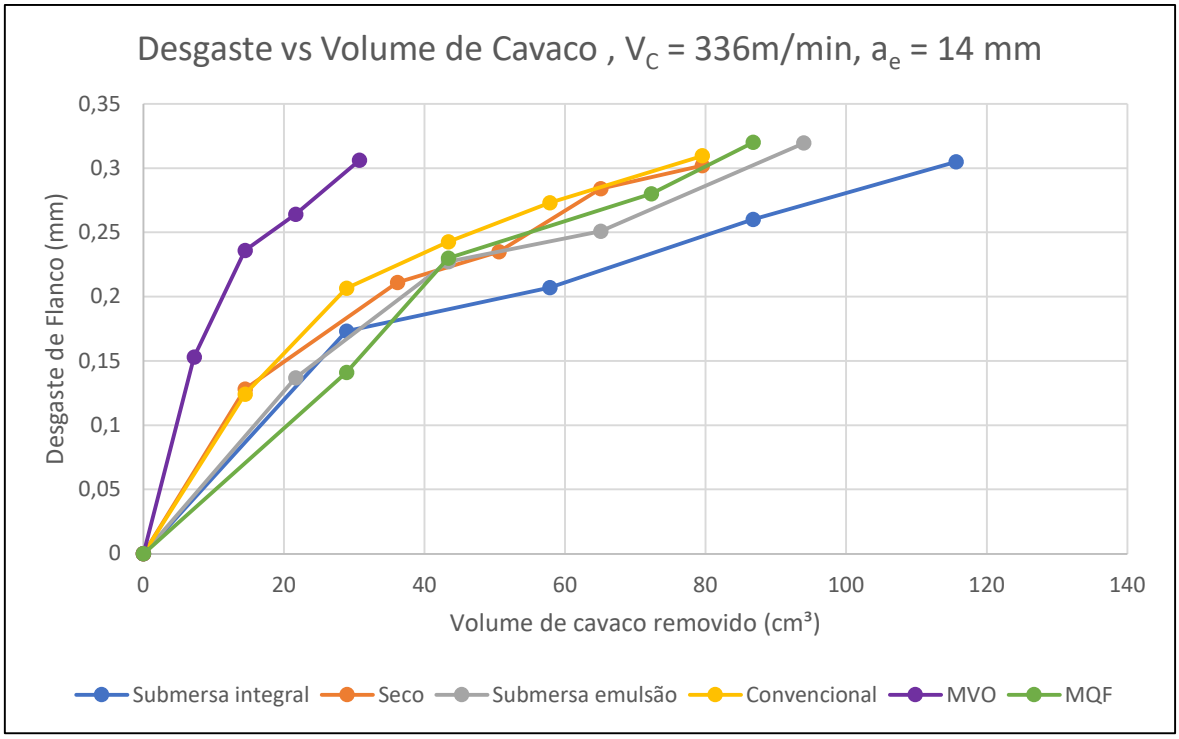


Figura 4.5 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração testadas para desgaste limite V_B = 0,3 mm – V_C = 336 m/min

Machado et al. (2015) apontam que a evolução de desgaste se dá em 3 estágios, de acordo com a Figura 4.6: estágio I, desgaste primário ou inicial, que costuma ser mais acelerado, natural da adequação ao sistema tribológico envolvido, como se a ferramenta estivesse se acostumando ao processo, passando a apresentar uma taxa decrescente com o passar do tempo; estágio II, quando a ferramenta já está acomodada ao processo e o desgaste apresenta-se de forma crescente, normalmente de forma não acelerada e constante durante o tempo; e o estágio III quando nova inflexão ocorre em função dos mecanismos de desgaste, e o desgaste acelera até ocasionar a quebra da ferramenta caso o corte continue.

De um modo geral, de acordo com a Figura 4.4 a evolução dos desgastes durante os ensaios deste trabalho seguiu o descrito acima, pois os desgastes iniciais foram todos acelerados (com pequeno volume de remoção de cavaco o desgaste de flanco já era próximo ou maior que 0,1 mm) e, posteriormente, ocorreu o estágio 2 com a evolução constante. Quando o desgaste de flanco (V_B) de 0,3 mm foi atingido, os desgastes das ferramentas não alcançaram o início do estágio III. Entretanto, a exceção foi o nível MVO, onde se nota evolução mais acentuada do desgaste nas duas velocidades de cortes testadas, sem seguir os 3 estágios, pois, conforme já explicado, a temperatura foi determinante para o fim da vida da ferramenta.

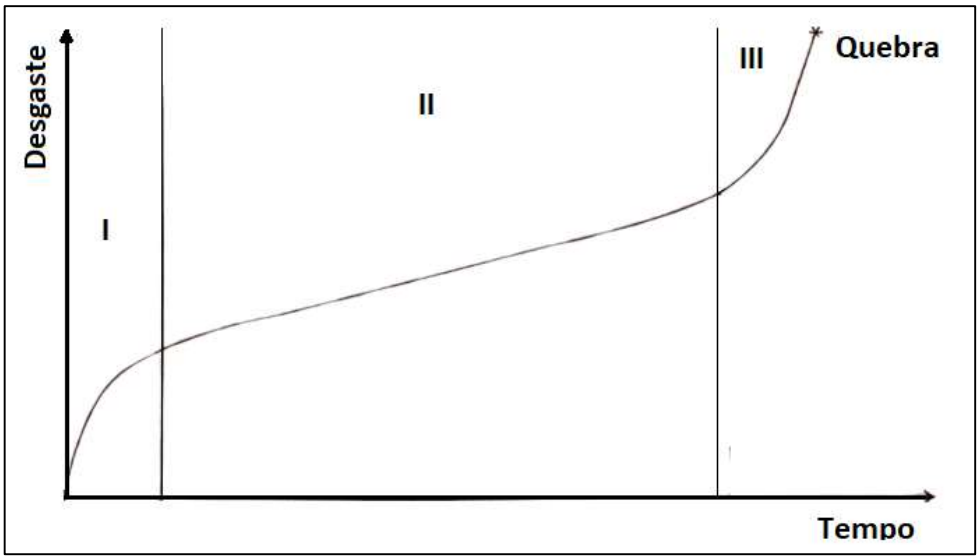


Figura 4.6 – Fases de evolução do desgaste (MACHADO et al., 2015).

Como já observado, o mínimo volume de óleo não reduziu atrito, ao contrário, piorou a vida da ferramenta, sendo este o pior resultado do teste. Já com a usinagem submersa em óleo integral, o desgaste da ferramenta parece ainda não ter alcançado o estágio III nas duas velocidades de corte, pois o desgaste continua a evoluir de forma constante (sem nenhuma inflexão observada nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5). Mas é importante ressaltar que em nenhum momento do crescimento do desgaste em quaisquer das condições utilizadas ocorreu um salto abrupto do valor do desgaste, o que indicaria que tivesse ocorrido lascamento intenso ou quebra da aresta. Assim, mesmo com a presença de trincas térmicas em algumas das condições de lubri-refrigeração, e até alguns pequenos lascamentos, a interrupção do experimento com desgaste de flanco de 0,3 mm impediu que a ruptura ocorresse.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as evoluções dos desgastes das ferramentas por volume de cavaco removido sob as velocidades de corte normal e alta respectivamente, somente para os ensaios que foram realizados em dois valores de largura usinagem.

De forma similar ao observado com as comparações das condições anteriores, o padrão de evolução de desgaste obedeceu aos 3 estágios demonstrados com a Figura 4.6, e os desgastes observados ainda não tinham entrado na fase 3 quando os ensaios foram terminados (V_B = 0,3 mm). As condições submersas sob emulsão apresentaram uma evolução de desgaste mais acentuada que aquelas sob óleo integral. Este fato ocorreu porque estas tiveram seus fins de vida acelerados nesta fase final, principalmente pelo surgimento de trincas térmicas.

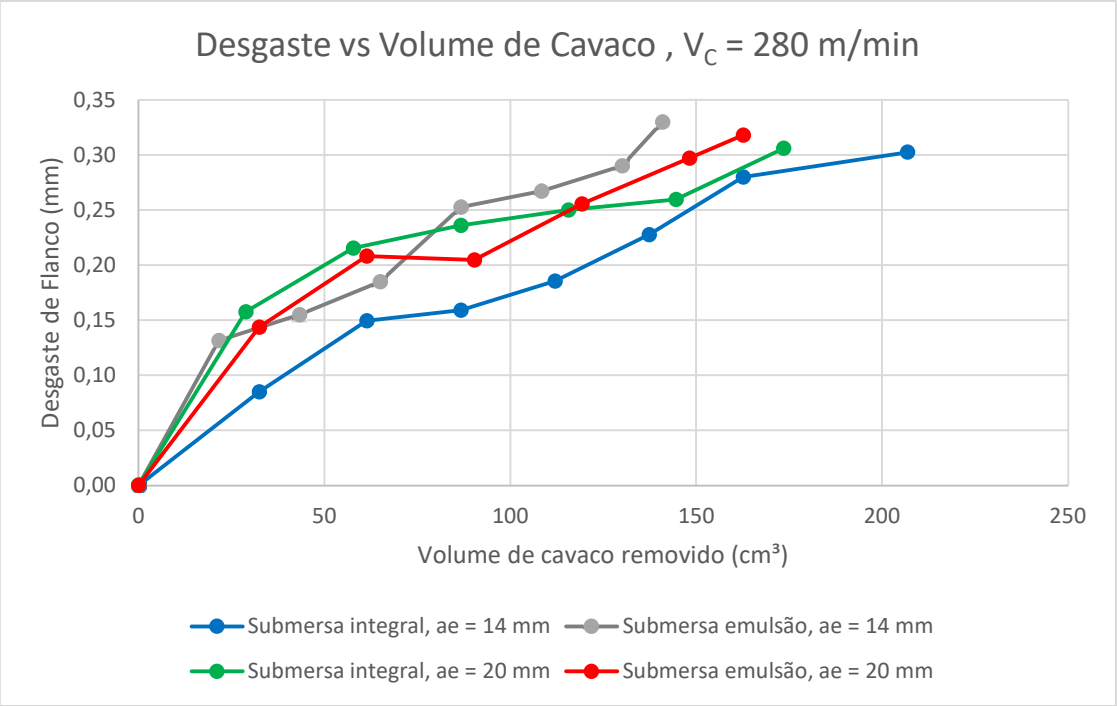


Figura 4.7 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração e larguras de usinagem testadas para desgaste limite V_B = 0,3 mm – V_C = 280 m/min

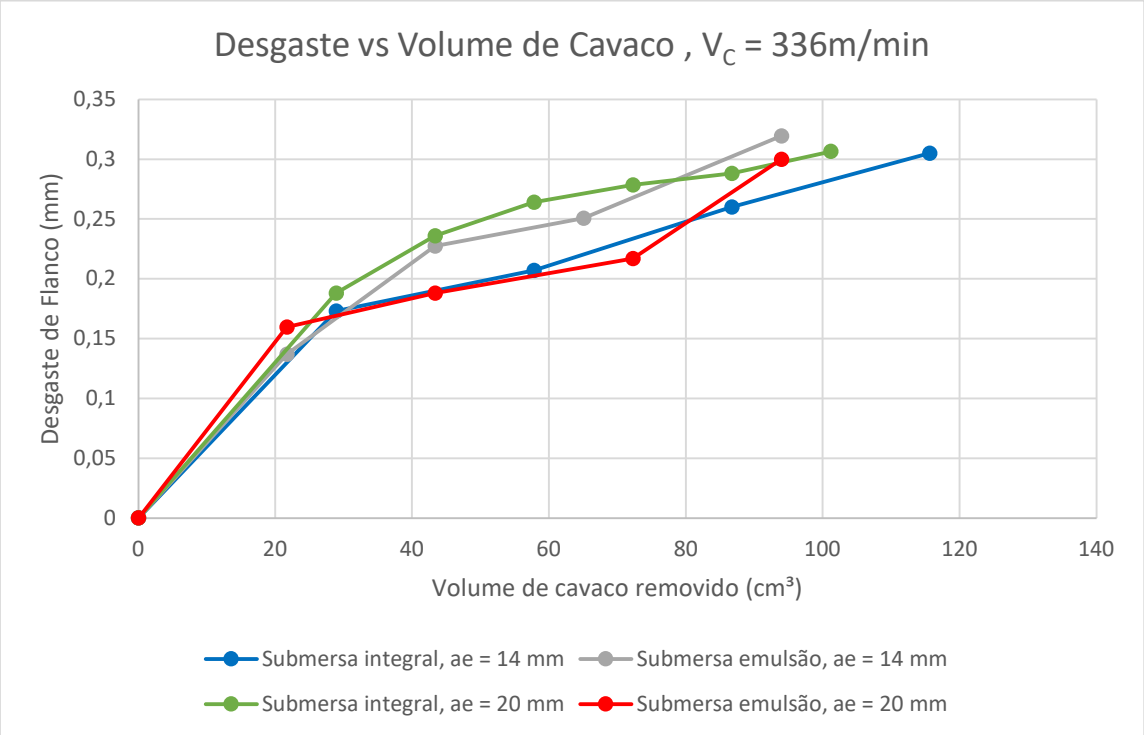


Figura 4.8 – Volume de cavaco removido em cm^3 em função de variáveis de lubrificação / refrigeração e larguras de usinagem testadas para desgaste limite de flanco V_B = 0,3 mm – V_C = 336 m/min

4.1.1 **Análise estatística dos resultados de vida da ferramenta**

O gráfico de Pareto da Figura 4.9 mostra os resultados e influência das variáveis de entrada “tipo de lubri-refrigeração” e “velocidade de corte” na vida da ferramenta. As variáveis que se encontram acima da linha vermelha definida pelo valor “P” são aquelas que foram determinantes para a formação do resultado (resposta) (CAMPOS, 2003).

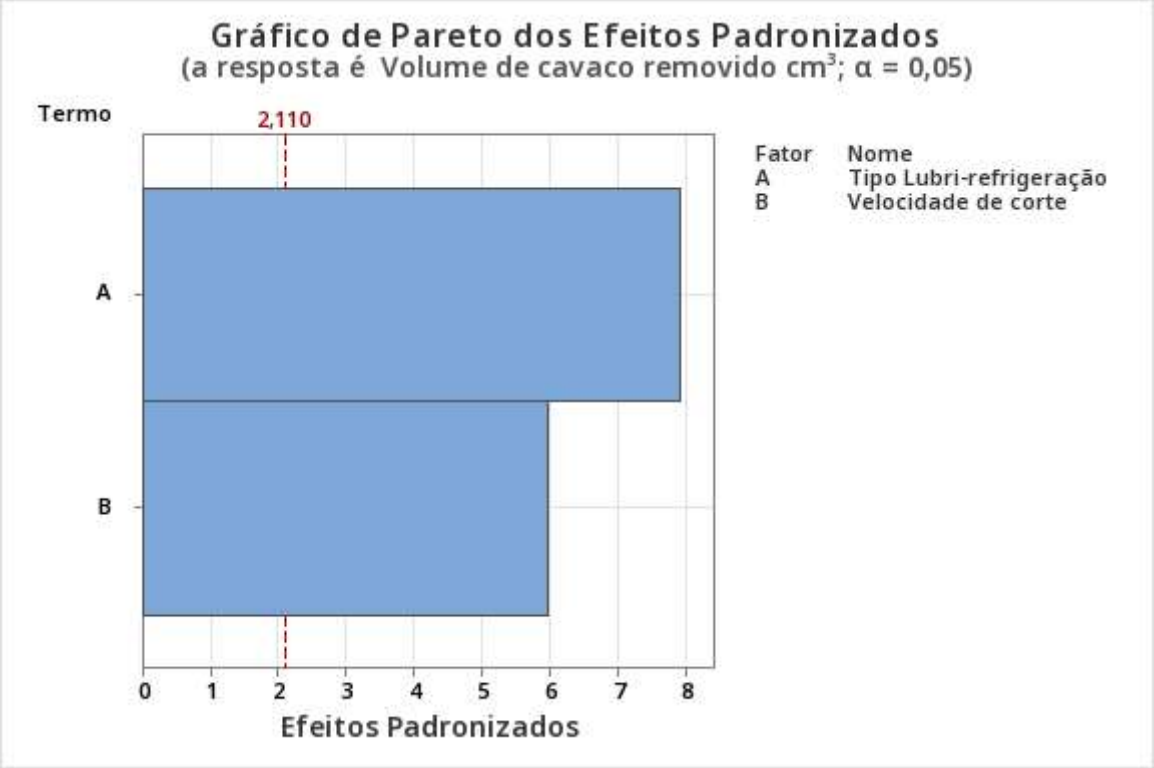


Figura 4.9 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da vida da ferramenta, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em cm³ de volume de cavaco removido (95% de confiança)

Neste caso as duas variáveis influenciaram os resultados de forma significativa com 95% de confiança (α=0,05). Em ordem de significância o tipo de lubrificação - refrigeração foi mais importante que a velocidade de corte para determinar a vida da ferramenta.

Isso porque, conforme demonstra a Figura 4.10, com os efeitos principais ocorridos neste ensaio, a variação de vida da ferramenta entre o melhor nível testado de lubri-refrigeração (nível 1 – usinagem submersa em óleo integral) e o pior resultado do teste (nível 4, MVO), foi da ordem de 375%. Ainda, se for comparado com o segundo pior resultado do teste, a vida da

ferramenta no método submerso é mais que o dobro que no convencional com jorro de fluido aquoso (nível 3 deste teste). Já para a variável velocidade corte, esta variação foi da ordem de 66% maior volume de cavaco removido para a velocidade de corte menor.

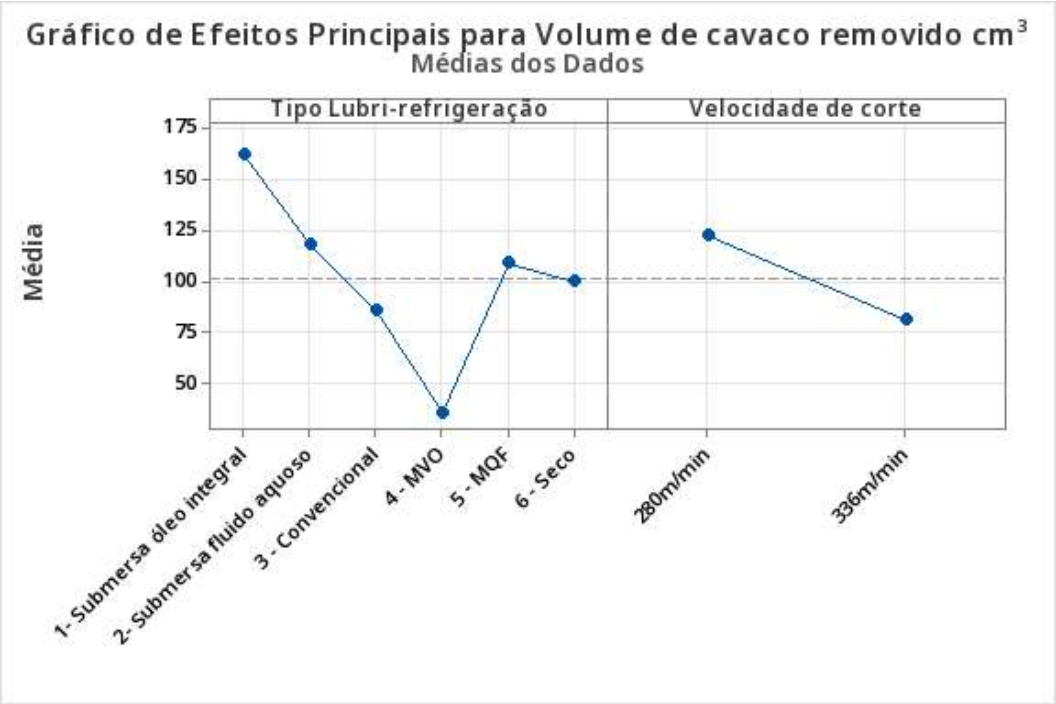


Figura 4.10 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da vida da ferramenta, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm) medida em cm³ de volume de cavaco removido (95% de confiança)

Há que se reforçar as razões destas influências. A vida da ferramenta ser maior para menores velocidades de corte já é um efeito esperado, pois maiores velocidades de corte propiciam maiores temperaturas que aceleram os efeitos dos mecanismos de desgastes e encurtam a vida da ferramenta. Os resultados mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10 somente confirmam o que já foi visto quando da análise da Figura 4.1 e não serão mais discutidos. Porém, a maior influência da condição de lubri-refrigeração que da velocidade de corte no processo de fresamento analisado é um ponto que merece destaque. Este resultado indica que, se num processo produtivo se deseja que a vida da ferramenta seja aumentada, não é necessário que a velocidade de corte seja diminuída, o que resultaria em maior tempo de produção de uma peça. Pode-se simplesmente alterar a condição de lubri-refrigeração, o que não impacta o tempo de produção por peça e, se realizado da maneira adequada, gera maior vida da ferramenta e, consequentemente, também gera diminuição do tempo de produção por peça pela diminuição dos tempos inoperantes da máquina-ferramenta, para a troca de ferramenta. Além disso, esta

ação também diminui os custos de usinagem. Este trabalho propõe que a condição de lubri-refrigeração com peça submersa em óleo integral seja analisada nos diversos ambientes de produção em que se utiliza o fresamento. Até o ponto que se conseguiu chegar na revisão bibliográfica realizada neste trabalho, não se encontrou este tipo de condição de lubri-refrigeração utilizada em nenhum outro ambiente, tanto industrial, quanto de pesquisa.

A Figura 4.11 mostra o gráfico dos efeitos padronizados da influência na vida da ferramenta para os dois níveis de lubri-refrigeração que obtiveram os melhores resultados (nível 1 e nível 2) em combinação com a variável velocidade de corte e variável largura de usinagem.

Tanto a variável tipo de lubri-refrigeração como velocidade foram influentes nesta ordem para formação do resultado. A variação da largura de usinagem, entretanto, não foi significativa para o resultado obtido, uma vez que seus valores se encontram menores que o valor "P" (para nível de confiança 0,95).

Já a Figura 4.12 demonstra os efeitos principais destas variáveis da Figura 4.11 sobre a vida da ferramenta. A velocidade de corte e o tipo de lubri-refrigeração obtiveram os mesmos resultados apresentados na Figura 4.10 e já tiveram seus efeitos acima explicados.

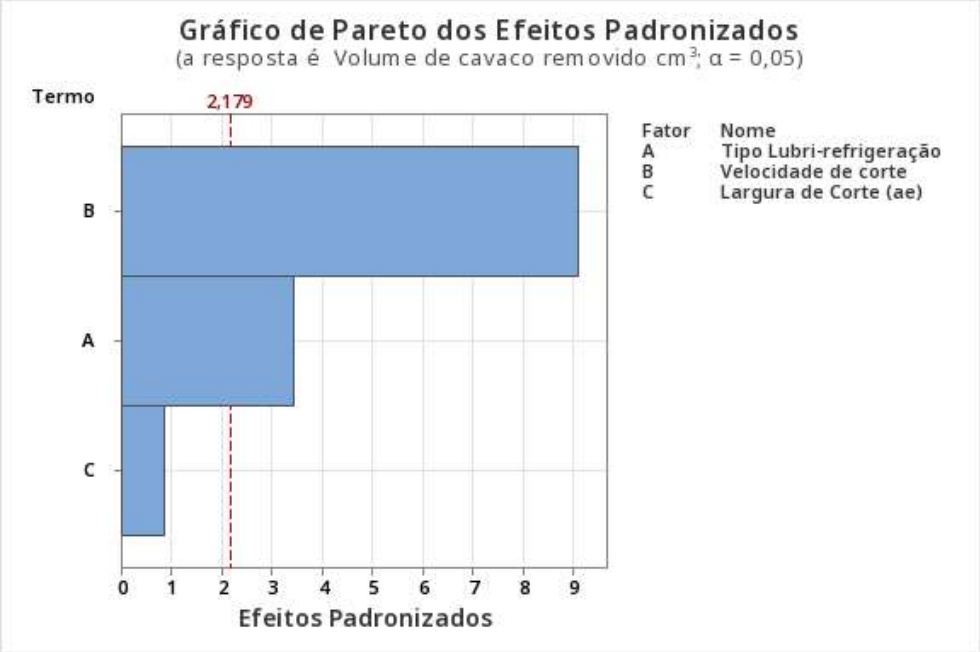


Figura 4.11 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da vida da ferramenta para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em cm³ de volume de cavaco removido (95% de confiança)

No entanto, a variação do a_e não influenciou significativamente na vida de ferramenta. Este resultado se deve ao fato que as usinagens submersas inibiram o efeito de maior temperatura causado com largura de usinagem maior, da mesma forma que isso também inibiu a variação cíclica da temperatura da ferramenta, fazendo com que a vida da ferramenta pouco alterasse diante desta variação.

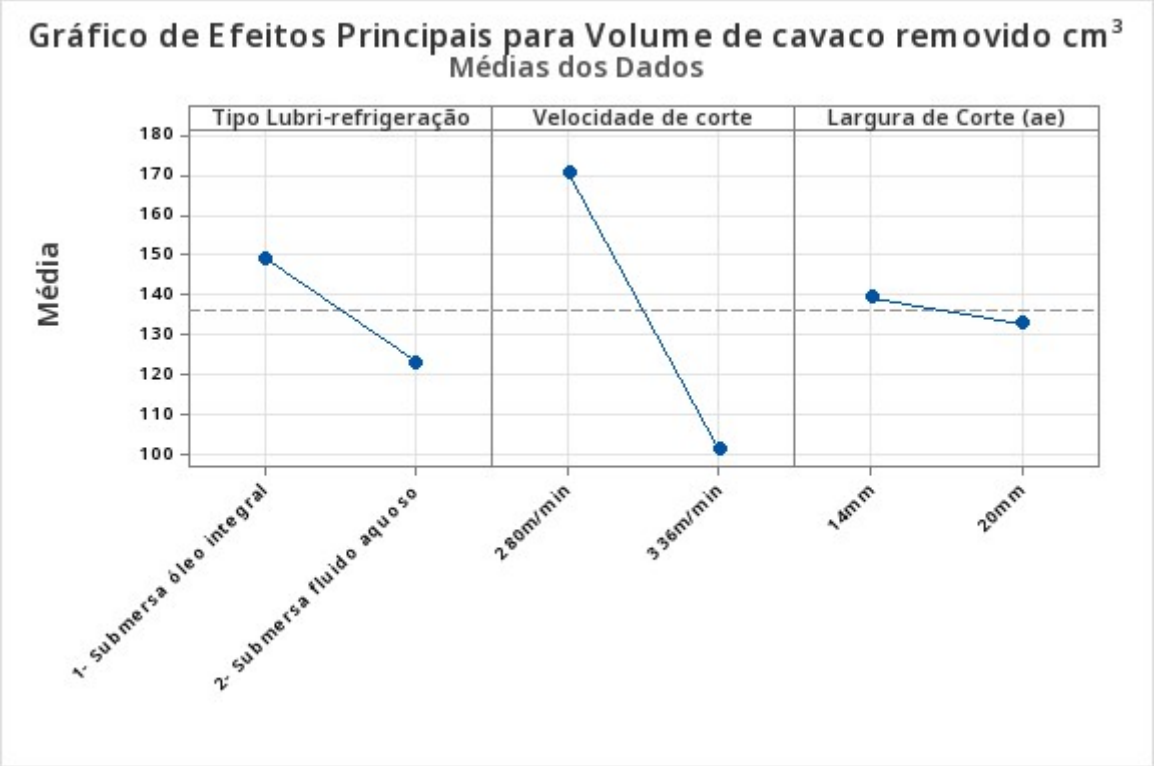


Figura 4.12 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da vida da ferramenta, para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em cm³ de volume de cavaco removido (95% de confiança)

4.1.2 **Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas**

Conforme já explicado na metodologia, escolheu-se analisar as condições com usinagem submersa em fluido integral, submersa em fluido aquoso, fluido de corte em abundância e corte a seco.

4.1.2.1 **Usinagem submersa em óleo integral**

Na Figura 4.13, pode-se observar a imagem microscópica do desgaste utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) que determinou o fim de ensaio para a condição 1 (submersa em óleo integral) usando v_c = 280 m/min e largura fresada (a_e) equivalente a 70% do diâmetro da fresa. O desgaste delimitador foi de flanco (V_B), que neste caso chegou a alcançar 0,32 mm, após o último passe.

Observa-se que a superfície desgastada tem predominantemente o aspecto "liso", característica do mecanismo de difusão, quando os átomos da peça usinada e ferramenta são migrados entre si em escala atômica, normalmente devido à alta temperatura de corte gerada na zona de cisalhamento (TRENT; WRIGHT, 2000). Não se vê na região de desgaste riscos abrasivos.

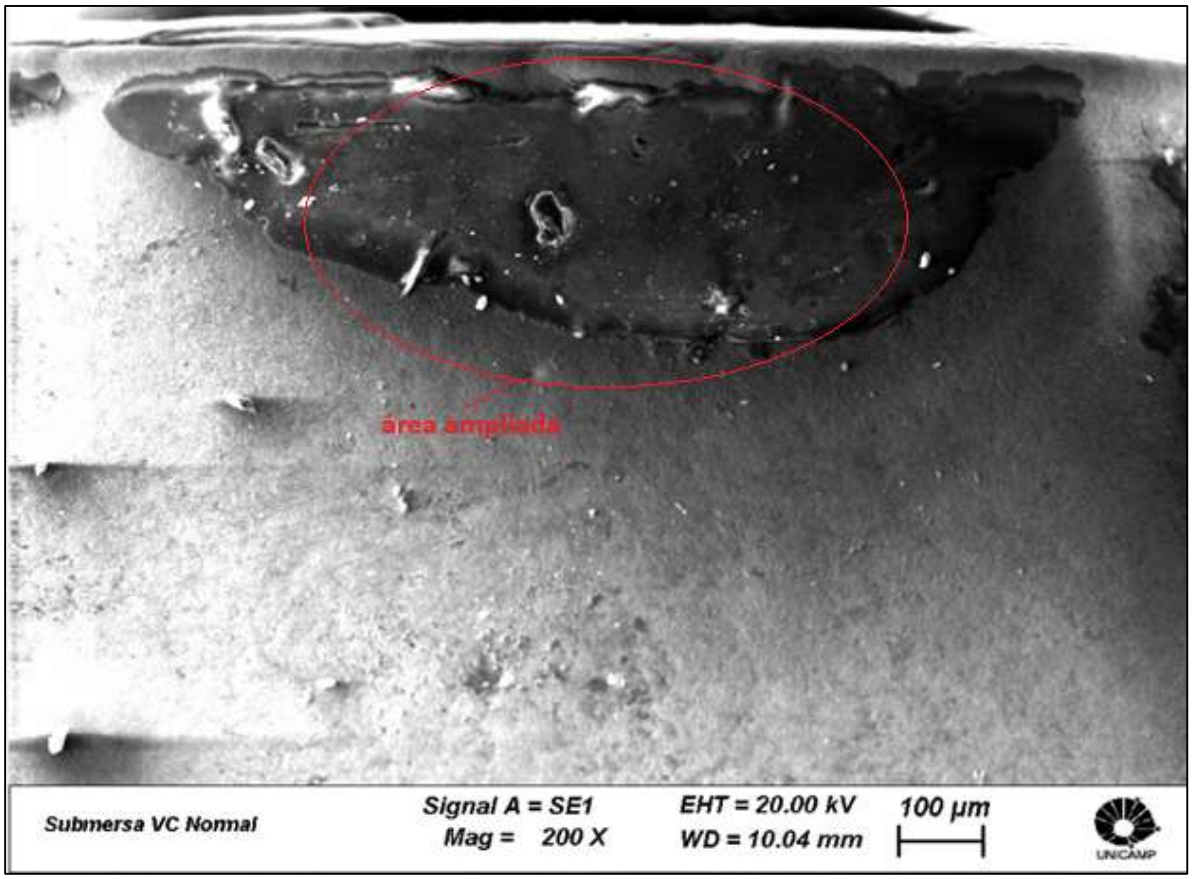


Figura 4.13 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) condição submersa óleo integral com velocidade de 280 m/min, com a_e= 70% do diâmetro da fresa

Ao se ampliar ainda mais a região de desgaste da Figura 4.13, obtém-se com a Figura

4.14 uma imagem mais nítida, em que também pode-se observar alguns pontos mais ásperos em determinadas regiões sobre a superfície de aspecto predominantemente liso. Tais pontos podem indicar a adesão de material da peça/cavaco à superfície da ferramenta, com posterior remoção das partículas (a nível de grãos, não atômico) da mesma, características típicas do mecanismo de adesão, denominado por Trent e Wright (2000) como *attrition*. Também se observa inúmeros pontos mais claros, "prateados" ao longo da superfície desgastada. De acordo com a Figura 4.15 na qual se tem os elementos químicos encontrados pela espectrometria por energia dispersiva, estes elementos mais claros, mais precisamente sob os pontos identificados como *spectrum* 4 e 5, têm a presença de alumínio e oxigênio, muito provavelmente pela profundidade de desgaste atingir a alumina (Al_2O_3), segunda camada da cobertura da ferramenta. Porém, a presença destes elementos indica que a camada de cobertura ainda não tinha sido totalmente removida pelo desgaste da ferramenta.

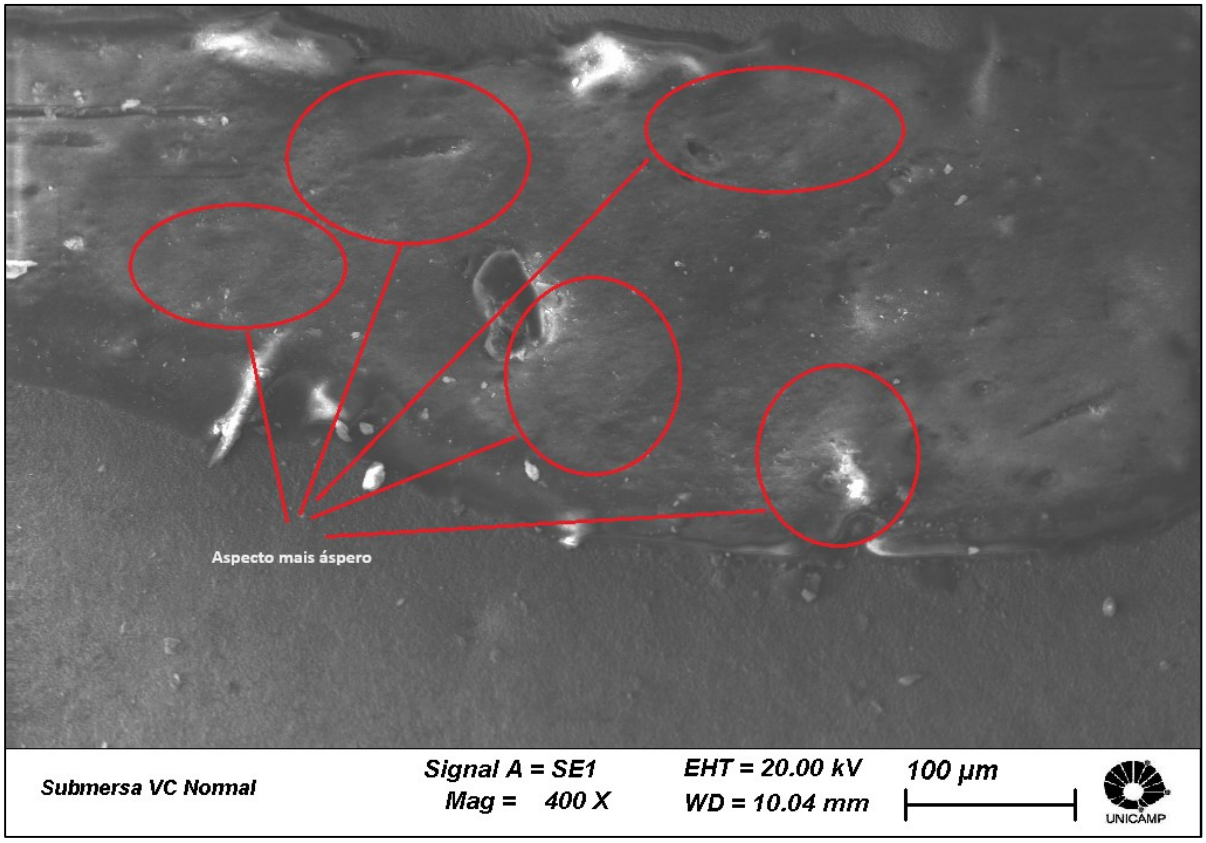
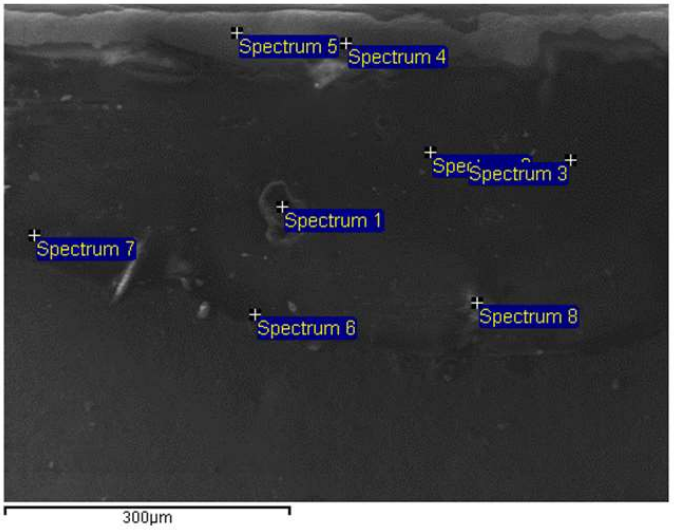


Figura 4.14 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) condição submersa óleo integral com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa

O ponto 1 ("spectrum 1") da Figura 4.15 confirma a hipótese do *attrition*, pois está dentro da área demarcada como áspera e indica a aderência de elementos da peça/cavaco em grandes

proporções como o carbono, ferro e manganês. Já o ponto 2, corrobora a hipótese da alta temperatura e que, portanto, pode ter havido a difusão, pois além do já mencionado aspecto liso, encontra-se neste e em outros pontos a forte presença de oxigênio, que indica a formação de óxidos decorrentes de altas temperaturas de usinagem, que favorecem a difusão. Não somente no ponto 1, mas em todos os outros pontos analisados usando EDS, vê-se o mesmo padrão, isto é, pouco Fe, que seria proveniente do material da peça/cavaco e muito Ti, presente na cobertura da ferramenta. Isto aponta para o fato de que o desgaste, apesar de já ter alcançado a altura de 0,32 mm, não se aprofundou na ferramenta, não atingindo fortemente o substrato dela. O carbono, presente em todos os pontos analisados, está presente tanto na peça, quanto na cobertura e também no substrato da ferramenta. Portanto, não se pode afirmar que este carbono é oriundo do substrato da ferramenta. Além disso, conforme observado por Gomes (2022) há imprecisão na detecção deste tipo de elemento, assim como o oxigênio.



Spectrum	In stats.	C	N	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ti	Mn	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	25.36		7.82	0.21		1.07	0.83		1.88	0.49	62.35	100.00
Spectrum 2	Yes	15.46	0.00	27.95	0.27		1.35	1.65		49.71		3.61	100.00
Spectrum 3	Yes	21.94	0.00	25.16	0.39	0.18	1.75	1.93		45.07		3.59	100.00
Spectrum 4	Yes	13.18		19.31		9.34				52.66		5.52	100.00
Spectrum 5	Yes	6.98		17.60		5.82				63.42		6.17	100.00
Spectrum 6	Yes	31.63		28.86	0.35	0.21	1.42	1.81		35.03		0.69	100.00
Spectrum 7	Yes	18.01	0.00	22.04	0.18	0.21	0.91	0.90		53.69		4.06	100.00
Spectrum 8	Yes	54.15	27.93		0.81		3.37	4.32	0.21	5.90		3.32	100.00

Figura 4.15 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS do nível 1 - submersa óleo integral com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa

A Figura 4.16 mostra a análise pelo MEV do desgaste da pastilha da ferramenta durante usinagem do nível 1 de lubri-refrigeração, com velocidade de corte de 336 m/min e largura de usinagem equivalente a 70% do diâmetro da fresa. Observa-se claramente a presença de superfície áspera, com "riscos" paralelos entre si e perpendiculares à aresta de corte, forte indicativo que foi a abrasão o mecanismo causador do desgaste da ferramenta.

A Figura 4.17 mostra a análise de EDS de alguns pontos da região desgastada. Pode-se observar nos pontos 4 e 5 forte presença de ferro proveniente do material da peça, intercalado com o carbono, que pode ser proveniente da peça ou da primeira camada de cobertura da ferramenta. Já o alumínio encontrado no *spectrum* 1 por exemplo e em toda esta faixa mais clara, com certeza é oriundo da camada intermediária de cobertura da ferramenta. Assim, também neste caso vê-se que o substrato da ferramenta não foi atingido, isto é, o desgaste, apesar de alto, não foi profundo. A presença do elemento ferro indica que houve aderência do material da peça na ferramenta com remoção de grãos da ferramenta, o que é conhecido como *attrition.* Em boa parte da ferramenta nota-se também riscos abrasivos, que indica a abrasão como mecanismo de desgaste. Assim, o fim de vida de ferramenta neste ensaio foi decretado pelos mecanismos de *attrition* e abrasão (conforme observado por Khatri e Jaham em 2018).

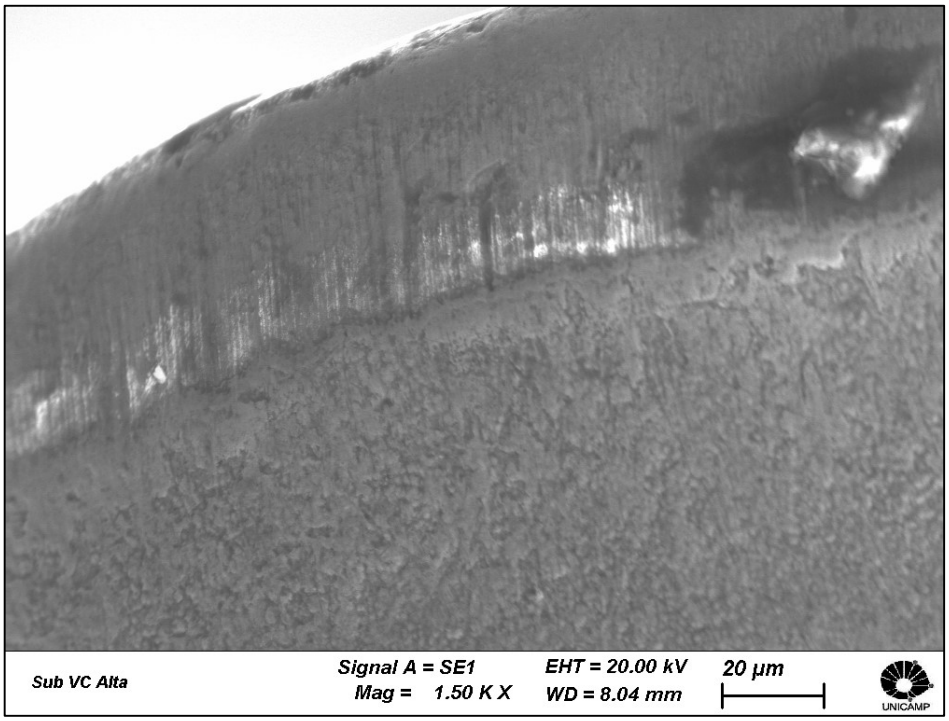
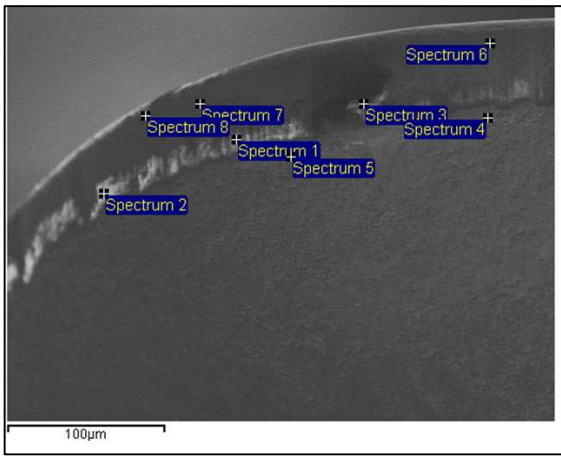


Figura 4.16 – Foto do MEV do desgaste da ferramenta - condição submersa óleo integral com v_c = 336 m/min



Spectrum	In stats.	C	N	Al	Ti	Mn	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	12.39		82.20	5.41			100.00
Spectrum 3	Yes	50.59		37.48	8.01		3.92	100.00
Spectrum 4	Yes	9.86		4.42	58.06	1.83	25.83	100.00
Spectrum 5	Yes	6.57	13.66	3.75	57.52	0.66	17.83	100.00
Spectrum 6	Yes	12.57			87.43			100.00
Spectrum 7	Yes	8.11			91.89			100.00
Spectrum 8	Yes				100.00			100.00

Figura 4.17 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS do nível 1 - submersa óleo integral com v_c = 336 m/min e a_e= 70%D da fresa

4.1.2.2 **Usinagem submersa em emulsão de óleo em água (fluido aquoso)**

A Figura 4.18 mostra a foto da região de desgaste proveniente no MEV da ferramenta utilizada na usinagem da peça sob a condição 2 (submersa em emulsão), com velocidade de corte de 280 m/min (recomendada pelo fabricante) e com 70% da fresa em contato com a ferramenta (a_e = 70%D).

Observou-se basicamente três camadas compondo desgaste da ferramenta. Uma área mais escura está envolta de duas áreas mais claras "prateadas". Em todas estas áreas é possível notar "traços" ou riscos paralelos entre si, que aponta para a abrasão como mecanismo causador de desgaste durante a usinagem sob esta variável. Conforme mostrado anteriormente, ao se analisar a Figura 4.2 (nível 2) também se observou a presença de trincas térmicas na área do desgaste, mecanismo este ajudou junto com a abrasão a determinar o fim de vida da ferramenta.

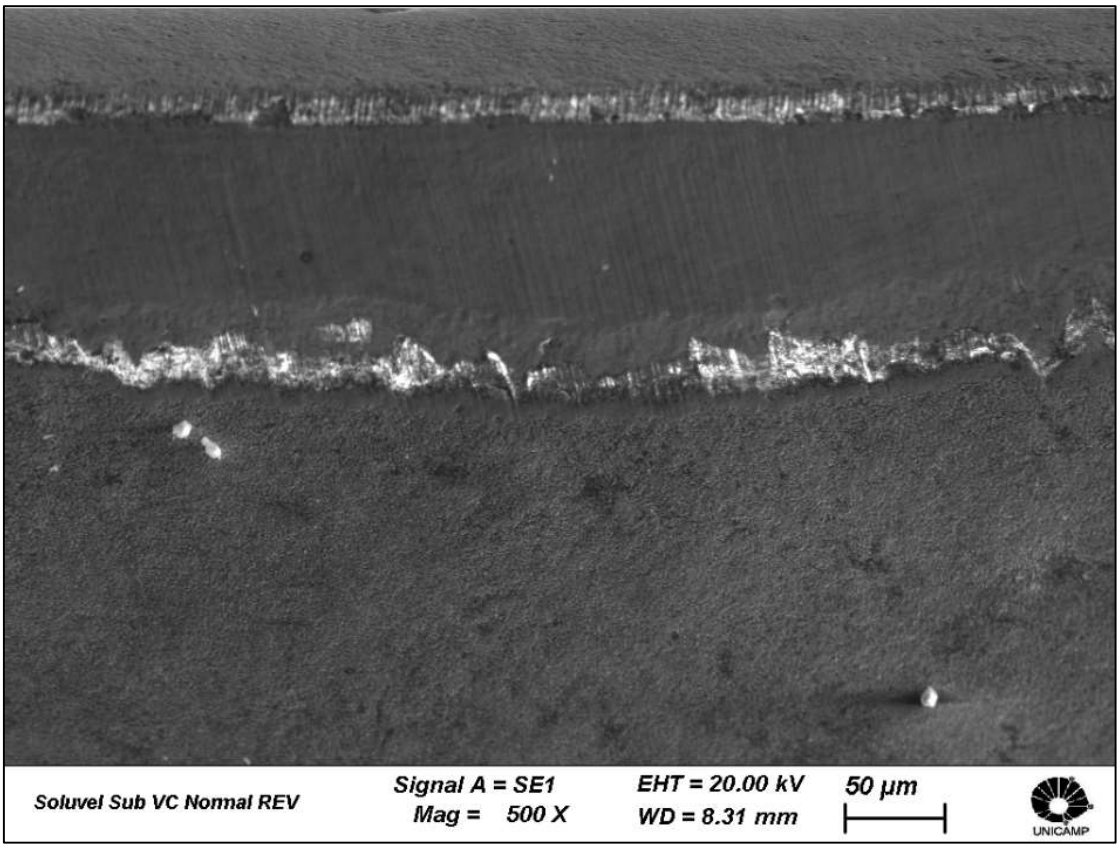
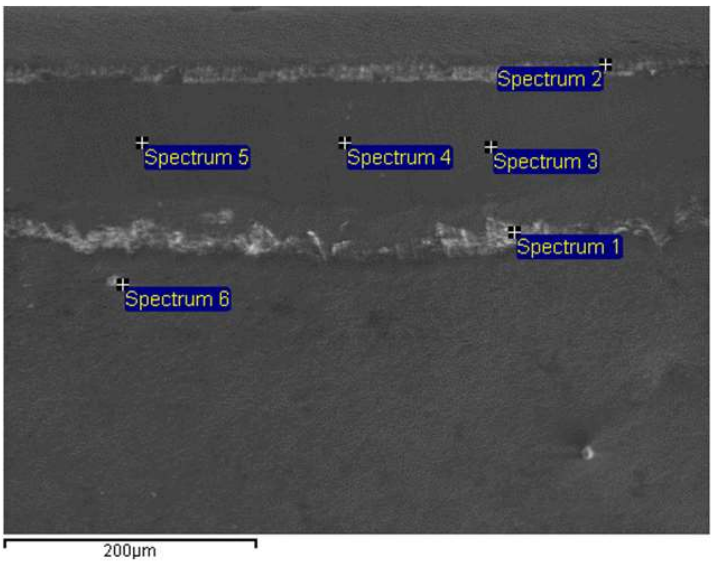


Figura 4.18 – Foto do MEV - condição submersa em emulsão com v_c = 280 m/min e a_e = 70% do diâmetro da fresa

A análise da espectroscopia (Figura 4.19) indica que nas áreas mais claras (*spectrum* 1 e 2) houve a presença dos elementos alumínio e oxigênio, mostrando que o desgaste atingiu a segunda camada de cobertura da ferramenta por abrasão. Já na área mais escura, o titânio (primeira camada de cobertura da ferramenta) é o elemento predominante, mas a pequena presença de ferro e carbono, como também a superfície não tão lisa (com os riscos paralelos, melhores demonstrados na Figura 4.18), demonstra que também pode ter havido remoção de partículas, característica do *attrition*. Porém, a pequena presença do elemento ferro dificulta comprovar esta hipótese. Por estar submerso em emulsão de óleo sendo renovado constantemente, acredita-se que não houve alta temperatura suficiente, neste caso, para causar a aderência, sendo o fenômeno mais frequente a abrasão que somente atingiu a primeira camada da ferramenta. O fenômeno do *attrition* pode ter ocorrido, conforme já explicado, mas em menores proporções, ou em outros pontos que não foram analisados. Os mecanismos de desgaste que levaram, portanto, ao fim de vida da ferramenta nesta condição foram a trinca térmica e a abrasão. As trincas térmicas são decorrentes da variação da temperatura ocorrida (conforme Palmai, 1987), neste caso em menor número, devido a peça estar submersa.



Spectrum	In stats.	C	N	O	Al	Ti	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	4.70		25.68	53.04	16.58		100.00
Spectrum 2	Yes	5.18		57.80	36.74	0.28		100.00
Spectrum 3	Yes	7.34		6.42		85.65	0.59	100.00
Spectrum 4	Yes	7.45		9.29		82.49	0.77	100.00
Spectrum 5	Yes	6.09		6.34		86.99	0.58	100.00
Spectrum 6	Yes	4.18	6.07	17.80	0.30	67.71	3.95	100.00

Figura 4.19 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS da variável 2 - submersa em emulsão com v_c = 280 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa

A Figura 4.20 mostra fotos do MEV durante a usinagem da peça sob a variável 2 (submersa em emulsão), com velocidade de corte de 336 m/min (20% acima da recomendada pelo fabricante) e com 70% do diâmetro da fresa em contato com a ferramenta (a_e = 70%D). Por ela se observou superfície predominante áspera, trinca e até uma pequena área que aparenta ser um micro lascamento, atribuído à variação térmica ocorrida nestes tipos de processo com fluido refrigerante (KHATRI; JAHAM, 2018). O desgaste também parece ter sido causado por abrasão nas partes mais claras (indicadas na Figura).

Com a análise do EDS (Figura 4.21), pode-se identificar que o desgaste foi mais profundo na superfície mais áspera (ponto 1) e alcançou inclusive, em certos pontos, o substrato da ferramenta, indicada pela presença dos elementos do substrato como tungstênio e cobalto. A presença de elementos oriundos da ferramenta e a já citada superfície áspera indica adesão de

material da peça usinada à ferramenta seguida de remoção de partículas (*attrition*) (TRENT; WRIGHT, 2000).

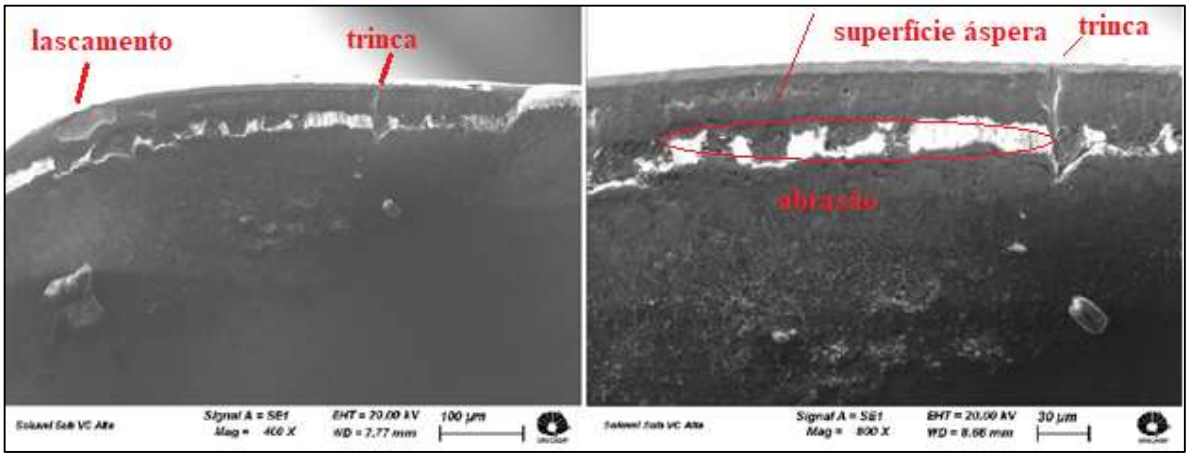
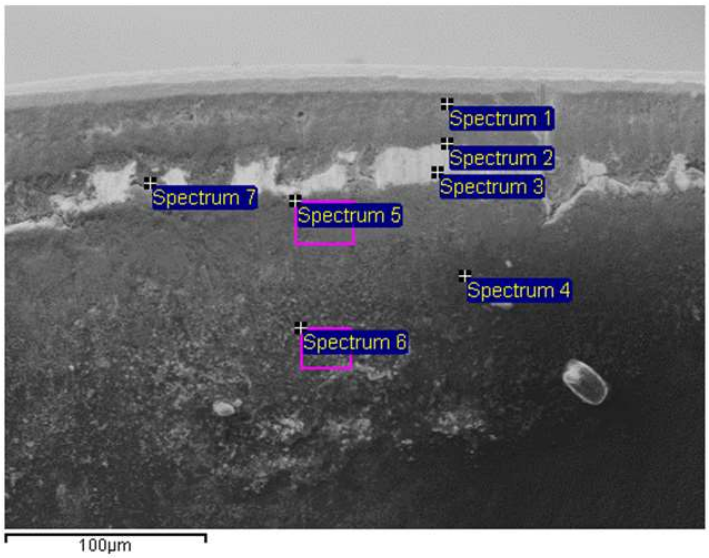


Figura 4.20 – Fotos do MEV da ferramenta (esquerda) e esta área ampliada (direita) - condição submersa em emulsão com v_c = 336 m/min e a_e= 70% do diâmetro da fresa

O ponto 7 corrobora em parte este mecanismo com a presença mais acentuada do elemento ferro, mas, assim como nos pontos 1 e 2 também se nota presença de titânio o que indica que a camada de cobertura ainda estava presente, pelo menos parcialmente. Pode ser que a área mais escura do ponto 7 seria a próxima a sofrer com a remoção de partículas pelo material aderido. A temperatura mais elevada, em função da velocidade de corte maior que a recomendada, pode ter ajudado o mecanismo de abrasão (áreas demarcadas na Figura 4.20), nesta área indicada. Nota-se no ponto 3, que o desgaste alcançou a alumina, segunda camada de cobertura da ferramenta, pela forte presença de alumínio que somente está presente nesta camada de cobertura e o mecanismo causador foi a abrasão, dada as características apresentadas. Também se nota trincas de origens térmicas e alguns pontos de lascamentos na área de desgaste da ferramenta. Também foram observadas trincas térmicas e lascamento em outros trabalhos de fresamento que utilizaram fluido de corte constituído por emulsão de óleo em água, como os de Braghini et al (2008), Khatri e Jaham (2018) e Teixeira Filho (2006).

Assim os mecanismos causadores do desgaste nesta condição foram as avarias (principalmente as trincas) e a abrasão em determinados pontos onde a segunda camada foi atingida. Possível, porém menos provável, o *attrition* em determinadas áreas mais escuras entre as áreas demarcadas como abrasão (como por exemplo o ponto 7). A abrasão é comum em processo de fresamento pelo atrito entre a superfícies da ferramenta (KHATRI; JAHAM, 2018).



Spectrum	In stats.	C	N	Al	Ti	Mn	Fe	Co	W	Total
Spectrum 1	Yes	13.92	8.37		63.38		0.38	5.60	8.36	100.00
Spectrum 2	Yes	12.73		2.99	84.28					100.00
Spectrum 3	Yes	13.27		85.89	0.84					100.00
Spectrum 4	Yes	22.43	18.54	2.47	38.41	0.29	17.86			100.00
Spectrum 5	Yes	13.88		5.59	61.47	0.84	18.22			100.00
Spectrum 6	Yes	31.95	19.33	1.11	23.22	0.58	23.82			100.00
Spectrum 7	Yes	20.17	14.22	1.46	49.86	0.41	13.90			100.00

Figura 4.21 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS da variável 2 - submersa em emulsão com V_C = 336 m/min e a_e= 70%D da fresa

4.1.2.3 **Usinagem com refrigeração abundante convencional (emulsão de óleo em água)**

A pastilha de corte durante a usinagem da peça no nível 3 (fresamento com refrigeração convencional da máquina-ferramenta, aplicação de emulsão de óleo em água, em abundância, sob vazão de 7 l/min e concentração de 6%), com velocidade de corte de 280 m/min e com entrada de 70% do diâmetro da fresa em contato com a ferramenta (a_e = 70%D) teve seu fim de vida determinado pelo desgaste de flanco, que após última passada alcançou valor próximo de 0,31 mm. Também foram observadas inúmeras trincas térmicas (paralelas à superfície de corte), avaria comum neste tipo de operação pelo corte interrompido, em que o fluido acentua a

refrigeração da aresta de corte da fresa durante o momento que esta não está em corte e, como consequência, torna mais drástico o efeito do ciclo térmico sofrido pela ferramenta (variação de temperatura em cada volta da fresa), o que ocasiona o surgimento de trincas.

A Figura 4.22 mostra a foto do MEV do desgaste observado neste processo. Nela foram observados superfície lisa, que indica que o mecanismo de desgaste nesta área possivelmente tenha sido a difusão. Também há poucos pontos indicados que podem indicar abrasão e trincas térmicas (nesta seção analisada não encontrada em grandes proporções, como na Figura 4.2), além de superfície mais áspera o que pode indicar a remoção de partículas maiores da ferramenta.

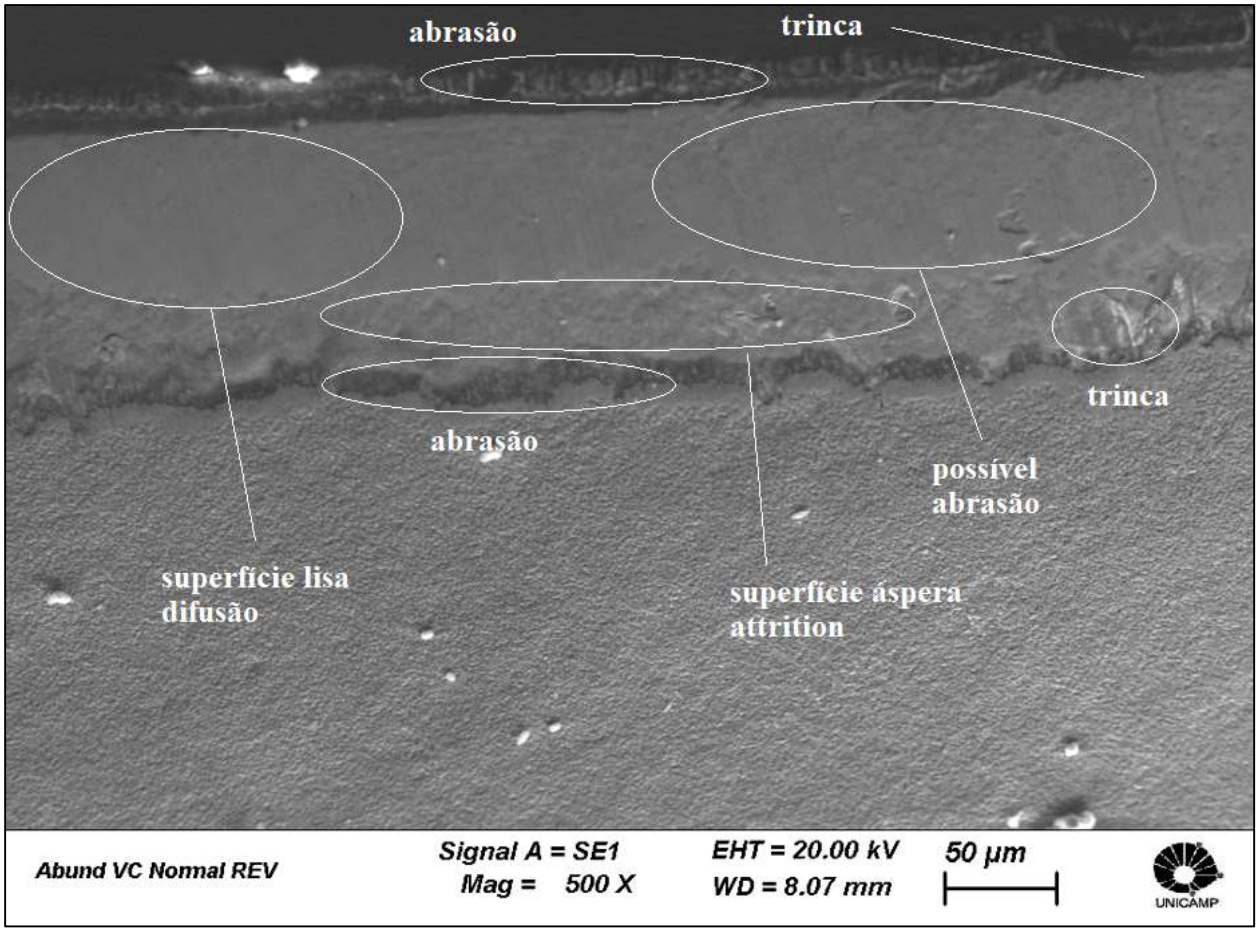
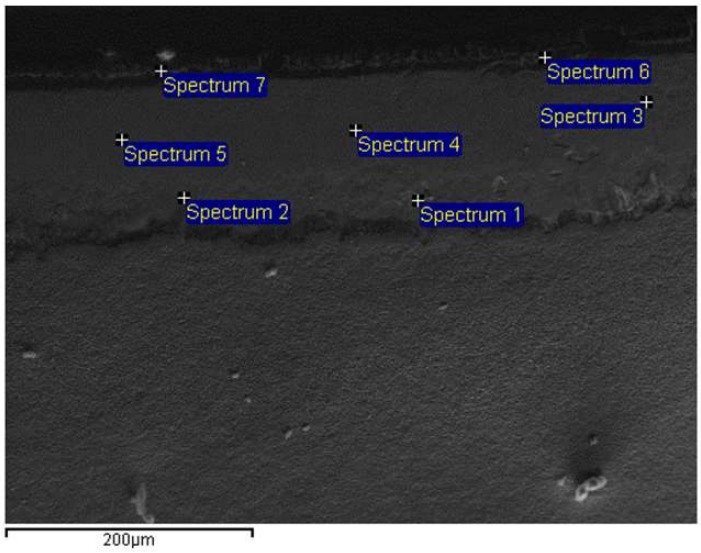


Figura 4.22 – Foto do MEV ampliada – nível 3 – jato de fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D

Ao analisar a espectroscopia por energia dispersiva (EDS, Figura 4.23) da ferramenta, nota-se que no ponto 1, uma das superfícies indicadas na Figura 4.22 como superfície áspera, há a presença relevante do elemento químico ferro. Isso indica que o mecanismo causador do desgaste nesta região foi o *attrition*. O ponto 7, que está localizado bem perto da aresta de corte,

mostra, pela forte presença de alumínio, que o desgaste atingiu a segunda camada de cobertura da ferramenta e o mecanismo do desgaste mais provável foi a abrasão. Já no ponto 5, apesar de estar em uma região lisa, não se encontra evidências no EDS que se trate de difusão, pois aparentemente não houve a combinação em nível atômico, uma vez que não aponta elementos químicos da peça em quantidade relevante. Em resumo, o fim de vida da ferramenta nesta usinagem foi causado principalmente por *attrition*, abrasão e formação de trincas (nítidas na Figura 4.2). Braghini et al. (2008) também observou maior incidência de *attrition* para fresamento com emulsão de fluido em água sob concentração de 7%. Nestes tipos de usinagem com emulsão de óleo em água, ocorre formação de trincas, que podem resultar em lascamento, em função da variação térmica ocorrida na aresta de corte (KHATRI; JAHAM, 2018).



Spectrum	In stats.	C	N	O	Al	Cl	Ti	Cr	Fe	Co	Total
Spectrum 1	Yes	11.44		3.48	0.40		8.03		76.65		100.00
Spectrum 2	Yes	7.31	0.00	29.66	2.31	0.20	56.06		4.45		100.00
Spectrum 3	Yes	8.78	15.18	5.20			69.91		0.62	0.31	100.00
Spectrum 4	Yes	15.11		6.06			78.83				100.00
Spectrum 5	Yes	15.78		5.76			77.81	0.26		0.38	100.00
Spectrum 6	Yes	7.75		27.66	2.24	0.20	60.58	0.27	1.29		100.00
Spectrum 7	Yes	8.05		50.98	39.14		1.83				100.00

Figura 4.23 – Foto do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) e análise EDS– nível 3 – jato de fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa

De forma análoga à usinagem nesta variável com velocidade de corte normal, as próximas

Figuras indicam as fotos do MEV e a espectrometria para o corte com velocidade alta (336 m/min). Provavelmente em decorrência de maior temperatura, devido à maior velocidade de corte, ocorre também maior variação de temperatura, maior choque térmico e, consequentemente, mais trincas térmicas.

A foto do MEV, Figura 4.24, demonstra a área do desgaste mais acentuado. Com ela, é possível identificar áreas mais claras com riscos paralelos entre si, que indicam abrasão.

A análise do EDS (fig. 4.25) mostra com o ponto 1, assinalado dentro da superfície lisa citada na Figura 4.24, que houve forte presença do elemento ferro e alumínio. O ferro corrobora que o mecanismo de desgaste nesta região pode realmente ter sido o *attrition*, conforme também observado por Rael (2004), já o alumínio, mostra que o desgaste foi profundo de tal forma a alcançar a camada de alumina.

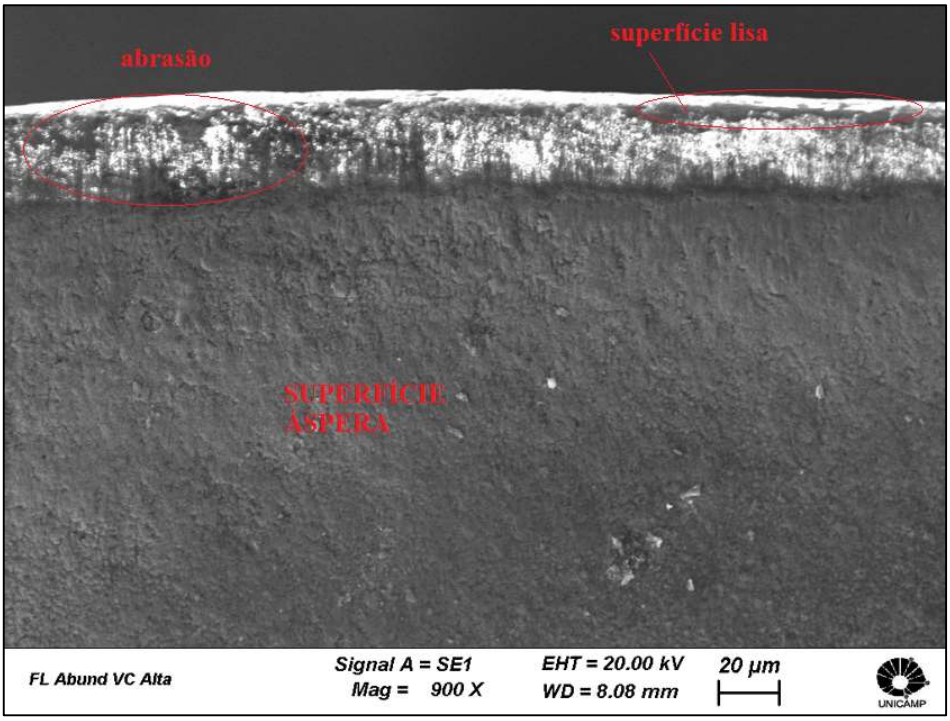
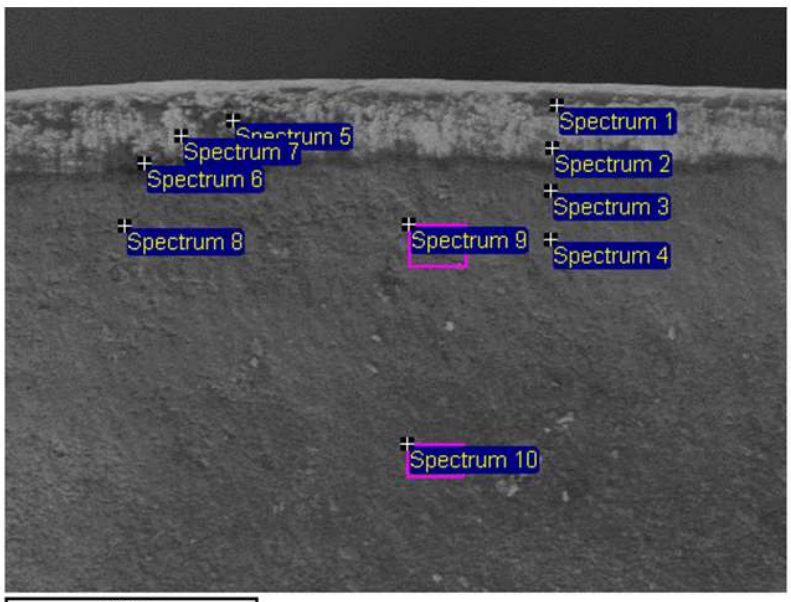


Figura 4.24 – Foto do MEV - variável 3 – jato de emulsão em abundância com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa

Áreas mais claras da ferramenta com os pontos 2, 5 e 6, indicam a forte presença de alumínio, o que de novo confirma o alcance da segunda camada de cobertura da ferramenta pelo desgaste. A análise feita indica que, além das trincas térmicas observadas na foto desta região desgastada com menor ampliação (Figura 4.3), vê-se que a abrasão foi fenômeno predominante no atingimento do fim de vida da ferramenta, além da difusão em menor proporção.



Spectrum	In stats.	C	N	Al	Ti	Fe	Total
Spectrum 1	Yes			50.08	3.10	46.82	100.00
Spectrum 2	Yes	17.06		80.13	2.81		100.00
Spectrum 3	Yes	3.15	28.94	4.25	62.37	1.28	100.00
Spectrum 4	Yes	6.03	27.15	3.98	58.24	4.59	100.00
Spectrum 5	Yes	47.00		38.08	13.53	1.39	100.00
Spectrum 6	Yes	34.16		65.06	0.78		100.00
Spectrum 7	Yes	10.27		56.31	33.41		100.00
Spectrum 8	Yes	4.09	30.01	4.36	57.72	3.81	100.00
Spectrum 9	Yes	12.90		5.32	68.86	12.92	100.00
Spectrum 10	Yes	15.48	24.73	4.24	51.27	4.28	100.00

Figura 4.25 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS– nível 3 – jato fluido aquoso em abundância com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa

4.1.2.4 **Usinagem a seco**

Ao se analisar as Figuras 4.26 (foto MEV para o nível 6, corte a seco com velocidade de 280 m/min) 4.27 (foto MEV com ampliação maior) e 4.28 (análise EDS) conjuntamente,

observa-se uma superfície lisa predominante em toda a região de desgaste da ferramenta que poderia ser característica de difusão atômica. A análise EDS aponta para pequenas quantidades de elementos químicos da peça presente praticamente em todos os pontos, porém a pequena concentração dos elementos pode ter sido coberta por uma camada de oxido, já que o elemento oxigênio é aquele que foi predominantemente encontrado durante esta usinagem, e pode ter ocorrido a oxidação da ferramenta. Tanto a difusão, quanto à oxidação eram elementos esperados neste tipo de usinagem, pois estão associados à alta temperatura (TRENT; WRIGHT, 2000). Entretanto, os óxidos, assim como o carbono são elementos que nem sempre são detectados com precisão (GOMES, 2022). Também se observou, o que seria uma leve deformação das linhas da ferramenta. Desta forma presume-se a oxidação como principal mecanismo de desgaste e possível micro deformação da ferramenta, definida como alteração da forma geométrica da ferramenta por consequências da alta temperatura de usinagem que podem comprometer posterior utilização da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000), este mecanismo também foi apontado como predominante durante fresamento de liga de titânio (KHATRI; JAHAM, 2018).

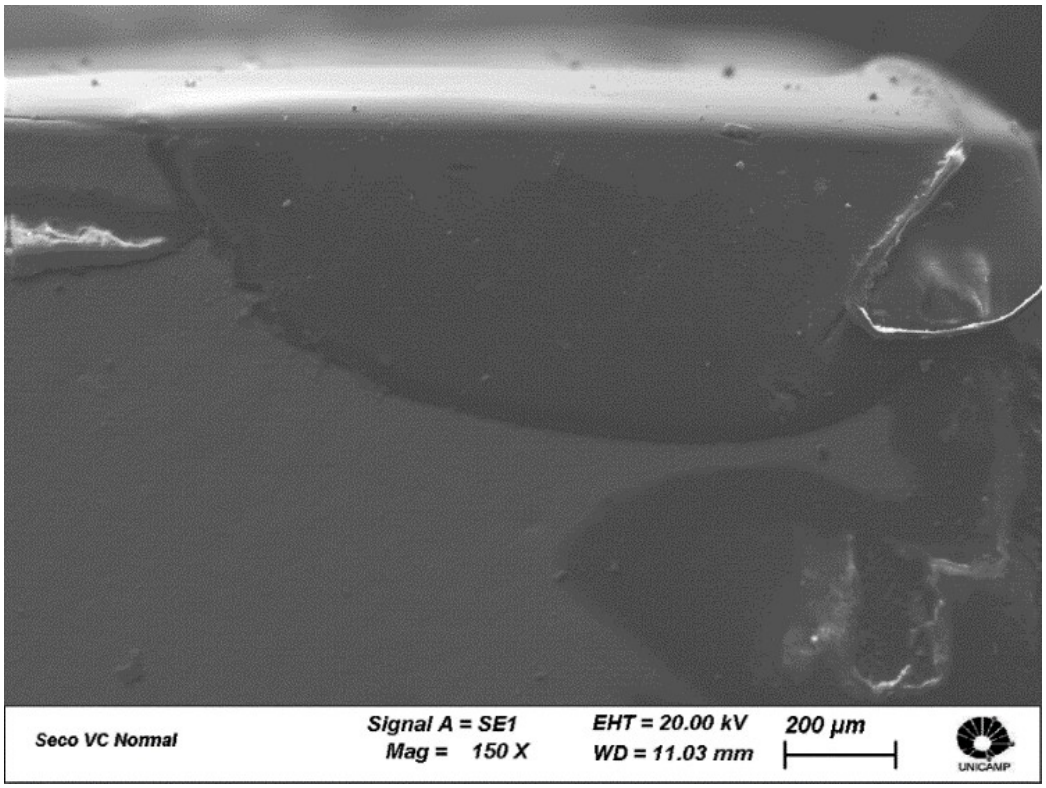


Figura 4.26 – Foto do MEV ampliada em 150x – nível 6 – corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa

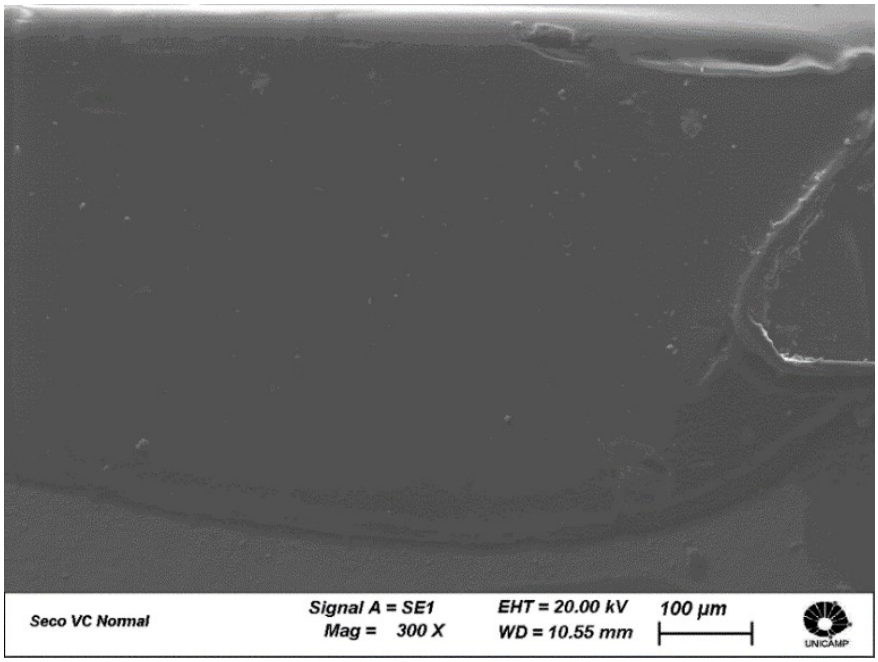
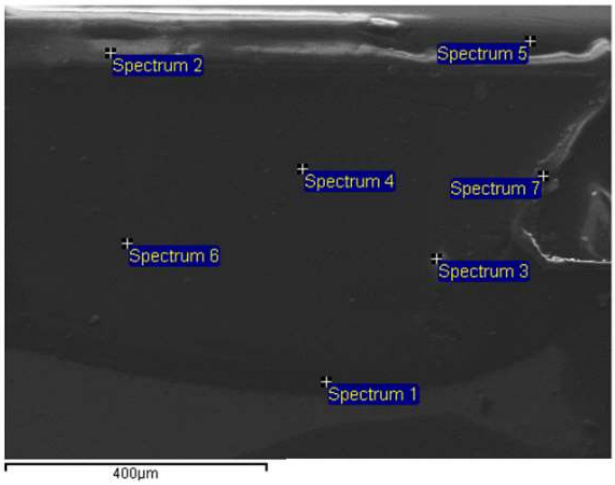


Figura 4.27 – Foto do MEV ampliada em 300x – nível 6 – corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa



Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	54.70	35.40	0.65		2.73	3.32				3.21		100.00
Spectrum 2	Yes	58.15	33.24	0.67		2.86	3.45				1.63		100.00
Spectrum 3	Yes	57.77	31.87	0.87		4.33	4.71				0.45		100.00
Spectrum 4	Yes	59.84	29.98	0.77		4.16	4.79				0.46		100.00
Spectrum 5	Yes	29.17	28.43	0.37	0.73	1.85	1.77				37.13	0.55	100.00
Spectrum 6	Yes	55.61	33.26	1.28		4.32	4.87			0.16	0.50		100.00
Spectrum 7	Yes	61.01	32.43	0.49		1.82	2.32	0.72	0.40	0.43	0.37		100.00

Figura 4.28 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS – nível 6 – corte a seco - com velocidade de corte 280 m/min, com a_e = 70%D da fresa

A Figura 4.29 mostra a foto do MEV da região desgastada da superfície de folga da pastilha quando foi alcançado o desgaste de flanco de aproximadamente 0,31 mm que determinou o seu fim de vida, após usinagem no nível 6 (corte a seco) e sob velocidade de corte de 336 m/min (20% acima daquela recomendada pelo fabricante).

A região indicada com círculo branco, superfície áspera deve ter tido como mecanismo, o *attrition*. As partes mais claras, dentro da área assinalada pelo círculo vermelho, tiveram como mecanismo a abrasão (sugere-se que houve abrasão devido aos riscos abrasivos paralelos à direção de corte) e mostram que o desgaste provavelmente atingiu coberturas mais profundas da ferramenta, como a alumina (segunda camada da cobertura).

A análise do EDS (Figura 4.30) confirma os fatos revelados acima, pois nos pontos 1 e 3 (correspondentes à área de abrasão indicada na Figura 4.29) houve forte concentração de alumínio. Também se nota no ponto 2, o mais próximo da superfície áspera indicada na Figura 4.29, que houve aderência mínima de material da peça (presença do elemento ferro) e o desgaste alcançou o substrato da ferramenta minimamente, pois o EDS identificou o elemento cobalto em quantidade pequena. Assim é possível afirmar que houve, de forma não predominante o mecanismo de *attrition* como causa do desgaste da ferramenta.

A região identificada por “a”, marcada com os pontos 5 e 6 indicam a forte presença de ferro, mas estão fora da região de desgaste e não foi mais detalhadamente analisada. O ferro aí presente pode ter sido proveniente da colisão do cavaco com esta parte da ferramenta após a ruptura do primeiro.

Considerando os pontos que devem estar dentro da região de desgaste e os elementos encontrados nestas regiões, é possível concluir que a alta temperatura causada pelo corte a seco junto com a maior velocidade de corte fez com que a ferramenta perdesse dureza e facilitasse a abrasão, mecanismo predominante durante esta usinagem. A abrasão proveniente do atrito, que por sua vez, resulta no alto calor gerado na zona de corte, também foi observada como fator predominante em outros trabalhos que envolvem fresamento sem fluido de corte (TEIXEIRA FILHO, 2006) (KHATRI; JAHAM, 2018).

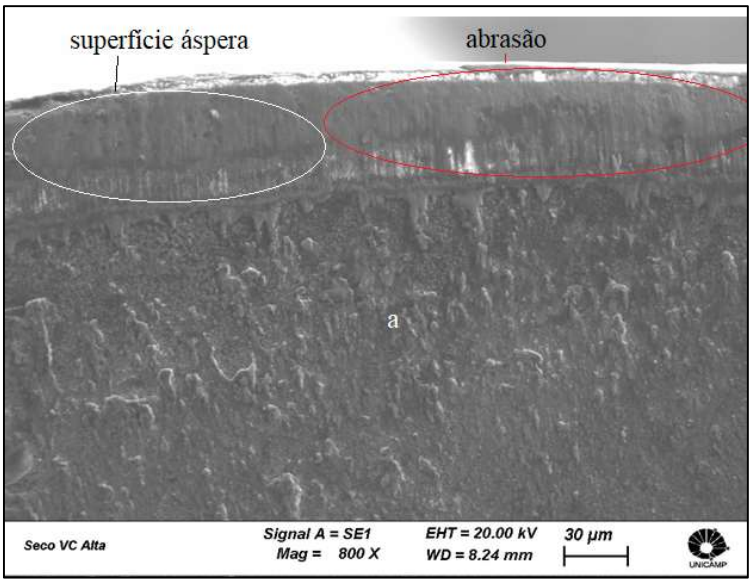
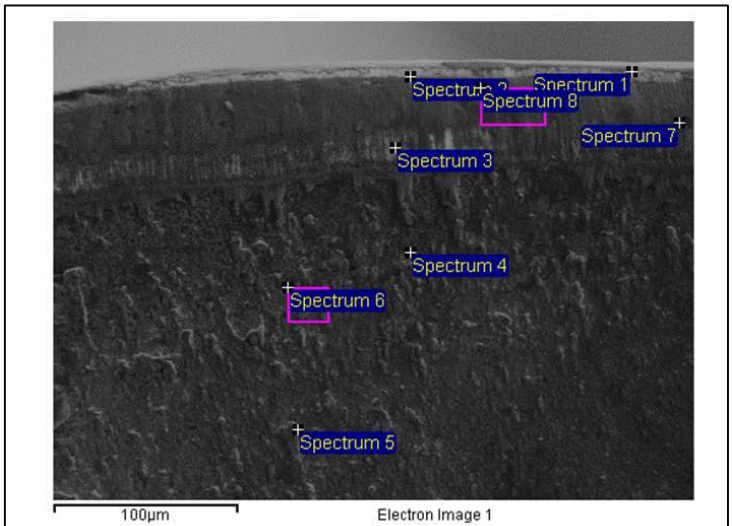


Figura 4.29 – Foto do MEV– nível 6 – corte a seco – com velocidade de corte de 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa



Spectrum	In stats.	C	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Total
Spectrum 1	Yes	25.14	72.73	1.66		0.46		100.00
Spectrum 2	Yes	23.49	1.64	74.10		0.36	0.41	100.00
Spectrum 3	Yes	28.55	69.65	1.80				100.00
Spectrum 4	Yes	12.94	5.95	80.06		1.05		100.00
Spectrum 5	Yes	43.25	0.83	6.02	0.34	49.55		100.00
Spectrum 6	Yes	14.14	1.58	47.34		36.94		100.00
Spectrum 7	Yes	8.00	4.44	68.64	11.86	7.07		100.00

Figura 4.30 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e análise EDS – variável 6 – corte a seco - com velocidade de corte 336 m/min, com a_e = 70%D da fresa

4.2 **Análise da usinabilidade pela rugosidade de superfície**

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram os valores de rugosidade para todas as variáveis testadas na fase inicial e final da vida da ferramenta (após o desgaste), respectivamente. É possível observar que os valores de rugosidade no final da vida da ferramenta foram, na maioria das condições, menores que aqueles no estado inicial (após a primeira passada). Entretanto, a maior diferença absoluta encontrada entre estas fases da vida da ferramenta foi de apenas 0,13 μm, ou seja, muito pequena para poder avaliar se realmente houve diferença, pois, os desvios encontrados (diferença dos valores maior e menor sobre média), praticamente colocam as rugosidades em condição de igualdade. Por esta razão, também não foi possível distinguir ou determinar a rugosidade média como um parâmetro para determinar o fim de vida da ferramenta neste trabalho.

(MACHADO et al., 1997) também obteve dificuldade de comparar rugosidade, pois não houve diferenças significativas entre os processos com lubrificação em relação aos processos com refrigeração. O autor, entretanto, atribui ao fato de o lubrificante não ter alcançado a zona de corte eficientemente de forma a diminuir o atrito, o que não deve ser o caso deste trabalho, pois sim houve redução de atrito na condição submersa e MQF, conforme se vai demonstrar no capítulo 4.3.

Talvez, se o limite de desgaste determinante do fim de vida de ferramenta fosse maior que V_B = 0,3 mm, seria possível que estes desgastes ao alcançarem o estágio III (conforme Fig. 4.6), proporcionariam uma piora considerável sobre as rugosidades, podendo ser um parâmetro para determinação do fim de vida da ferramenta.

Uma possível explicação para a ferramenta nova apresentar pior rugosidade que a ferramenta desgastada, é que o início do processo exige adaptação da ferramenta ao ambiente ao qual está inserida, como a condição de lubri-refrigeração testada, o sistema de fixação, as temperaturas de corte, parâmetros de corte, entre outros fatores e, tal qual demonstrado com a evolução do desgaste, é possível que a ferramenta também tenha alcançado uma adaptação a este meio com mais tempo de usinagem (MACHADO et al., 2015). Também o possível aumento de raio de ponta pelo desgaste, proporciona melhora da qualidade superficial (DINIZ; MICARONI, 2002). Além do atrito gerado com os primeiros passes que gera pior rugosidade, também existe a possibilidade de arredondamento da aresta, que tende ao alisamento da superfície fresada (DACAS et al., 2018). Por último, é importante salientar que não houve desgaste na aresta secundária de corte durante os experimentos. Há que se lembrar aqui que a

rugosidade de uma superfície fresada com fresa frontal como a utilizada neste trabalho, é obtida principalmente pelo alisamento da superfície causado pela aresta secundária de corte (chamada de fase plana da pastilha) (DINIZ et al., 2014). Como este tipo de desgaste, se ocorreu, foi muito pequeno, não prejudicou a rugosidade da peça.

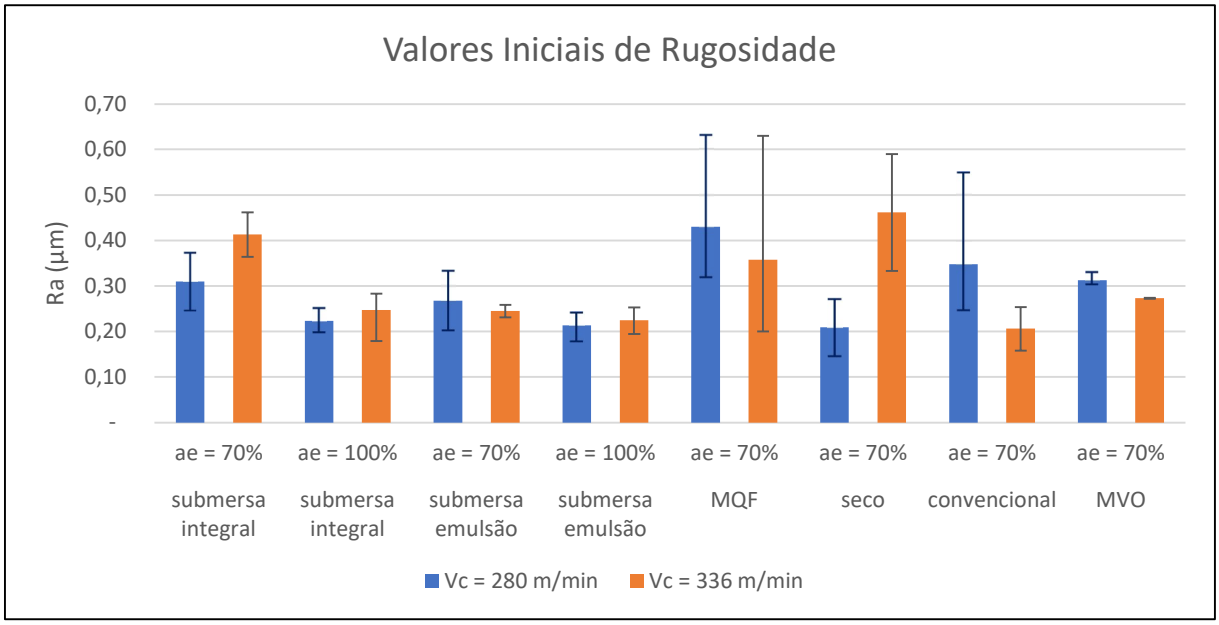


Figura 4.31– Rugosidades médias (Ra) obtidas após primeira passada em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem

A exceção para o exposto acima foi com a usinagem com mínimo volume de óleo. Nesta condição, as rugosidades obtidas foram piores ao fim da vida da ferramenta, nas duas velocidades de corte testadas. Para o corte a seco, melhores valores de rugosidade foram também obtidos com a ferramenta nova, muito embora, não seja possível afirmar com certeza, já que os desvios são muito altos em todos os testes. Nestes processos houve supostamente início de deformação plástica nas arestas de corte, incluindo as arestas secundárias, devido às altas temperaturas. Assim, houve alteração geométrica na ferramenta, que embora quase que irrelevante, prejudicou o acabamento superficial de certa forma, ainda que de forma pequena em termos absolutos.

No que tange à variação de velocidades de cortes, também pelos altos desvios encontrados não é possível afirmar em qual velocidade foi obtida a menor rugosidade. Em se tratando de rugosidade final, ou seja, a última rugosidade medida na peça, após o fim de vida da ferramenta, observa-se que, para os processos com usinagem submersa com óleo integral, submersa com emulsão de óleo em água (fluido aquoso) e MVO foram obtidos menores valores de rugosidade

para velocidades mais altas, ao passo, que para a usinagem convencional, MQF e corte a seco, o contrário ocorreu.

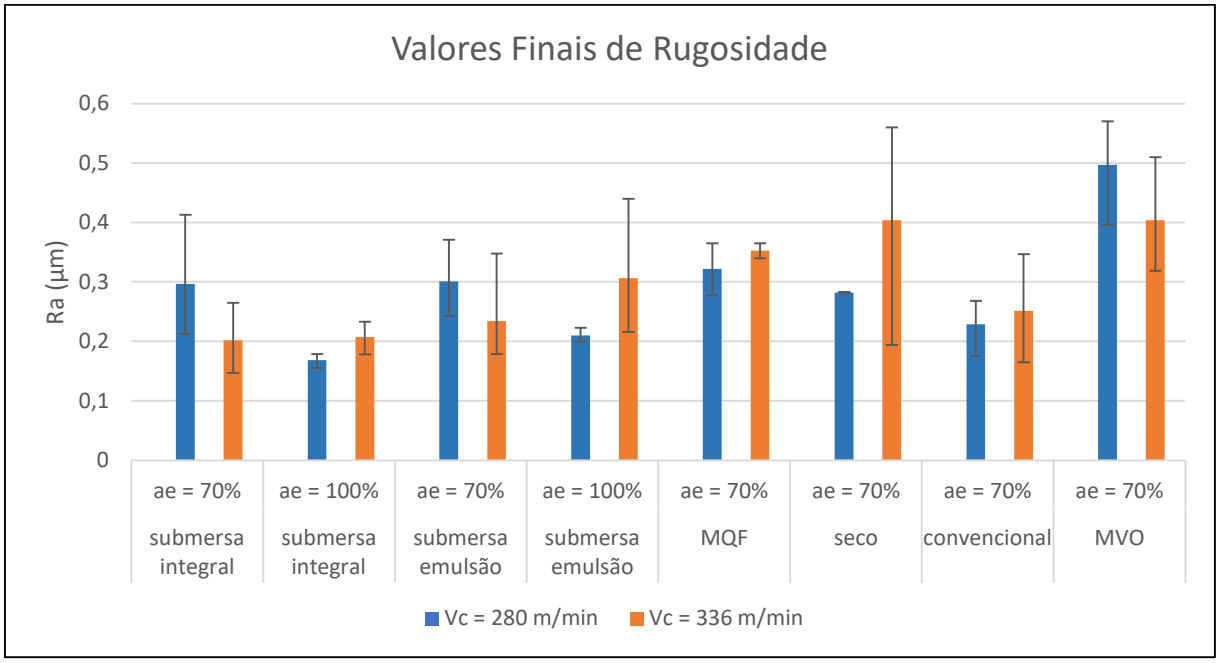


Figura 4.32 – Rugosidades médias (Ra) obtidas após última passada, em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem

No caso das usinagens submersas, a evolução dos desgastes ocorreu de forma mais constante. A mais alta temperatura pode ter facilitado o corte por diminuição da resistência da peça de modo a obter melhor rugosidade. Já com as demais condições, foram observadas algumas avarias de forma mais frequentes (como trincas térmicas), ou mecanismos que acentuaram o desgaste principalmente quando submetidos a maiores velocidades de corte e, conforme já explicado, podem ter contribuído para este melhor resultado. Porém conforme já esclarecido, as diferenças ainda são muito pequenas e dentro do processo do fresamento tais valores não fariam a menor diferença, para quaisquer que fosse uma hipotética aplicação desta peça. Em outras palavras, os valores de rugosidade foram muito baixos, bastante adequados para uma operação de acabamento.

Ao se variar a largura de usinagem observa-se, sob a velocidade de corte normal (280 m/min) melhor rugosidade (também dentro da faixa de erro) para larguras de usinagem maiores, para as duas condições submersas. Aparentemente o maior contato da fresa com a peça, nestas condições, acarretou maiores temperaturas, e isso fez com que a resistência da peça à usinagem fosse menor. Entretanto para maiores velocidades, as rugosidades obtidas foram iguais para os

dois valores de a_e testados na condição submersa em óleo integral e menores na condição submersa em emulsão. Neste caso, o efeito do maior aquecimento pelo aumento do contato com a fresa e também pela maior velocidade foi mais prejudicial ao acabamento e compensado, de uma certa forma, por aumento de vibração que estes aumentos proporcionam, assim que as rugosidades foram piores com velocidades mais altas para as maiores larguras de usinagem. Cabe enfatizar uma vez mais que as diferenças encontradas entre um processo e outro (máxima de 0,13μm) não significam nenhuma diferença relevante ao processo.

Dentre as condições de lubrificação ou refrigeração testadas, o melhor resultado observado sob velocidade normal foi com as condições submersas e com o fluido em abundância e pior resultado para o MVO. Como já explicado neste trabalho, as diferenças minúsculas de rugosidade em termos absolutos e os grandes desvios não permite explicar exatamente qual foi o melhor resultado. Há que se tentar explicar, entretanto, porque melhores rugosidades foram obtidas sob os dois níveis submersos. Em ambos deve ter ocorrido lubrificação suficiente para permitir melhor acabamento, apesar de estar claro que as dispersões não permitem afirmar qual foi o melhor processo. Já com o MVO, conforme já explicado, a possível variação mecânica (atrito intermitente já que a pequena quantidade de óleo utilizada fazia com que nem sempre houvesse óleo no contato fresa-peça-cavaco) e deformação levaram aos piores resultados. Não convém, neste trabalho, explicar cada condição que alcançou resultado intermediário, devido a não existir relevante diferença entre as rugosidades obtidas.

4.2.1 **Análise estatística dos resultados de rugosidade de superfície**

A Figura 4.33 demonstra claramente, conforme observado no item anterior, que as variáveis do processo não foram significativas para influenciar os resultados de rugosidade obtidos (para nível de confiança de 95% (α=0,05). Este resultado é explicado pelo fato de todos os resultados de rugosidade obtidos nestes processos de fresamento terem sido muito baixos, o que certifica que o sistema de fixação utilizado era suficientemente rígido para não permitir vibração. Assim as diferenças obtidas são insignificantes no processo.

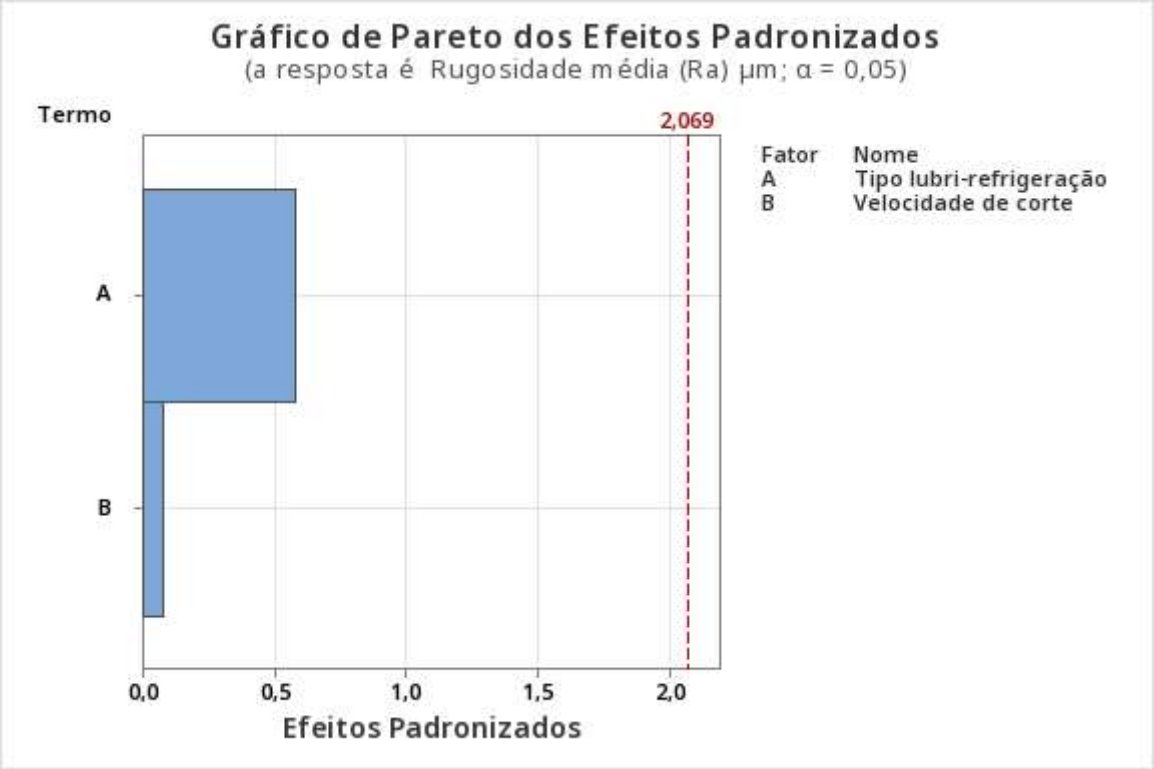


Figura 4.33 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em µm (95% de confiança), com largura de usinagem constante (a_e = 14 mm),

A Figura 4.34, que mostra os efeitos principais das variáveis velocidade de corte e tipo de lubri-refrigeração, bem como confirma o exposto pela figura 4.33, pois a diferença entre o melhor processo para rugosidade (nível 2, processo submerso em fluido aquoso) para o pior processo (nível 5 MQF) é de apenas 0,12 µm, ou seja, amplitude muito baixa. Qualquer mínima alteração na zona de corte já seria suficiente para produzir resultado diferente, pois conforme explicado anteriormente, e também pela dispersão observada na Figura 4.32, não se pode afirmar qual foi o melhor processo observado em termos de rugosidade.

A Figura 4.35 mostra de forma análoga à Figura 4.33, os resultados obtidos da análise Pareto dos fatores que foram significativos para a formação do resultado de rugosidade com as variáveis tipo lubri-refrigeração, velocidade de corte e largura de usinagem para os níveis 1 (submersa em óleo integral) e 2 (submerso em fluido aquoso) de aplicação de lubri-refrigeração. Neste caso, mais uma vez velocidade de corte e tipo de lubri-refrigeração não foram relevantes para a formação de resultado, porém a largura de usinagem (a_e) foi significativa para as rugosidades obtidas (valor P acima do limite).

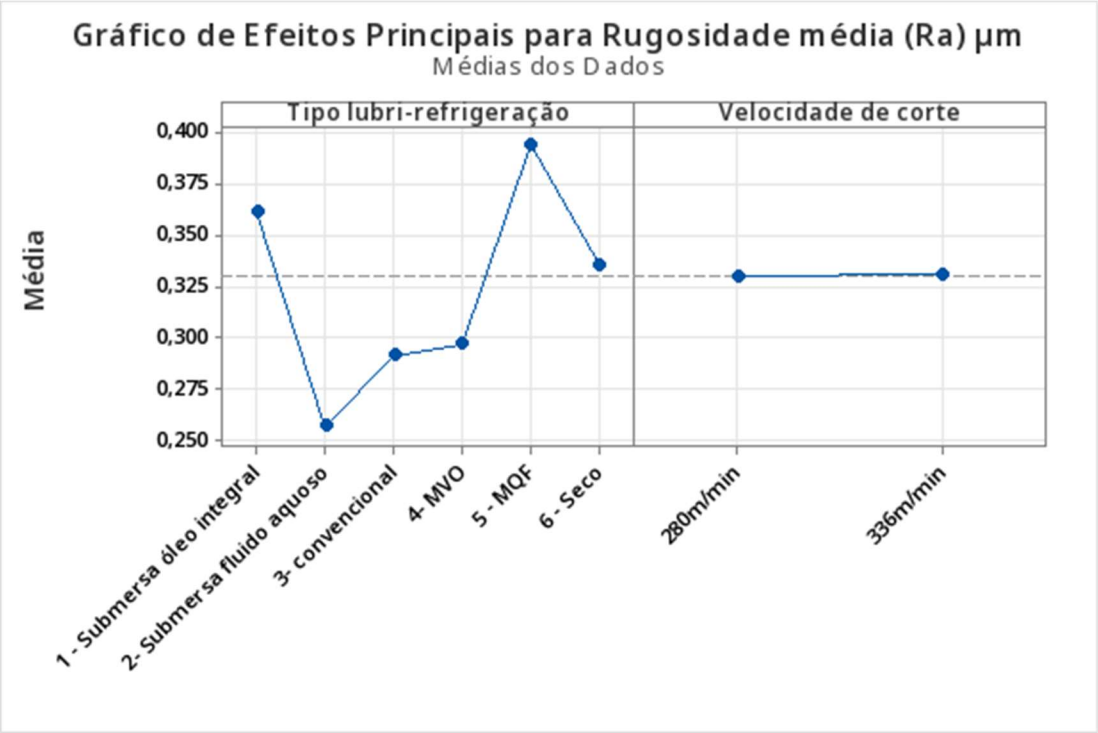


Figura 4.34 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da rugosidade média (Ra), medida em µm (95% de confiança), com largura de usinagem constante (ae=14 mm)

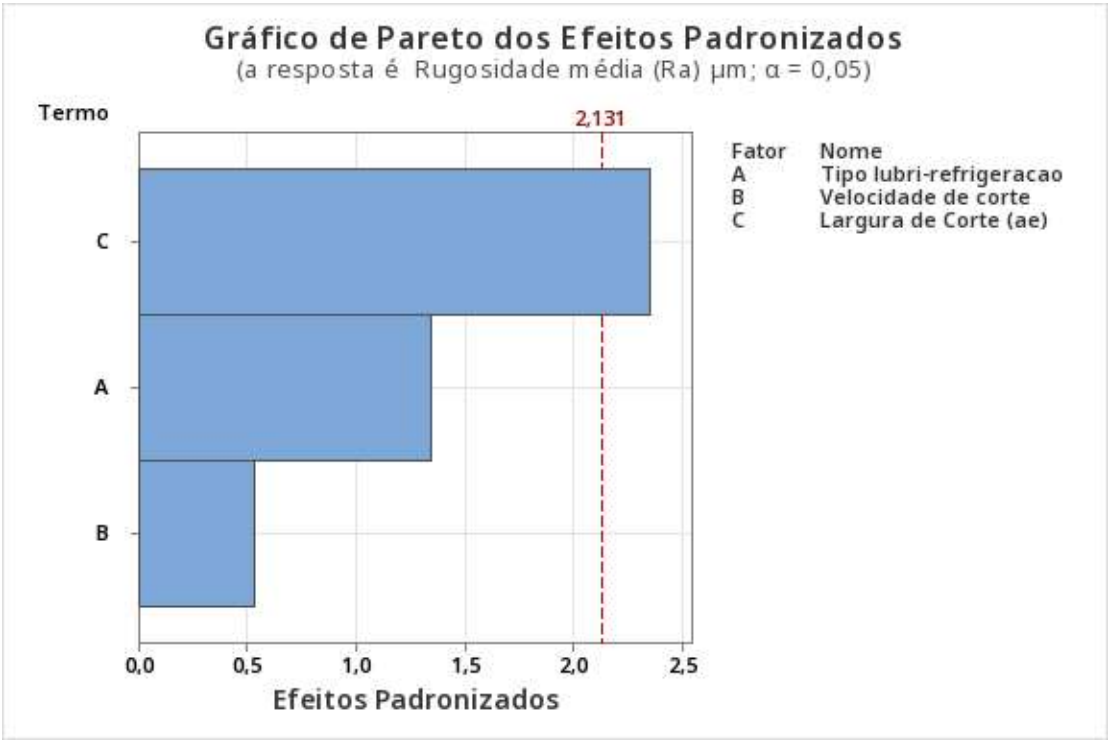


Figura 4.35 Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em µm (95% de confiança) para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e =14 mm e a_e =20 mm)

Conforme a Figura 4.36, que mostra os efeitos principais ocorridos na rugosidade de superfície causados pelas diferentes variáveis de forma individual, observa-se que foram obtidos menores valores de Ra para maiores larguras de usinagem. Esta variação, embora, muito pequena (0,07 µm entre o maior e o menor valor), foi significativa para a formação do resultado. Larguras de usinagem maiores tendem a gerar maior temperatura que tendem "amolecer" o material e isso faz com que não haja resistência ao corte e melhores resultados de rugosidade podem ser a partir daí obtidos. Além disso, o fresamento com 100% da ferramenta na peça garante que as duas arestas estejam no mesmo plano durante o corte e isso proporciona que a mesma região seja alisada mais vezes durante a mesma passada, algo que não ocorreu no corte com 70% do diâmetro da ferramenta, fato este também observado por Machado et al. (2015).

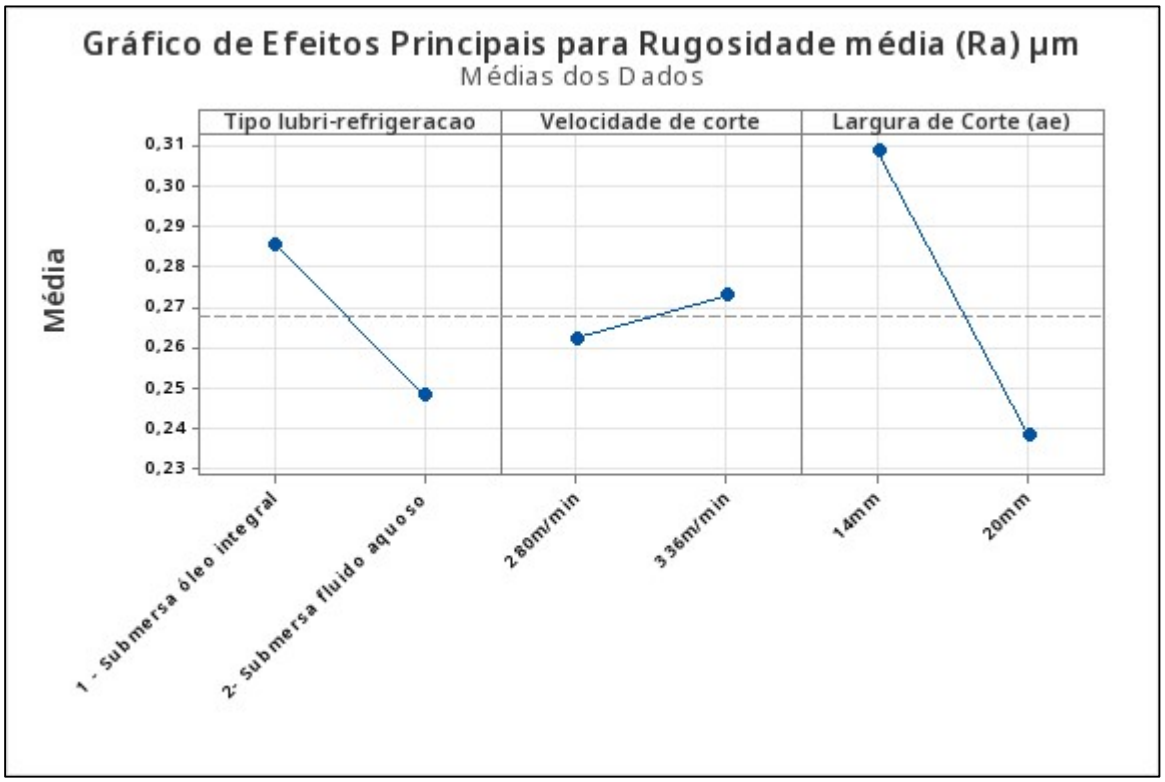


Figura 4.36 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da rugosidade de superfície média (Ra), medida em µm (95% de confiança), para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e =14 mm e a_e =20 mm)

Importante salientar novamente que as variações de rugosidade foram muito baixas, assim como os resultados obtidos também foram muito baixos para fresamento, resultado atribuído principalmente à boa fixação do dispositivo.

4.3 **Análise da usinabilidade pela potência de corte**

Neste trabalho, conforme explicado no capítulo 3, foi medida durante cada passe, a potência do fuso da máquina, quando a fresa estava em pleno corte na peça. Os resultados registrados nas Figuras 4.37 (potência no início de vida da ferramenta) e 4.38 (potência no fim de vida da ferramenta) são correspondentes às potências encontradas, descontadas as potências da máquina com rotação em vazio (fora de corte) para as duas velocidades de corte.

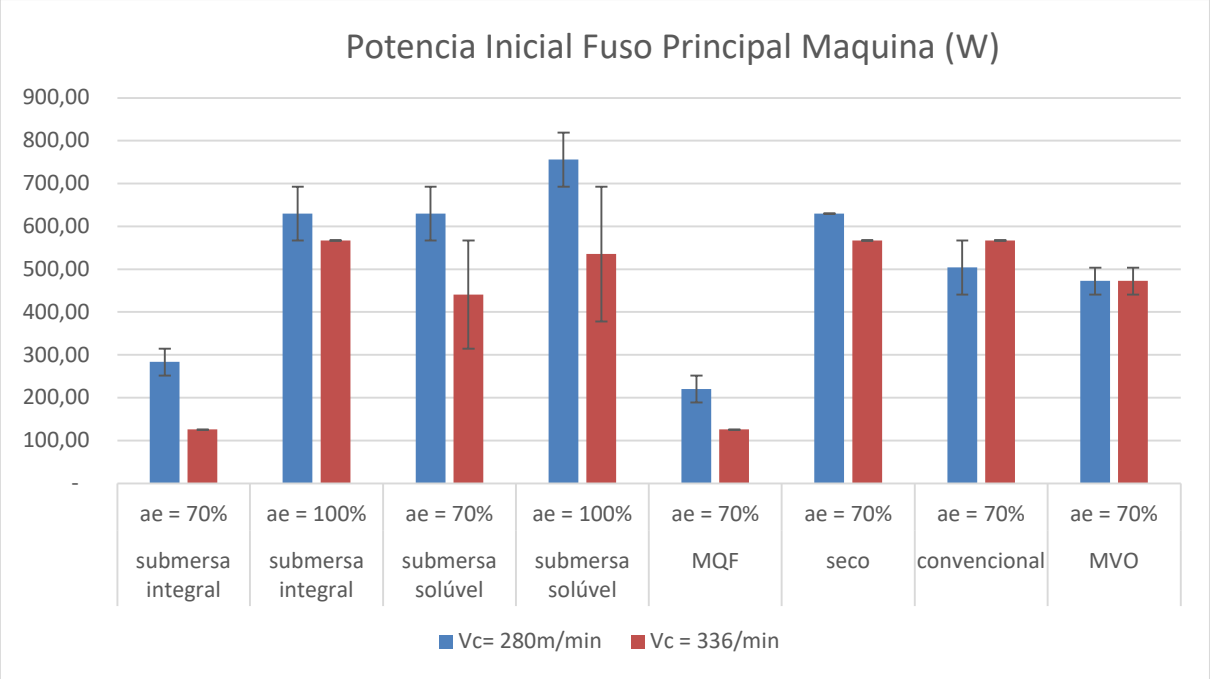


Figura 4.37 – Potência do fuso obtida após primeira passada, em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem

A primeira observação é que em todos os casos, conforme esperado, houve maiores valores de potência de corte para as ferramentas desgastadas (Figura 4.38) em relação às ferramentas novas (Figura 4.37). Isso ocorre porque as ferramentas desgastadas já não estão em seus formatos originais, desenhados para melhores desempenhos e, por esta razão, maiores atritos e maiores esforços de corte são gerados para a remoção do mesmo volume de cavaco.

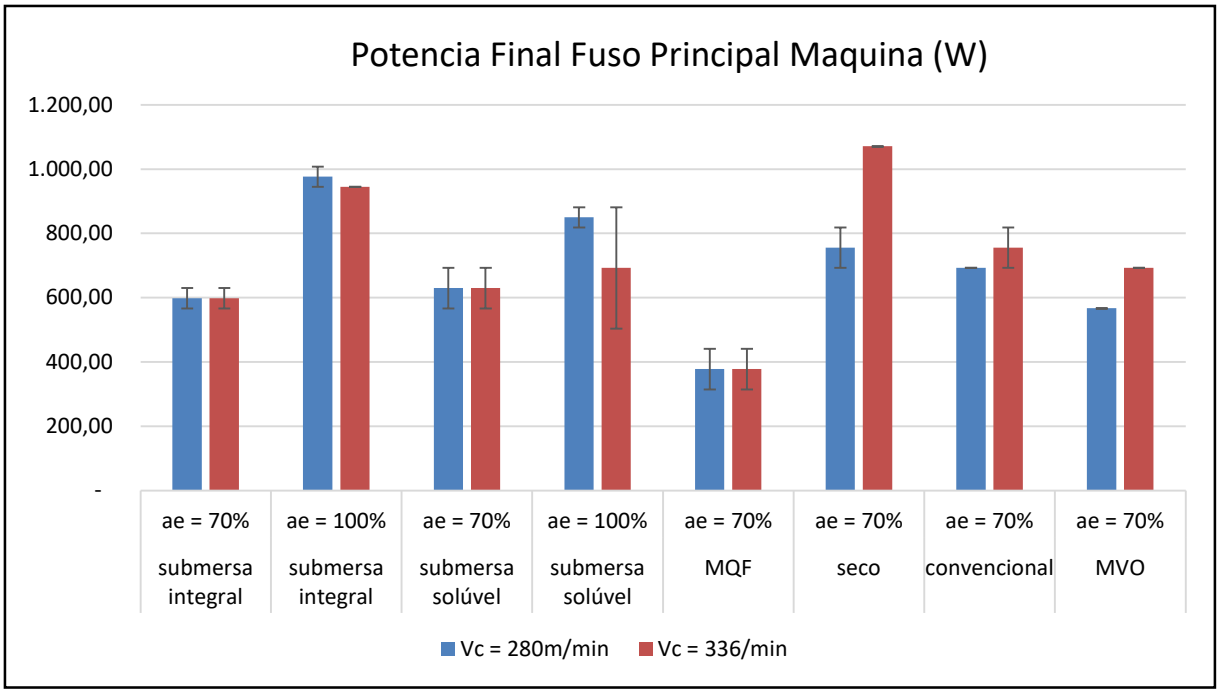


Figura 4.38 – Potência do fuso obtida após última passada (ferramenta desgastada), em função de variáveis de lubrificação / refrigeração, velocidades de corte e larguras de usinagem

Para as ferramentas novas (medições durante a primeira passada, Figura 4.37), observou-se, na maioria das condições de lubri-refrigeração, que para velocidades de corte maiores, obteve-se menores valores de potência de corte, conforme também observado por Usca et al. (2022). A explicação para isto, reside no fato que maiores velocidades de corte promovem maiores temperaturas de corte, que causam um efeito de "amolecimento" (diminuição da resistência mecânica) do material, proporcionando, desta forma, menores esforços de corte e, por conseguinte, menores potências de corte. Pela fórmula da potência de corte, que é o produto da velocidade de corte pela força de corte, que por sua vez é o produto da pressão específica de corte pela área da secção de corte, o citado aumento da temperatura fez com que a pressão de corte (Ks) diminuísse a ponto de se compensar o aumento provocado pelo incremento da velocidade de corte e, assim, obter menores potências de corte. (DINIZ et al., 2014). A exceção para estes casos foi o MVO e o corte convencional com fluido em abundância. Para o primeiro, a temperatura gerada em ambos os cortes foi alta o suficiente para que não houvesse diferença na potência de corte. No MVO as potências encontradas foram iguais para as duas velocidades de corte, o que significa que o aumento da velocidade de corte, neste caso, também causou a diminuição da pressão específica de corte na mesma proporção do acréscimo da velocidade de corte. Já no corte com fluido em abundância, nível 3 deste trabalho, o corte com a velocidade de corte alta apresentou potência de corte ligeiramente maior que com a velocidade normal,

apesar de não ser possível afirmar com exatidão, devido aos desvios encontrados. Uma possível explicação é que com velocidades de corte mais altas, apesar da temperatura média ser mais alta, também ocorre, principalmente sob esta condição de refrigeração, maior variação cíclica da temperatura, devidos aos já mencionados períodos ativos e inativos da ferramenta durante o corte. Para este primeiro contato entre ferramenta e peça, a variação cíclica pode ter resultado em maiores esforços e maior potência. Pelos motivos acima a pressão específica se manteve constante, fazendo com a potência de corte aumentasse pelo efeito da velocidade de corte.

Para as ferramentas desgastadas, também se observa de forma sumarizada, potências iguais entre as duas velocidades de corte para as condições submersa em óleo integral, submersa em emulsão e MQF. Já para as condições de corte a seco, MVO e fluido em abundância foram anotados maiores valores de potência para maiores velocidades de corte. Isso ocorreu, porque nos casos em que as potências foram iguais para as duas velocidades, o desgaste mais acelerado na velocidade de corte mais alta influenciou de forma equivalente a potência de corte de forma a compensar o efeito provocado pela diminuição da resistência mecânica em função da temperatura, quando se aumenta a velocidade de corte.

Ao se analisar as variações de largura de usinagem entre as condições submersas, observou-se maiores potências de corte para maiores larguras de usinagem nas duas velocidades, com a ferramenta em estado novo e desgastado. O maior contato da ferramenta na peça, apesar de gerar maior temperatura que deveria melhorar o corte pela já explicada redução de resistência mecânica da peça, também propicia maior contato, maior atrito e maior volume removido no mesmo tempo por dente da ferramenta, o que acarreta maior sobrecarga sobre o fuso da máquina.

Dentre as condições de lubrificação e refrigeração, as variáveis que consumiram menores potências de corte foram o MQF e a submersa com óleo integral, para as ferramentas novas. Rael (2004) também observou melhor resultado para fresamento que utilizava condição com óleo, pois esta condição permite lubrificação da aresta de corte, que reduz o atrito e como tem pouco efeito de resfriamento, permite também a diminuição da resistência mecânica pelo aumento da temperatura, conforme já explicado anteriormente. Isto indica que os óleos lubrificantes utilizados realmente lubrificaram, isto é, reduziram o atrito gerado, facilitando o corte e, consequentemente, consumiram menor potência da máquina para a usinagem. A condição submersa com fluido aquoso, não teve o efeito de lubrificar o contato fresa-peça-cavaco e, por isso, gerou altos valores de potência de corte (Figura 4.37).

É importante neste momento comparar os valores de potência de corte que indicam o quanto de lubrificação ocorreu no processo, com os valores de vida da ferramenta (Figura 4.4).

A Figura 4.37 mostra que as potências de corte consumidas na condição usinagem submersa com óleo integral e na condição MQF foram similares, indicando que os atritos nestas duas condições foram similares. Porém, a vida da ferramenta na condição submersa com óleo integral foi maior que na condição MQF (Figura 4.4). Muito provavelmente isto se deveu ao fato de que, o MQF, apesar de proporcionar condições de atrito similares à usinagem submersa com óleo integral, não evitou a variação cíclica de temperatura que ocorre devido à intermitência do corte típica do fresamento, o que prejudicou a vida da ferramenta. A condição submersa também deve ter reduzido a temperatura média em relação ao MQF, o que fez com que este apresentasse valores menores em termos de potência.

No caso das ferramentas desgastadas, sabe-se que o desgaste de flanco promove aumento de atrito e este resulta em maiores esforços e potências de corte. Neste caso, as menores potências foram encontradas no MQF e na usinagem submersa integral, mas a potência de corte desta última variável foi similar que em outros processos como a usinagem submersa em fluido aquoso. Aparentemente o desgaste de flanco igualou as demais condições, e o MQF continua sendo o melhor resultado, pois a lubrificação pode ter sido muito eficiente neste caso de modo a reduzir o atrito.

4.3.1 **Análise estatística dos resultados de potência de corte**

A Figura 4.39 mostra o gráfico Pareto das variáveis analisadas (velocidade de corte e tipo de lubri-refrigeração) que foram significativas ou não para a formação de resultado em termos de potência de corte, medidas em W. Pela análise do gráfico, observou-se que todas as variáveis do processo foram relevantes estatisticamente, sendo que o tipo de lubrificação ou refrigeração utilizado foi mais importante para o resultado que a velocidade de corte.

A Figura 4.40 mostra o gráfico dos efeitos principais das variáveis na formação do resultado de potência de corte. Estes dados confirmam aquilo que foi observado no item anterior, pois dentre os tipos os tipos de lubrificação ou refrigeração aplicados, foram observados menores valores de potência para os meios em que a lubrificação foi mais eficiente, ou seja, no MQF e usinagem submersa com óleo integral. A facilitação do corte pelo eficiente meio de aplicação do fluido possibilitou a redução de atrito e menores potências de corte foram observadas.

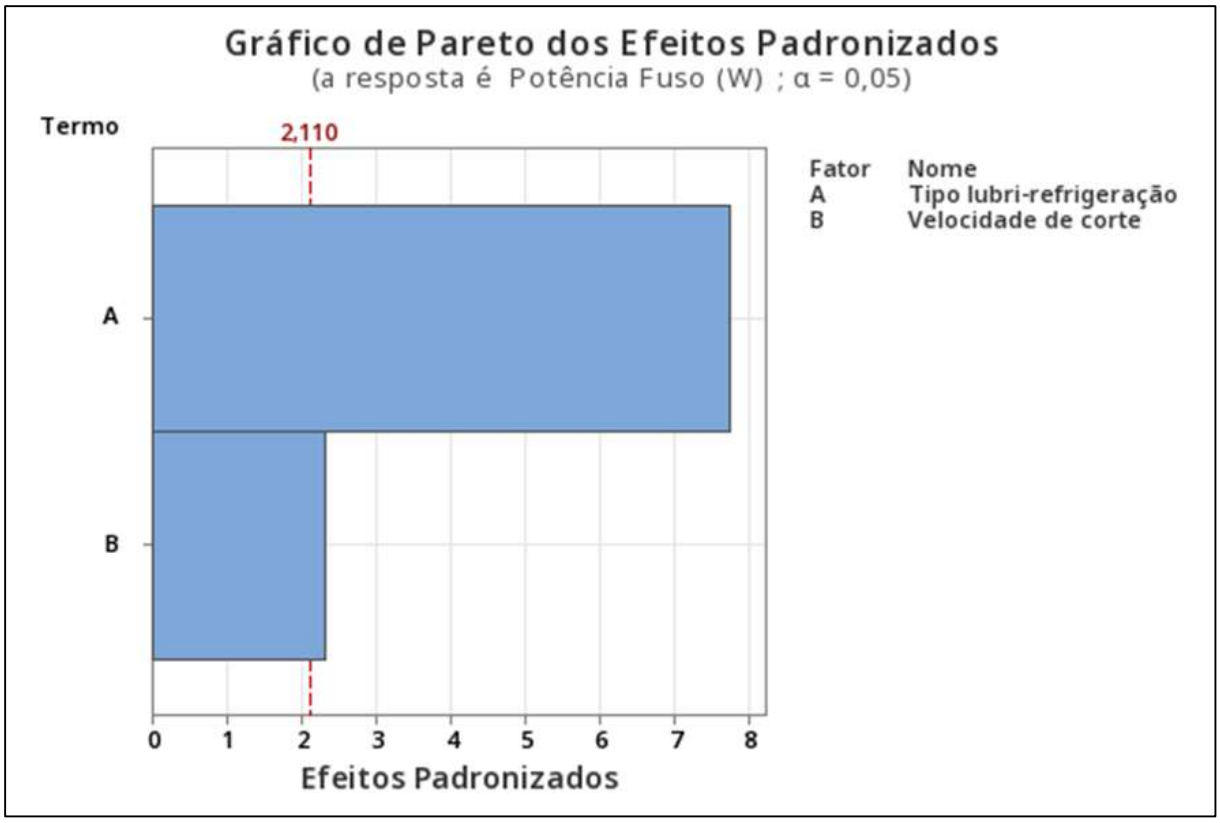


Figura 4.39 – Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da potência do fuso da máquina, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em W (95% de confiança)

O corte a seco, apesar de propiciar aumento da temperatura, o que em tese facilitaria o corte pela suposta redução da resistência mecânica da peça, foi o corte que empregou maior potência de corte. O possível excesso de aquecimento acelerou o desgaste de flanco, formando maior contato da fresa com material, que pode ter levado a maiores esforços de corte e também de potência, pela interdependência destas duas grandezas (Potência é produto da força pela velocidade de corte) (DINIZ et al., 2014).

No que tange à velocidade de corte, maiores velocidades de corte, conforme já explicado, promovem maiores temperaturas, que por sua vez causam efeito de amolecimento de material facilitando a usinagem, caso este excesso de temperatura não cause danos à ferramenta que mude sua condição geométrica ou o contato ferramenta – peça.

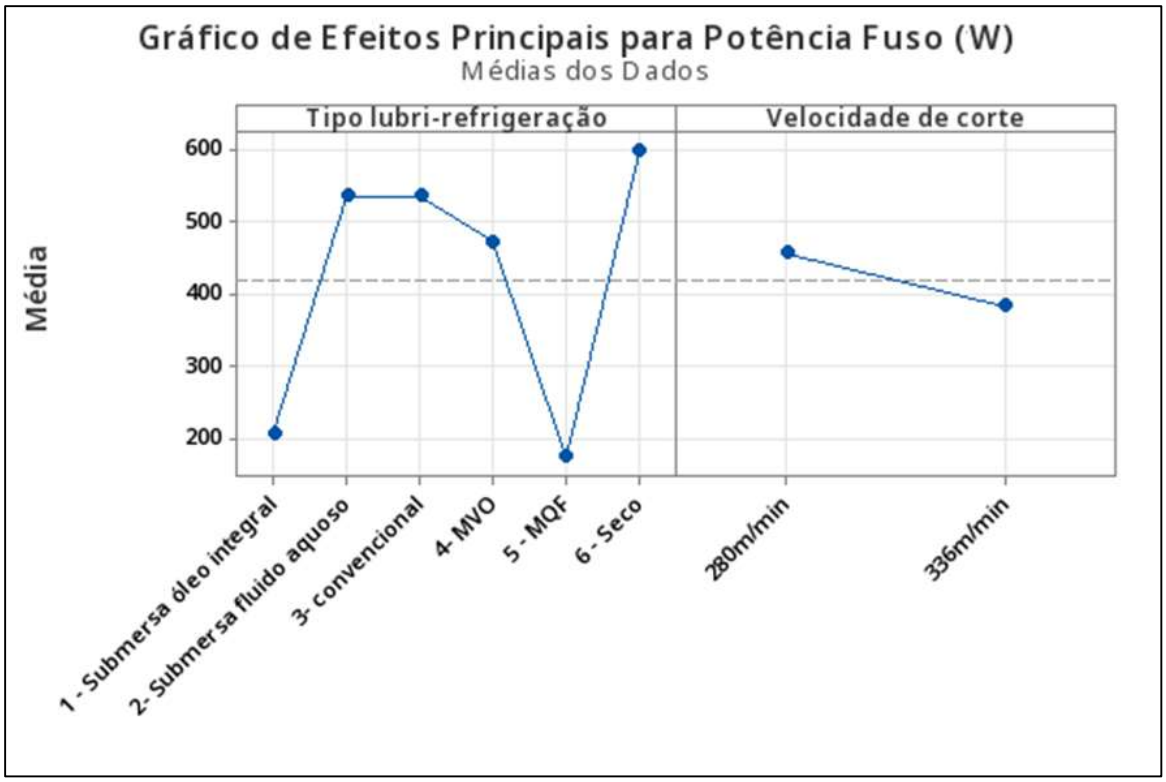


Figura 4.40 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da potência do fuso da máquina, com largura de usinagem constante (a_e=14 mm), medida em W (95% de confiança)

Novamente é importante ressaltar que a condição de lubri-refrigeração foi mais importante que a velocidade de corte para o consumo de potência. Assim, a mesma conclusão já citada quando da análise da vida da ferramenta pode ser feita aqui, isto é, se for necessário diminuir a potência de corte em um processo qualquer de fresamento, é mais indicado alterar-se adequadamente a condição de lubri-refrigeração (passar-se para a condição de usinagem submersa com óleo integral) que mexer na velocidade de corte que pode ter influência negativa em parâmetros como o tempo de usinagem e os custos de fabricação.

A Figura 4.41 mostra o gráfico Pareto, para confiança de 95%, das variáveis largura de usinagem, tipo de lubri-refrigeração (apenas para os dois níveis submersos) e velocidade de corte sobre a formação do resultado da potência do fuso da máquina. Todos os fatores foram relevantes para a formação do resultado. Porém, em comparação com o Pareto anterior, a largura de usinagem foi mais influente que a variação da usinagem submersa com óleo integral para a usinagem submersa em fluido aquoso. A largura de usinagem menor, conforme mostra o gráfico dos efeitos principais (Figura 4.42) utilizou aproximadamente 50% menos potência da máquina que o fresamento executado com 100% da fresa na peça. O maior contato da fresa com a peça proporciona mais atrito e isso faz com que esforços de corte e potência requerida

sejam maiores. Os demais efeitos observados, como a variação de potência entre os níveis 1 e 2 e a variação de velocidade, já foram exaustivamente explicados no subcapítulo anterior.

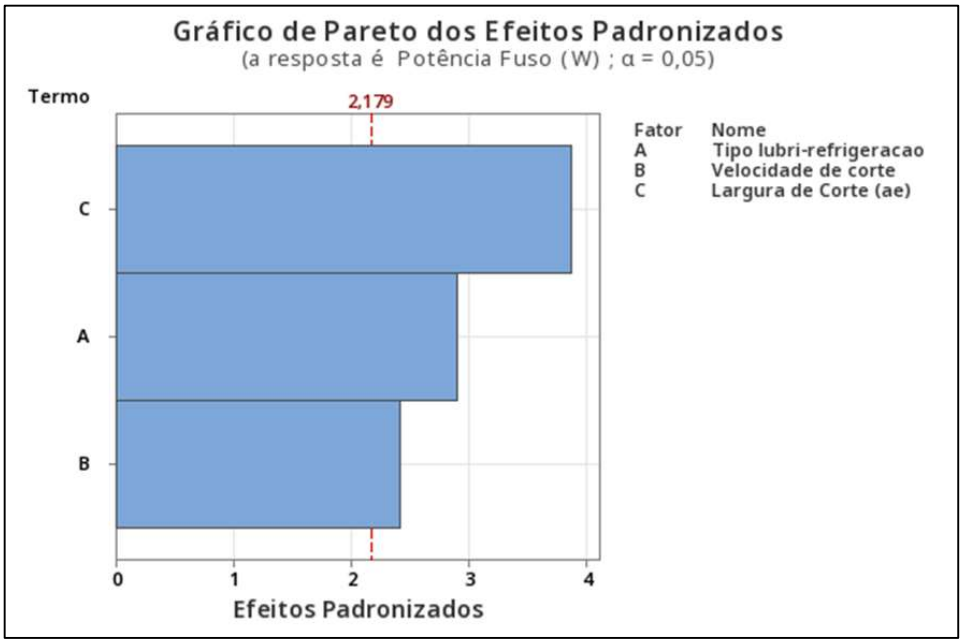


Figura 4.41– Gráfico Pareto padronizado para os efeitos significativos para a variação da potência do fuso da máquina para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em W (95% de confiança)

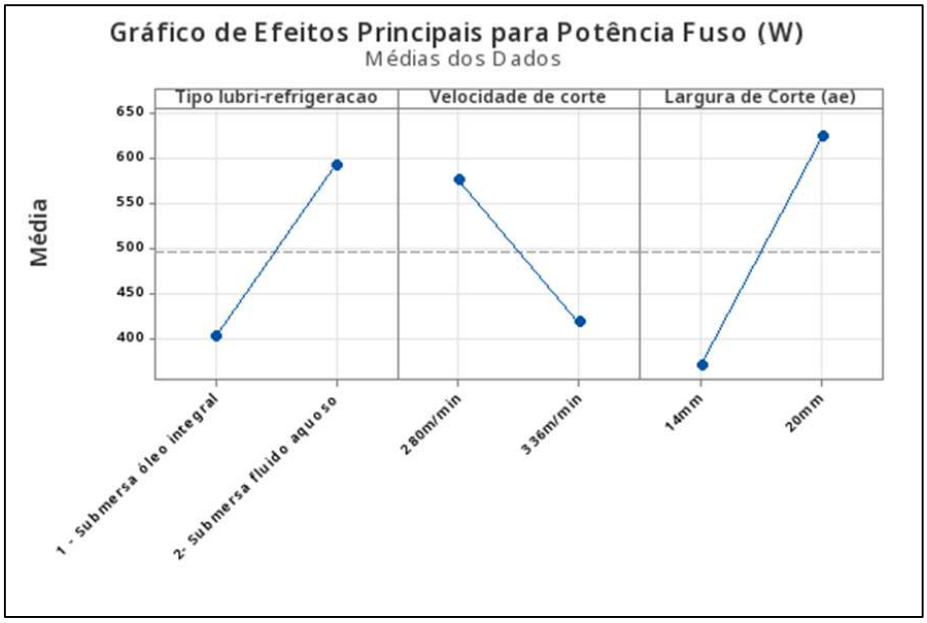


Figura 4.42 – Gráfico dos efeitos principais para a variação da potência do fuso da máquina, para os dois melhores níveis de lubri-refrigeração testados e para diferentes larguras de usinagem (a_e=14 mm e a_e=20 mm), medida em W (95% de confiança)

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a usinabilidade em operação de fresamento, em termos de vida de ferramenta, pela progressão do desgaste de flanco e mecanismo de desgaste, bem como, rugosidade de superfície aritmética e potência de corte de aço comum ABNT 1045 sob dois inéditos métodos de lubri-refrigeração em comparação com métodos já existentes, a saber com jorro de fluido aquoso (denominado neste trabalho também como "fluido em abundância" ou "refrigeração convencional"), corte com mínimo volume de óleo, MQF e corte a seco. Tais métodos testados foram a usinagem submersa em óleo integral e usinagem submersa em fluido aquoso.

Baseado nos resultados obtidos, pôde-se concluir para os ensaios deste trabalho:

- Os métodos inéditos apresentados foram os que proporcionaram maior vida de ferramenta. A usinagem submersa em óleo integral e a usinagem submersa em fluido aquoso apresentaram vidas de ferramenta na ordem de 120% e 85% maiores que no processo convencional (jorro de fluido aquoso), sob velocidade de 280 m/min, respectivamente. A diferença entre a usinagem submersa com fluido integral (melhor resultado) e o pior resultado obtido (com a usinagem com mínimo volume de óleo, denominada MVO) foi 420%; São, portanto, as melhores técnicas utilizadas e as recomendadas pelo autor;
- Em ordem decrescente de vida de ferramenta para as duas velocidades de corte, os resultados dos ensaios foram: usinagem submersa em óleo integral, usinagem submersa em fluido aquoso, MQF, corte a seco, fluido em abundância e por último, o processo com MVO;
- O processo MVO foi um fato inesperado deste trabalho, porque se esperava vida da ferramenta maior para este método, uma vez que proporciona lubrificação à zona de corte. No entanto, acredita-se que a o volume aplicado foi muito baixo, o que proporcionou lubrificação parcial e intermitente, e que acarretou efeito de deslizamento da ferramenta sob a peça e, com isso, proporcionou pior vida que o corte a seco ou com refrigeração convencional (jorro de fluido aquoso);
- Como já esperado, maiores velocidades proporcionaram menores vidas de ferramenta;
- A variação de largura de usinagem, aplicada nos processos submersos, não foi

relevante estatisticamente em termos de vida de ferramenta. Observou-se, apesar dos desvios encontrados, que larguras de usinagem maiores apresentaram menores vidas de ferramentas;

- O principal mecanismo de desgaste observado nos processos de usinagem submersa foram a abrasão e o *attrition*. No processo submerso em fluido aquoso também se observa a presença de trincas térmicas em menores proporções. Foram identificadas inúmeras trincas no processo convencional (jorro de emulsão de óleo em água) e o corte a seco apresentou possivelmente pequena deformação das linhas geométricas da ferramenta, porém a oxidação foi o principal mecanismo de desgaste observado nesta condição;
- Devido às altas dispersões de rugosidade e grande variação de resultados obtidos, pode-se afirmar que a condição de lubri-refrigeração e as diferentes velocidades de corte não influenciaram os resultados de rugosidade da peça. As larguras de usinagem foram significativas para os resultados, e tem-se que maiores larguras de corte proporcionaram menores valores de rugosidade;
- As condições de lubri-refrigeração, as velocidades de corte e a largura de usinagem foram significantes para a formação de resultados em termos de potência de corte;
- O processo com usinagem submersa em óleo integral e o MQF foram os que requereram menor potência do fuso da máquina seguidos pelo processo MVO, MQF, submersa em fluido aquoso, jorro com fluido em abundância e corte a seco;
- De forma geral, maiores velocidades de corte requereram menores potências de corte, em função do amolecimento do material resultante da maior temperatura de corte. Também maiores larguras de usinagem proporcionaram maiores esforços de corte pelo aumento do contato e do atrito;

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar as usinagens submersas com materiais de pior usinabilidade como ligas de titânios, Inconel ou aços inoxidáveis;
- Testar as usinagens submersas com diferentes fluidos, tidos como mais ambientalmente sustentáveis, como os nanofluidos, por exemplo;

- Testar com outros tipos de ferramentas como fresas inteiriças de metal duro, por exemplo;
- Testar o processo em proporções maiores, ou seja, com recipiente maior. Maior quantidade de fluido deveria proporcionar resultados ainda melhores que os observados neste trabalho;
- Testar eficácia ambiental e econômica do sistema, uma vez que com um galão de óleo foi possível realizar todos os testes, seria importante testar quanto tempo é possível utilizar o mesmo fluido para as usinagens;
- Comparar os mesmos resultados com a aplicação do MVO sobre maior vazão, pois assim poder-se-ia confirmar as possíveis causas do mau desempenho deste nível de condição de lubri- refrigeração.

Referências

Abdulkareem S., Babatunde, M. A., Ogedengbe T. S., Adegun I. K. **Effect of Some Thermodynamic Properties of Cutting Fluids on Machinability of Carbon Steel.** Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET), Vol. 5, Issue 2, September 2020.

Adler D.P., Hii W.W.-S., Michalek D.J., Sutherland J.W. **Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns.** Mach SciTechnol, cap 10(1):23–58, 2006.

Ashmawy, M., Elsheikh A., Elkassas A. **A Review of Cooling and Lubrication Techniques for Machining Difficult-to-cut Material.** Journal of Engineering Research: Vol. 7: Iss. 1, Article 4. 2023.

Basseti J.; Poulesquen, A.; Pierlot, C. **Review on Cutting Fluids: Formulation, Chemistry and Deformulation.** Journal of Oleo Science. 73(7):921-941. 2024

Benedicto E., Carou D., Rubio E.M. **Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes.** Science Direct, Advances in Material & Processing Technologies Conference, Procedia Engineering, 184, 99 – 16, 2017.

Blaser, Swisslube do Brasil. **Ficha Técnica de Produto PIDS 02903-06, Fluido Vascomill 10**. Revisao 06, 28.09.2017

Blaser, Swisslube do Brasil. **Ficha Técnica de Produto PIDS 02903-06, Fluido Vascomill 10**. Revisao 06, 17.07.2019

Bertolli, R. A. **Estudo do desgaste de fresas sob diferentes condições de usinagem**. Aranda Editora, 2023

Braga, D. U.; Diniz; A. E.; Miranda, G. W. A.; Coppini, N. L. **Minimum lubrication in Al-Si drilling**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2002

Braghini, A.; Diniz, A. E.; Teixeira Filho, F. **Tool wear and tool life in end milling of 15–5 PH stainless.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer, London 2008

Çakīr O., Yardimeden A., Ozben T., Kilickap E. **Selection of cutting fluids in machining** Process Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, JAMME. Volume 25, issue 2, December of 2007.

Cambiella, A.; Benito, J.M.; Pazos, C.; Coca, J.; Hernández, A.; Fernández, J.E. **Formulation of emulsifiable cutting fluids and extreme pressure behavior**. J. Mater. Process. Technol. 184, 139-145, 2007

Campos, M. S.; **Desvendando o Minitab.** 1 ed. Rio de Janeiro: editora Qualitymark, 2003. 259p.

Callegaro, C.; Cesar, F. I. G. **Manuseio de fluidos de cortes: da utilização ao descarte**. REGRA SP, ISSN 2526-1045, v. 4, n.1. p. 76-98. Publicado em Fevereiro 2019.

Chetan; Ghosh, S.; Rao, P. V. **Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review.** Journal Of Cleaner Production, v. 100, p.17-34, 2015

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica, **Por que um óleo solúvel vegetal é a melhor opção para a usinagem de metais?** publicado em 21/11/2019

Cselle, T. **As Opções do mercado para o desenvolvimento de ferramentas.** Máquinas e Metais, volume 430, pp 32.45, novembro, 2001.

D'Amato R., Wang C., Calvo R., Valásek P., Ruggiero A. **Characterization of vegetable oil as cutting fluid.** 8th Manufacturing Engineering Society International Conference. Procedia Manufacturing, 41, 145 -152. 2019

Dacas, F. P., Costa, R.C., Desiderio, Flesch, E. A., Marques, F. M. **Avaliação Da Refrigeração Criogênica Na Usinagem Cnc Do Aço Inoxidável Martensítico Aisi 440c**. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018

Davim J.P., Sreejith P.S., Gomes R., Peixoto C. **Experimental studies on drilling of aluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions**. Proc Inst Mech Eng Part B Journal Engineering Manufacture 220:1605–1611, 2016

Dhar NR, Islam MW, Islam S, Mithu MAH. **Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Chip Formation Mode, Tool Wear, and Surface Roughness in Turning AISI-1040 Steel with Uncoated Carbide Tool**. Bangladesh, 2008.

Debnath, S., Reddy, M. M. and Yi, Q. S. **Environmentally friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review**. Journal of Cleaner Production, 83, 33–47 (2014).

Debnath, S.; Reddy M. M.; Pramanik, A. **Dry and Near-Dry Machining Techniques for Green Manufacturing**. Springer Nature Switzerland. Gupta ed. P 1 -29. 2019.

De Paula, Antonio Romero. **Estudo da usinabilidade do aço abnt 4340 endurecido no torneamento com alta velocidade de corte sob diferentes condições de lubrirrefrigeração**. Belo Horizonte, MG, 2012. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Deshpand, Soham; Deshpande, Yogesh. **A review on cooling systems used in Machining Processes**. 9th International Conference of Materials Processing and Characterization, ICMPC-Hyderabad, Andhra Prades (India): 2019

Diniz, A.E; Marcondes, F.C; Coppini, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber editora. 10ª ed. 247p. 2014.

Diniz, A.E, Micaroni, R. **Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v42, pp. 809 – 904. 2002

Dörr, J., Sahm, A. **A mínima quantidade de lubrificantes avaliada pelos usuários.** Máquinas e Metais, volume 418, pp 20-39, novembro, 2000.

Drozda, T. J.; Wick, C. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machining**. v.1, 4-ed., 1983.

El Baradie, M., A. **Cutting Fluids.** Dublin: Journal of Materiais Processing Technology, n. 56, p. 786-806, 1996.

Fernandes, G. H. N; Barbosa, L. M. Q.; Martins, P. S.; Machado, A. **Técnicas de refrigeração para usinagem do titânio Ti-6AL-4V**. Colóquio de Usinagem PUCPR. 2022

Gomes, Milla Carolina. **Estudo do processo de microfresamento em aço inoxidável ABNT 316L produzido por fundição e manufatura aditiva**. Uberlândia, MG, 2022. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

Gupta, M.K.; Nieslony, P.; Korkmaz, M.E, Królczik, G.M.; Kuntoglu, M., Pawlus, P.; Jamil, M.; Sarikaya, M**. Potential use of cryogenic cooling for improving the tribological and tool wear characteristics while machining aluminum alloys**. Tribology Internacional 183. 2023

HAI LU J. HE. Enterprise Co, **A qualidade da água afeta o desempenho do refrigerante.** 2021. Disponivel em: https://www.hai-lu-oil.com/pt/faq/A-qualidade-da-gua-afeta-o-desempenho-do-refrigerante/HLJH_faq-19.html

Heisel, U., Lutz, M., Spath, D.; Wassmer, R., Walter, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, p. 22-38, fevereiro, 1998.

Hong, S.Y., Ding, Y.; **Cooling Approaches and Cutting Temperatures in Cryogenic Machining of Ti-6Al4V**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41: 1417–1437, 2001

ISO3685. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. 2017

Iyengar, Ramai H.S., Salmon R., Rice W.B. **Some effects of cutting fluids on Chip Formation in metal cutting.** ASME J Eng Ind Ser B, 1965

Junior, A B., Silva, L. R., Bezerra, A. A., Coelho, R. T. **Desgaste de ferramentas de torneamento usando HSC e MQL.** Máquinas e Metais, volume 423, pp. 284-295, abril, 2001.

Kamruzzaman, M.; Dhar, Nikhil Ranjan. **Effect of high-pressure coolant on temperature, chip, force, tool wear, tool life and surface roughness in turning AISI 1060 steel.** GU, Journal of Science, p. 359 -370, 2009

Karupannasamy D.K., Ruthuraraj, R. **Synthesis of Eco-Friendly Machining Lubricants and Its Tribological Characteristics.** International Journal of Recent Technology and Engineering – IJRTE; ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-3, September 2019

Khatri, A., Jaham, M. P. **Investigating tool wear mechanisms in machining of Ti-6Al-4V in flood coolant, dry and MQL conditions**. 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas, USA, 2018.

Kaur, S., Garg, K., Mittal, R. **Effect of Minimum Quantity Lubrication in Machining Using Different Vegetable Oils**. Asian Journal of Engineering and Applied Technology Vol. 7 No. S2, pp.70-72, 2018

Klocke, F.; Eisenblätter, G. **Machinability investigation of the drilling process using minimal cooling lubrication techniques**. Production Engineering, v. 4, n. 1, p. 19-24.1997.

Klocke, F., Krieg, T., Gerschwiler, K., Fritsch, R.; Zinkann, V., Pohls, M., Eisenblatter, G. **Improved Cutting Processes with Adapted Coating Systems. Laboratory for Machine Tools and Production Engineering.** RWTH, Aachen. 4p. 1998.

Lawal, S.A., Choudhury, I. A., Sadiq I. O., Oyewole, A. **Vegetable-oil based metalworking fluids research developments for machining processes: survey, applications and challenges.** Manufacturing Review, 2014.

Leyers, J. **Why saturated synthetic ester oils are n°1 for hydraulic fluids.** Q8 Oils, 2020

Lima, Hugo Vilaça. **Análise do Comportamento do Fluido de Corte Recuperado/ Reformulado no Processo de Retificação**. Belo Horizonte, MG, 2013. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Machado A.R., Motta M.F., da Silva M.B. **Performance of synthetic and mineral soluble oil when turning AISI 8640 steel.**Trans ASME, J Manuf Sci Eng 119:580–586, 1997

Machado, A.E; Abrão, A.M., Coelho, R.T.; da Silva, M.B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher editora. 3ª ed. 407p. 2015.

Magri, A., Diniz, A.E., Suyama, D.I., **Evaluating the use of high-pressure coolant in turning process of Inconel 625 nickel-based alloy**. Journal of Engineering Manufacturing. Vol. 232(7): 1182 -1192. 2018

Mamidi, V. K., A.E., Xavior, A.M., **A Review on Selection of Cutting Fluids**. Journal of Research in Science & Technology, ABHINAV. Volume I, Issue nr. 5. 2012.

MazurkiewiczM, Kubala Z, Chow J, **Metal machining with high-pressure water-jet cooling assistance—a new possibility**. J Eng Ind, 1989

Micaroni, R. **Otimização dos parâmetros de usinagem visando a viabilização do torneamento seco ABNT 1045 em operações de acabamento**. Campinas, SP, 2001. Originalmente apresentada como tese de mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade estadual de Campinas.

Micaroni, R.; Diniz, A. E..; **Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel**. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) 247–254

Miranda, Gilberto Wasser Arenas Miranda. **Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN**. Campinas, SP, 2003. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade estadual de Campinas.

Naves, Vitor Tomaz Guimaraes; Silva, Marcio Bacci da. **Usinagem com fluido à alta pressão**. 21° POSMEC, Simposio de Programa de Pós Graduacao, Universidade Federal de Uberlandia, MG, 2017

Novaski, O., Dörr, J. **Usinagem quase a seco.** ***Máquinas e Metais*****, p. 34 a 41.** Revista, Máquinas e Metais, novembro, 1999

Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., and Ryffel, H. H.,: **Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook, Industrial Press.** 2016.

Palmai, Z. **Cutting Temperature in Intermittent Cutting**, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol. 272, pp. 261-274, 1987.

Pervaiz, S., Deiab, I., Rashid, A., Nicolescu, M. and Kishawy, H. **Performance Evaluation of Different Cooling Strategies when Machining Ti6Al4V**. International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, Newtech, Stockholm, Sweden, 2013

Pevec, S.; Janez K.; Vedran B. Matej N.; Denis D. **An All-Fiber Fabry–Pérot Sensor for Emulsion Concentration Measurements.** Chicago: Sensors 2023, n. 4, 2023.

Pereira O, Català P, Rodríguez A, Ostra T, Vivancos J, Rivero A, López-de-Lacalle LN. **The use of hybrid CO2 + MQL in machining operations**. Procedia Eng 132:492–499. 2015

Pires, Bruno Jorge. **Estudo das forças, vibrações e desgaste das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4Vma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN**. Campinas, SP, 2011. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade estadual de Campinas.

Polajnar, M.; Coga, L.; Kalin, M. **Base lubricants for green stamping: The effects of their structure and viscosity on tribological performance.** Laboratory for Tribology and Interface Nanotechnology, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, 2022

Pušavec F, Kopač J. **Sustainability assessment: cryogenic machining of inconel 718**. Stroj Vestnik/Journal of Mechanical Engineering 57(9): 637–647. 2011

Rael, Valmir Aparecido. **Ciclo de melhoria aplicado na avaliação do comportamento de diferentes condições de refrigeração /lubrificação em fresamento em alta velocidade de corte**. Campinas, SP, 2004.Originalmente apresentada como tese de mestrado profissional, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade estadual de Campinas.

Raynor, P.C.; Wom Kim, S.; Bhattacharya, M. **Mist generation from Metalworking Fluids Formulated Using Vegetable Oils**. The Annals of Occupation Hygiene. Volume 49, P. 283-293, 2005.

Reis, Roberto. **Estudo da influência da geometria da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço ABNT 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes**. Uberlândia, MG, 2015. Originalmente apresentada como tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Rocol. **Water hardness and cutting fluid**. Disponível em https://www.rocol.com/news/water-hardness-and-cutting-fluid. 2012

Sales, W. F. ; Diniz A. E. ; Machado, Á. R. . **Application of Cutting Fluids in Machining Processes.** Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 23, n.2, p. 227-240, 2001."

Saadieh, Abdel Salam. **Submerged Machining of Steel and Aluminum.** Gazimağusa, North Cyprus, 2015. Submitted for the Degree of Master of Sciences in Mechanical Engineering, Eastern Mediterranean University.

Sanchez, L.E.A; Marinescu, I. **Effect of different methods of cutting fluid application on turning of a difficult-to-machine steel (SAE EV-8**). Journal of Engineering Manufacture, 2012

Sanchez, L.E.A; Palma L. G.; Marinescu, I.;Modolo D. L.; Nalon L. J.; Santos A.E. **Effect of different methods of cutting fluid application on turning of a difficult-to-machine steel (SAE EV-8).** Journal of Engineering Manufacture, 2013

Santos, F. A., Pinto, M. A. C, Santos, R. O. B., Bimestre, T. A., Gama, R. P. **Comparative analysis of the application of lubricant coolant by the MQF technique in the face milling machining process of hardened D2 steel alloy**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.1, p. 10349-10370, 2021.

Scandiffio, Innocenzo, R. **Uma contribuição ao estudo de corte a seco e ao corte com mínima quantidade de fluido de lubrificante em torneamento de aço**. Campinas, SP, 2000. Originalmente apresentada como tese de mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade estadual de Campinas.

Sharmin, I.; Gafur, A, Dhar, N. R. **Preparation and evaluation of a stable CNT-water based nano cutting fuid for machining hard-to-cut materialife**. Springer Nature Applied Sciences Journal, Switzerland, 2020.

Sharif, Muhammed Nadeem; Pervaiz, Salman; Deiab, Ibrahim. **Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review.** Article of Internation Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, 2017

Shaw, Milton C. **Metal Cutting Principles.** New York, USA: Oxford University Press, cap 13, p. 265 – 305, 2005

Sheng, P. S.; Oberwalleney, S. **Life – cycle planning of cutting fluids – a review**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 119, n. 4 (b), p. 791-0, 1997

Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. **Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids**. International Journal of Machining, 2012

Sokovic, M. ; Mijanovic, K. **Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of cutting processes.** American Journal of Mechanics and Applications, v.109, pp. 181-189, 2019.

Sreejith PS, Ngoi BKA **Dry machining: machining of the future.** Journal of Material Processing Technology 101(1):287–291. 2000

Sultana N., Dhar N.R., Prianka, B.Z. **A Review on Different Cooling/Lubrication Techniques in Metal Cutting.** American Journal of Mechanics and Applications. Vol. 7, No. 4, 2019, pp. 71-87. doi: 10.11648/j.ajma.20190704.11: 2019.

Tapoglou N., Lopez M. I. A., Cook I., Taylor C. M., **Investigation of the influence of CO2 cryogenic coolant application on tool wear**, Procedia CIRP, 63, 745-749, 2017

T. Lu, O. W. Dillon, Jawahir Jr:,vI. S.; **A thermal analysis framework for cryogenic machining and its contribution to product and process sustainability.** GCSM – Global Conference on Sustainable Manufacturing. 11th edition, 2013.

Tang L., Li C., Zhou Z., Nie X., Chen Y., Cao H., Liu B., Zhang N., Said Z., Debnath S., JamilM., Ali, H. M., Sharmal, **Biological Stability of Water-Based Cutting Fluids: Progress and Application.** Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2022.

Teixeira Filho, Fernando. **A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH**. Campinas, SP, Originalmente apresentada como tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

Ternec, Lubrificantes. **Informativo técnico produto HCSS B/551**. Revisão 02, 14.03.2023

Trent, E.M. ; Wright, P. K. **Metal Cutting**. Woburn: Butterworth–Heinemann. 4ª ed. 464p., 2000.

Usca, Ü. A., Uzun, M., Sap, S., Giasin, K., Pimenov, D. Y., **Prakash, C. Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling/lubrication conditions.** Journal of Materials Research and Technology, Volume 21, Pages 893-904, 2022.

Venugopal K a, Paul S, Chattopadhyay AB; **Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy.** Cryogenics 47(1):12–18, 2007

Vicentin, G. C.; Sanchez, E. D. A. **Porta-Ferramenta Para Usinagem Com Refrigeração Interna**. III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009. Disponivel em: http://www2.feb.unesp.br/pos/seminario/IIISeminario/anais.php. A

Viswanathan, R., Ramesh, S. and Subburam, V., **Measurement and optimization of performance characteristics in turning of Mg alloy under dry and MQL conditions**, Procedia Manufacturing, vol. 26, pp. 434-445, 2018.

Wickramasinghe, K.C., H. Sasahara, and M. Usui, **Performance Evaluation of a Sustainable Metal Working Fluid applied to Machine Inconel 718 and AISI 304 with Minimum Quantity Lubrication**. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2021.

Wu, X.; Changhe, L.; Zhou, Z.; Nie X.; Chen Y.; Zhang Y.; Cao H.; Liu B.; Zhang N.; Said Z.; Debnath S.; Jamil M.; Ali, H. M.; Sharma, S. **Circulating purification of cutting fluid: an overview.** Springer Nature, 2021

Yildirin, Ç.V.; Kivak, T.; Sarikaya, M.; Sirin, S. **Evalution of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology, when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CrioMQL.** Journal of Material Researchs and Technology: 2079 – 2092, 2020.