



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

SANDER GABALDO

**Dióxido de carbono como fluido de corte no
torneamento de aço inoxidável duplex com
ferramentas de metal duro: efeitos na
integridade superficial**

CAMPINAS
2019

SANDER GABALDO

Dióxido de carbono como fluido de corte no torneamento de aço inoxidável duplex com ferramentas de metal duro: efeitos na integridade superficial

Tese de Doutorado 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. Amauri Hassui

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO SANDER GABALDO, E ORIENTADO PELO PROF. DR AMAURI HASSUI.

**CAMPINAS
2019**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

G11d Gabaldo, Sander, 1981-
Dióxido de carbono como fluido de corte no torneamento de aço inoxidável duplex com ferramentas de metal duro : efeitos na integridade superficial / Sander Gabaldo. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Amauri Hassui.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Acabamento. 3. Aço inoxidável. 4. Dióxido de carbono. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Carbon dioxide as cutting fluid in duplex stainless steel turning machining : effects on surface integrity

Palavras-chave em inglês:

Machining

Finishing

Stainless steel

Carbon dioxide

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Amauri Hassui [Orientador]

Anselmo Eduardo Diniz

Tamires de Souza Nossa

Daniel Iwao Suyama

Haroldo Lhou Hasegawa

Data de defesa: 19-08-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0000-0002-3106-4491.

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9604233825581543>

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

Dióxido de carbono como fluido de corte no torneamento de aço inoxidável duplex com ferramentas de metal duro: efeitos na integridade superficial

Autor: Sander Gabaldo

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Amauri Hassui – Presidente da banca
Universidade de Campinas

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade de Campinas

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama
Universidade de Campinas

Prof. Dra. Tamires de Souza Nossa
Instituto Federal de São Paulo

Prof. Dr. Haroldo Lhou Hasegawa
Universidade Federal de Itajubá

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 19 de Agosto de 2019.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Dario Gabaldo e Maria do Carmo Gabaldo que sempre me incentivaram e me apoiaram em quaisquer das minhas escolhas, sendo elas pessoais, profissionais ou acadêmicas.

Ao meu querido filho, Gustavo Gabaldo, que apesar de ser uma criança, teve a compreensão nos momentos de minha ausência, fazendo com que a conclusão desta pesquisa fosse possível.

A minha namorada Francine Melo, pelo incentivo e apoio nos momentos de fraqueza e perda do foco.

A todos os amigos e parceiros profissionais que de forma positiva e amigável estiveram sempre comigo.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por mais esta etapa vencida.

Ao professor Dr. Amauri Hassui pelo profissionalismo e pela enorme capacidade de orientação, troca de experiência, companheirismo e pelo grande incentivo e motivação para a realização desta pesquisa.

Aos alunos, docentes, técnicos e secretaria do Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas, que sempre que solicitados, estiveram prontamente dispostos a ajudar.

A empresa Walter do Brasil, na pessoa do Diretor Presidente, Sr. Salvador Fogliano Júnior por disponibilizar o Centro de Tecnologia da Empresa (máquina-ferramenta e ferramentas de corte) para o desenvolvimento da pesquisa.

A Universidade de Sorocaba, na pessoa do Engenheiro Sr. Alexandre Belchior e equipe, dando todo suporte necessário para a preparação e condução dos testes de usinagem realizados.

Ao Instituto Federal, Campus Itapetininga, na pessoa da Profa. Dra. Tamires Nossa e equipe, dando todo suporte necessário para a preparação e realização dos ensaios laboratoriais de corrosão.

A empresa Sandvik Materials Technology, na pessoa do Gerente Nacional de Vendas, Sr. Angelo Martinez doando a matéria prima para a realização da pesquisa.

A empresa Circular Gases, na pessoa do Diretor Geral, Sr. Edilson Machado pelo suporte e desenvolvimento do equipamento de criogenia e fornecimento dos gases.

A empresa Blaser Swissslube, na pessoa do Diretor Geral, Sr. Alessandro E. Alcantarilla pelo fornecimento do fluido de corte líquido para o desenvolvimento da pesquisa.

A empresa Voith Brasil, na pessoa do Sr. Alexandre Bueno pelo fornecimento da estrutura da empresa para ensaios iniciais com o dióxido de carbono e doação de matéria prima.

A empresa Walter AG, na pessoa da Dra. Vikki Franke pelo fornecimento da know-how técnico de aplicação e uma extensa lista de referências bibliográficas de relevância na comunidade acadêmica global.

“Acho que a base do
sucesso em qualquer
atividade está em primeiro
se ter uma oportunidade,
que geralmente aparece não
porque você cria o
momento, mas alguém
chega e abre uma porta”

Ayrton Senna

Resumo

A indústria metal mecânica em geral vêm testemunhando uma maior procura por materiais metálicos para fabricação de componentes críticos, tais como peças da indústria de extração de gás e petróleo para utilização de componentes em alto mar, palhetas de turbinas à vapor, tanques para produtos químicos, estruturas para construção civil, entre outras, fabricados em aços inoxidáveis, aços inoxidáveis duplex, ligas à base de titânio e à base de níquel, principalmente devido à relação resistência mecânica e peso, e à alta capacidade de manter propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e em ambientes corrosivos. Variações e combinações de vários elementos de liga como o cromo, níquel, molibdênio, proporcionam uma excelente resistência à corrosão, uma alta taxa de encruamento e baixa condutividade térmica. Assim, gerou-se a necessidade da evolução dos processos de usinagem visto que a dificuldade da remoção de cavaco nestas ligas em função da baixa usinabilidade afeta diretamente os custos de produção destes componentes tornando-os extremamente caros e muitas vezes inviáveis. O objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo de técnicas de usinagem na operação de torneamento longitudinal em acabamento da liga duplex SAF2205 (UNS S31803) com a utilização de fluido de corte tipo aquoso (emulsão) e fluido tipo gasoso (dióxido de carbono, CO₂). Para cada tipo de fluido de corte, foram testados dois canais de direcionamento do fluido de corte para a região da interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça com o objetivo de buscar o melhor desempenho da ferramenta de corte de metal duro. Como limitador do teste, por tratar-se de uma operação de acabamento, quando a rugosidade média (Ra) atingi 1,60 µm o teste era finalizado. A vida útil em minutos, taxa de remoção de cavaco, acabamento superficial, potência de corte e temperatura da peça-cavaco-ferramenta, e formação dos cavacos foram monitorados e analisados a fim de encontrar as melhores práticas e possibilidades para a operação de usinagem acabamento. Os melhores resultados foram obtidos na usinagem com CO₂ e direcionamento do fluido na superfície de folga e ferramenta. Diferentes mecanismos de desgastes foram observados quando na usinagem por emulsão e CO₂.

Palavras-Chave: Usinagem, Acabamento, Aço inoxidável, Fluido de corte, Dióxido de carbono

Abstract

The metalworking industries in general have been witnessing a greater demand for metal materials to manufacture critical components such as parts of the oil and gas extraction industry for offshore component use, steam turbine blades, chemical tanks, building structures, among others, made of stainless steels, duplex stainless steels, titanium and nickel based alloys, mainly due to the mechanical resistance and weight ratio, and the high capacity to maintain mechanical properties at high temperatures and in corrosive environments. Variations and combinations of various alloying elements like chromium, nickel, molybdenum, provide excellent corrosion resistance, high hardening rate and low thermal conductivity. Thus, the necessity of the evolution of the machining processes was generated since the difficulty of the removal of chips in these alloys due to the low machinability directly affects the production costs of these components, making them extremely expensive and often impracticable. The objective of this thesis is to contribute to study of machining techniques in the longitudinal finishing turning operation in duplex alloy SAF2205 (UNS S31803) with the use of aqueous oil type (emulsion) and gaseous fluid (carbon dioxide, CO₂). For each type of cutting fluid, two directional channels of the cutting fluid were tested for the region of the chip-tool interface and the tool-part with the objective of analyze the best performance of the carbide cutting tool. As the test limiter, because it is a finishing operation, when the average roughness (Ra) reaches 1.60 μm the test was finished. The tool life in minutes, chip removal rate, surface finish, cutting power and chip-tool temperature, and chip formation were monitored and analyzed in order to find the best practices and possibilities for machining operations. The best results were found in the use of CO₂ and directing the fluid on the machine and tool surface. Different degradation mechanisms were observed when emulsion and CO₂ machining.

Key words: Machining, Finishing, Stainless steel, Cutting fluid, Carbon dioxide

Lista de ilustrações

Figura 2. 1 - Geometria de um pite formado em um aço inoxidável (a) e a formação de uma grande quantidade de pites (b).....	34
Figura 2. 2 - Temperatura crítica para a formação de corrosão por pites (CPT) e fendas (CCT) em diferentes aços inoxidáveis e duplex.....	35
Figura 2.3 - Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis.	37
Figura 2.4 - Comparação de usinabilidade das diferentes ligas de aços inoxidáveis com ferramentas de metal duro e aço rápido.....	37
Figura 2.5. Fatores que influenciam na formação do cavaco.....	38
Figura 2.6. Classificação dos cavacos.....	39
Figura 2.7 - Classificação dos fluidos de corte.....	41
Figura 2.8 - Diagrama de fase do dióxido de carbono.....	45
Figura 2.9 - Direcionamento do jato de fluido de corte.....	49
Figura 2.10 - Suporte Walter <i>Precision Coolant</i> com sistema de refrigeração pela superfície de saída e superfície de folga	50
Figura 2.11 – Sistema de fixação do disco de válvula na máquina de usinagem.....	51
Figura 2.12 – Disco de válvula: peça bruta e peça acabada.....	52
Figura 2.13 - Desenvolvimento do desgaste com 02 peças usinadas.....	53
Figura 2.14 - Desenvolvimento do desgaste com 04 peças usinadas.....	53
Figura 2.15 - Fixação entre pontas da peça no centro de usinagem e ferramenta de corte...	54
Figura 2.16 - Palheta de turbina à vapor usinada em desbaste.....	54
Figura 2.17 - (a) Cilindro de CO ₂ ; (b) Máquina ROTHER Aerossol para injeção do CO ₂ e MQL no sistema da máquina ferramenta; (c) Máquina ferramenta Starrag LX0051; (d) Eixo e rotação da máquina com três canais de alimentação independentes; (d) Ferramenta de corte Walter com canais otimizados para aplicação de CO ₂ + MQL.....	55
Figura 2.18 - Arestas de corte usinadas sem refrigeração (esquerda) e com refrigeração por CO ₂ + MQL (direita).....	56
Figura 2.19 - Arestas de corte com refrigeração por CO ₂ + MQL, velocidade de corte de 400 m/min e avanço por dente de 0,55 mm.....	57

Figura 3.1 – Medição da rugosidade	59
Figura 3.2 – Dispositivo para realização da tomada de temperatura da peça e ferramenta de corte com o termômetro.....	60
Figura 3.3 – Desenho esquemático do corpo de prova (a) e fixação do corpo de prova na placa com castanhas e contra ponto (b).....	61
Figura 3.4 – Suporte Walter <i>Precision Coolant</i>	62
Figura 3.5 – Pastilha de metal duro ISO CNMG120408-FM5 WSM10S.....	63
Figura 3.6 – Equipamento de criogenia e cilindros de dióxido de carbono.....	64
Figura 3.7 – Sistema de injeção externa do fluido de corte com borrifador.....	65
Figura 3.8 – Sistema de monitoramento de torque das ferramentas de corte.....	66
Figura 3.9 – Refrigeração por emulsão: (1) refrigeração na superfície de saída da pastilha e (2) refrigeração na superfície folga da pastilha.....	66
Figura 3.10 – Refrigeração por dióxido de carbono: (1) refrigeração na superfície de saída da pastilha e (2) refrigeração na superfície folga da pastilha.....	67
Figura 3.11 – Usinagem criogênica (a) no início do processo de usinagem e (b) após o fim da usinagem e parada da máquina para a realização das medições de temperatura e acabamento superficial.....	69
Figura 3.12 – Ensaio de Corrosão, equipamento Potentiostat Galvanostat PerkinElmer Versa SAT4 utilizado para obtenção da curva Tafel.....	70
Figura 4.1 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido.....	71
Figura 4.2 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO ₂ na superfície de folga – saída da ferramenta.....	73
Figura 4.3 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO ₂ na superfície de saída da ferramenta.....	74
Figura 4.4 – Velocidade de 288 m/min, comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO ₂ na superfície de saída da ferramenta.....	75
Figura 4.5 – Velocidade de 346 m/min, comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO ₂ na superfície de saída da ferramenta.....	75
Figura 4.6 – Evolução dos desgastes da ferramenta com velocidade de corte de 288 m/min.....	77
Figura 4.7 – Evolução dos desgastes da ferramenta com velocidade de corte de 346 m/min.....	77
Figura 4.8 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.....	78

Figura 4.9 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por CO ₂ e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.....	79
Figura 4.10 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.....	80
Figura 4.11 – (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.....	81
Figura 4.12 – Evolução da rugosidade da superfície usinada com velocidade de corte de 288 m/min.....	82
Figura 4.13 – Evolução da rugosidade da superfície usinada com velocidade de corte de 346 m/min.....	83
Figura 4.14 – Temperatura da peça, cavaco e inserto (ferramenta de corte) variando sistema de refrigeração (emulsão e CO ₂) e também os diferentes canais dedirecionamento do fluido de corte.....	84
Figura 4.15 – Potencia de corte nos eixos X, Z e S (<i>spindle</i>).....	85
Figura 4.16 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados.....	87
Figura 4.17 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min.....	87
Figura 4.18 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min.....	88
Figura 4.19 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO ₂ , canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min.....	88
Figura 4.20 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO ₂ , canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min.....	89
Figura 4.21 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min.....	89
Figura 4.22 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min.....	90
Figura 4.23 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO ₂ , canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min.....	90

Figura 4.24 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO ₂ , canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min.....	91
Figura 4.25 - Formação dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão e canais de refrigeração para superfície de saída.....	91
Figura 4.26- Formação dos cavacos nos ensaios realizados com CO ₂ e canais de refrigeração para superfície de saída.....	92
Figura 4.27- Resumo dos ensaios realizados referente aos mecanismos de desgastes e tipos de desgastes e avarias.....	93
Figura 4.28 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	94
Figura 4.29 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	95
Figura 4.30 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	96
Figura 4.31 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	96
Figura 4.32– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	97
Figura 4.33 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	98
Figura 4.34 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	99
Figura 4.35 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	100
Figura 4.36 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	100
Figura 4.37 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	101
Figura 4.38 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	102
Figura 4.39 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	102

Figura 4.40 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	103
Figura 4.41– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	103
Figura 4.42– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	104
Figura 4.43 Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	104
Figura 4.44– Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	105
Figura 4.45– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	106
Figura 4.46– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	107
Figura 4.47– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	108
Figura 4.48– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	108
Figura 4.49– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	109
Figura 4.50– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	109
Figura 4.51– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	110
Figura 4.52 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	111
Figura 4.53– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	112
Figura 4.54 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	112
Figura 4.55 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	113

Figura 4.56 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	113
Figura 4.57 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.....	114
Figura 4.58 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	115
Figura 4.59 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	115
Figura 4.60 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO ₂ , superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.....	116
Figura 4.61 – Composição de fases do aço Duplex SAF2205 com ampliação de 100x e 500x.....	117
Figura 4.62 – Composição em percentual das fases ferrítica e austenítica do aço Duplex SAF2205.....	118
Figura 4.63 – Variação do potencial de corrosão e densidade de corrosão	120
Figura 4.64 – Variação do potencial de corrosão e rugosidade.....	120
Figura 4.65 – Comparativo das curvas de polarização do aço duplex UNS S31803/SAF2205 com um aço estrutural micro ligado ASME AS 516.....	121

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Alguns tipos de aços inoxidáveis duplex.....	27
Tabela 2.2 Tipos de aços inoxidáveis duplex e sua respectiva composição química.....	28
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex.....	28
Tabela 2.4 – PRE de alguns aços inoxidáveis.....	33
Tabela 2.5 – Temperatura de ebulição do N ₂ e CO ₂ comparado com fluidos refrigerantes convencionais.....	44
Tabela 2.6 – Comparação da aplicação do dióxido de carbono com o nitrogênio líquido...	47
Tabela 3.1 - Composição química do SAF2205	60
Tabela 3.2 – Propriedade mecânicas do SAF2205	61
Tabela 3.3 – Condições e variações dos ensaios realizados.....	68
Tabela 4.1 - Parâmetros avaliados na análise eletroquímica.....	119

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

κ_r	ângulo de posição da ferramenta
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
ap	Profundidade de usinagem [mm]
C	Carbono
Co	Cobalto
CO_2	Gás carbônico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Dc	Diâmetro de corte [mm]
Fe	Ferro
fn	Avanço por rotação [mm]
h	Espessura de corte [mm]
k	Condutividade térmica [W/m.K]
k_s	Pressão específica de corte [kg/mm ²]
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega pascal
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Nb	Nióbio
ppm	Partes por milhão
Q	Taxa de remoção de material [mm ³ /min]
R_a	Rugosidade média [μm]
R_z	Rugosidade de profundidade média [μm]
Si	Silício
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
V_B	Desgaste de flanco [mm]
v_c	Velocidade de corte [m/min]

Letras gregas

\emptyset	diâmetro
δ/γ	Estrutura bifásica ferrítica e austenítica
μ	micro

Siglas

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
APC	Aresta postiça de corte
CCC	Estrutura cúbica de corpo centrado
CFC	Estrutura cúbica de face centrada
CNC	Comando numérico computadorizado
CVD	chemical vapour deposition
DIN	Deutsches Institute für Norming
DSS	Duplex Stainless Steel
EDS	Energy Dispersive x-ray Spectrometer
HB	Dureza Brinell
HSS	High Speed Steel
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
IMO	International Molybdenum Association
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópico Eletrônico de Varredura
PRE	Pitting resistance equivalent
PVD	Physical vapour deposition
SDSS	Super Duplex Stainless Steel
UNS	Unified Numbering System
MQL	Minimum Quantity Lubrication
Ecor	Potencial de corrosão (mV)
Icor	Densidade de corrente(nA)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 Aços Inoxidáveis	23
2.1.2 Aço Inoxidável Duplex.....	26
2.1.3 Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 (UNS S31803).....	28
2.1.4 Resistência a corrosão nos aços inoxidáveis duplex.	31
2.1.5 Corrosão por Pite	32
2.2 Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis.....	35
2.2.1 Formação dos cavacos	38
2.3 Influência da rugosidade superficial na resistência a corrosão	40
2.4 Fluidos de corte	41
2.4.1 Fluidos de corte – Dióxido de carbono (CO ₂)	41
2.4.2 Direcionamento do fluido de corte na região de corte.....	48
2.5 Estudo de caso	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1 Equipamentos	58
3.1.1 Máquina ferramenta.....	58
3.1.2 Microscópio óptico	58
3.1.3 Rugosímetro	58
3.1.4 Termômetro	59
3.2 Matéria Prima	60
3.2.1 Corpos de Prova (material e Análises)	60
3.2.2 Ferramentas de corte.....	61
3.2.3 Fluidos de corte	63
3.3 Monitoramento do torque da ferramenta	65
3.4 Planejamento experimental	66
3.3.1 Ensaio de corrosão.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1 Vida da ferramenta.....	70
4.2 Evolução dos desgastes	76
4.3 Evolução da Rugosidade	81
4.4 Temperatura do sistema peça – cavaco – ferramenta	83
4.5. Potencia nos eixos	85
4.6 Formação do cavaco	85
4.7 Análise do desempenho dos revestimentos nas pastilhas de metal duro	92
4.6 Corrosão	117
CONCLUSÕES.....	122
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

As indústrias químicas, de alimentos, médicas, aeroespaciais, construção civil e principalmente as relacionadas com a extração de gás e petróleo vêm testemunhando uma maior procura por materiais metálicos para fabricação de componentes críticos, tais como engrenagens, válvulas, palhetas de turbinas à vapor, estruturas, entre outras, fabricados em aços inoxidáveis, duplex, e ligas à base de titânio e à base de níquel, principalmente devido à relação resistência mecânica e peso, e à capacidade de manter propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e em ambientes corrosivos.

Assim, gerou-se a necessidade da evolução dos processos de usinagem visto que estas ligas apresentam baixa usinabilidade e isso afeta diretamente os custos de produção destes componentes tornando-os demasiadamente caros e algumas vezes até inviabilizando a sua produção e comercialização.

Os aços inoxidáveis duplex tem uma estrutura mista com proporções similares de austenita e ferrita. Esses aços são caracterizados por uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência à corrosão muito boa em diversos meios e excelente resistência à corrosão sob tensão de fadiga. (SILVA E MEI, 2015).

A resistência à corrosão por pites e frestas dos aços inoxidáveis duplex, é dada em função do teor de cromo, molibdênio, tungstênio e nitrogênio. Todos os aços inoxidáveis duplex apresentam resistência à corrosão sob tensão na presença de cloretos, muito superior à dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300. (IMOA, 2012).

Gamarra (2017) cita que o aço inoxidável duplex é um dos materiais mais modernos e de maior destaque no tocante às propriedades de resistência à corrosão e resistência mecânica em relação ao custo. Em função disso, sua demanda cresce a cada ano na indústria petrolífera. Aços inoxidáveis duplex, objeto deste trabalho, representa cerca de 1% das aplicações de aço inoxidáveis no mundo (OLIVEIRA JUNIOR, 2013; CHATER, 2010).

Operações de acabamento em aços inoxidáveis são críticas na indústria metal mecânica em geral. A dificuldade de se obter tolerâncias dimensionais apertadas, tolerância de forma e posição e rugosidade é limitadora para uma maior produtividade dos processos. Características como alta taxa de encruamento, alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica, alto coeficiente de dilatação térmica, alto coeficiente de atrito e grande zona plástica fazem dos aços inoxidáveis materiais de difícil controle e formação dos cavacos. Um maior esforço de corte, tendência de formação de arestas postiças de corte, além da presença de partículas duras e abrasivas, geram altas taxas de desgastes e avarias nas ferramentas de corte. Estudos recentes mostram que a utilização de ferramentas de corte com micro geometrias mais afiadas, cobertura do substrato com a tecnologia PVD e refrigeração por emulsão em alta pressão (acima de 60 bar) vêm apresentando resultados positivos referente à vida da ferramenta. A formação do cavaco ainda é um desafio para a usinagem dos aços inoxidáveis.

Portanto, a motivação e objetivo para o trabalho é propor o estudo de técnicas de usinagem na operação de torneamento longitudinal em acabamento da liga duplex SAF2205, com a utilização de fluido de corte tipo aquoso (emulsão) com a pressão de trabalho mais comumente encontrada no parque de máquinas nacional (8 bar) e fluido tipo gasoso (dióxido de carbono, CO₂) com 20 bar de pressão. Para cada tipo de fluido de corte, foram testadas duas alternativas de canais de direcionamento do fluido de corte para a região da interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, com o objetivo de buscar o melhor desempenho da ferramenta de corte de metal duro. Vida, taxa de remoção, rugosidade, potência de corte e temperatura da peça-cavaco-ferramenta e formação de cavaco foram monitorados e analisados a fim de encontrar as melhores práticas e possibilidades para a operação de usinagem em acabamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aços Inoxidáveis

A perda de peças metálicas por ação da corrosão tem preocupado engenheiros e metalurgistas que procuram constantemente não só aperfeiçoar ou desenvolver novos métodos de proteção, como também aperfeiçoar ou criar novas ligas que apresentem a característica de resistência a corrosão (CHIAVERINI, 2002).

Segundo Silva e Mei (2010), adições de cromo aumentam a resistência à oxidação e à corrosão. Aços com teor de cromo acima de 12% têm elevada resistência à corrosão e são designados como aços inoxidáveis. Esses aços têm grande importância no campo da engenharia devido às suas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas. Entretanto, nenhum material é completamente inoxidável, no sentido estrito da palavra, e muita atenção deve ser dada à correta seleção do material para a aplicação em meios corrosivos (o aço ao carbono comum, por exemplo, pode apresentar resultados superiores a um aço inoxidável inadequadamente selecionado) (SILVA e MEI, 2010).

Os aços inoxidáveis são divididos basicamente em cinco grupos:

a) Austeníticos:

São ligas à base de ferro, cromo (16-30%) e níquel (8-35%) com estrutura predominantemente austenítica após tratamento térmico. São não magnéticos e não endurecíveis por tratamento térmico e normalmente trabalhados a frio (LIMA, 2006). Comercialmente são classificados como: (AISI) 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347. O teor de carbono é, em geral inferior a 0,08%. Outros aços inoxidáveis austeníticos incluem aqueles em que, por questão de custo, parte do níquel é substituído por manganês ou nitrogênio que são elementos estabilizadores da austenita (SILVA, MEI, 2010). Outros elementos de liga como molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio podem ser adicionados para conferir certas características, tais como melhoria da resistência à corrosão e à oxidação (ASM, 2005). Enxofre e selênio têm a função de melhorar a usinabilidade dessas ligas.

Segundo Carbó (2001) citado por Gamarra (2017), os aços inoxidáveis austeníticos são os que apresentam a mais elevada resistência à corrosão, em termos gerais, dentre as famílias de aços inoxidáveis. Portanto, quando a resistência à corrosão é o principal fator a ser considerado, os austeníticos são os mais indicados. Além da excelente resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam excelente ductilidade e excelente soldabilidade quando comparados aos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Em função dessas características, este material é amplamente utilizado na indústria na indústria química, alimentícia e refino de petróleo em componentes como válvulas, flanges, tubulações e principalmente estruturas, recipientes de armazenamento e tubulações (CARBÓ, 2001).

b) Martensíticos:

Caracterizam-se por serem aços-cromo, contendo entre 11,5% e 18% de cromo; eles tornam-se martensíticos pois o cromo é um formador da estrutura ferrítica. Aços inoxidáveis martensíticos são magnéticos e atingem elevadas durezas por tratamento térmico (FERRARESI, 1977). Dentro desse grupo, podem ser ainda consideradas três classes, os de baixo, médio e alto teor de carbono. De acordo com Chiaverini (2002), as principais características desses aços são:

- Podem ser facilmente trabalhados, tanto a quente quanto a frio. Sobretudo quando o teor de carbono for baixo;
- Apresentam boa resistência à corrosão quando expostos ao tempo, à ação da água e de certas substâncias químicas; à medida que aumenta o teor de carbono, fica prejudicada a resistência à corrosão, o que, entretanto, pode ser compensado pelo maior teor de cromo;
- O níquel melhora a sua resistência à corrosão, o melhor aço inoxidável martensítico, sob esse ponto de vista é o AISI 431, devido ao baixo teor de carbono, alto de cromo e presença de níquel.
- A têmpera também melhora a resistência à corrosão, pois contribui para evitar a possibilidade de precipitação de carbonetos.

Comercialmente são classificados como: (AISI) 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501.

c) Ferríticos:

São ligas a base de ferro-cromo essencialmente ferríticas em todas as temperaturas, não endurecíveis por tratamento térmico. Normalmente possuem teores de cromo mais elevados (entre 14 e 30%) do que dos aços martensíticos e de carbono menores (OLIVEIRA JÚNIOR, 2013).

Gamarra (2017) cita que os aços inoxidáveis ferríticos são de menor custo, mas tem limitada resistência à corrosão comparada com os austeníticos mais comuns. Da mesma forma, são limitados em termos de tenacidade, conformabilidade e soldabilidade quando comparados aos austeníticos.

Comercialmente são classificados como: (AISI) 405, 430, 430F, 446, 502.

d) Ferrítico-austenítico (duplex):

Aços inoxidáveis denominados “duplex” vêm apresentando, nos últimos anos, crescente utilização, principalmente em aplicações que exijam maior resistência à corrosão, maior resistência à oxidação e tenacidade adequada, dos que as apresentadas pelos aços inoxidáveis austeníticos. São superiores também porque apresentam melhor resistência à corrosão localizada e melhor resistência à trincas por corrosão sob tensão (CHIAVERINI, 2002).

Os aços inoxidáveis duplex se caracterizam por apresentarem uma microestrutura bifásica austeno-ferrítica (CCC e CFC) determinada, sobretudo pelos teores de ferro, cromo e níquel. Uma composição química típica tem 22% de cromo, 5% de níquel e 3% molibdênio com pequena adição de nitrogênio. Ainda podem ser adicionados Cu, Si e W para controlar o balanço estrutural e conferir características melhoradas de resistência à corrosão (ASM, 2005).

e) Endurecíveis por precipitação (PH – do inglês *Precipitation Hardening*):

Conforme Kopeliovich (2012), os aços inoxidáveis PH podem ser austeníticos ou martensíticos e são tratados termicamente. Entretanto, o processo metalúrgico para endurecimento é diferenciado. Este tratamento é realizado geralmente depois do processo de usinagem, e a temperatura do tratamento não deve causar distorções na peça. Esses aços são

capazes de atingir alta resistência à tração, normalmente têm estrutura martensítica e assim são ferro magnéticos. Estes aços foram desenvolvidos após a segunda guerra mundial e têm suas propriedades mecânicas melhoradas por tratamento de envelhecimento, assim constituem uma boa alternativa para os aços inoxidáveis austeníticos quando se deseja combinar resistência à corrosão, boas características de trabalhabilidade e elevadas propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas.

2.1.2 Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex existem há aproximadamente 80 anos (IMOA, 2012). Os primeiros duplex laminados foram produzidos na Suécia em 1930 e utilizados na indústria de papel sulfite. Esse tipo de material foi desenvolvido para reduzir os problemas com a corrosão intergranular nos primeiros aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de carbono. Ainda segundo Imoa (2012), peças fundidas de duplex foram produzidas na Finlândia em 1930 e uma patente foi concedida na França em 1936 para o pioneiro que depois seria conhecido como Urano 50. O tipo AISI 329 e o 3RE60 se consolidaram depois da 2ª guerra mundial e foi usado de forma extensiva em tubulações de trocadores de calor para uso com ácido nítrico. Nos anos seguintes, esse duplex laminado foi utilizado para uma série de aplicações na indústria como na fabricação de tanques, trocadores de calor e bombas.

A segunda geração de aços inoxidáveis duplex é definida pela adição de nitrogênio. Esse desenvolvimento se deu na década de 70 e foi ao encontro de novas necessidades como plataformas *offshore* de gás e petróleo no Mar do Norte e a crescente demanda por aços inoxidáveis com excelente resistência à corrosão por cloretos. O SAF2205 se tornou o principal duplex comercializado para estas aplicações (ASM, 1989).

Hoje o duplex é encontrado em diferentes segmentos da indústria de transformação tais como: plantas termoeletricas a carvão, reatores, unidades de dessalinização de água do mar, sistemas de tubulação, separadores, depuradoras e bombas para a indústria de óleo e gás, tanques de biocombustível, alimentos e bebidas. Na arquitetura é encontrado na construção de pontes, prédios e telhados. Na construção civil é encontrado na forma de vergalhões e pregos. Indústria farmacêutica, biotecnologia e indústria médica também utilizam esse material para construção de diferentes componentes (BERNER et al.; 2009).

Os aços inoxidáveis duplex ferríticos-austeníticos têm microestruturas que consistem em frações aproximadamente iguais dessas duas fases. Esses aços são caracterizados por uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: têm elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência à corrosão muito boa em diversos meios e excelente resistência à corrosão sob tensão de fadiga (SILVA, MEI, 2010).

A tabela 2.1 mostra a composição típica percentual de alguns aços inoxidáveis duplex.

Tabela 2.1 - Alguns tipos de aços inoxidáveis duplex (CHIAVERINI, 2002).

Designação	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Outros
X2 CrNiMoSi195 (DIN)	18,5	5	2,7	0,07	1,5 Si
X2 CrNiN234 (DIN)	23	4	0,2	0,1	-
X2 CrNiMoN2253 (DIN) / SAF2205	22	5,3	3	0,17	-
UNS 532760	25	7	3,6	0,25	0,70Cu, 0,70W
UNS 532750	25	7	3,8	0,28	-
UNS S31200	25	6	1,2-2,0	0,14-0,2	2,0Mn – 1,0Si
UNS S311260	25	6,5	2,5-3,0	0,10-0,3	0,2-0,8Cu, 0,1-0,5W
UNS S320404	21,5	7,0	2,5	0,20	1,0-2,0Cu, 2,0Mn, 1,0Si

Senatore et al. (2007) citam que os aços inoxidáveis duplex são separados em três grupos, com relação à composição química:

a) Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: devido ao menor teor de elementos de liga são materiais econômicos, não possuem molibdênio na composição química e podem substituir aços inoxidáveis austeníticos como TP304L/316L. O nome comercial utilizado é o UNS S32304 (SAF 2304).

b) Aços inoxidáveis duplex de média liga: nessa família, enquadram-se os duplex mais utilizados. O nome comercial utilizado é o SAF 2205 (DIN X2CrNiMoN2253). Apresentam resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns TP304L/316L e aços inoxidáveis super austeníticos com 5 e 6% de molibdênio.

c) Aços inoxidáveis duplex de alta liga: comumente designados por super duplex. O UNS S32750 (SAF 2507) apresenta elevada resistência à corrosão, comparável aos super austeníticos que possuem entre 5 e 6% de molibdênio.

A tabela 2.2 apresenta a composição química para os aços inoxidáveis duplex UNS S32304, S31803 e S32750 (SAF – Sandvik Austenitic Ferritic; 2304, 2205 e 2507).

Tabela 2.2 - Tipos de aços Inoxidáveis Duplex e sua respectiva composição química (Sandvik Material Technology, 2017).

AISI-UNS / SAF	%C _{máx}	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu
S32304 / 2304	0,030	0,5	1,0	23	4,5	-	0,10	-
S31803/ 2205	0,030	1,0	2,0	22	5,5	3,2	0,18	-
S32750/ 2507	0,030	0,8	1,2	25	7	4	0,30	-

Conforme Nilsson (1992), a combinação entre os elevados valores de alongamento da austenita com o elevado limite de escoamento da ferrita nos aços inoxidáveis duplex, forma um conjunto de notáveis propriedades mecânicas como por exemplo o elevado limite de escoamento (da ordem de duas vezes o valor dos aços austeníticos) e um alongamento mínimo em torno de 25%.

O comportamento mecânico dos aços inoxidáveis duplex está intimamente relacionado com a característica de cada fase, por isso o balanceamento entre as frações volumétricas de austenita e ferrita deve estar próximo de 50% para cada uma das fases, a fim de se maximizar as propriedades mecânicas.

A tabela 2.3 mostra as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex (Sandvik Material Technology, 2017).

AISI-UNS / SAF	Resistência ao escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento Mínimo (%)	Dureza Vickers
S32304 / 2304	400	600-820	25	230
S31803/ 2205	450	680-880	25	260
S32750/ 2507	550	800-1000	25	290

2.1.3 Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 (UNS S31803 / DIN 1.4462 X2CrNiMoN2253).

O aço inoxidável duplex SAF2205 (UNS S31803 / DIN 1.4462 / X2CrNiMoN2253) é de uma família que combina boa resistência à corrosão com alta resiliência e facilidade de

fabricação. Segundo Silva e Mei (2010) ele é o duplex mais utilizado na indústria, sendo responsável por aproximadamente 80% da produção mundial de duplex. Oliveira Júnior (2013) cita que em 2010 os aços inoxidáveis duplex representavam em torno de 1% de todo inoxidável produzido mundialmente, entretanto com uma forte tendência de crescimento. Chater (2010) cita que o volume de duplex produzido no ano de 2008 foi de 22.000 toneladas contra 6.000 toneladas produzidas em 2004, ou seja, um aumento muito rápido em função de novas demandas.

De acordo com Sandvik Material Technology (2017), as principais características do SAF2205 são:

- Alta resistência à corrosão por rachaduras em ambientes com cloretos;
- Alta resistência à rachaduras de corrosão por estresse em ambientes contendo sulfureto de hidrogênio;
- Alta resistência à corrosão geral e fissuras;
- Boas propriedades para trabalho à quente;
- Alta resistência à corrosão por erosão e fadiga por corrosão;
- Boa soldabilidade.

Os principais elementos químicos e suas influências no comportamento do aço inoxidável duplex são:

Cromo: um mínimo de cerca de 10,5% de cromo é necessário para formar uma película passiva estável de cromo, suficiente para proteger um aço inoxidável contra a corrosão atmosférica leve. A resistência à corrosão de um aço inoxidável aumenta com o teor de cromo. O cromo é formador de ferrita, o que significa que a adição de cromo promove a estrutura cúbica de corpo centrado do ferro. Com teores mais altos de cromo, mais níquel é necessário para formar uma estrutura austenítica ou duplex (austenítica-ferrítica). O teor mais alto de cromo também promove a formação de fases intermetálicas. Normalmente o conteúdo mínimo de cromo dos aços inoxidáveis austeníticos é de 16% e nos tipos duplex de 20% (ATLAS STEEL, 2013). O cromo também aumenta a resistência à oxidação em temperaturas elevadas. Este efeito do cromo é importante devido à sua influência sobre a formação e remoção da carepa de óxido ou coloração térmica resultante do tratamento

térmico ou soldagem. Os aços inoxidáveis duplex são mais difíceis de decapar e a remoção de coloração térmica é mais difícil que nos aços inoxidáveis austeníticos (IMOA, 2012).

Molibdênio: O molibdênio age para dar apoio ao cromo, oferecendo resistência à corrosão por pites aos aços inoxidáveis. Quando o teor de cromo de um aço inoxidável é de pelo menos 18%, adições de molibdênio se tornam cerca de três vezes mais efetivas que as adições de cromo contra a corrosão por pites e em frestas nos ambientes que contém cloretos (IMOA, 2012). O molibdênio entre 0,2 e 5,0% nos aços inoxidáveis duplex melhora a resistência à corrosão por pites, corrosão generalizada e à corrosão em frestas (CHIAVERINI, 2005). O molibdênio, juntamente com o cromo, proporciona uma grande resistência à fadiga.

Nitrogênio: O nitrogênio aumenta a resistência à corrosão por pites e em frestas dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex. Ele também aumenta significativamente a resistência mecânica, na verdade, é o elemento de fortalecimento da solução sólida mais eficaz e um elemento de liga de baixo custo (IMOA, 2012). Em proporções que variam de 0,1 a 0,35%, o nitrogênio melhora a resistência à corrosão localizada e também aumenta a resistência mecânica (CHIAVERINI, 2005).

Silva e Mei (2006), descrevem que o nitrogênio é adicionado quase no seu limite de solubilidade e proporciona o desejado equilíbrio ferrita-austenita. Oliveira Júnior (2013) cita que cromo e molibdênio são formadores de ferrita e são balanceados com os formadores de austenita, que são o níquel e nitrogênio.

Níquel: O níquel é um estabilizador de austenita que promove uma mudança da estrutura cristalina do aço inoxidável de cúbica de corpo centrado (ferrítica) para cúbica de face centrada (austenítica). Os aços inoxidáveis ferríticos contém pouco ou nenhum níquel, os aços duplex contém quantidade baixa a média de níquel, como 1,5 a 7%, e os aços austeníticos da série 300 contém menos de 6% de níquel (IMOA, 2012). O níquel retarda a formação de fases intermetálicas prejudiciais nos aços inoxidáveis austeníticos, mas é bem menos eficiente que o nitrogênio para retardar sua formação nos aços inoxidáveis duplex (ROTHERY, 1968). A estrutura cúbica de face centrada é responsável pela excelente tenacidade dos aços inoxidáveis austeníticos. Sua presença em cerca de metade da

microestrutura dos tipos duplex aumenta significativamente a sua tenacidade em relação aos aços inoxidáveis ferríticos.

2.1.4 Resistência à corrosão nos aços inoxidáveis duplex.

O ferro e o aço são muito atacados pela corrosão e os principais agentes corrosivos naturais são o gás sulfídrico (muito encontrado nas jazidas de petróleo), a água, os cloretos e nitratos (FALCÃO, 2013). Aços resistentes à corrosão são classificados em três tipos básicos, sendo o primeiro os que têm menos do que 16% de cromo, o segundo aqueles que têm mais que 16% de cromo e o terceiro, o tipo austenítico, tendo 17% a 25% de cromo, juntamente com 7 a 20% de níquel (DOYLER e SCHARADER, 1978).

Individualmente, a propriedade mais importante dos aços inoxidáveis é a resistência à corrosão. Silva e Mei (2010) citam que um conhecimento básico dos fenômenos da corrosão que podem afetar a durabilidade dos itens fabricados em aço inoxidável em serviço é fundamental na seleção do material mais econômico.

Senatore et al. (2007) descreve que a resistência à corrosão é determinada pela capacidade que esses materiais têm de se passivar e permanecer nesse estado no ambiente a que estiver exposto. Essa propriedade está relacionada, principalmente, aos elementos de liga presentes na composição química do aço, embora outros fatores como tamanho de grão, distribuição e morfologia de inclusões, precipitação de fases e qualidade da superfície também exerçam influência.

Para Chiaverini (2002), a corrosão pode ser considerada como um ataque gradual e contínuo de metal por parte do meio circunvizinho, que pode ser a atmosfera mais ou menos contaminada das cidades, ou meio químico, líquido ou gasoso. Como resultado de reações químicas entre metais e elementos não metálicos contidos nesses meios, tem-se a mudança gradual do metal num composto ou em vários compostos químicos, que são geralmente óxidos ou sais.

Quando um metal não corrói é porque temos a produção de uma reação química entre ele e o meio que o circunda e forma-se uma camada fina que adere à superfície metálica e é aí mantida por forças atômicas. Se algum motivo levar à destruição dessa camada mesmo que momentaneamente, a mesma será restabelecida e a “lesão do metal” será sanada. O tipo

de corrosão mais comum é a atmosférica, e a corrosão do ferro é a mais importante dentro da engenharia dos materiais (CHIAVERINI, 2002).

Os meios de corrosão mais comuns são a corrosão atmosférica, a corrosão do solo, a corrosão em água doce e a corrosão em água salgada. Os mecanismos de corrosão mais comuns são: corrosão por pite e corrosão sob tensão. Em geral, os aços inoxidáveis duplex apresentam elevada resistência a todos esses mecanismos. Nesse trabalho iremos abordar a corrosão por pite.

2.1.5 Corrosão por Pite.

Gravalos (2008) descreve que a corrosão pode ser definida como a reação do metal com os elementos do seu meio, na qual o metal é convertido a um estado não metálico e que as variáveis encontradas em ambientes de corrosão, como velocidade, temperatura e composição do fluido, podem ter influência decisiva nas propriedades de corrosão dos materiais com que estão em contato.

Silva e Mei (2010) descrevem que os principais meios que promovem a corrosão por pites são as soluções de cloretos e sais oxidantes, as soluções neutras, aeradas, de cloreto e o aumento da temperatura e que a água do mar é um dos meios mais comuns para que ocorra a corrosão localizada nos aços inoxidáveis e a mais difícil de controlar.

Nos aços inoxidáveis, os elementos de liga que ditam o comportamento para a alta resistência à corrosão são cromo, molibdênio e nitrogênio. A tabela 2.4 apresenta o PRE para alguns aços inoxidáveis mais comuns no mercado de construção mecânica.

Tabela 2.4 – PRE de alguns aços inoxidáveis (SENATORE 2007).

AISI-UNS	% Cr	%Mo	%N	PRE	Microestrutura
304L	18	-	-	18	Austenita
316L	17	2,2	-	24	Austenita
S 32304	23	-	0,1	25	Duplex
S31803 (SAF2205)	22	3,1	0,2	35	Duplex
S32750	25	4	0,3	43	Duplex

Gravalos (2008) define que a corrosão localizada pode ser definida como a remoção seletiva do metal pela corrosão em pequenas áreas superficiais que geralmente ocorre sob condições onde uma parte da superfície permanece sem ataque ou somente ligeiramente atacada. Uma forma extrema de corrosão localizada é a formação de pites, em que áreas muito pequenas da superfície são atacadas, enquanto a parte principal da superfície permanece não afetada. Como resultado da formação dos pites, os componentes podem apresentar falhas devido ao início de trincas que assim podem diminuir a resistência total do material ou podem penetrar no metal completamente e causar a fuga de gases e líquidos contidos.

Ramanathan (1989) afirma que a formação de pites geralmente ocorre sobre metais que são cobertos com uma película muito fina, normalmente transparente, aderente e protetora, conhecida como camada passiva ou passivadora, presente nos aços inoxidáveis entre outros materiais. As formas dos pites variam muito. Usualmente possuem, de uma maneira geral forma de pires, cônica ou hemisférica. Durante o mecanismo de formação de pites ocorre a quebra da passividade através de uma competição entre a absorção de íons cloreto e de oxigênio em solução, sobre as camadas superficiais metálicas. Embora o metal tenha maior afinidade com o oxigênio, em potenciais mais altos a absorção de íons cloreto é favorecida em certas regiões sobre a superfície.

A figura 2.1 representa a geometria de um pite formado em um aço inoxidável (a) e a formação de uma grande quantidade de pites (b).

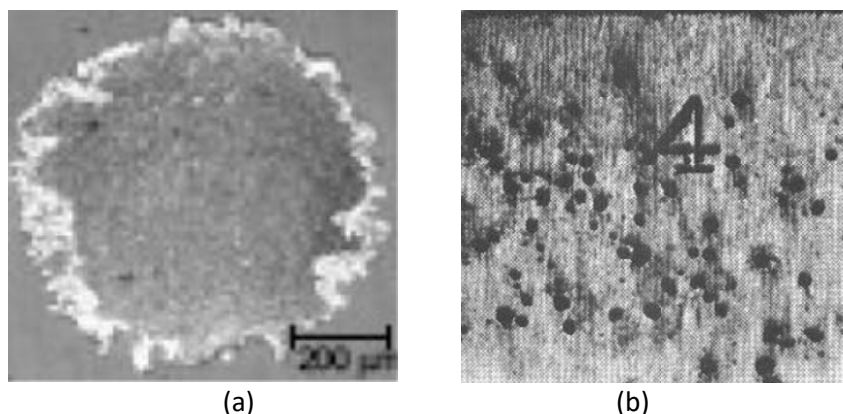


Figura 2. 1 - Forma de um pite em aço inoxidável (OLIVEIRA JUNIOR 2013; GRAVALOS, 2008).

A formação de pites ocorre nos metais na presença de íons cloreto. Os íons cloreto rompem a película passivada, localmente. Como as condições são de estagnação no interior do pite, forma-se uma solução ácida que possibilita um rápido crescimento do pite para o interior do material (OLIVEIRA JUNIOR 2013; CALLISTER, 2002). A corrosão por pite nos aços inoxidáveis ocorre devido à deterioração do filme passivo e, posterior desenvolvimento localizado de um ponto de corrosão catódica cercado por uma área catódica que permanece passiva (OLIVEIRA JUNIOR 2013; CURTIS, 2002).

A resistência à corrosão por pites e fendas é determinada principalmente pelo teor de cromo, molibdênio e nitrogênio do aço inoxidável. Como já abordado anteriormente, nos aços inoxidáveis duplex, como é o caso do SAF 2205 (UNS 31803) estudado neste trabalho, a corrosão por pites depende do valor do PRE tanto na fase austenítica como na fase ferrítica. A fase com o menor valor de PRE determinará o limite de resistência à corrosão por pites. O valor mínimo de PRE para o SAF 2205 é 38 (SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY, 2008). Um dos testes de corrosão por pites e fendas mais severos aplicados nos aços inoxidáveis é o descrito pela norma ASTM G48, que expõe o material a uma solução com 6% de cloreto de ferro FeCl_3 com e sem fendas (métodos A e B, respectivamente). A amostra fica exposta por um período de 24 horas. Quando os pites são detectados com perda substancial de peso (maior que 5 mg), o teste é interrompido.

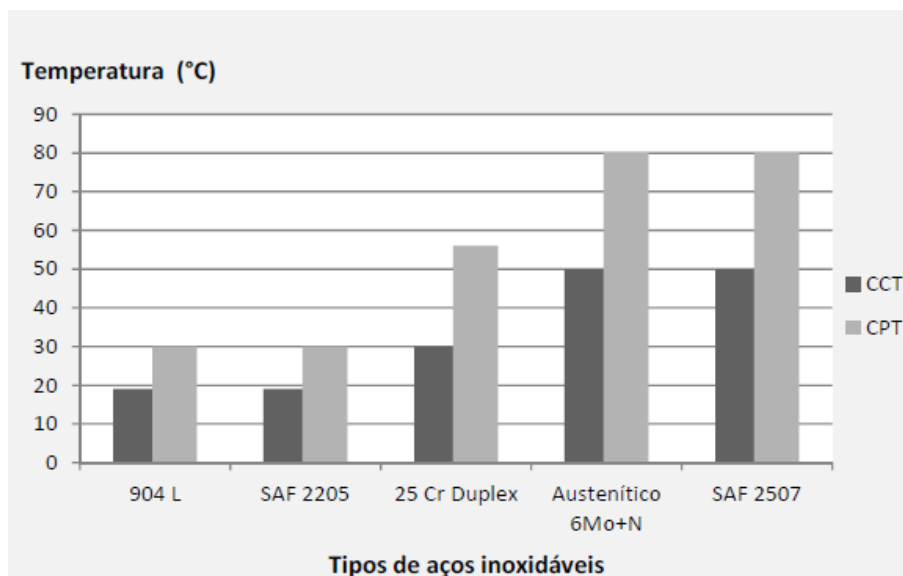


Figura 2. 2- Formação de corrosão por pites (CPT) e fendas (CCT) em diferentes aços inoxidáveis e duplex, e temperatura de atuação (SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY, 2008).

2.2 Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Em outras palavras, pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usar um determinado material.

Existem vários critérios utilizados para avaliar a usinabilidade, os mais importantes são: (1) vida da ferramenta, (2) forças de usinagem, (3) acabamento superficial, (4) facilidade de retirada dos cavacos (GROOVER, 2014).

As características dos aços inoxidáveis que exercem grande influência na usinabilidade incluem (TRENT, WRIGTH, 2000; MACHADO et al., 2015):

- Alta taxa de encruamento;
- Elevada ductilidade;
- Elevada resistência à fratura (tenacidade);

- Baixa condutividade térmica;
- Altos valores de resistência mecânica;
- Tendência à formação de arestas postiças de corte;

As altas taxas de encruamento fazem dos aços inoxidáveis duplex materiais de difícil usinabilidade, requerendo tempos maiores para a sua usinagem (IMOA, 2014).

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados difíceis de usar. Aresta postiça de corte (APC) e desgaste irregular ocorrem frequentemente nas operações de usinagem destes aços. Porém, do ponto de vista da usinagem, as dificuldades aumentam consideravelmente quando se usinam aços inoxidáveis duplex, pois a usinabilidade do material frequentemente é relacionada ao seu PRE. Os aços inoxidáveis duplex modernos tendem a ser mais difíceis de usar em virtude dos altos teores de austenita e nitrogênio, além do aumento de elementos ligantes, diminuindo rápida e significativamente a usinabilidade desses aços (GAMARRA, 2017; PARO, HÄNNINEN, KAUPPINEN, 2001).

A estrutura bifásica dos aços inoxidáveis duplex contribui para induzir vibrações durante o corte do material, aumentando ainda mais os problemas para a obtenção de bons acabamentos e contribuindo para a diminuição da vida da ferramenta. Outro fator que contribui para as dificuldades na usinagem é que, além das fases estarem aleatoriamente distribuídas, cada fase possui características e propriedades diferentes e cada uma contribui de maneira diferente para a formação de cavaco (GAMARRA, 2017; BORDINASSI, 2006).

A usinagem dos aços inoxidáveis, em geral, é mais difícil que a dos aços carbono comuns, sendo que os ferríticos e martensítico apresentam uma melhor usinabilidade em relação aos austeníticos e duplex (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013; CHIAVERINI, 2002), como pode ser observado na figura 2.3.

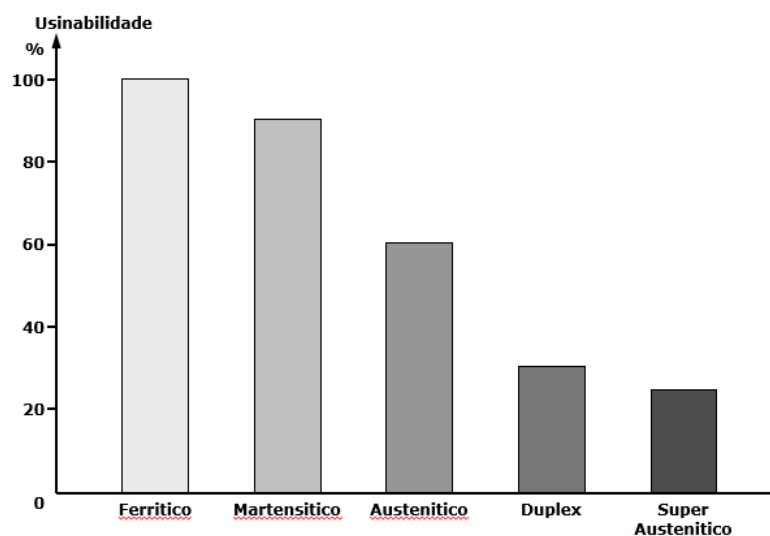


Figura 2.3 – Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis. Fonte: (Walter AG, 2007)

Os aços inoxidáveis duplex são materiais mais difíceis de se usar comparados aos aços inoxidáveis austeníticos similares da série 300. A figura 2.4, mostra a comparação de usinabilidade de algumas classes de aços inoxidáveis duplex (S32101, 2304, 2205), super duplex (2507) e também austenítico (316).

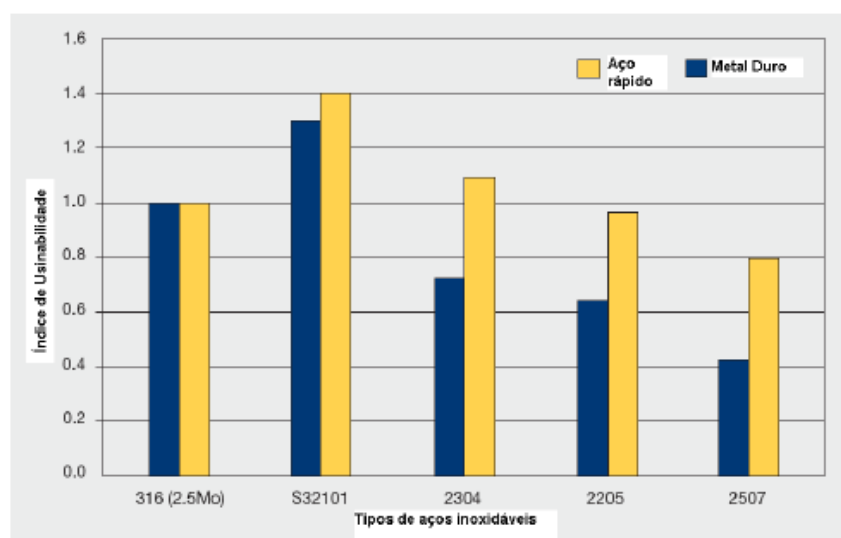


Figura 2.4 - Comparação de usinabilidade das diferentes ligas de aços inoxidáveis com ferramentas de metal duro e aço rápido (IMO, 2001).

2.2.1 Formação dos cavacos.

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado, a penetração do fluido de corte, etc (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Ferraresi (2006), descreve que os cavacos são basicamente divididos em três grupos, sendo os cavacos do tipo contínuo que apresentam lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares (aços em geral); os cavacos do tipo cisalhamento (comum nos aços inoxidáveis), que apresentam grupos lamelares bem distintos e justapostos e o cavaco tipo ruptura, que são constituídos de fragmentos arrancados da peça usinada (comum nos ferros fundidos).

Referente à forma do cavaco, Diniz, Marcondes e Coppini (2013), citam que os cavacos tipo ruptura não são passíveis de classificação, entretanto, cavacos contínuos e de cisalhamento pode ser classificado como cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco em espiral e cavaco em lascas ou pedaços. Walter AG (2010) define que diversos fatores podem influenciar no formato do cavaco, a figura 2.5 mostra esses fatores.

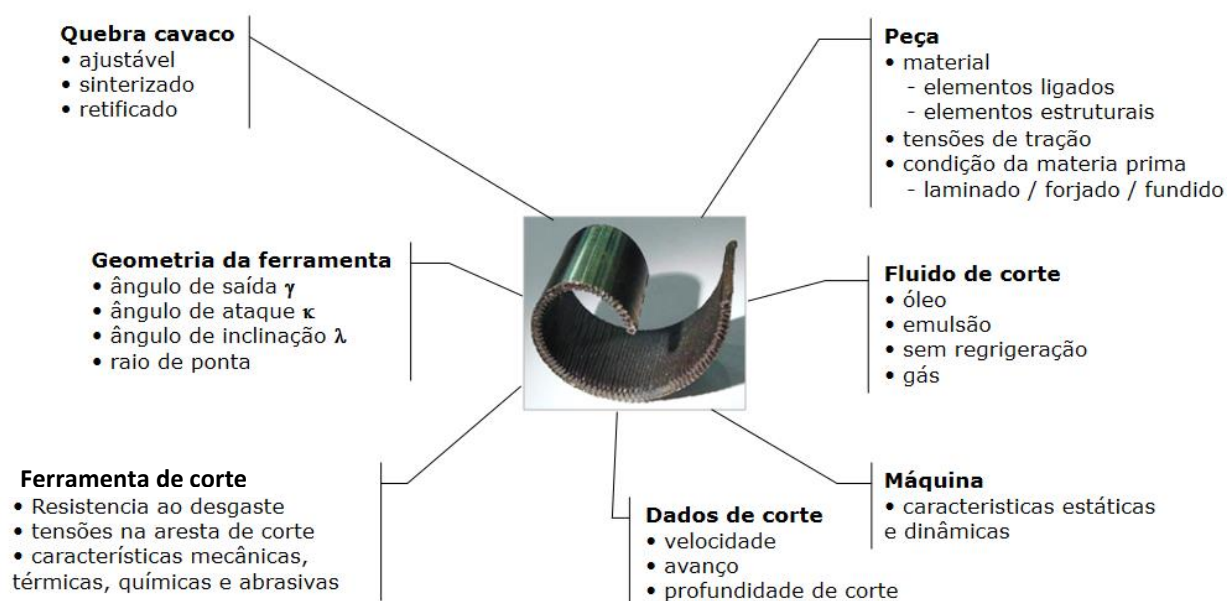


Figura 2.5. Fatores que influenciam na formação do cavaco (WALTER AG, 2010).

A figura 2.6 mostra os formatos dos cavacos e a sua condição de escoamento referente ao processo de usinagem.

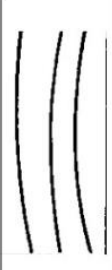









1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
									
desfavorável		médio		favorável			médio		

Figura 2.6. Classificação dos cavacos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013)

Aços inoxidáveis duplex apresentam cavacos tipo contínuo (desfavoráveis e médio) seguindo os critérios de seleção conforme Ferraresi (2006). Oliveira Júnior (2013) estudou o processo de torneamento longitudinal do aço inoxidável super duplex SAF2507 e concluiu que uma maior pressão do fluido de corte facilita a quebra do cavaco, principalmente em baixas profundidades de corte, ou seja, operações típicas de acabamento.

Gamarra (2017) descreve que na usinagem do super duplex com o aumento da velocidade de corte (240 m/min) ocorre um aumento da ductilidade do material, dificultando ainda mais o controle e formação dos cavacos. Com velocidades de cortes mais baixas (120-150 m/min) é possível encontrar a formação de aresta postiça de corte (APC) no inserto de metal duro, e assim, também ocorrem problemas na formação e controle dos cavacos. Nos ensaios realizados, a melhor formação de cavaco ocorreu com velocidade de corte de 200 m/min (cavacos tipo hélice curta e longa).

2.3 Influência da rugosidade superficial na resistência a corrosão.

A rugosidade de uma superfície usinada depende de muitos fatores que podem ser agrupados da seguinte forma: (1) fatores relacionados à geometria, (2) fatores relacionados ao material usinado, e (3) fatores relacionados à vibração e à máquina-ferramenta (GROOVER, 2014).

Gamarra (2017) cita que as superfícies, por mais perfeitas que pareçam, são uma herança do método empregado em sua obtenção, por exemplo, tipo de operação (torneamento, fresamento, retificação, metalurgia do pó, lapidação). Elas apresentam saliências (picos) e reentrâncias (vales) com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou uma textura característica em sua formação. Novaski (2013) cita que o grau de acabamento superficial tem influência no desgaste, nas características do contato, na lubrificação, no escorregamento, na resistência à fadiga e à corrosão etc.

Nas operações de acabamento, a rugosidade geralmente é medida para obter-se informações sobre a qualidade da superfície. A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade superficial podem dar indicações sobre suas causas, como por exemplo vibrações de máquina, peça ou ferramenta, desgastes da ferramenta ou até o método de conformação para a obtenção do componente (OLIVEIRA JUNIOR, 2013; GRAVALOS, 2008).

Gravalos et al. (2008) cita que uma superfície com o acabamento o mais liso possível reduz o potencial para a formação de pites. A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam o acabamento superficial. Durante a usinagem, a seleção dos parâmetros de corte apropriados é muito importante para o controle da corrosão. Como resultado do estudo, foi verificado que um acabamento superficial liso, baixa rugosidade obtida através da seleção dos parâmetros de usinagem apropriados, contribui no controle de formação dos pites em superfícies usinadas.

Os ensaios de Oliveira Junior (2013), apresentaram valores muito próximos de corrosão por pites para rugosidades diferentes no início e final de vida da ferramenta de corte. Isso apesar da teoria afirmar que quanto menor a rugosidade, menor a tendência de corrosão por pites.

2.4 Fluidos de corte.

Define-se fluido de corte como qualquer líquido ou gás aplicado diretamente na operação de usinagem para melhorar o desempenho de corte. Os fluidos de corte tratam de dois problemas principais da usinagem que são a geração de calor nas zonas de cisalhamento e o atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça (GROOVER, 2014).

Yildiz e Nalband (2008) citam que os fluidos convencionais de corte foram classificados em três grupos, como visto na figura 2.7. Os fluidos solúveis em água são adequados para operações em que as velocidades de corte são muito altas e as pressões sobre a ferramenta relativamente baixas. Os óleos de corte são óleos minerais, ou minerais com aditivos e são preferidos quando as pressões de corte entre o cavaco e ferramenta são muito elevadas e a primeira consideração é a lubrificação. Fluidos de corte não conseguem penetrar na interface cavaco ferramenta em altas velocidades de corte. Já os lubrificantes gasosos têm sido vistos como muito atraentes para melhorar o desempenho da vida da ferramenta, mas o alto custo dos gases dificulta a sua aplicação nas linhas de produção.

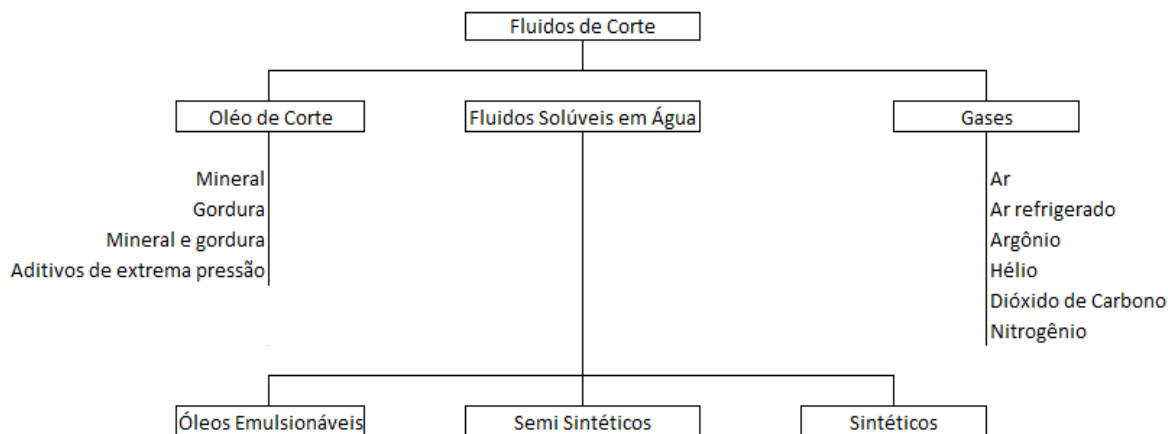


Figura 2.7 - Classificação dos fluidos de corte

Modificado de: Yildiz e Nalband (2008).

Durante o processo de usinagem, o calor gerado precisa ser reduzido e/ou extraído de ferramenta e peça, principalmente para minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica (e com isso facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas na peça) e o dano térmico à estrutura da peça. A geração de calor pode ser reduzida com a diminuição do coeficiente de atrito. Se isto acontecer, não somente a geração de calor é diminuída, mas também os esforços e a potência de corte. Estudos nessa direção têm sido bastante explorados com o

desenvolvimento de novos materiais para ferramenta (ou camadas de cobertura), com o desenvolvimento de materiais de peça com usinabilidade melhorada ou com a utilização de fluidos de corte com capacidade lubrificante (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2008).

Segundo Ferraresi (1970), a função do fluido de corte é melhorar o processo de usinagem dos metais, do ponto de vista econômico e/ou funcional. Como melhorias de caráter econômico podemos citar a redução do consumo de energia, redução do custo da ferramenta na operação e diminuição da corrosão na peça a ser usinada. Já as de caráter funcional são aquelas que facilitam a usinagem conferindo ao processo um desempenho melhor como por exemplo, a redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco; a melhor expulsão do cavaco da região de corte; a refrigeração do corpo da ferramenta; a refrigeração da peça em usinagem; o melhor acabamento superficial da peça e a melhor refrigeração da máquina-ferramenta;

Em relação aos fluidos de corte gasosos, Ferraresi (1977) cita que os mesmos visam principalmente a refrigeração e a expulsão do cavaco e que não se deve esperar desta classe de fluidos os efeitos de lubrificação e nem ela impeça a corrosão das partes acessíveis pelo fluido. Dentro dessa classe de gases, os de maior destaque são o ar, o dióxido de carbono (CO_2) e o Nitrogênio (N).

2.4.1 Fluidos de corte – Dióxido de carbono (CO_2).

O termo "usinagem criogênica" foi usado pela primeira vez por Uehara e Kumagai em 1968. Em operações de usinagem, fluidos como o nitrogênio, dióxido de carbono e hélio são usados como alternativa refrigerantes para o óleo tradicional e refrigerante à base de água/lubrificantes. A usinagem criogênica tem como objetivo alterar as propriedades dos materiais da ferramenta de corte e da peça bem como dissipar o calor gerado na zona de corte (JAWAHIR et al., 2011).

Fluidos criogênicos incluem gases liquefeitos de ar, nitrogênio, argônio, oxigênio, hidrogênio e hélio. O nitrogênio líquido tem sido o refrigerante criogênico mais amplamente utilizado em operações de usinagem, principalmente por causa de seu comportamento inerte

e baixo custo. No entanto, houveram outros esforços envolvendo líquidos como o dióxido de carbono, gases frios e misturas sólidas/gasosas como refrigerantes (RAHMAN et al., 2003; GHOSH, 2003).

Nos últimos anos com a pressão por redução nos custos de produção para manter a competitividade global, fabricantes estão se esforçando mais para melhorar a produtividade e manter a qualidade final das peças. Melhorias contínuas na produtividade através das ferramentas de corte, máquinas-ferramentas e processos resultaram em aumentos significativos nas velocidades de corte devido à maior resistência das ferramentas e equipamentos (JAWAHIR et al., 2016). A consequência não intencional de melhorar os ganhos de produtividade dessa forma é o aumento do calor gerado no processo. Esse aumento de calor e a consequente alta temperatura é um fator crítico na elaboração de um processo de usinagem dada a diminuição da vida da ferramenta e até mesmo da qualidade final da peça (GHOSH, 2006).

As inovações nas áreas de interação da ferramenta, processo, máquina e tratamento de materiais têm ajudado no aumento da produtividade e qualidade das peças usinadas, porém o mesmo não é verdadeiro para a refrigeração e o gerenciamento das temperaturas envolvidas no processo de usinagem. Isto é porque os fluidos de corte convencionais, como ar, óleos ou emulsões aquosas, seja em forma de inundação (jorro) ou névoa (MQL), têm um potencial limitado para impactar significativamente as temperaturas extremamente elevadas produzidas durante os modernos processos de usinagem (YILDIZ; NALBAND, 2008).

Uma das primeiras aplicações conhecidas de criogenia na usinagem envolveu a aplicação de dióxido de carbono líquido na usinagem no início década de 1950. O uso de nitrogênio líquido como refrigerante na usinagem foi documentado pela primeira vez em meados da década de 1960 (HONG, 2001). No entanto, questões relacionadas à usinagem econômica com fluidos criogênicos, comportamento variável do material em temperaturas criogênicas e falta de entrega eficiente dos gases criogênicos aos sistemas impediram a adoção industrial e provocaram uma diminuição significativa das pesquisas nos anos 70 e início dos anos 80. Desde então, a necessidade de usinagem mais eficiente de materiais difíceis de se usar, bem como o desejo de eliminar o uso de óleo ou fluidos de corte à base

de água provocou um renovado interesse de vários grupos de pesquisa e indústrias (GHOSH, 2006).

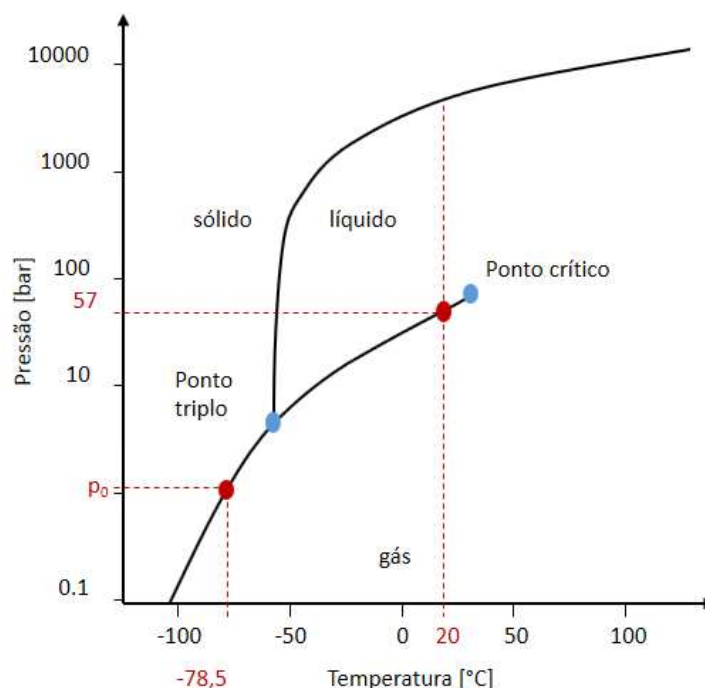
Schaarschmidt et al. (2014) descreve que maioria de meios comuns para usinagem criogênica são o nitrogênio líquido (LN_2) e dióxido de carbono (CO_2). O nitrogênio líquido (LN_2) entra em ebulição a $-195,8^\circ\text{C}$ à pressão atmosférica. O dióxido de carbono líquido (CO_2) é um gás liquefeito refrigerado, à temperatura ambiente pode ser mantido líquido por uma pressão mínima de 57 bar e pode ser armazenado em cilindros de alta pressão. Quando se funde com o ar transforma-se em uma mistura de um gás com gelo seco sólido e sua temperatura vai a $-78,5^\circ\text{C}$ devido à transformação fase.

A tabela 2.5 mostra a temperatura de ebulição do nitrogênio e do dióxido de carbono comparado com fluidos refrigerantes convencionais.

Fluido	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
N_2	-195,8
CO_2	-56,6
H_2O	100
Óleo Mineral	150-200
Óleo Éster	224

Tabela 2.5 – Temperatura de ebulição do LN_2 e CO_2 comparado com fluidos refrigerantes convencionais. Modificado de: Schaarschmidt et al.(2014).

A figura 2.8 mostra o diagrama de fase do dióxido de carbono (CO_2). Com pressão atmosfera de 1 bar, o gás carbônico é encontrado em forma de gelo seco e temperatura de $-78,5^\circ\text{C}$ Celsius.



A figura 2.8 - Diagrama de fase do dióxido de carbono.

Segundo Chiliaire (2014), o CO₂ é produzido e capturado como um subproduto de processos naturais e industriais (CO₂ reciclado) e é um recurso importante para uma série de processos comerciais e industriais. O CO₂ reciclado contribui para a conservação de energia, redução da poluição bem como para outros benefícios sociais importantes. Não são acrescentadas quantidades suplementares de CO₂ à atmosfera utilizando tal resíduo. Os usuários de CO₂ reciclado não são considerados geradores de CO₂. Esta é a posição da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

A razão mais importante para o uso de CO₂ reciclado é que ele substitui de forma eficiente a função de agentes de processamento industrial, como água, solventes, lubrificantes e refrigerantes que é de refrigeração e limpeza de peças e componentes. O CO₂ reciclado elimina as consequências negativas ambientais e energéticas associadas à fabricação, embalagem, transporte, tratamento, reciclagem ou descarte de agentes de processamento convencionais (CHILIAIRE, 2014).

Os principais benefícios ambientais e de custo do uso do CO₂ são:

- Não tóxicos, não perigosos, não corrosivos e não inflamável;

- Custo competitivo;
- Sem resíduos por produtos e sem necessidade de secagem (menor consumo de energia);
- Produto abundante de numerosos processos industriais e naturais o que garante o abastecimento;

O uso da tecnologia de refrigeração com dióxido de carbono como substituto químico reduz o uso de energia elétrica, reduz os resíduos de fabricação, aumenta a produtividade da produção e diminui a necessidade de produtos químicos, como lubrificantes e solventes, entre muitos outros benefícios socioeconômicos e ambientais. A redução dos resíduos de fabricação ou eliminação de fatores químicos de produção de qualquer tipo diminui a geração industrial de CO₂ conforme demonstrado abaixo (CHILIAIRE, 2014):

- Menos CO₂ é produzido se menos eletricidade for consumida;
- Menos CO₂ é produzido se menos óleo for refinado, transportado e consumido;
- Menos CO₂ é produzido se menos solventes de limpeza forem produzidos, transportados e consumidos;
- Menos CO₂ é produzido se mais produtos forem fabricados com os mesmos insumos de energia. Menos CO₂ é produzido se menos retrabalho é realizado e sucata produzida;
- Menos CO₂ é produzido se os produtos não precisam ser limpos ou secos;

Hong (2001), descreve que os dióxidos de nitrogênio e de carbono estão disponíveis em forma líquida, e são abundantes, tornando-os de custos acessíveis. À temperatura ambiente, o CO₂ é mais pesado do que ar, portanto há o problema potencial de se acumular no chão da fábrica. Isso coloca os trabalhadores em risco de deficiência de oxigênio.

Rother (2015) destaca o perigo de intoxicação por dióxido de carbono (CO₂) devido a uma maior concentração no ar ambiente, o que afetaria a troca de gás no pulmão e um sufocamento posterior. As tolerâncias individuais para a inalação de dióxido de carbono podem ser muito diferentes dependendo da condição física da pessoa, a temperatura do ar e a umidade. Como segurança operacional, a concentração máxima admissível de CO₂ é de 3%.

Ainda segundo Rother (2015), uma série de medidas técnicas de segurança devem ser tomadas como precaução, como por exemplo, a utilização de válvulas de segurança na alimentação do CO₂ para evitar a ruptura do tubo, controle de sucção na sala, indicadores de aviso de sala ou máquina trabalhando com CO₂, treinamento operacional, etc.

Ambientalistas acreditam que o CO₂ contribui para o efeito estufa, uma das causas do aquecimento global. Quando pulverizado, o CO₂ tende a acumular-se como gelo seco, uma forma sólida de CO₂ que não é tão fácil de gerir. Inversamente o N₂, que é mais leve que o ar, tende a evaporar e se dispersar no alto dos espaços. O nitrogênio é o gás mais abundante. O ponto de ebulição do LN₂, -196 °C, é muito menor do que o CO₂ líquido ~ -44 °C, portanto, o nitrogênio líquido é o refrigerante preferido (HONG, 2001).

A tabela 2.6 compara a aplicação do dióxido de carbono com o nitrogênio líquido.

Dióxido de Carbono (CO₂)	Nitrogênio Líquido (LN₂)
Fase líquida na condição de +20°C	Fase líquido na condição de -196°C
Efeito de refrigeração: Transformação de fase	Efeito de refrigeração: Contato com a fase líquida
Não necessário isolamento da ferramenta	Isolamento dos canais de refrigeração são mandatórios
Combinação de refrigerantes e lubrificantes	Lubrificação apenas externa
Alta absorção térmica devido a fase de transformação	Refrigeração permanente e risco de condensação e principalmente corrosão

A tabela 2.6 – Comparação da aplicação do dióxido de carbono com o nitrogênio líquido (WALTER AG, 2014).

Nos últimos 30 anos diversas pesquisas com gases como meio refrigerante na usinagem foram realizadas. Aplicações de usinagem por torneamento, furação e fresamento com pastilhas de metal duro ou ferramentas inteiriças de metal duto são o carro chefe das pesquisas, entretanto, ferramentas de aço rápido (HSS), ferramentas de cerâmica, nitreto cubico de boro (CBN) e de diamante policristalino (PCD) também são citadas em alguns estudos. Processo de retificação também podem ser encontrados. Abaixo será citado um breve resumo de alguns artigos publicados nos últimos anos

Ambrosy et al. (2014) usinaram aços com ferramentas de metal duro e refrigeração criogênica. Em comparação com o corte a seco, foi observada uma redução significativa das forças de corte com resfriamento criogênico. As despesas com energia foram reduzidas em 85%, que os pesquisadores atribuem à redução do coeficiente de atrito da cobertura com a refrigeração criogênica.

Aurich et al.(2014), estudaram os efeitos da refrigeração criogênica na usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos. Testes comparativos foram realizados entre emulsão de óleo e refrigeração com nitrogênio líquido usando ferramentas de metal duro e HSS. Os resultados mostraram uma redução de 10 a 20% nas forças de corte com a utilização de nitrogênio líquido e possibilitou um aumento da velocidade de corte com ambas as ferramentas. O nitrogênio líquido melhorou o acabamento da peça usinada com ferramentas de HSS, enquanto um efeito contrário foi observado com ferramentas de metal duro.

Khan et al. (2008) realizaram uma série de testes de fresamento, comparando o corte a seco, com névoa de óleo, ar frio e resfriamento com gelo seco (CO_2). O ar frio e o gelo seco foram fornecidos à aresta de corte através dos canais de refrigeração ou utilização de jatos externos. Forças de corte, rugosidade, desgaste da ferramenta e temperatura de corte foram registrados durante os testes. Os resultados mostraram que a refrigeração por gelo seco foi a opção mais eficaz, reduzindo o desgaste da ferramenta e melhorando a qualidade superficial. As forças de corte também foram menores utilizando esse fluido de corte.

2.4.2 Direcionamento do fluido de corte na região de corte

As principais funções dos fluidos de corte são a redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio no transporte dos cavacos (limpeza). Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material da peça e/ou cavaco não será garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta é o aumento do desgaste abrasivo e por adesão. Prevê-se ainda uma elevação da temperatura do processo (GAMARRA, 2017).

Com o aumento da temperatura os cavacos se tornam mais dúcteis e assim terão maior dificuldade para serem formados e tenderão a aderir na ferramenta de corte. No trabalho com

materiais de difícil usinagem, o efeito refrigerante dos fluidos de corte é bastante restrito devido à sua evaporação prematura, ocasionada pelas altas temperaturas alcançadas nessa região. Esta evaporação não permite o acesso do fluido de corte na interface cavaco ferramenta e/ou ferramenta peça. Devido a isso, o efeito lubrificante se destaca pela formação de um filme de óleo que reduz significativamente o atrito, reduzindo com isto, a geração de calor e consequentemente diminuindo a temperatura da região do corte (EZUGWU et al., 2004).

Magri (2015), cita que o fluido de corte pode ser direcionado basicamente de três modos diferentes: A figura 2.9 mostra a atuação do fluido sobre o cavaco (A), entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (B) e entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (C).

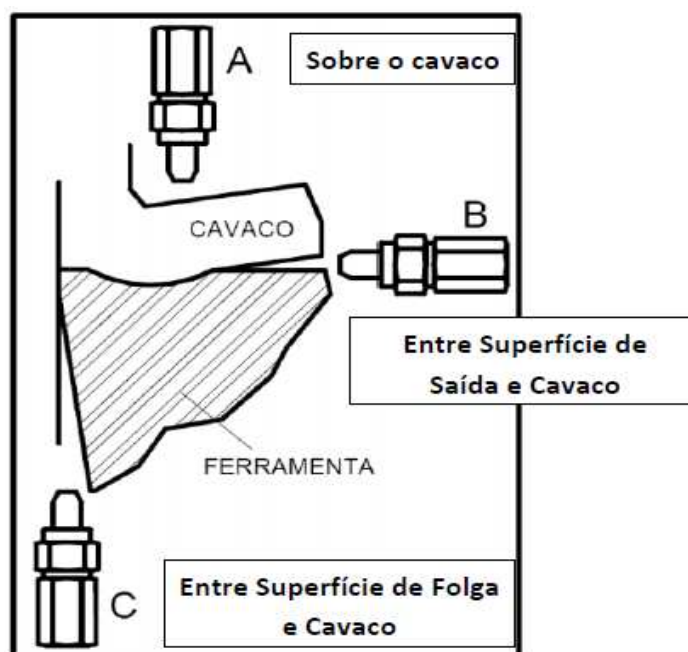
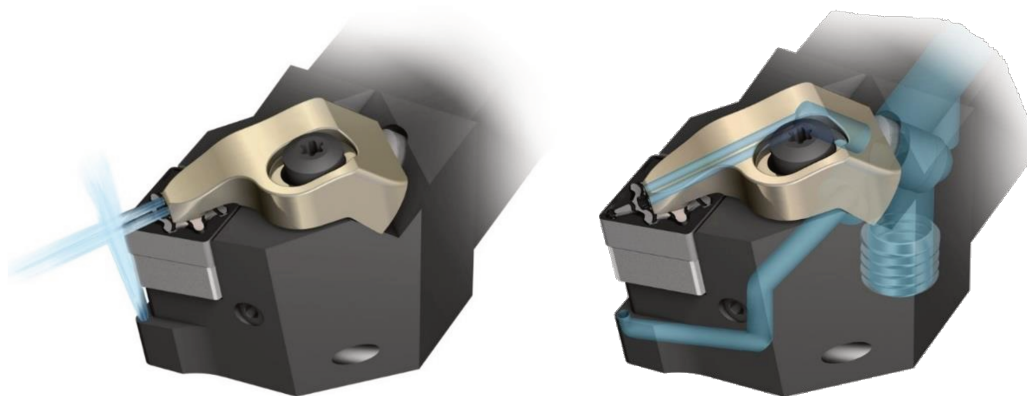


Figura 2.9 - Direcionamento do jato de fluido de corte

Modificado de: SHAW, 1984

O direcionamento do fluido de corte na ferramenta, utilizado nesse trabalho, foi feito pelo sistema *Walter Precision Coolant* é apresentado na figura 2.10. O sistema baseia-se no fornecimento do fluido de corte diretamente através do grampo de fixação do inserto

(superfície de saída da pastilha) e através da base inferior do suporte de fixação do inserto, o que direciona o fluido de corte para a superfície de folga do inserto.



Figuras 2.10 - Suporte Walter *Precision Coolant* com sistema de refrigeração pela superfície de saída e superfície de folga do cavaco (WALTER AG, 2015).

Segundo o fabricante, resultado da utilização desse sistema é um aumento de 30 até 150% na vida da ferramenta (dependendo do material e pressão do fluido de corte) para aços inoxidáveis, materiais termorresistentes e aços ligados (WALTER AG, 2014).

Ainda segundo Walter AG (2014), o novo sistema direciona o refrigerante para a aresta de corte, fornecendo maior lubrificação, mantendo os insertos com temperaturas menores e proporcionando um melhor controle dos cavacos. Os efeitos positivos aumentam com o aumento da pressão, particularmente em pressões acima de 70 bar. Isso pode resultar em aumento da velocidade de corte de até 100%, mantendo a mesma vida da ferramenta. Junto com a maior produtividade tem-se a melhora do acabamento superficial com o menor endurecimento da zona periférica de trabalho, aumentando a confiabilidade do processo.

2.5 Estudo de caso

Os casos exemplificados a seguir apresentam semelhanças quando comparados à usinagem de aço inoxidável de difícil usinabilidade, utilizam o mesmo sistema de refrigeração e podem servir como base para aplicação e conhecimento na usinagem do aço inoxidável duplex, que é o foco desse trabalho.

Caso 1: Torneamento de aço inoxidável com fluido de corte aquoso (emulsão) variando o direcionamento dos canais de saída de refrigeração.

As figuras 2.11 e 2.12, mostram um estudo (WALTER AG, 2015) que trata do torneamento de um disco de válvula de aço inoxidável austenítico 316L (X2CrNiMo17-12-2), que apresenta características (soldabilidade e resistência à corrosão) similares ao duplex SAF2205. A pastilha de metal duro utilizada no ensaio foi a de geometria triangular negativa, classe ISO M20, com designação do fabricante TNMG160412-RM5 WSM20S. O ângulo de posição do suporte é de $\kappa_r=91^\circ$ e foram utilizados o suporte *Walter Precision Coolant* (com canais de refrigeração nas superfícies de saída e folga da ferramenta) e um suporte convencional (refrigeração externa). A pressão do fluido de corte foi de 40 bar.

As figuras 2.11 e 2.11 mostram o sistema de fixação da peça na máquina e a peça bruta e após a usinagem respectivamente.

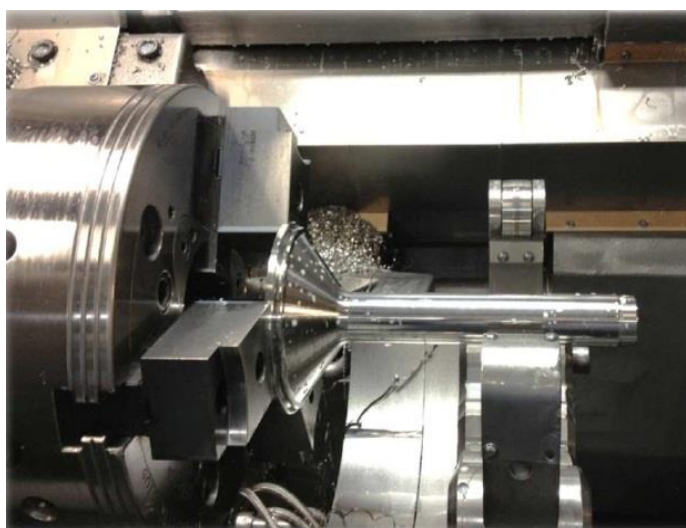


Figura 2.11 – Sistema de fixação do disco de válvula na máquina de usinagem.
(WALTER AG, 2014).



Figura 2.12 – Disco de válvula: peça bruta e peça acabada (WALTER AG, 2014).

A velocidade de corte utilizada foi de 180 m/min, o avanço por rotação de 0,33 mm e a profundidade de corte igual a 2,15 mm. O critério para final da vida da ferramenta foi a qualidade superficial.

A figura 2.13 mostra o inserto de metal duro após a usinagem de 2 peças. O inserto (a) foi usinado pelo processo convencional de refrigeração (externo) e o inserto (b) utilizando a tecnologia com refrigeração direcionada à superfície de saída e folga da ferramenta. É possível notar uma redução do desgaste. Segundo o fabricante, esse efeito é reduzido graças aos canais de refrigeração que são prensados na geometria do quebra cavaco da pastilha direcionando de uma forma mais efetiva o fluido de corte.

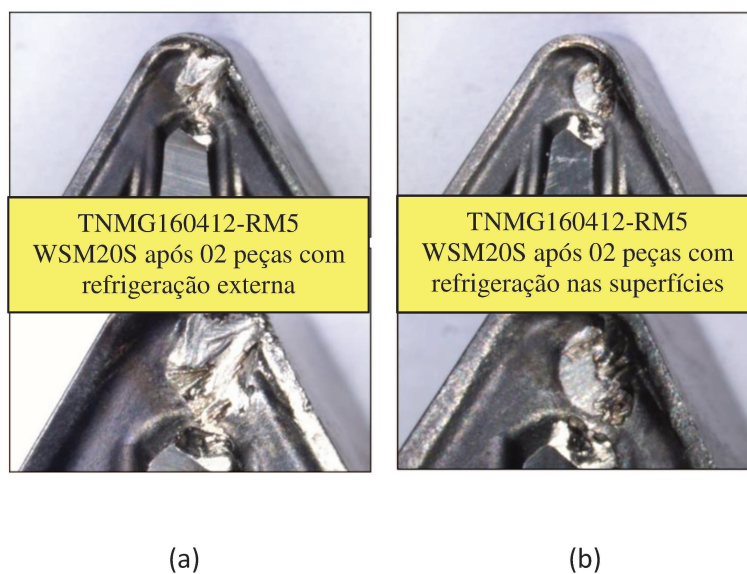


Figura 2.13 - Desenvolvimento do desgaste com 02 peças usinadas (WALTER AG, 2014).

Na figura 2.14, com 04 peças usinadas, é possível ver o aumento do desgaste de cratera nos dois inserts, entretanto, no inserto utilizado com refrigeração externa (a), essa cratera já atingiu a aresta de corte principal e consequentemente o acabamento superficial ficou acima do permitido, encerrando-se então a vida dessa ferramenta. O inserto com canais de refrigeração diretamente na superfície de folga e saída (b) se comportou de forma estável, dando uma maior segurança ao processo.

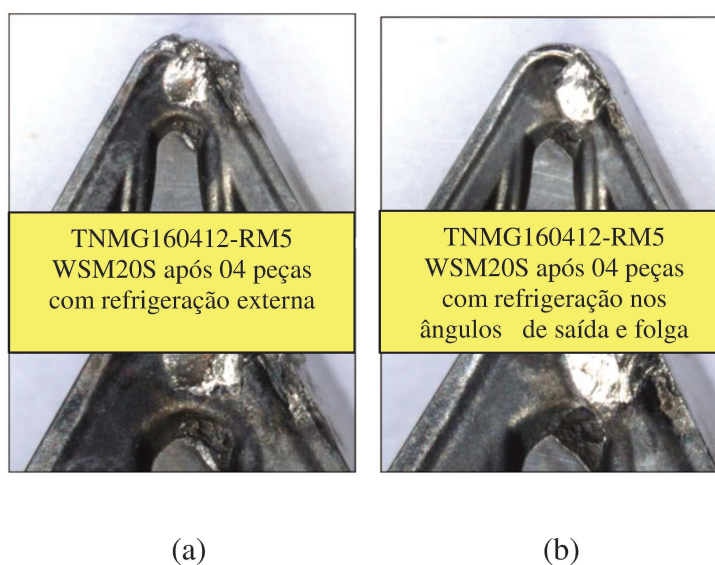


Figura 2.14 - Desenvolvimento do desgaste com 04 peças usinadas (WALTER AG, 2014).

Caso 2: Fresamento de aço inoxidável com fluido de corte gasoso (CO₂) + MQL.

As figuras 2.15 e 2.16 mostram um estudo (STARRAG e WALTER AG, 2013) sobre a usinagem de palhetas de turbinas a vapor de aço inoxidável austenítico X12CrNiWTiB16-13 (1.4962).

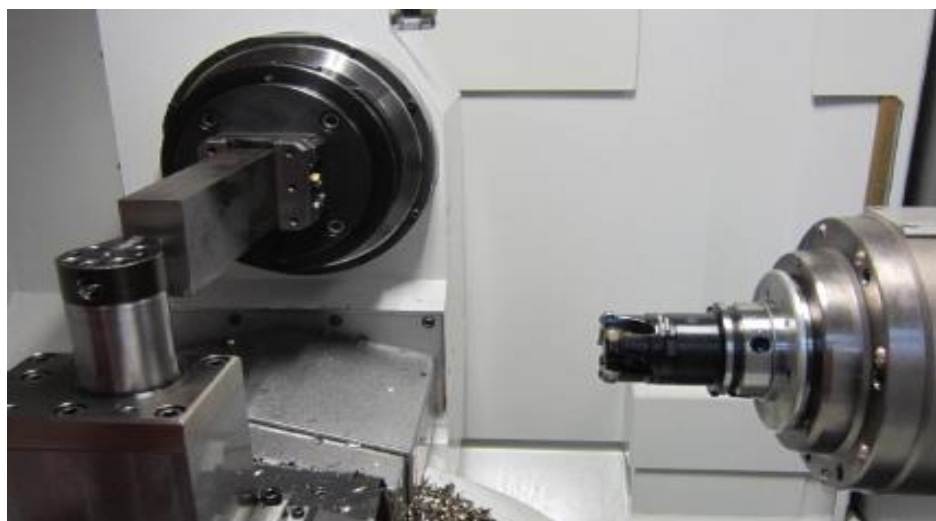


Figura 2.15 - Fixação entre pontas da peça no centro de usinagem e ferramenta de corte (WALTER AG, 2014)

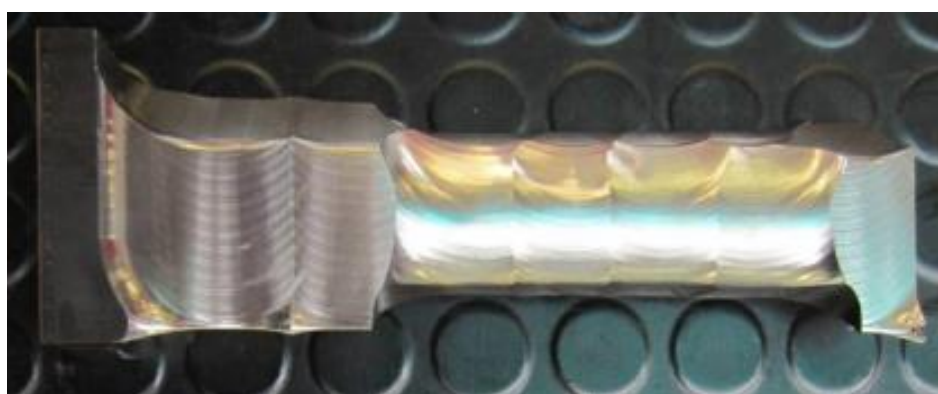


Figura 2.16 - Palheta de turbina à vapor usinada em desbaste (WALTER AG, 2014).

A figura 2.17 mostra a tecnologia desenvolvida para levar o CO₂ + MQL até a ponta da ferramenta de corte.

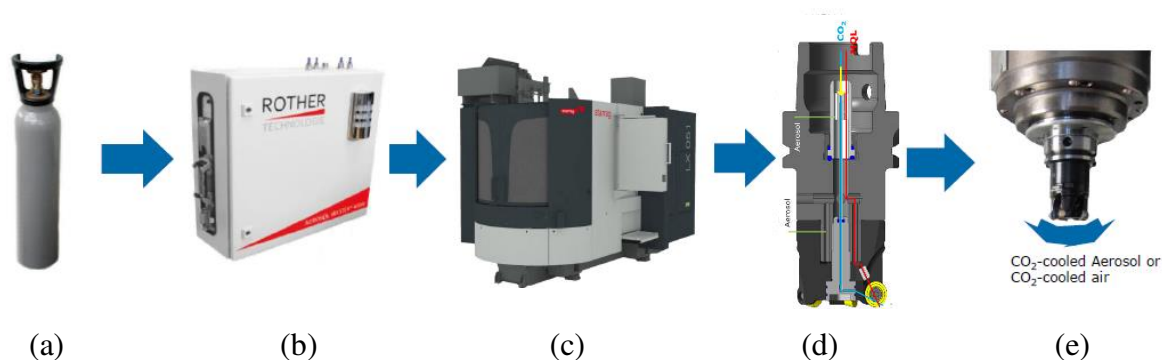


Figura 2.17 - (a) Cilindro de CO₂; (b) Máquina ROTHER Aerosol para injeção do CO₂ e MQL no sistema da máquina-ferramenta; (c) Máquina-ferramenta Starrag LX0051; (d) Fuso da máquina com três canais de alimentação independentes (esquemático); (e) Ferramenta de corte Walter AG com canais otimizados para aplicação de CO₂ + MQL. (WALTER AG, 2014).

A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa com canais de refrigeração otimizados para aplicação de dióxido de carbono (CO₂). O diâmetro da fresa foi de 50mm com 5 facas de corte (F2334R.B22.050.Z05.06) e pastilhas redondas formato ROHX1204M0-F57 W3536.

Duas estratégias foram utilizadas com o objetivo de otimizar o processo de usinagem reduzindo o tempo de ciclo da peça e mantendo uma vida da ferramenta em níveis aceitáveis.

A estratégia 1 utilizou a usinagem sem refrigeração comparando com a refrigeração por CO₂ + MQL. A velocidade de corte foi de 320 m/min, avanço por dente de 0,40 mm, profundidade de corte de aproximadamente 3,0 mm. A largura de corte variava entre 30 e 50 mm em função da usinagem ser realizada em uma máquina-ferramenta 5 eixos. O tempo total de usinagem com esta ferramenta foi de 4,56 min efetivos e a taxa de remoção de cavaco foi de 61 cm³/min.

A figura 2.18 mostra os desgastes das arestas de corte da fresa após a usinagem de uma peça (4,56 min). De acordo com o fabricante, nas arestas onde o corte foi realizado sem nenhum tipo de refrigeração o desgaste de flanco chegou a 0,16 mm. A análise das arestas do lado direito, onde foi aplicado o CO₂ + MQL, mostraram que após o mesmo tempo de contato, o desgaste de flanco obtido foi de 0,06 mm, ou seja, uma redução de 62,5% comparado com o corte a seco, possibilitando assim o aumento da vida da ferramenta. A temperatura da ferramenta chegou a 160°C na usinagem sem refrigeração e 40° na usinagem com CO₂ + MQL.

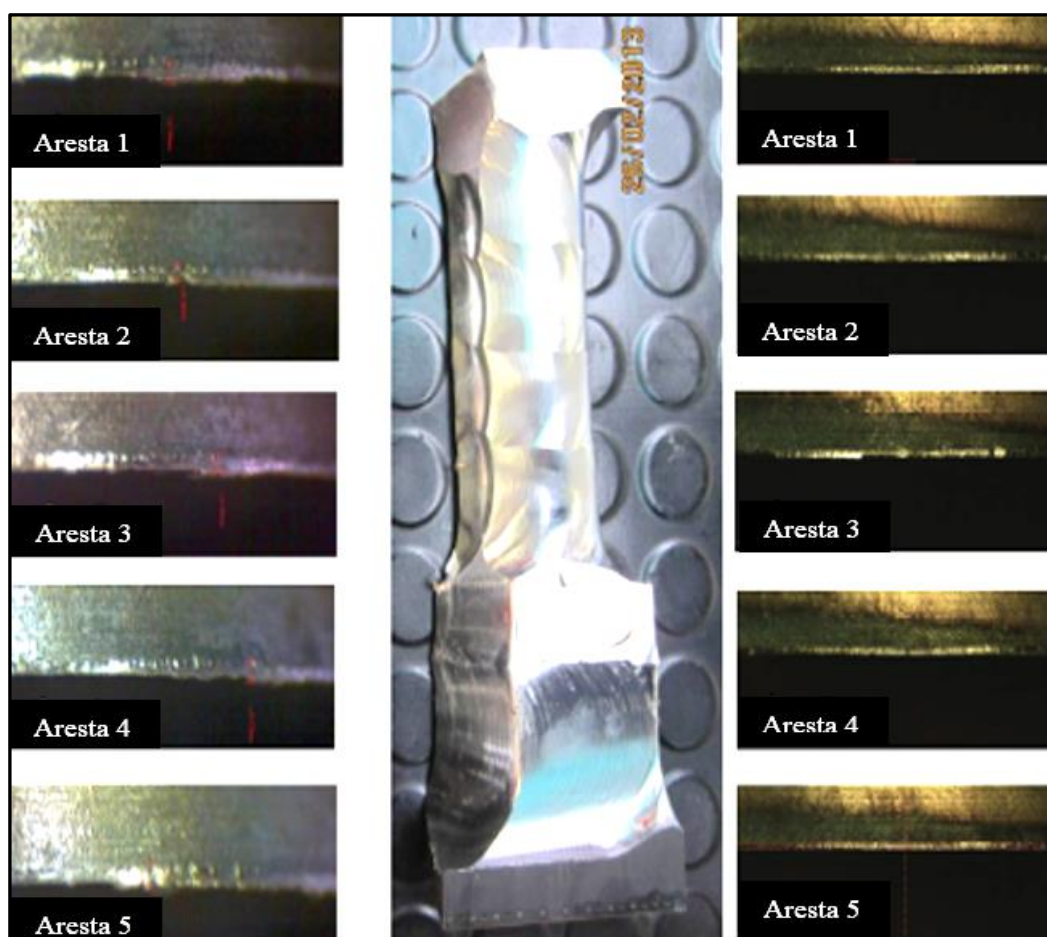


Figura 2.18 - Arestas de corte usinadas sem refrigeração (esquerda) e com refrigeração por CO₂ + MQL (direita). (WALTER AG, 2014).

Foi utilizada a melhor vida da ferramenta de corte (usinagem com CO₂ + MQL) para aumentar os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por dente) com o objetivo de se reduzir o tempo de ciclo da operação. A nova velocidade de corte utilizada foi de 400 m/min, avanço por dente de 0,55 mm, os demais parâmetros permaneceram iguais. O tempo

total de usinagem com esta ferramenta foi de 2,66 min efetivos (uma redução de 41,62% comparado com o tempo de corte da estratégia 1) e a taxa de remoção de cavaco foi de 105 cm³/min. O desgaste de flanco ficou em 0,16 mm após a usinagem de 1 peça. A figura 2.19 mostra a aresta de corte com parâmetros de corte otimizados na usinagem com CO₂+MQL.

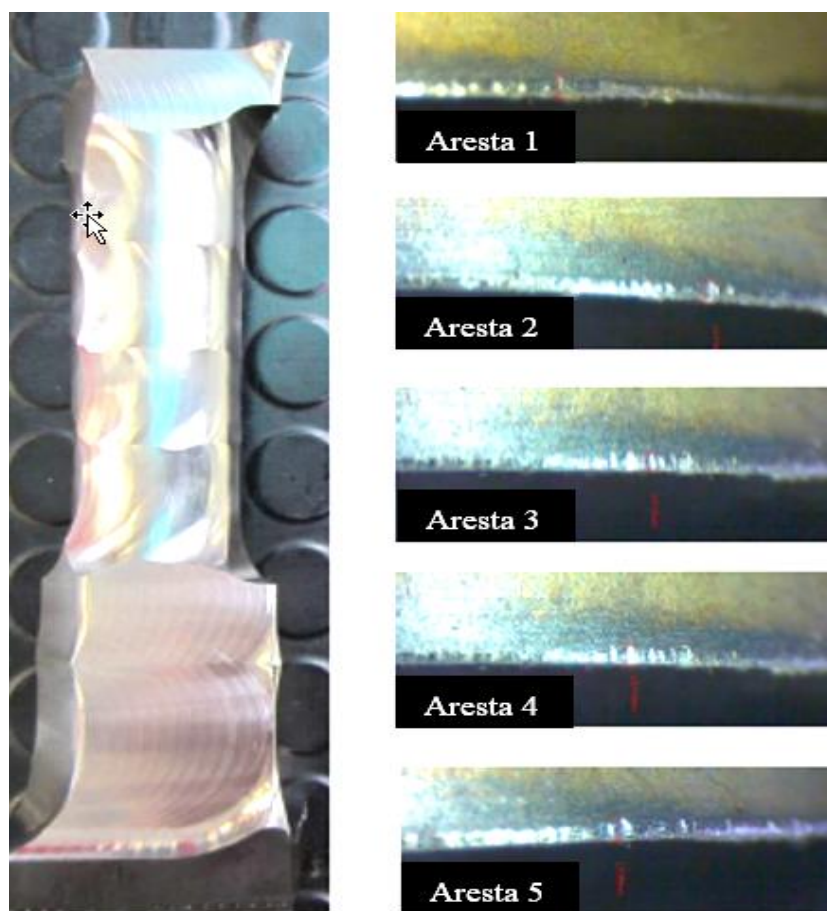


Figura 2.19 - Arestas de corte com refrigeração por CO₂ + MQL, velocidade de corte de 400 m/min e avanço por dente de 0,55 mm.

Resultados desse estudo comprovaram que a utilização da tecnologia de refrigeração por CO₂ + MQL, comparado com o corte a seco, pode resultar em aumento de produtividade de até 70%, reduzindo efetivamente os custos de produção, principalmente quando falamos em tempos de ciclo de máquina.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão mostrados os recursos utilizados na realização dos experimentos, além dos procedimentos adotados para a execução dos mesmos. O objetivo de apresentar esses detalhes é facilitar o entendimento dos métodos dos experimentos em questão, para possibilitar a reprodução do comportamento do processo utilizado por qualquer interessado da área acadêmica ou industrial. Os experimentos para essa pesquisa foram realizados no centro de tecnologia da Empresa Walter do Brasil situado na cidade de Sorocaba – SP.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Máquina ferramenta

Os ensaios foram realizados em um torno CNC, da marca Romi, modelo E280, potência do eixo da árvore de 18 kW, com rotação máxima de 4.000 RPM.

3.1.2 Microscópio óptico

As medições dos desgastes e avarias das ferramentas foram realizadas com o auxílio de um microscópio óptico modelo *Digital Microscope*, do fabricante INSIZE ISM-PM200SB, que proporciona ampliação de 10X até 200X com precisão de 8 microns. O microscópio estava acoplado a um computador contendo o *software* INSIZE *Analysis* utilizado para a captura das imagens e medição dos desgastes e avarias.

3.1.3 Rugosímetro

A verificação da rugosidade da peça usinada foi realizada utilizando um rugosímetro portátil INSIZE ISR-16, e uma base magnética como suporte do apalpador. As medidas foram realizadas sem a retirada da peça da máquina, garantindo assim a estabilidade da peça na retomada dos ensaios e dos resultados conforme figura 3.1.



Figura 3.1 – Medição da rugosidade.

3.1.4 Termômetro

A medição da temperatura do cavaco, do inserto e da peça usinada foram realizadas com o auxílio de um Termômetro Laser Digital Infravermelho com faixa de medição de temperatura entre $-50^{\circ}\sim 380^{\circ}$, precisão de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ e relação de distância para o tamanho do ponto a ser medido de 12:1.

A figura 3.2 mostra o termômetro na posição padrão definida para a realização das medições de temperatura da peça e da pastilha. Para a medição dos cavacos, um segundo termômetro do mesmo modelo foi utilizado com posicionamento realizado de forma manual com uma distância aproximada de 20 mm dos mesmos.



Figura 3.2 - Dispositivo para realização da tomada de temperatura da peça e ferramenta de corte com o termômetro.

3.2 Materiais

3.2.1 Corpos de Prova (material e análises)

Os ensaios foram realizados em barras laminadas de aço inoxidável Duplex UNS S31803, conhecido comercialmente como SAF 2205 e cedidos pela divisão de tubos e barras da Sandvik Materials Technology. A tabela 3.1 mostra a composição química nominal do material e a tabela 3.2 algumas das suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.1- Composição química do SAF2205 (SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY, 2017).

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	% S	%P
≤0,030	≤1,0	≤2,0	22,5	5,5	3,2	0,18	≤0,015	≤0,030

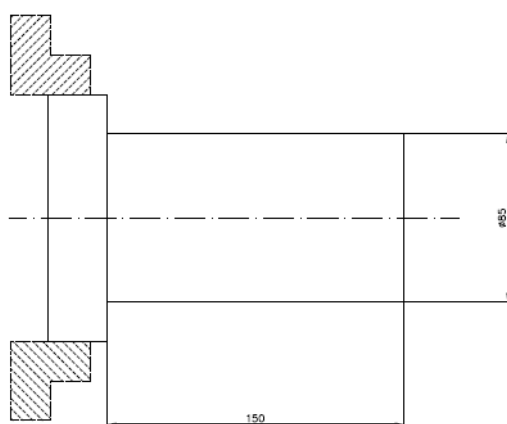
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do SAF2205 (SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY, 2017).

Elasticidade		Resistência à tração	Dureza
Limite de escoamento (0,2%)	Limite de escoamento (1,0%)	MPa	Brinell
MPa (min)	MPa (min)		Máx
≥ 450	≥ 500	660-860	≤ 270

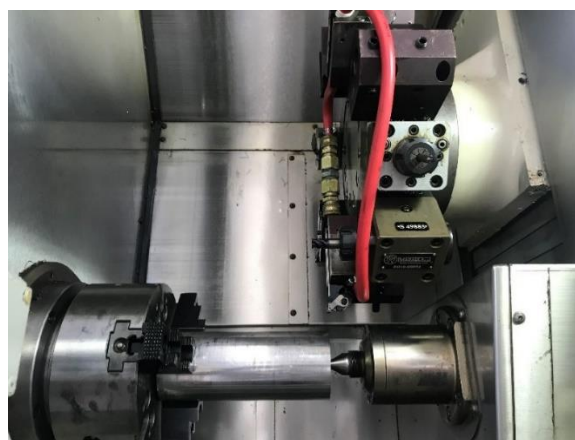
Além do processo de torneamento longitudinal, amostras do material foram retiradas para ensaios de corrosão com o objetivo de identificar em que grau a usinagem variando o tipo de fluido de corte (líquido e gasoso) e o canal de direcionamento do mesmo afeta a resistência a corrosão da peça usinada.

Os corpos de prova para a realização dos ensaios de vida da ferramenta, rugosidade, formação do cavaco, temperatura do processo e potência de corte, apresentaram inicialmente as dimensões de 85 mm de diâmetro por 150 mm de comprimento. Os cortes foram realizados em passadas longitudinais, de tal maneira que o diâmetro do corpo de prova diminuía à medida que o ensaio ocorria. O limitador do diâmetro utilizado foi 35 mm. A usinagem de diâmetros menores não era possível já que a velocidade de corte definida para os ensaios não era atingida devido à máxima rotação disponível na máquina.

A figura 3.3 mostra o esquema do corpo de prova (a) e a fixação do corpo de prova na placa com castanha e contraponto (b).



(a)




(b)

Figura 3.3 Desenho esquemático do corpo de prova e a fixação do corpo de prova na placa com castanha e contraponto.

No final de cada comprimento útil usinado, foi recuado 0,15 mm no comprimento de usinagem no eixo “Z” para evitar um abrupto crescimento de carga na saída da ferramenta e também um atrito excessivo da ferramenta contra a peça.

3.2.2 Ferramentas de corte.

Durante os experimentos deste trabalho foi utilizado o suporte para torneamento *Walter Precision Coolant* modelo DCLNR2020X12-P com sistema de refrigeração que atua de 10 – 150 bar. A figura 3.4 mostra detalhes do suporte.



Ângulo de ataque longitudinal (Klongitudinal)	95 °
Ângulo de ataque plano (Kplano)	95 °
Tamanho do inserto	12
Altura funcional (h = h1)	20 mm
Largura da haste (b)	20 mm
Largura do pre-set até a parte de trás da cabeça (b1)	10 mm
Largura funcional (f)	25 mm
Comprimento útil (l1)	115 mm
Balanço máximo (l4)	38.5 mm
Ângulo de saída ortogonal (γ)	-6 °
Ângulo de inclinação (λs)	-6 °

Figura 3.4 - Suporte *Walter Precision Coolant* (WALTER AG, 2017).

As pastilhas de metal duro utilizadas apresentavam o formato losangular, com ângulo de ponta de 80°, dupla face, geometria de quebras cavacos própria para a usinagem de aços inoxidáveis e ligas termorresistentes em operações de acabamento e desbaste leve, raio de ponta de 0,8 mm, comprimento da aresta de 12 mm e código ISO CNMG120408-FM5.

A figura 3.5 mostra detalhes geométricos da pastilha de metal duro utilizada nos ensaios.

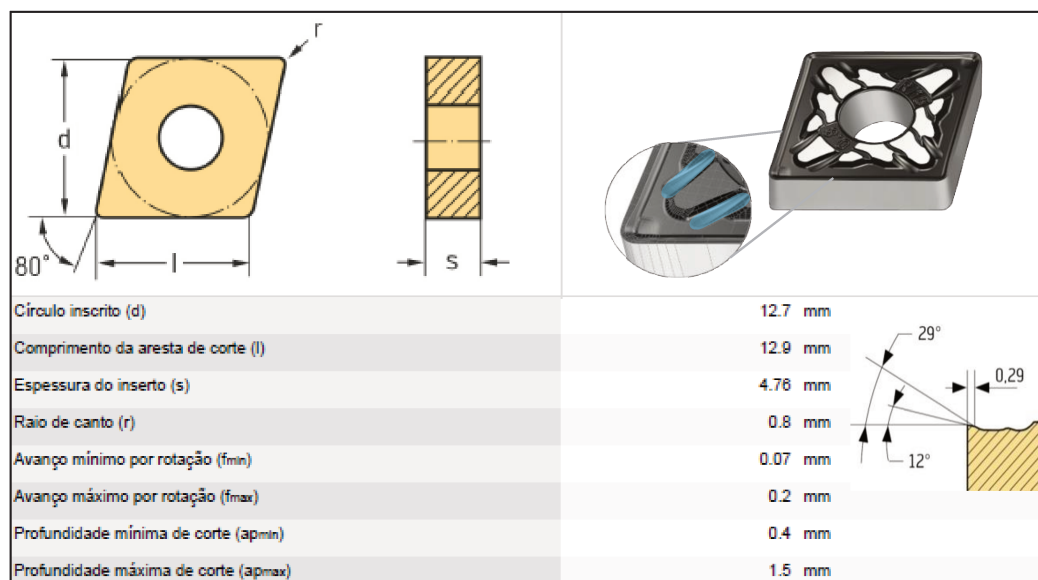


Figura 3.5 – Pastilha de metal duro ISO CNMG120408-FM5 WSM10S
(WALTER AG, 2017).

A classe de metal duro micro grão utilizada é denominada pela fabricante como WSM10S, que pela norma ISO é classificada como M10 - S10 e revestida com uma cobertura PVD multicamadas de $TiAlN$ e Al_2O_3 com espessura total de camadas entre 4 – 5 microns.

3.2.3 Fluidos de corte.

Durante todas as etapas dos ensaios, a usinagem foi realizada com fluido de corte, entretanto, dividido em líquido e gasoso.

Para os ensaios com fluido de corte líquido foi utilizado o produto Blaser B-Cool semi-sintético, miscível em água e indicado para a usinagem de aços, aços inoxidáveis e ligas termorresistentes. Segundo o fabricante, esse produto tem uma excelente proteção anticorrosiva. A concentração do óleo foi de 5-6% aferido com refratômetro.

Nos ensaios com dióxido de carbono (CO_2), foi utilizado um equipamento criogênico desenvolvido pela empresa Circular Gases no qual foi regulada a pressão e vazão do gás com um manômetro. A pressão utilizada foi de 20 bar e a vazão estimada em 25 kg/h. Cada cilindro de dióxido de carbono utilizado tem capacidade de 25 kg.

A figura 3.6 mostra o equipamento criogênico utilizado nos ensaios (cilindros e estrutura com válvulas de regulação).



Figura 3.6- Equipamento de criogenia e cilindros de CO_2 .

Durante a usinagem com o dióxido de carbono, foi injetado externamente através de um borrifador manual um fluido de corte específico para a usinagem com MQL (mínima quantidade de lubrificante). O jato foi direcionado à superfície de saída da ferramenta, onde ocorre o contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. O fluido de corte utilizado foi o produto Blaser Vascomill MMS FA2 e o volume de aproximadamente 2,0 ml injetado manualmente por injeção (borrifador). A cada 50 mm usinados era realizado esse procedimento, repetindo assim 3x por passada longitudinal.

A figura 3.7 mostra o sistema de injeção externa do fluido de corte durante a usinagem.



Figura 3.7- Sistema de injeção externa do fluido de corte com borrifador.

3.3 Monitoramento do torque da ferramenta.

O sistema de monitoramento do torque das ferramentas (MCF – versão 2.0, disponível no CNC da máquina utilizada) efetua a leitura e interpretação dos valores de torque consumidos por uma ferramenta durante o processo de usinagem. A função desse monitoramento é reduzir os impactos que eventualmente a máquina pode sofrer em função de colisões, aumento repentino dos esforços de corte e controle dos desgastes das ferramentas.

O torque é monitorado nos eixos X e Z e também no eixo árvore principal (S1) e no eixo árvore secundário (S2). A figura 3.8 a tela do sistema de monitoramento de torque das ferramentas. Este sistema faz parte do comando CNC FANUC 21i-TB e é padrão para o torno ROMI E280 utilizado nos ensaios de trabalho.

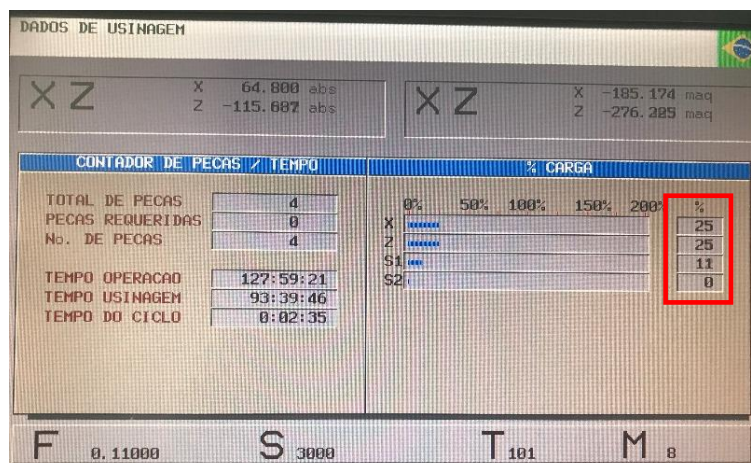


Figura 3.8 – Sistema de monitoramento de torque das ferramentas de corte.

3.4 Planejamento experimental.

O objetivo desse trabalho é estudar o processo de torneamento longitudinal em acabamento do aço inoxidável duplex SAF2205 e a influência de fatores como velocidade de corte, tipo de fluidos de corte, diferentes canais de refrigeração (superfície de folga e saída ou apenas superfície de saída) na vida das ferramentas, qualidade superficial da peça e resistência à corrosão da superfície usinada. As figuras 3.9 e 3.10 mostram os dois diferentes canais de refrigeração utilizados nos ensaios com emulsão ou dióxido de carbono (CO_2).

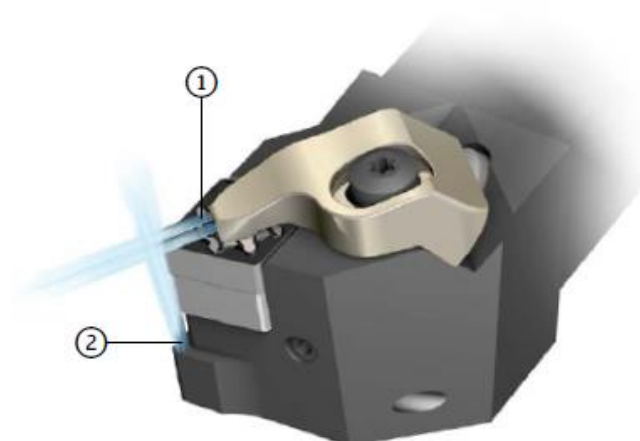


Figura 3.9 - Refrigeração por emulsão: (1) refrigeração na superfície de saída da pastilha e (2) refrigeração na superfície folga da pastilha

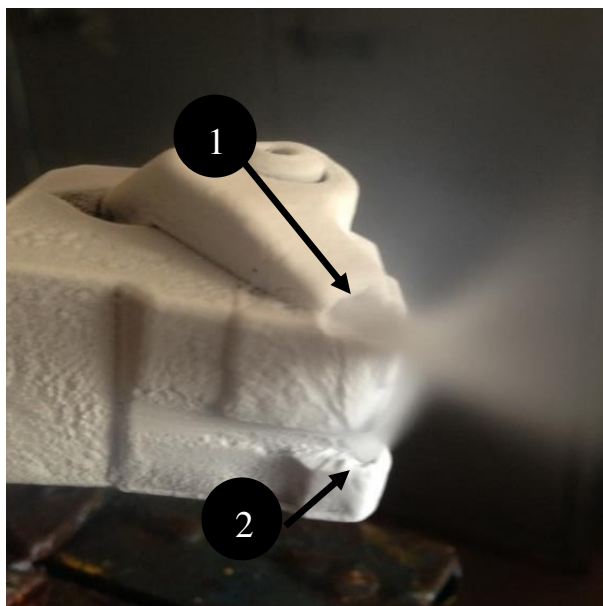


Figura 3.10 - Refrigeração por dióxido de carbono: (1) refrigeração na superfície de saída da pastilha e (2) refrigeração na superfície folga da pastilha.

Os parâmetros de corte foram definidos inicialmente com base nas recomendações do catálogo do fabricante WALTER AG (2017) para a classe de metal duro WSM10S, geometria CNMG120408-FM5. Dessa forma, o avanço (f_n) e a profundidade de corte (a_p), foram fixadas para todos os ensaios de vida como 0,11 mm/n e 0,6 mm respectivamente.

Para os ensaios, foi definido um planejamento fatorial 2^3 em que foram variados a velocidade de corte (v_c), tipo de refrigeração utilizada (emulsão e gás) e direção de condução do fluido de corte até a região de corte. Conforme já citado, a classe de metal duro utilizada foi a WSM10S, a refrigeração por emulsão realizada com pressão de sistema da máquina ferramenta de 8 bar e no sistema de refrigeração por dióxido de carbono a pressão utilizada foi de 20 bar e vazão estimada de 25 kg/h. As velocidades de corte (v_c) utilizadas foram 288 e 346 m/min.

Dessa forma, seguindo o planejamento experimental do tipo 2^3 citado, realizaram-se 8 ensaios diferentes. Para todos os ensaios foi realizada uma repetição, totalizando 16 ensaios no total.

As condições de corte e variações dos ensaios são mostradas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Condições e variações dos ensaios realizados.

Ensaio	Tipo de refrigeração	Canal refrigeração	v_c (m/min)
1	Emulsão	Sup. de Folga – Saída (F+S)	288
2	Emulsão	Sup. de Folga – Saída (F+S)	346
3	CO ₂	Sup. de Folga – Saída (F+S)	288
4	CO ₂	Sup. de Folga – Saída (F+S)	346
5	Emulsão	Sup. de Saída (S)	288
6	Emulsão	Sup. de Saída (S)	346
7	CO ₂	Sup. de Saída (S)	288
8	CO ₂	Sup. de Saída (S)	346

No ensaio torneava-se a peça utilizando-se um determinado conjunto de variáveis de entrada (velocidade de corte, tipo de refrigeração e direcionamento do canal de refrigeração) até que a rugosidade média atingisse $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ que é um parâmetro comum dentro da indústria metal mecânica para operações de acabamento. Cada ensaio era interrompido após três passes de corte longitudinal (450 mm usinados) para que o desgaste de flanco da ferramenta, a temperatura da peça-cavaco-pastilha de metal duro e a rugosidade fossem medidos. Amostras dos cavacos também foram coletados a cada 450 mm usinados. Durante a usinagem, dados do torque nos eixos X, Y e S da máquina também foram adquiridos. Após os ensaios, as ferramentas desgastadas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol JXA-840A do Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, que possui o recurso de espectrometria de energia dispersiva (ou EDS, do inglês *Energy Dispersive X-ray Spectrometer*) para que o desgaste fosse analisado com grande ampliação e que análises de EDS fossem feitas, a fim de procurar entender quais foram os mecanismos de desgaste predominantes no processo.

A figura 3.11 mostra a usinagem com criogenia em andamento, (a) no início do processo de usinagem e (b) após o fim da usinagem e parada da máquina para a realização das medições de temperatura e acabamento superficial.

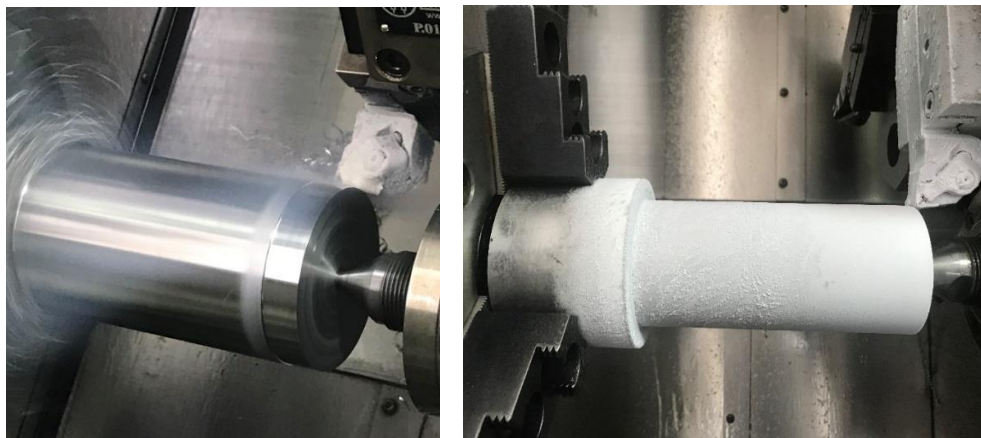


Figura 3.11 - Usinagem criogênica (a) no início do processo de usinagem e (b) após o fim da usinagem e parada da máquina para a realização das medições de temperatura e acabamento superficial.

3.3.1 Ensaio de corrosão.

A fim de analisar o comportamento do material em relação à corrosão pós usinagem foram faceados anéis com diâmetros externos e interno iguais a 85 e 20 mm respectivamente que posteriormente foram cortados com 4,0 mm de espessura. Desses anéis foram extraídas amostras com 10 mm x 10 mm para que fosse feita a medição da corrosão no teste eletroquímico.

As amostras tiveram suas superfícies polidas com pasta de diamante 1 μm para garantir a mesma uniformidade da superfície para todas as amostras. O teste eletroquímico foi realizado na Potentiostat Galvanostat a VersaSTAT4 (figura 3.12) à temperatura ambiente na área exposta de 0,2 cm^2 numa solução de 3,5% p/p NaCl. Os dados do circuito aberto de corrosão foram obtidos usando uma referência eletrodo de Ag, AgCl (0,197 V). Para produzir as curvas Tafel, o potencial foi variado de $-0,25$ V para 0,25 V com uma taxa de varredura de 0,167 mV/s. Os testes foram realizados de acordo com a norma técnica ASTM-G5 - 94.



Figura 3.12 – Ensaio de Corrosão, equipamento Potentiostat Galvanostat PerkinElmer Versa SAT4 utilizado para obtenção da curva Tafel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios referente à vida da ferramenta, rugosidade, potência de corte e temperatura do sistema peça-ferramenta-cavaco. Análise de corrosão do material e do desempenho do revestimento da pastilha de metal duro também serão apresentados.

4.1 Vida da ferramenta

Na figura 4.1 é possível visualizar a média aritmética da vida da ferramenta em tempo de corte (min) e em volume de cavaco removido (cm^3/min), assim como suas dispersões nos ensaios realizados. No gráfico, a nomenclatura “F+S”, significa refrigeração na superfície de folga e saída da ferramenta e “S”, refrigeração apenas na superfície de saída.

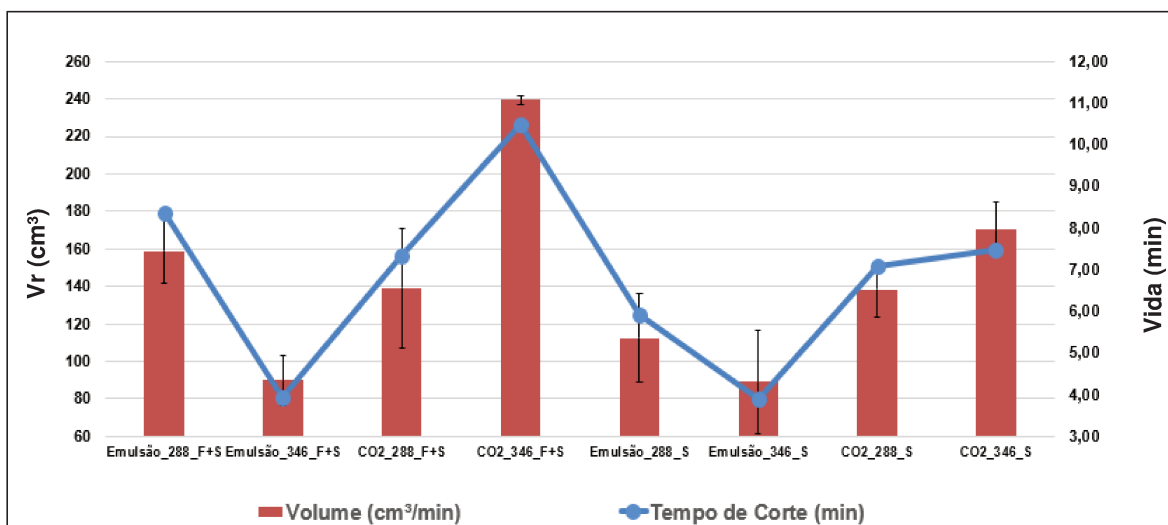


Figura 4.1 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido.

Para a usinagem com emulsão como fluido de corte, assim como descrito na teoria da usinagem dos metais, com o aumento da velocidade de corte, a vida da ferramenta diminui devido ao aumento da energia (calor) que é imputada ao processo sem o aumento da área da ferramenta que recebe este calor. Tanto na usinagem com o sistema de refrigeração pela superfície de folga e saída como no sistema de refrigeração apenas pela superfície de saída, houve uma queda na vida da ferramenta (min) em função do aumento da velocidade de corte de 288 m/min para 346 m/min. As quedas foram 52,81% e 33,83% respectivamente. Analisando a taxa de remoção, as quedas foram 70% e 20% respectivamente.

Ainda com a refrigeração por emulsão, é possível verificar que com velocidade de corte de 288 m/min, o sistema de refrigeração pelos canais de folga e saída é mais eficiente que apenas a refrigeração pelo canal de saída em 41,28% (8,35 min contra 5,91 min respectivamente) analisando a vida em minutos ou seja, um incremento da taxa de remoção por vida da ferramenta de 41,28% apenas alterando o sistema de direcionamento do fluido de corte. Já com velocidade de corte de 346 m/min, não é possível verificar uma eficiência do sistema, com vida de 3,94 min para o sistema com refrigeração pelo canal de folga e saída contra 3,91 min apenas pela superfície de saída, desta forma os resultados ficaram dentro do desvio padrão calculado.

Por fim, em relação à refrigeração com emulsão, é possível afirmar que o calor gerado pelo aumento de velocidade de corte foi preponderante em relação à capacidade de refrigeração, mesmo quando o fluido foi aplicado de forma mais eficiente (superfície de folga e saída).

Para a usinagem com o CO₂ como refrigerante de corte, ao contrário da teoria da usinagem dos metais, é possível notar com que o aumento da velocidade de corte, houve um aumento da vida da ferramenta de corte tanto na refrigeração pelos canais de folga e saída, como também apenas pelo canal de saída. No sistema de refrigeração pelos canais de folga e saída, o aumento da vida foi de 43,11% (de 7,33 min com velocidade de corte 288 m/min para 10,49 min com velocidade de corte de 346 m/min). Analisando a taxa de remoção, os incrementos foram 72% e 23% respectivamente.

Na análise com a refrigeração pelo canal de saída, o aumento da vida da ferramenta foi de apenas 5,36% (de 7,08 min com velocidade de corte 288 m/min para 7,46 min com velocidade de corte de 346 m/min, dentro do desvio padrão calculado). Nesta análise de vida em minuto ou taxa de remoção, é possível verificar a eficiência do sistema de refrigeração por CO₂ principalmente no sistema de refrigeração pelos canais que direcionam o fluido de corte através da superfície de folga e saída da ferramenta principalmente com maiores velocidades de corte (346 m/min).

Nesse caso, o CO₂ foi capaz de retirar mais calor do que a emulsão, e isso preponderou sobre o aumento da velocidade de corte. Assim, a temperatura alcançada no torneamento favoreceu o corte e aumentou a vida da ferramenta. Ainda assim, a aplicação de CO₂ nas superfícies de folga e saída foi mais eficiente. Resumindo, uma possível explicação para os resultados de vida de ferramenta é de que há uma faixa de temperatura ótima para a usinagem e essa temperatura é atingida balanceando-se os insumos e extrações de calor. No presente trabalho eles foram representados por velocidade de corte e fluido de corte respectivamente.

A figura 4.2 compara a vida e taxa de remoção da ferramenta, utilizando fluido de corte por emulsão e o CO₂ com velocidades de corte de 288 m/min e 346 m/min respectivamente. A análise é feita com base no mesmo sistema de direcionamento do fluido

de corte para a área de interface peça-cavaco-ferramenta através da superfície de folga e saída da ferramenta.

Conforme figura, é possível verificar que com velocidade de corte de 288 m/min a vida da ferramenta tanto na usinagem com emulsão ou CO₂ são similares (dentro do desvio padrão). Nesse caso, como as velocidades são baixas, a temperatura também é relativamente baixa, assim tanto a emulsão quanto o CO₂ foram eficientes, ou seja mantiveram a temperatura abaixo do ponto ótimo. Nesse caso, as vidas das ferramentas foram similares. Já para velocidade de corte de 346 m/min, o sistema se mostra com maior eficiência. Quando a velocidade de corte foi aumentada para 346 m/min a temperatura subiu e os fluidos de corte passaram a ter comportamentos diferentes. Assim, a utilização de CO₂ permitiu o aumento da temperatura para a faixa ótima para o ensaio. Por outro lado, dada a menor capacidade de extração de calor da emulsão, a temperatura excedeu o patamar ótimo para vida da ferramenta e isso se refletiu nos resultados obtidos.

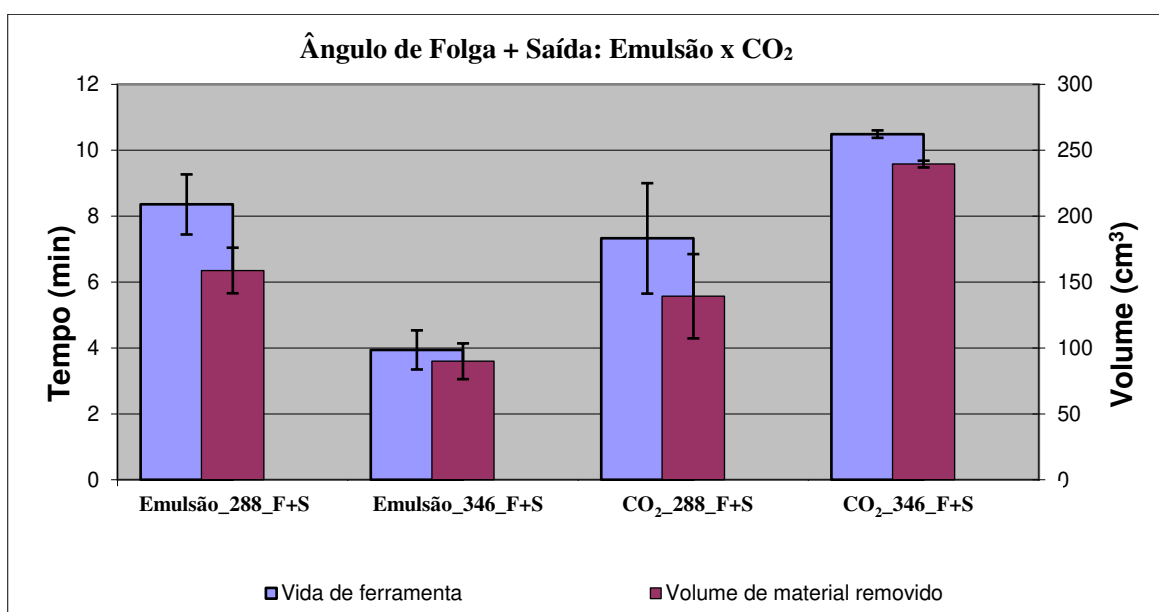


Figura 4.2 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO₂ na superfície de folga – saída da ferramenta

A figura 4.3 compara a vida e taxa de remoção da ferramenta, utilizando fluido de corte por emulsão e o CO₂ com velocidades de corte de 288 e 346 m/min respectivamente. A análise é feita com base no mesmo sistema de direcionamento do fluido de corte para a área de interface peça-cavaco-ferramenta através da superfície de saída da ferramenta.

Conforme figura, é possível verificar que com velocidade de corte de 288 m/min a vida da ferramenta tanto na usinagem com emulsão ou CO₂ são similares (dentro do desvio padrão). Já para velocidade de corte de 346 m/min, o sistema se mostra com uma boa eficiência, entretanto, não com valores tão expressivos conforme comparado com o sistema de refrigeração pelos canais de folga e saída da ferramenta (conforme visto na figura 4.2).

Nota-se que com o CO₂ é possível trabalhar com velocidades de corte mais elevadas obtendo-se a mesma vida de ferramenta. Isso ocorre porque a maior capacidade de extração de calor desse fluido consegue manter a temperatura mesmo com maior geração de calor.

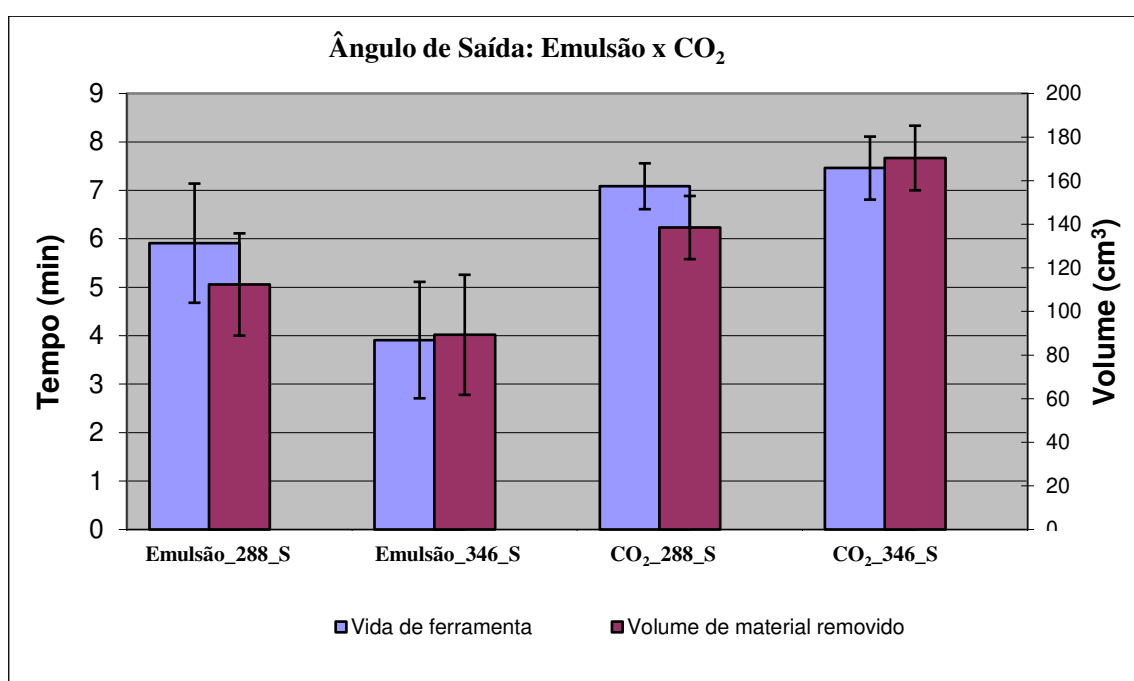


Figura 4.3 – Comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO₂ na superfície de saída da ferramenta

As figuras 4.4 e 4.5 mostram um comparativo da vida e taxa de remoção para a usinagem com velocidade de corte de 288 e 346 m/min respectivamente e com refrigeração por emulsão e CO₂ no sistema de direcionamento na superfície de folga e saída e apenas na superfície de saída da ferramenta.

Nesse caso, como a geração de calor foi menor, ambos os fluidos utilizados conseguiram extrair calor de forma similar. Provavelmente houve uma saturação da extração de calor pelo CO₂. Em outras palavras, o CO₂ poderia extrair mais calor se esse fosse gerado. Como isso não ocorreu, seu desempenho foi similar ao da emulsão. Esse mesmo fato deve

ter ocorrido em relação aos canais de distribuição do fluido de corte. Como a geração de calor foi menor, o desempenho da aplicação de fluido na superfície de saída e folga foi similar ao da aplicação apenas na superfície de saída.

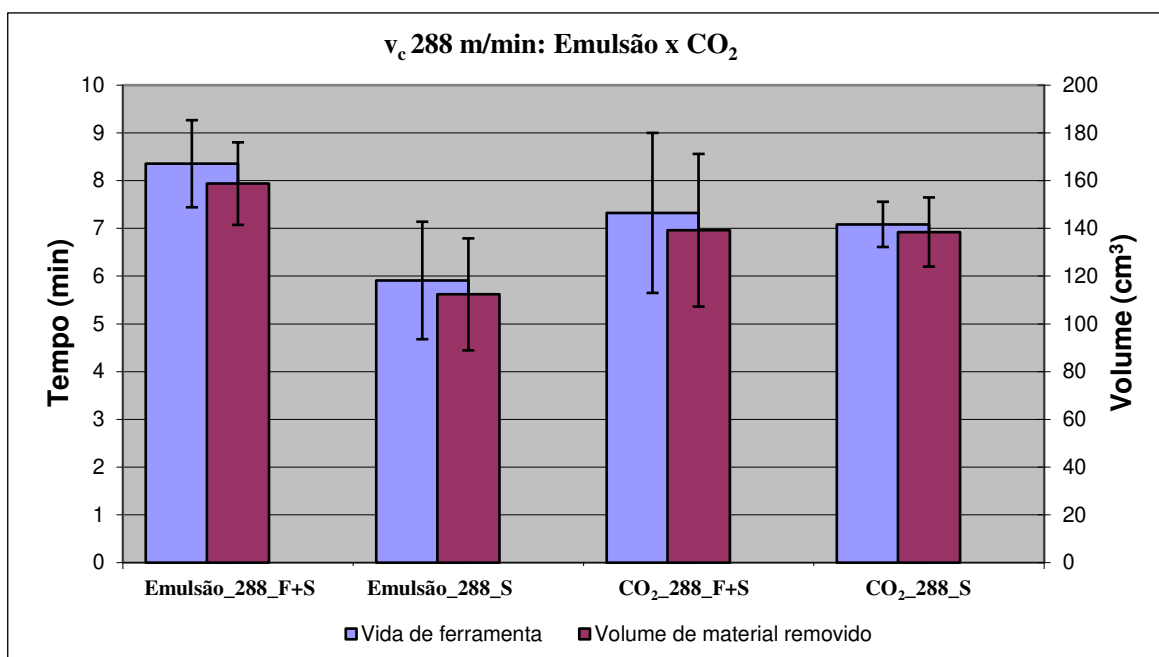


Figura 4.4 – Velocidade de 288 m/min, comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO_2 na superfície de saída da ferramenta.

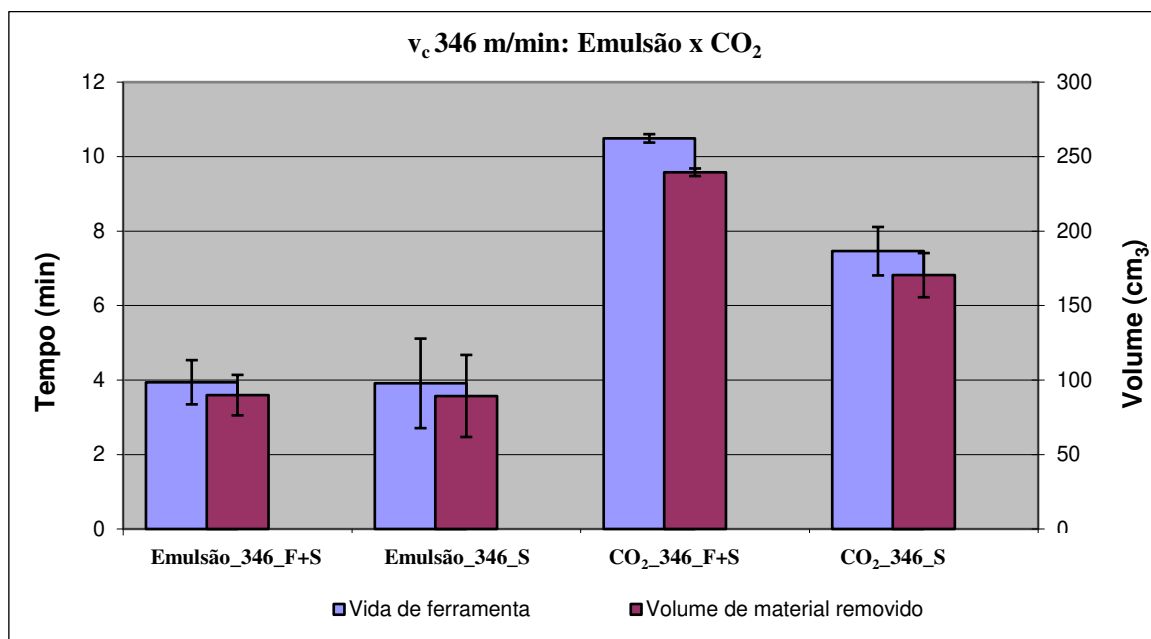


Figura 4.5 – Velocidade de 346 m/min, comparação da vida em tempo de corte e volume de cavaco removido com emulsão e CO_2 na superfície de saída da ferramenta.

É possível notar que em velocidade de corte menor (288 m/min), o sistema de refrigeração por folga e saída se torna mais efetivo, principalmente na refrigeração por emulsão. Já com velocidade maior (346 m/min) o sistema se torna mais efetivo principalmente com a refrigeração por CO₂.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, quando a velocidade de corte foi elevada para 346 m/min a temperatura aumentou, nesse caso a emulsão não conseguiu extrair de forma eficiente o calor. Por outro lado, a maior eficiência do CO₂ em extrair calor permitiu que a temperatura se aproximasse do patamar ótimo e assim a vida da ferramenta aumentou. A aplicação de CO₂ na superfície de saída apenas fez com que a temperatura caísse e se aproximasse do patamar ótimo, mas apenas com a maior eficiência da aplicação nas superfícies de folga e saída simultaneamente foi possível atingir tal patamar.

4.2 Evolução dos desgastes.

O desgaste gradual ocorre em duas regiões principais da ferramenta de corte: na superfície de saída e na de folga. Os dois principais tipos de desgastes da ferramenta são o desgaste de cratera e o de flanco.

As figuras 4.6 e 4.7 mostram a evolução dos desgastes da ferramenta de corte com velocidade de corte de 288 m/min e 346 m/min respectivamente. Com velocidade de corte de 288 m/min, os desgastes das ferramentas de corte usinadas com refrigeração por emulsão, independentemente do tipo de canal de direcionamento da refrigeração ou da vida da ferramenta, se mostraram mais estáveis durante a usinagem. Já com velocidade de corte de 346 m/min, a vida da ferramenta usinada com emulsão foi menor quando comparada com o processo de usinagem com CO₂, entretanto com exceção da usinagem com emulsão e direcionamento na superfície de saída, os demais desgastes evoluíram de forma constante ao longo do tempo.

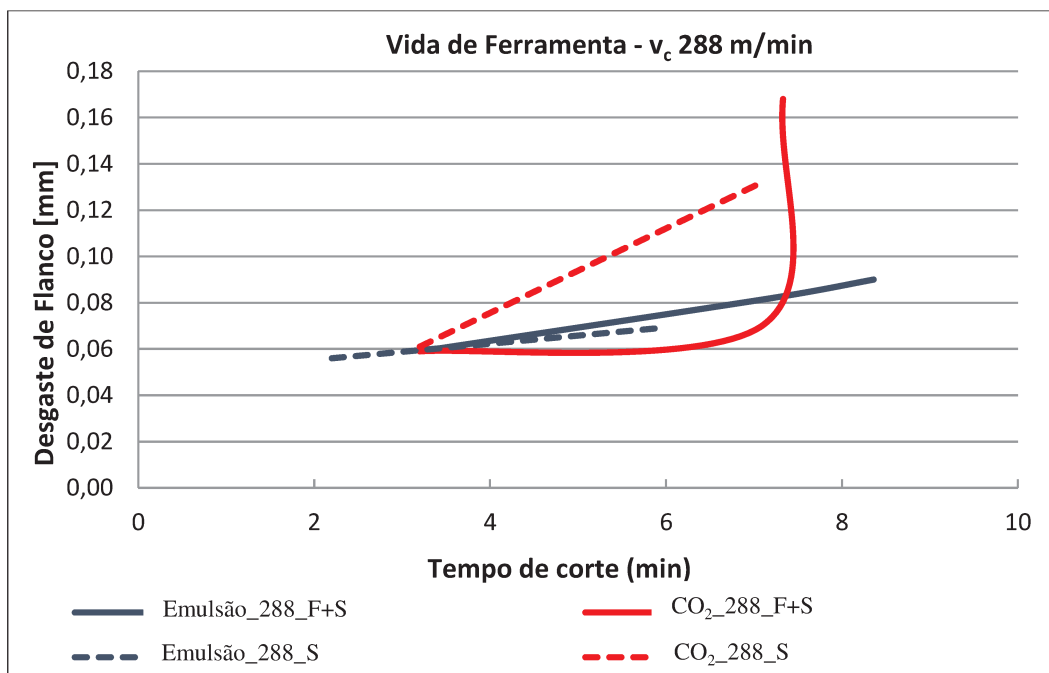


Figura 4.6 – Evolução dos desgastes da ferramenta com velocidade de corte de 288m/min.

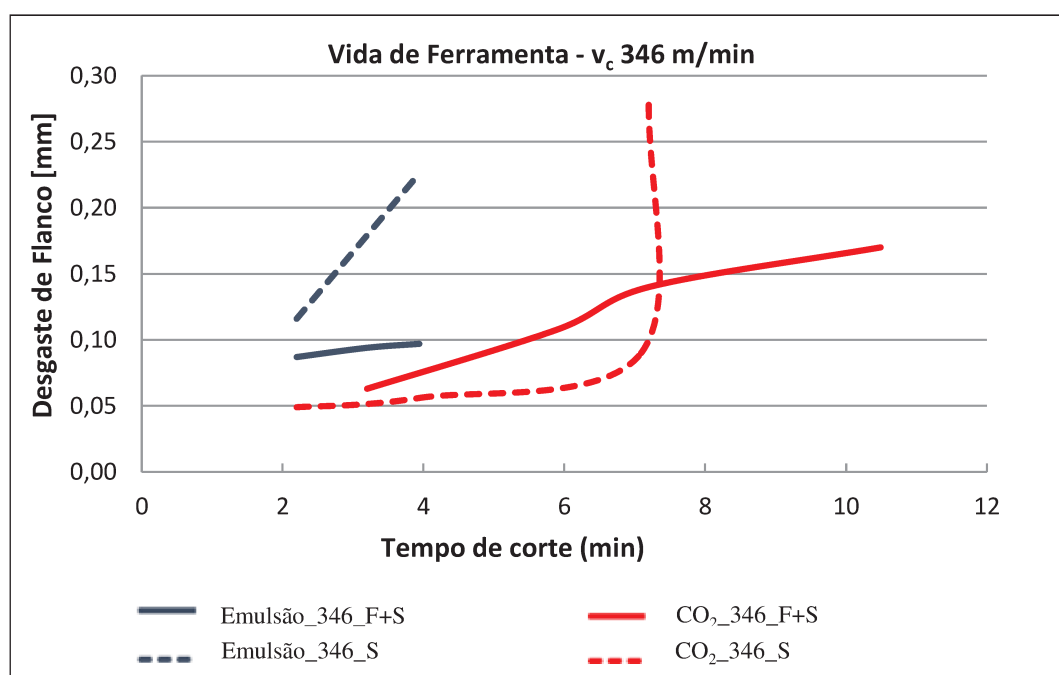
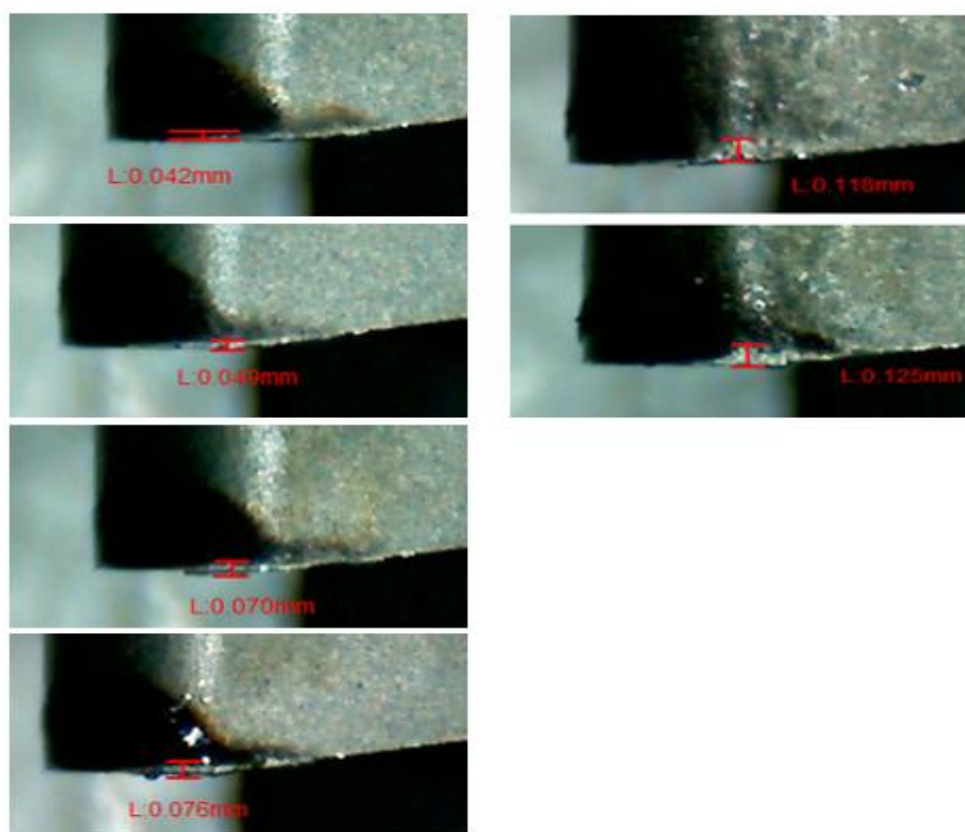


Figura 4.7 – Evolução dos desgastes da ferramenta com velocidade de corte de 346 m/min.

As figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram de forma macro a evolução dos desgastes de flanco da ferramenta de corte com velocidade de corte (288 m/min e 346 m/min) e canais de

direcionamento de refrigeração (folga-saída e somente saída) em análise. Estes mesmos desgastes serão discutidos posteriormente em um tópico específico, onde foi realizado a análise com microscopia eletrônica de varredura para que os desgastes fossem corretamente identificados com grande ampliação e que análises de EDS fossem realizadas, a fim de procurar entender quais foram os mecanismos de desgaste predominantes no processo.

A figura 4.8 (a) e (b), mostra o desgaste da ferramenta de corte pelo sistema de refrigeração por emulsão com o canal de direcionamento da refrigeração pela superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min respectivamente. Os desgastes evoluem de forma uniforme e isento de grandes imperfeições na aresta de corte principal da pastilha. As imagens estão com ampliação de 20x conforme medição realizada pelo microscópio digital.

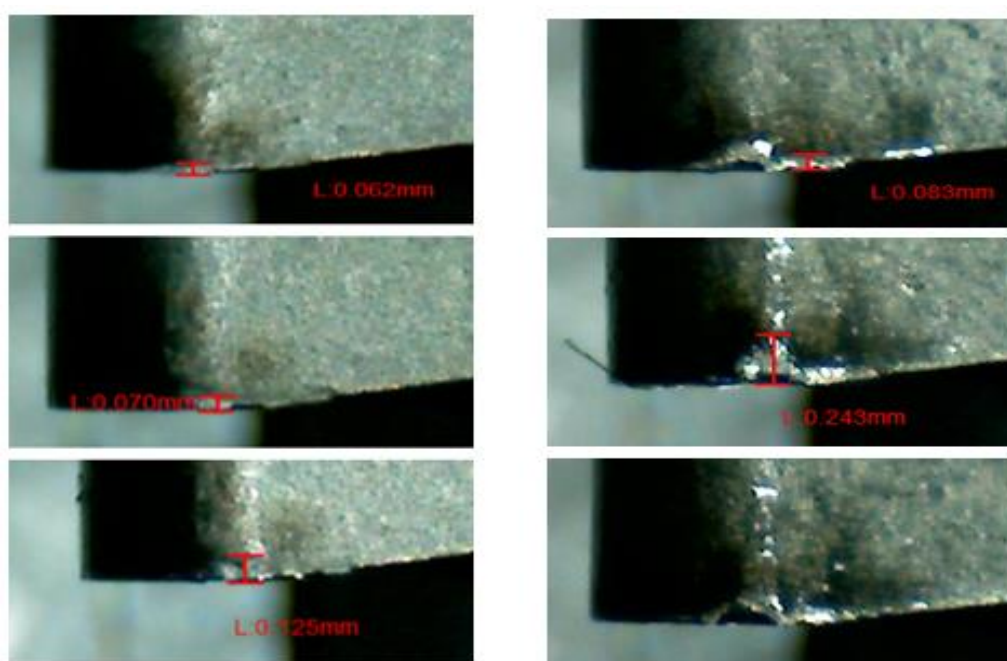


(a) Emulsão, F+S_{vc} 288 m/min

(b) Emulsão, F+S_{vc} 346 m/min

Figura 4.8 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.

Na figura 4.9 (a) e (b), com ampliação da imagem em 20x , é mostrado o desgaste da ferramenta de corte com refrigeração por CO₂ e canal de direcionamento da refrigeração pela superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min respectivamente. Nas amostras é possível verificar uma aresta de corte extremamente irregular contendo diversas lascas e desgaste de flanco acentuado. Isso ocorreu provavelmente pelo menor amolecimento térmico do material da peça, que fez o corte ser mais severo.



(a) CO₂, F+S_{vc} 288 m/min

(b) CO₂, F+S_{vc} 346 m/min

Figura 4.9 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por CO₂ e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de folga e saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.

A figura 4.10 (a) e (b), com ampliação da imagem em 20x mostra o desgaste da ferramenta de corte com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min respectivamente. É possível verificar uma aresta de corte com desenvolvimento do desgaste estável para a figura 4.10 (a) e na figura 4.10 (b) um desgaste de flanco já acentuado com pequenas lascas da ferramenta.

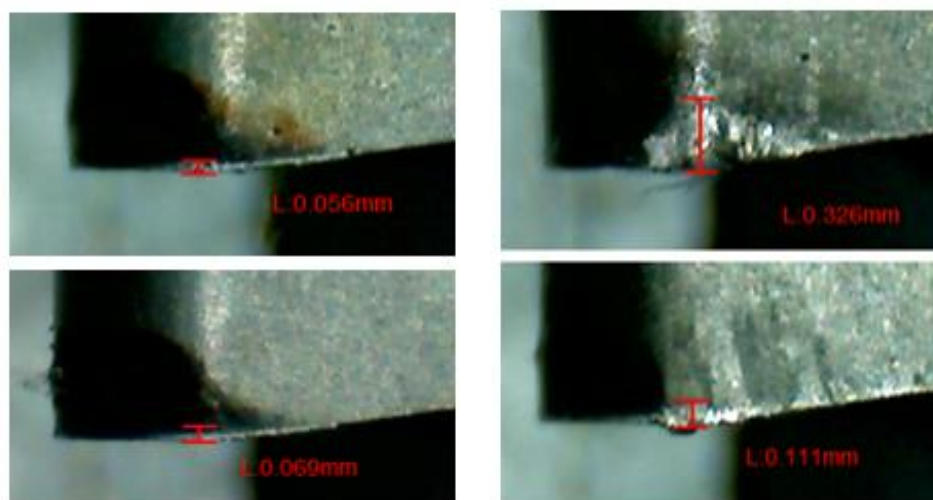
(a) Emulsão, S_{vc} 288 m/min(b) Emulsão, S_{vc} 346 m/min

Figura 4.10 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por emulsão e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.

A figura 4.11 (a) e (b), com ampliação da imagem em 20x mostra o desgaste da ferramenta de corte com refrigeração por CO_2 e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min respectivamente. É possível verificar micro lascas durante todo desenvolvimento dos desgastes até o fim da vida da ferramenta.

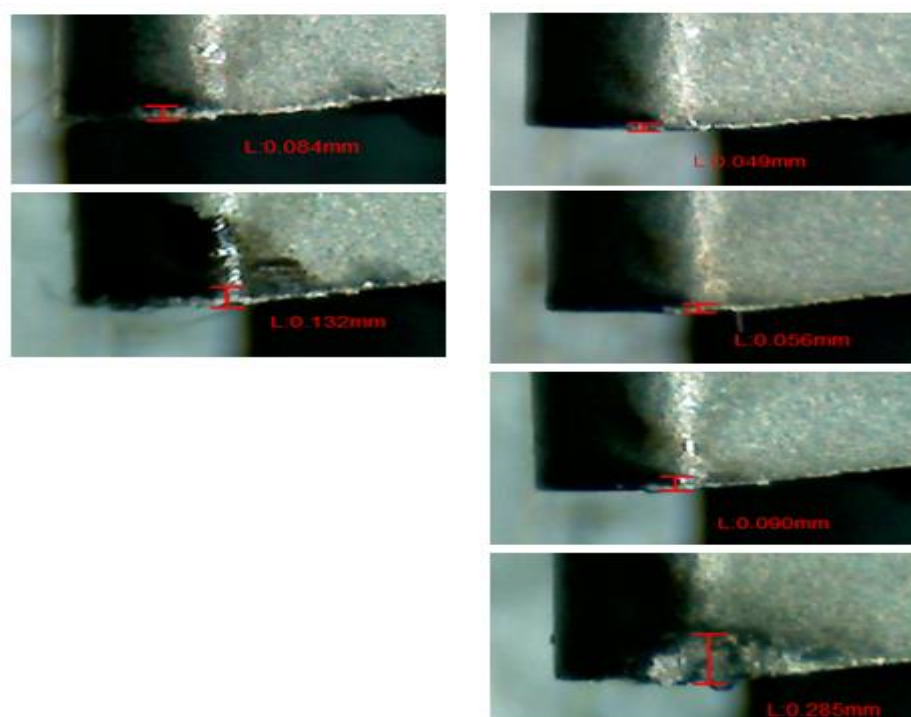
(a) CO₂, S_vc 288 m/min(b) CO₂, S_vc 346 m/min

Figura 4.11 (a) e (b) – Evolução dos desgastes de flanco com refrigeração por CO₂ e canal de direcionamento da refrigeração para superfície de saída com velocidades de corte de 288 e 346 m/min.

A análise das figuras 4.8 a 4.11 permite notar que ocorreu desgaste ao longo dos ensaios. O que variou foi a taxa de desgaste. Isso indica que a escolha da ferramenta e das condições de corte foram adequadas à análise de vida da ferramenta, haja vista que quando ocorrem avarias tal análise fica prejudicada dada a aleatoriedade de tal fenômeno.

4.3 Desenvolvimento da Rugosidade.

As operações de acabamento são importantes devido às características de tolerância de forma e posição (ajustes e encaixes), assim como a rugosidade geradas. Dentro da usinagem de componentes, principalmente da indústria de óleo e gás e geração de energia, a rugosidade também tem importância referente a resistência à corrosão do produto final. Rugosidades típicas dessa indústria estão entre 0,8 μm e 1,6 μm . É comum também encontrarmos na indústria uma grande variação dos desgastes das ferramentas de corte, não

existe uma constância no desgaste das ferramentas para operações de acabamento visto que outras variáveis influenciam a estabilidade do conjunto peça, máquina, ferramentas e fixação. As figuras 4.12 e 4.13 mostram a evolução da rugosidade da peça usinada em função da velocidade de corte, do tipo de fluido de refrigeração utilizado (emulsão ou CO_2) e os canais de direcionamento de refrigeração em análise (superfície de folga e saída e apenas superfície de saída).

Na figura 4.12 é mostrada a evolução da rugosidade da peça usinada com a ferramenta de corte contendo o sistema de refrigeração por emulsão e CO_2 com o canal de direcionamento da refrigeração pela superfície de folga e saída e apenas pela superfície de saída com velocidades de corte de 288 m/min. É possível verificar que no sistema de refrigeração folga-saída, as rugosidades iniciais foram mais baixas que as encontradas no sistema de refrigeração pelo canal de direcionamento apenas de saída.

Como mencionado anteriormente, quando a usinagem ocorre em velocidades menores (288 m/min nesse caso), as temperaturas atingidas são menores e, portanto, tanto a emulsão quanto o CO_2 mostraram-se eficientes na extração de calor. Assim, a rugosidade apresentou patamares similares e não houve predominância de um dos fluidos de corte ou mesmo da forma de aplicação.

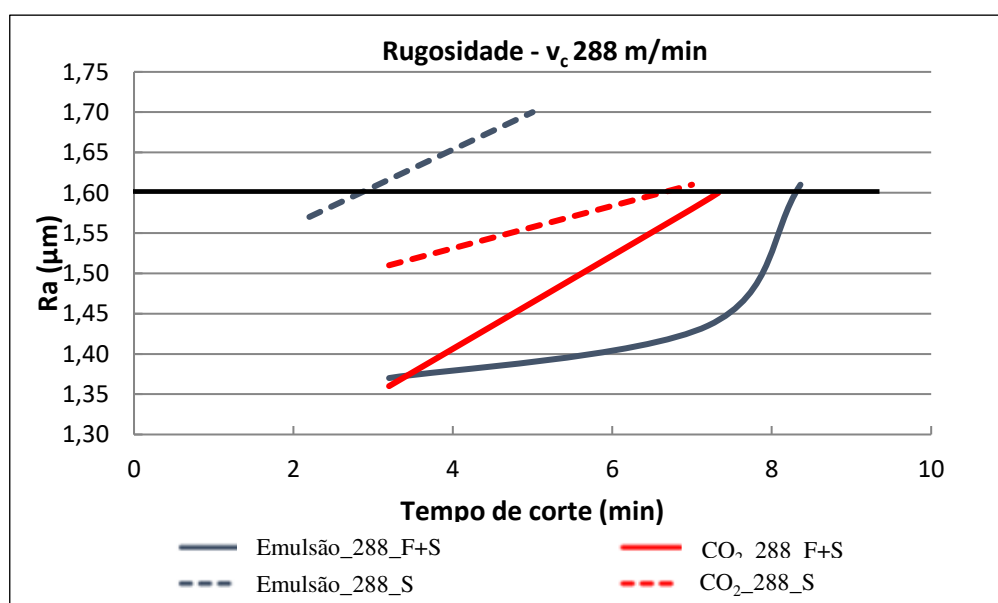


Figura 4.12 – Evolução da rugosidade da superfície usinada com velocidade de corte de 288 m/min.

Na figura 4.13 é mostrada a evolução da rugosidade da peça usinada com a ferramenta de corte contendo o sistema de refrigeração por emulsão e CO₂ com o canal de direcionamento da refrigeração para a superfície de folga e saída e apenas para superfície de saída com velocidade de corte de 346 m/min. O sistema de refrigeração por CO₂, independente do canal de refrigeração, se mostrou mais eficiente, gerando rugosidades menores desde o início da usinagem.

Neste caso, dada a maior velocidade de corte (346 m/min) e consequentemente maior temperatura da usinagem, a maior eficiência da refrigeração por CO₂ apresentou diferença também na rugosidade. Nota-se claramente duas regiões distintas de rugosidade, uma com a refrigeração por CO₂ e outra por emulsão. O direcionamento do fluido de corte também apresentou diferença, porém essa foi bem menos clara.

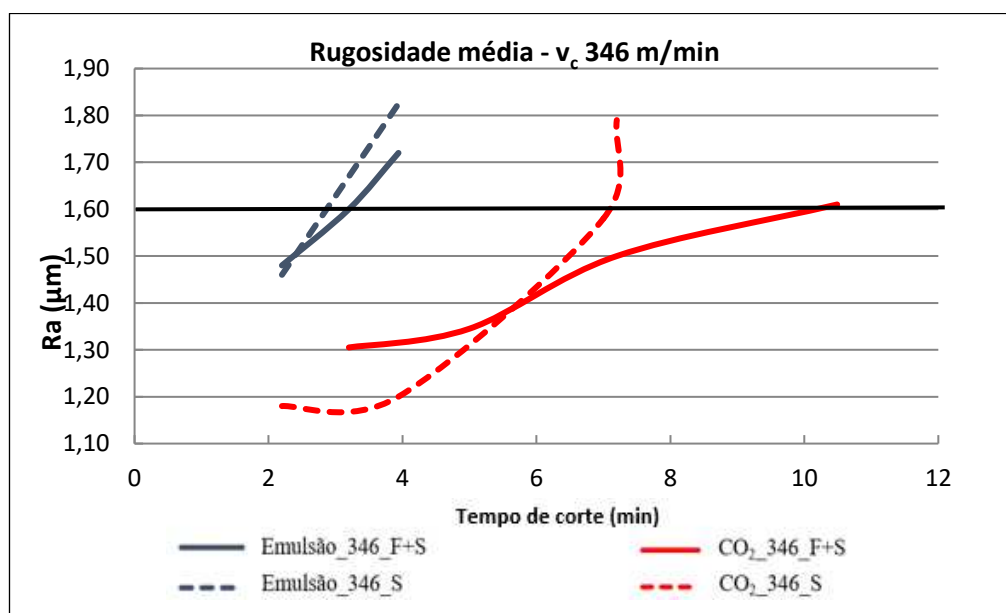


Figura 4.13 – Evolução da rugosidade da superfície usinada com velocidade de corte de 346 m/min.

4.4 Temperatura do sistema peça – cavaco – ferramenta.

Toda a energia mecânica associada à formação do cavaco é transformada em energia térmica (calor). Esse calor é gerado devido ao atrito do cavaco com a ferramenta e da ferramenta com a peça, bem como às deformações e cisalhamentos e é dissipado através do

cavaco, peça, ferramenta e fluido de corte. O calor na peça pode gerar dilatação térmica da mesma, dificultando assim obtenção de tolerâncias apertadas inerentes dos processos de acabamento, além de possíveis riscos à integridade superficial do material.

Os dados apresentados são referentes sempre ao último passe da vida da ferramenta e foram medidos com o termômetro laser digital (figura 3.5).

A figura 4.14 mostra a temperatura do sistema peça, cavaco e inserto (ferramenta de corte) variando sistema de refrigeração (emulsão e CO₂) e também os diferentes canais de direcionamento do fluido refrigerante (superfície de folga e saída e apenas saída). Velocidades de corte de 288 m/min e 346 m/min foram utilizados nos ensaios.

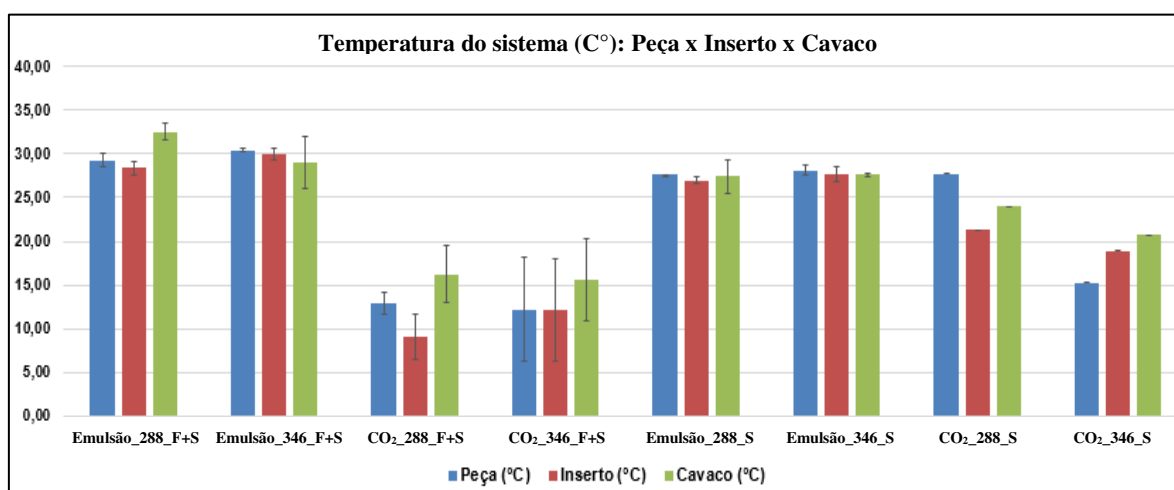


Figura 4.14 – Temperatura da peça, cavaco e inserto (ferramenta de corte) variando sistema de refrigeração (emulsão e CO₂) e também os diferentes canais de direcionamento do fluido de corte.

O gráfico de temperaturas corrobora a teoria de que há uma faixa de temperaturas ótima em termos de vida da ferramenta. Nesse caso deve-se avaliar apenas a temperatura da ferramenta. Nota-se que quando da usinagem com emulsão, as temperaturas tendem a ser maior, independente do direcionamento do fluido. Isso faz com que a temperatura esteja acima da região ótima. Com o CO₂, as temperaturas tendem a ser menores, porém também é possível notar que quando combinada com a velocidade de corte de 346 m/min e direcionamento para a superfície de saída e folga, o patamar é único. Quando com o mesmo direcionamento e velocidade de corte 288 m/min a temperatura é menor e quando com a

mesma velocidade e fluido direcionado à superfície de saída apenas, a temperatura é um pouco maior. De qualquer forma, esses foram os 3 melhores resultados em termos de vida.

Provavelmente a rugosidade da peça apresenta correlação com a temperatura da peça, mas essa precisaria ser medida ao longo do ensaio para se estabelecer essa relação. Ao final do ensaio (como os resultados apresentados) a influência do desgaste da ferramenta impossibilita a visualização dessa relação.

4.5. Torque nos eixos

O comportamento e ordem da grandeza dos esforços de corte no processo de usinagem é de fundamental importância, pois afetam diretamente a potência necessária para o corte (dimensionamento do motor das máquinas-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

A figura 4.15 mostra o torque durante a usinagem nos eixos X, Z e S (*spindle*) variando sistema de refrigeração (emulsão e CO₂), os canais de direcionamento do fluido refrigerante (superfície de folga e saída e apenas saída) e velocidade de corte de 288 m/min e 346 m/min.

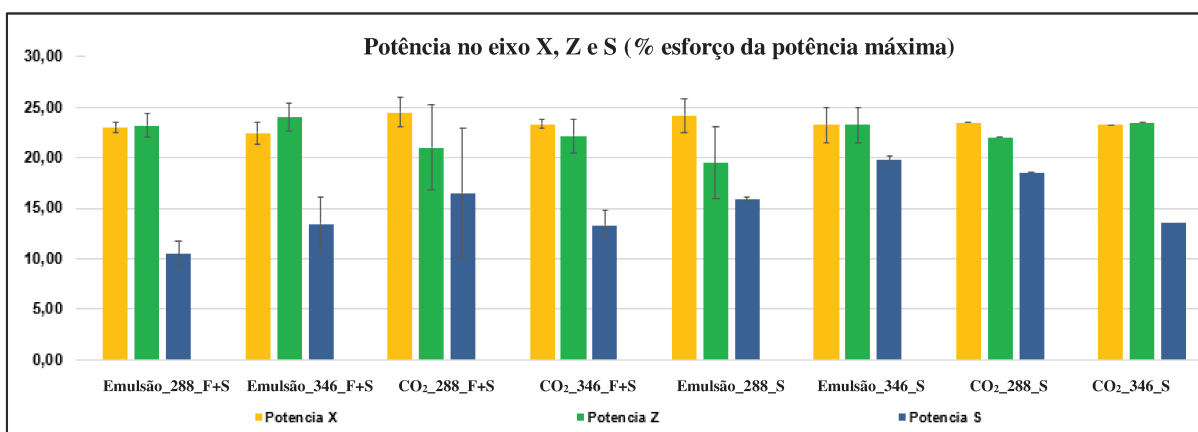


Figura 4.15 – Potência de corte nos eixos X, Z e S (*spindle*).

Para todos os ensaios realizados, o torque nos eixos X e Z se mostram muito próximos independente do fluido utilizado ou canal de direcionamento. Para os ensaios realizados com emulsão, independente do direcionamento do canal de refrigeração, houve um acréscimo de carregamento do eixo “S” (*spindle* da máquina) com o aumento da velocidade de corte de 288 m/min para 346 m/min.

Conforme mostrado na figura 4.14 referente às temperaturas do sistema peça, ferramenta e cavaco, as temperaturas com a utilização do CO₂ como fluido de corte são inferiores às temperaturas utilizadas com emulsão como fluido de corte, entretanto o esforço no eixo “S” se mostra em média superior quando comparado o mesmo sistema de refrigeração e velocidade de corte, isso se explica em função da menor temperatura da peça e maior dificuldade para o cisalhamento.

4.6 Formação do cavaco

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como desgastes das ferramentas, esforços de corte, calor gerado na usinagem, penetração do fluido de corte, etc. Além disso, outros aspectos são levados em conta, como por exemplo, econômico, segurança operacional e da qualidade das peças.

Conforme figura 4.16, o formato predominante dos cavacos nos testes realizados e suas respectivas réplicas são cavacos tipo emaranhados e tipo hélice, sendo planas, oblíquas e longas.

Nos ensaios 5 e 6, ambos com emulsão e canal de refrigeração apenas na superfície de saída da ferramenta, encontramos a formação de cavacos do tipo fita que é considerado o pior tipo de cavaco e deve ser evitado. Nos ensaios 4 e 8, ambos com CO₂ e velocidade de corte de 346 m/min encontramos a formação tipo hélice curta, que é o tipo de cavaco mais desejável em função de aspectos como segurança operacional, facilidade da remoção do mesmo do sistema máquina, peça e ferramenta de corte.

Os ensaios realizados com o direcionamento do fluido de corte (líquido ou gasoso) na superfície de folga e saída da ferramenta de corte, proporcionaram cavacos tipo hélice longa, apesar do comprimento, as mesmas apresentam uma formação mais adequada e próxima do tamanho de cavaco ideal (hélice curta ou espiral), quando comparado com os cavacos tipo hélice oblíqua ou emaranhados.

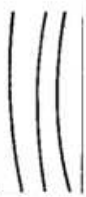





Forma do Cavaco				FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA
									
Teste	Fluido	Direcionamento fluido	vc						
1	Emulsão	Sup. de Folga - Saída	288						
2	Emulsão	Sup. de Folga - Saída	346						
3	CO2	Sup. de Folga - Saída	288						
4	CO2	Sup. de Folga - Saída	346						
5	Emulsão	Sup. de Saída	288						
6	Emulsão	Sup. de Saída	346						
7	CO2	Sup. de Saída	288						
8	CO2	Sup. de Saída	346						

Figura 4.16 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados

As figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, mostram a forma do cavaco em função do início, meio e final de vida útil do inserto utilizado no teste. As amostras de cavaco foram retiradas a cada 450 mm de comprimento usinado.

A figura 4.17, mostra a forma dos cavacos na usinagem com emulsão, canais de refrigeração direcionados para a superfície de folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min. Os cavacos têm formação básica entre emaranhados, cavacos em hélice plana e oblíqua e hélices longas. É possível observar que o desgaste da ferramenta faz com que a formação da hélice se tornasse menos definida, ou com raio de curvatura maior.



Figura 4.17 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.18, mostra a forma dos cavacos na usinagem com emulsão, canais de refrigeração pela superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min. Os cavacos

têm formação básica entre emaranhados, cavacos em hélice oblíqua e hélices longas. Novamente o desgaste da ferramenta torna o emaranhado de cavacos mais denso, o que é ruim para o processo como um todo.



Figura 4.18 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min.

A figura 4.19, mostra a forma dos cavacos na usinagem com CO_2 , canais de refrigeração direcionados para superfície folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min. Os cavacos têm formação básica entre emaranhados, cavacos em hélice plana e oblíqua e hélices longas. Apesar do tipo de cavacos ser similar aos gerados quando a emulsão foi usada, nota-se na figura 4.19 que mesmo desgastada a ferramenta continuou dando uma curvatura ao cavaco similar à ferramenta nova em parte do tempo.

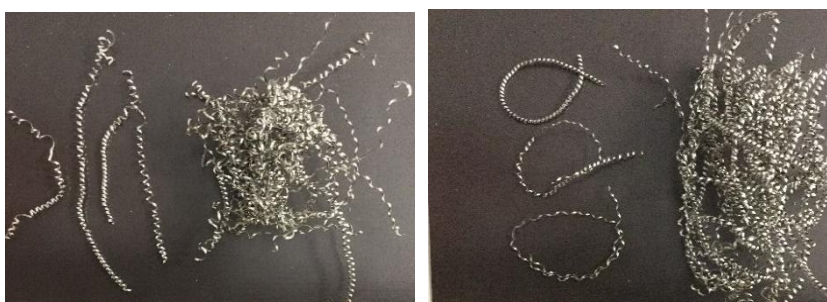


Figura 4.19 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO_2 , canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.20, mostra a forma dos cavacos na usinagem com CO_2 , canais de refrigeração direcionados para superfície folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min. Os cavacos têm formação básica entre emaranhados, cavacos em hélice plana e oblíqua, hélices longas e curtas. Aqui foi a primeira situação em que hélices curtas foram formadas.

Dentre os tipos de cavacos gerados, esse é o melhor. Nota-se que essa foi a condição que gerou maior vida da ferramenta. Como a vida da ferramenta foi definida pela rugosidade, pode ter ocorrido um menor contato dos cavacos com a superfície usinada.



Figura 4.20 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO₂, canais de refrigeração para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min.

A figura 4.21, mostra a forma dos cavacos na usinagem com emulsão, canais de refrigeração direcionados para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min. Os cavacos têm formação básica entre pequenas fitas e emaranhados, cavacos em hélice oblíqua e hélices longas.



Figura 4.21 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.22, mostra a forma dos cavacos na usinagem com emulsão, canais de refrigeração direcionados para superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min. Os cavacos têm formação básica entre longas fitas e emaranhados, e também cavacos em hélice oblíqua.



Figura 4.22 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min.

A figura 4.23, mostra a forma dos cavacos na usinagem com CO₂, canais de refrigeração direcionados para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min. Os cavacos têm formação básica de emaranhados e cavacos em hélice plana e oblíqua.



Figura 4.23 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO₂, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.24, mostra a forma dos cavacos na usinagem com CO₂, canais de refrigeração pela superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min. Os cavacos têm formação básica de emaranhados e cavacos em hélice plana e oblíqua e hélices curtas. Esse é o segundo caso em que hélices curtas foram formadas. Novamente uma boa vida da ferramenta de corte foi conseguida.



Figura 4.24 - Forma dos cavacos nos ensaios realizados com CO₂, canais de refrigeração para superfície de saída e velocidade de corte de 346 m/min.

As figuras 4.25 e 4.26 mostram a formação do cavaco durante a usinagem com emulsão e CO₂ e sistemas de canais de direcionamento do fluido de corte para superfície de saída. De acordo com as figuras é nítido a diferença da formação do cavaco entre os dois tipos de fluido de corte utilizados. Para a emulsão é utilizado a pressão da máquina que é de 8 bar, já com o CO₂, a pressão utilizada no sistema foi de 20 Bar (regulagem no cilindro). Apenas na usinagem com CO₂ é possível verificar cavacos com a formação mais próxima do ideal para a usinagem, que é o cavaco tipo hélice curta. Já na usinagem com emulsão é possível observar o cavaco tipo fita, que é o pior tipo de cavaco para a usinagem. Nas figuras 4.25 e 4.26 pode se observar que com o uso de CO₂ não ocorre acúmulo de cavaco na placa e nem sobre a peça. Isso torna a usinagem mais segura, para a ferramenta, para a peça e para o operador.



Figura 4.25 - Formação dos cavacos nos ensaios realizados com emulsão e canais de refrigeração para superfície de saída.

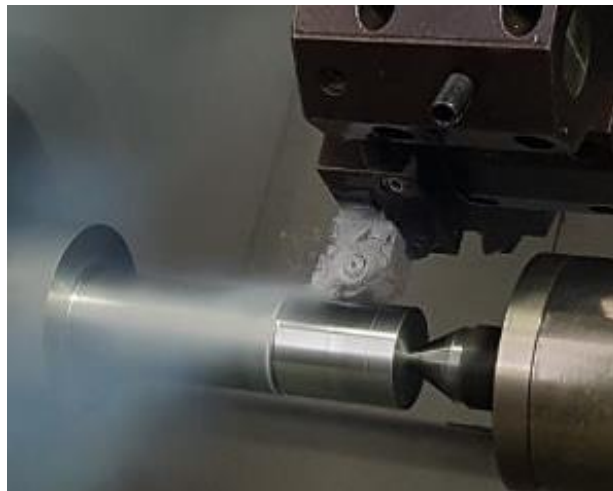


Figura 4.26- Formação dos cavacos nos ensaios realizados com CO₂ e canais de refrigeração para superfície de saída.

4.7 Análise do desempenho dos revestimentos nas pastilhas de metal duro

As pastilhas foram submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por microsonda (EDS) com o objetivo de se estudar o comportamento (análise do tipo e mecanismo de desgaste) da ferramenta de corte sob os dois tipos de fluido de corte utilizado (emulsão e CO₂) e também dos diferentes canais de refrigeração utilizados (folga e saída e apenas saída).

A figura 4.27 mostra um resumo da análise realizada em função do ensaio, mecanismos de desgastes e tipos de desgastes e avarias encontrados na ferramenta de metal duro. Conforme tabela, é possível encontrar os principais elementos químicos do material usinado e também do substrato e cobertura da ferramenta de corte de metal duro. A legenda “ferramenta”, indica o quanto de material da ferramenta de corte foi encontrado na análise (exemplo, para a craterização, desgaste de flanco). A legenda “peça”, é o indicativo do quanto de material da peça foi encontrado na superfície da ferramenta de corte (exemplo, aresta postiça de corte). A legenda “indicador” designa a magnitude sobre cada tipo de desgaste ou avaria (sob análise do autor desse trabalho). Esta análise facilita a visualização como um todo dos ensaios realizados, possibilitando uma rápida leitura sobre os mecanismos de desgastes apresentados nos diferentes ensaios.




<p>Principais elementos químicos encontrados na superfície de folga e saída, os mecanismos de desgastes predominantemente encontrados e os tipos de desgastes e avarias na ferramenta de corte (ponto de vista prático).</p> <p>Composição Química da Peça: C:0,03% / Si: 1,0% / Mn:2,0% / Cr:22% / Ni: 5,5% / Mo: 3,2% / N: 0,18%</p> <p>Composição Química da Ferramenta de corte (Cobertura e substrato): Cobertura: Al + TiAlN + Al2O3 Metal Duro: W + Co + Nb + TiC + Tac</p>						<div><div>Ferramenta</div><div>Peça</div><div>Indicador</div></div>	<div><div>Ferramenta</div><div>Peça</div><div>Indicador</div></div>	<div><div>Ferramenta</div><div>Peça</div><div>Indicador</div></div>	<div><div>Ferramenta</div><div>Peça</div><div>Indicador</div></div>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
						<p>Superfície de Folga (Material predominante na aresta de corte)</p> <p>Superfície de Saída (Material predominante na aresta de corte)</p> <p>Mecanismo de desgaste: Aderência</p> <p>Mecanismo de desgaste: Abrasão mecânica</p> <p>Desgaste de flanco uniforme (abrasão)</p> <p>Superfície de saída (ponto da quebra do cavaco) Craterização (difusão) ou APC (aderência)</p> <p>Lascamento (possível abrasão da APC)</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Teste	Fluido	Direcionamento fluido	VC (m/min)	Vida (min)	Vb (mm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														

Figura 4.27- Resumo dos ensaios realizados referente aos mecanismos de desgastes e tipos de desgastes e avarias.

4.7.1 Análise da superfície de folga e saída da ferramenta de corte.

As figuras de 4.28 a 4.60 mostram os mecanismos de desgastes da ferramenta de corte quando submetido à análise por microscopia eletrônica de varredura e por microsonda (EDS) com o objetivo de se estudar o comportamento do substrato do metal duro e cobertura em função dos diferentes fluidos de corte e canais de refrigeração.

As figuras 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 mostram os mecanismos de desgaste do ensaio nº 1, com o fluido de corte por emulsão, canal de direcionamento do fluido para superfície de folga e saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 288 m/min. Na figura 4.28 é possível notar que a aresta de corte está íntegra, isso se deu porque o critério de fim de vida estabelecido para os ensaios foi baseado na rugosidade da peça.

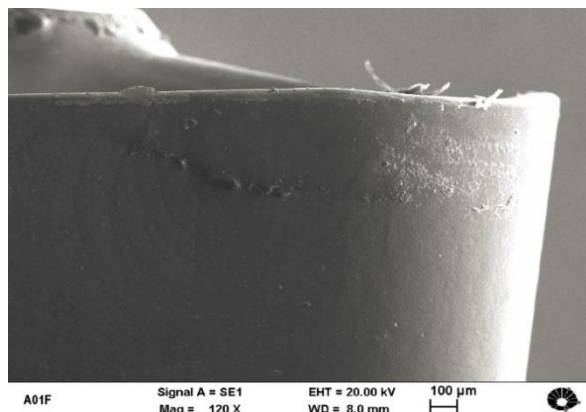


Figura 4.28 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.29 mostra uma ampliação da figura 4.28. Nela é possível verificar no ponto de análise 1, uma grande quantidade de material da peça aderido na aresta principal de corte da ferramenta. Já no ponto 2, é possível encontrar apenas elementos da cobertura da ferramenta de corte.

É possível notar também que o desgaste de flanco é relativamente baixo, sendo uma possível formação da aresta postiça de corte um fator determinante para a redução da vida da ferramenta em função do baixo acabamento superficial gerado na peça. Merece destaque também o fato de que a adesão de material se deu no ponto próximo à profundidade de corte, provável precursor de um desgaste de entalhe.

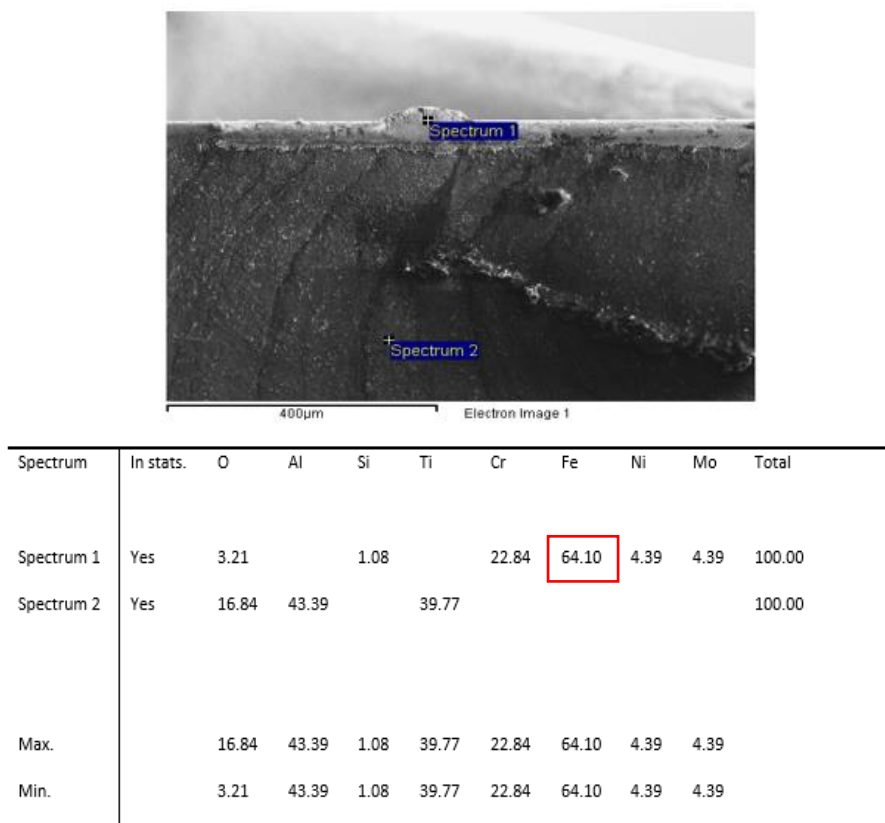


Figura 4.29 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Na superfície de saída da ferramenta de corte, mostrada nas figuras 4.30, 4.31 e 4.32, é possível verificar uma grande quantidade de material aderido na região do quebra cavaco. Além disso, ficou evidente na figura 4.30 pontos de desgaste nas extremidades do contato ferramenta peça. Assim, foi feita uma ampliação e análise de EDS dessa região em particular. Tal ampliação é mostrada na figura 4.31.

Para este ensaio, não encontramos lascas, quebras, trincas ou craterização na ferramenta de corte.

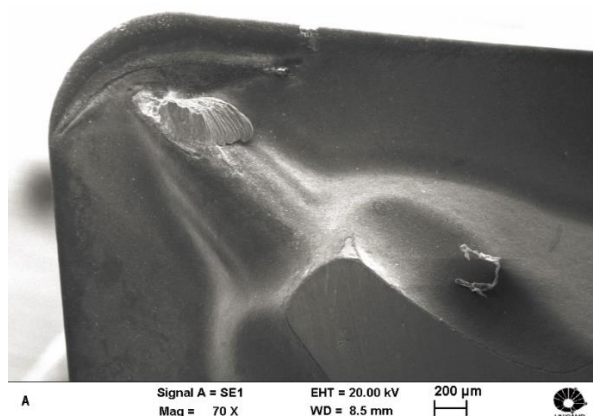
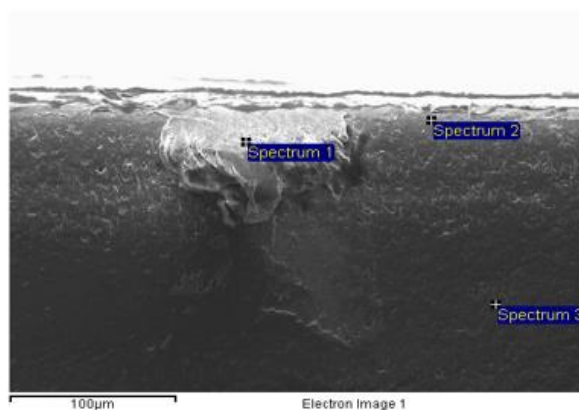


Figura 4.30 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Na figura 4.31, no ponto de análise 1 pode ser observada uma grande quantidade de material da peça aderido na aresta principal de corte da ferramenta. Já no ponto 2 e 3, encontramos basicamente elementos da cobertura da ferramenta de corte com um pouco de material da peça aderido no ponto 2.



Spectrum	In stats.	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes				0.63		23.17	67.40	5.08	3.72	100.00
Spectrum 2	Yes	15.84	15.15	27.56	0.22	32.53	2.67	5.66	0.37		100.00
Spectrum 3	Yes	22.10	8.59	26.17		40.65	0.84	1.65			100.00
Max.		22.10	15.15	27.56	0.63	40.65	23.17	67.40	5.08	3.72	
Min.		15.84	8.59	26.17	0.22	32.53	0.84	1.65	0.37	3.72	

Figura 4.31 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

A figura 4.32 confirma que o material sobre a superfície de saída é proveniente da peça-cavaco. Essa adesão mostra que o material apresenta tal comportamento, já que a região do quebra cavaco entra em contato com o cavaco já formado, ou seja, apenas muda a direção de escoamento desse. Mesmo nessa situação, em que a pressão sobre o quebra cavaco não é tão intensa quanto onde ocorre a formação de cavaco propriamente dita, ocorre adesão de material.

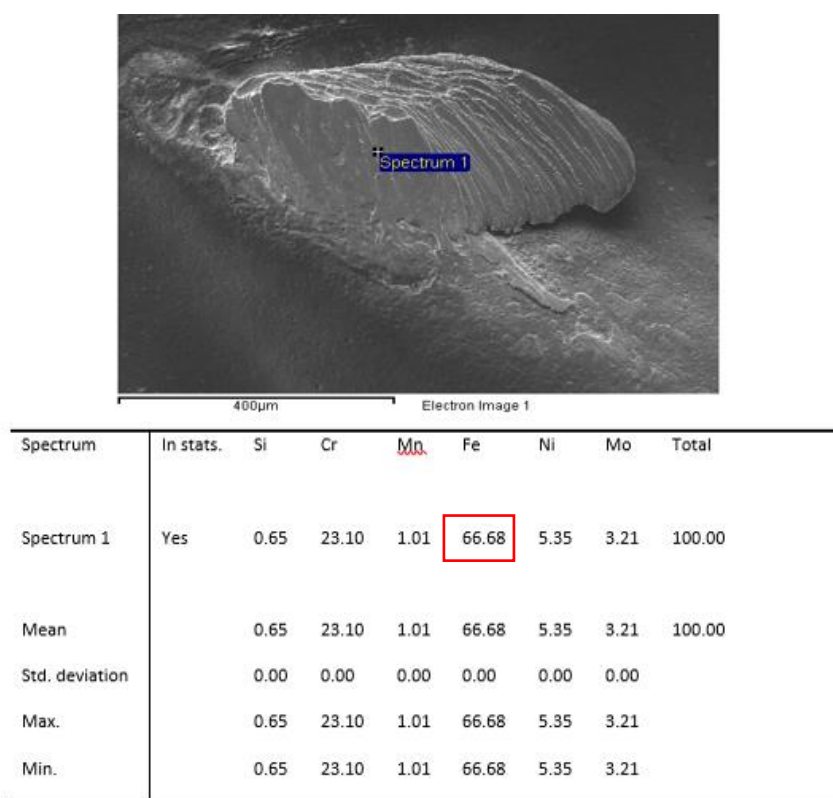


Figura 4.32– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Nas figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37 são mostradas as superfícies das ferramentas após a usinagem do ensaio n° 2, com o fluido de corte por emulsão, canal de direcionamento do fluido para superfície de folga e saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 346 m/min

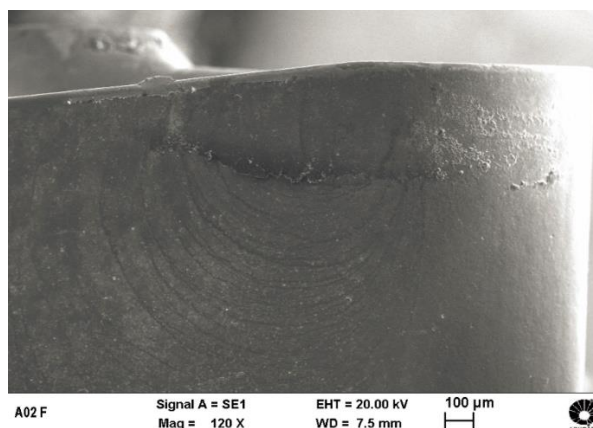


Figura 4.33 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Conforme figura 4.34, é possível verificar no ponto de análise 1 e 2, uma grande quantidade de material da peça aderido na aresta principal de corte da ferramenta. Já no ponto 3, é possível encontrar apenas elementos da cobertura da ferramenta de corte. É possível notar também que o desgaste de flanco é relativamente baixo, sendo a formação da aresta postiça de corte um fator determinante para o final da vida ferramenta de corte.

Os resultados apresentados aqui mostram que o fato de se trabalhar com velocidade de corte maior (346 m/min) não alterou o tipo e nem o mecanismo de desgaste. Apenas a taxa de desgaste foi maior quando da utilização da maior velocidade, proporcionando uma vida da ferramenta menor.

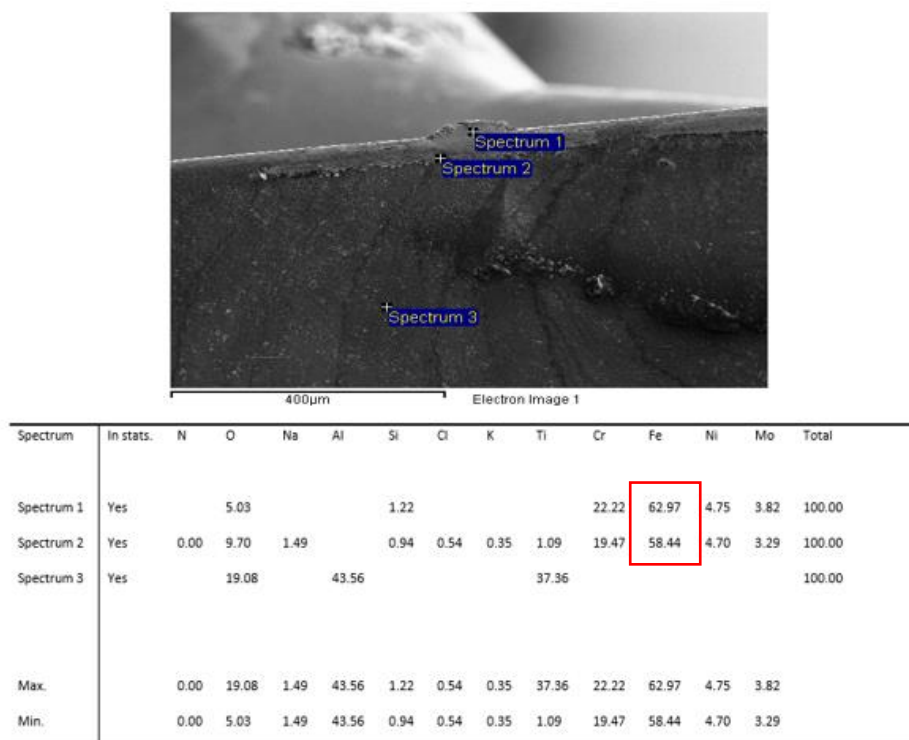


Figura 4.34 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min

Na superfície de saída da ferramenta de corte, conforme figuras 4.35, 4.36 e 4.37, é possível verificar uma grande quantidade de material aderido na ferramenta de corte. Na figura 4.36, no ponto de análise 1 é encontrado uma grande quantidade de material da peça aderido na aresta principal de corte da ferramenta. Já no ponto 2 encontramos elementos da cobertura da ferramenta de corte e material da peça aderido. Na figura 4.37, o ponto 1 mostra o fio de corte da aresta com lascas (devido a presença de tungstênio, que é elemento base do metal duro) e no ponto 2 uma leve aderência de material da peça. No ponto 3 é encontrado basicamente elementos da cobertura da pastilha.

Nota-se na figura 4.35 que além do quebra cavaco a superfície de saída da ferramenta apresenta vários pontos nos quais o revestimento foi removido. Isso provavelmente se deu porque o cavaco ficou emaranhado em torno da peça e da placa do torno.

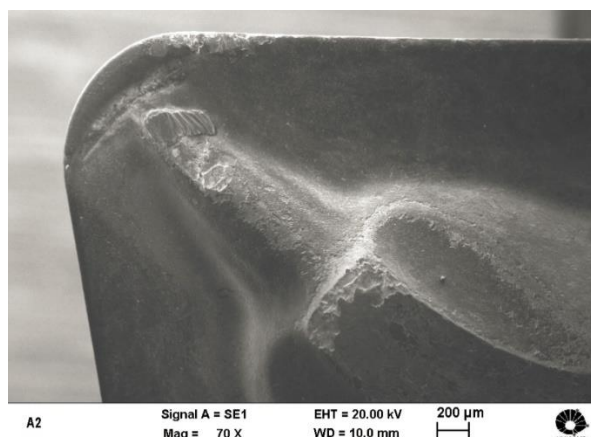


Figura 4.35 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

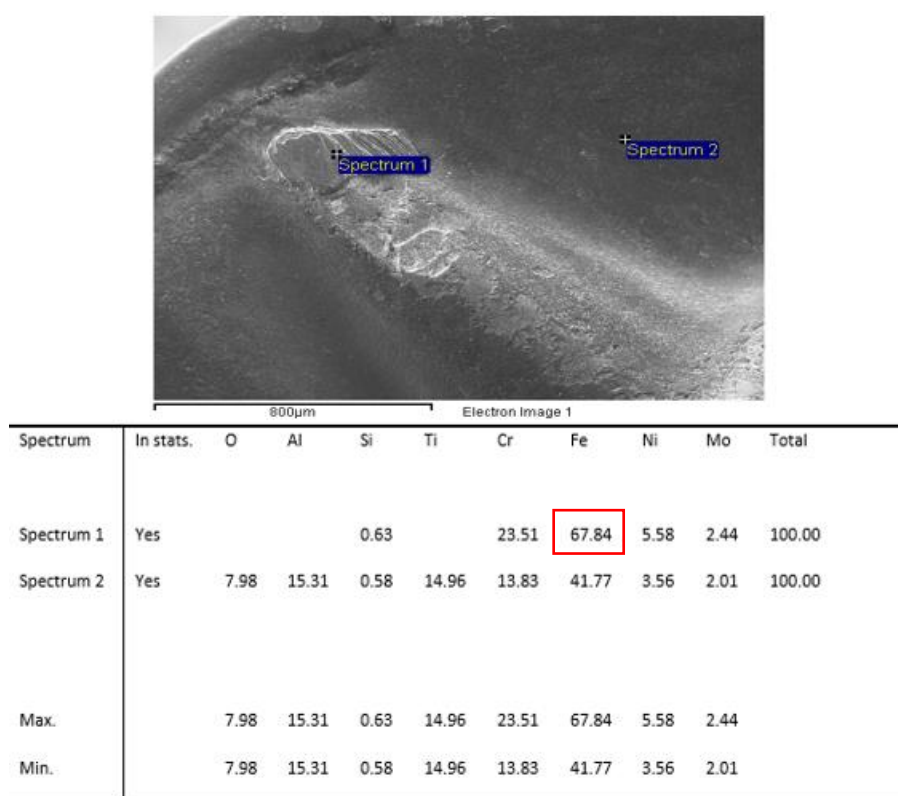


Figura 4.36 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Na figura 4.37 é mostrado que o desgaste na superfície de saída com velocidade maior também foi maior, como era esperado. Por outro lado, a ferramenta trabalhando com velocidade de corte maior conseguiu rugosidade da peça em níveis baixos mesmo com esse maior desgaste.

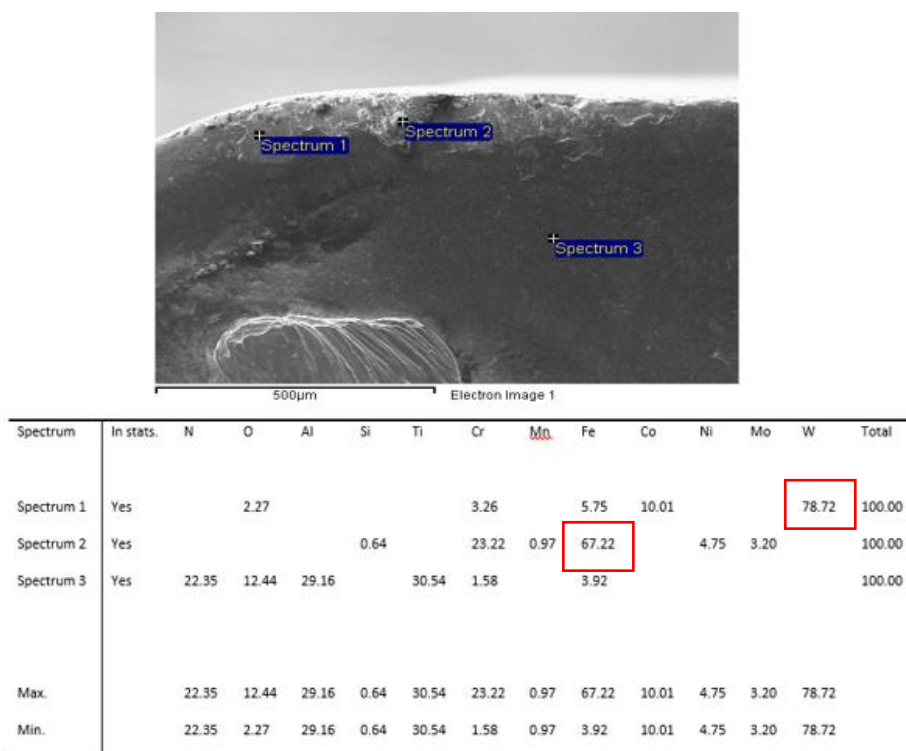


Figura 4.37 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Além disso, diferentemente do ensaio 1, no ensaio 2 com velocidades de cortes maior, é possível encontrar pequenas lascas na aresta de corte da ferramenta. Esse lascamento junto com a aresta postiça de corte (material da peça aderido na ferramenta) é um dos fatores determinantes o final da vida da ferramenta e uma vida inferior ao ensaio 1 (8,35 min do ensaio n°1 x 3,94 min do ensaio n° 2).

As figuras 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42 mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 3, com o fluido de corte CO₂, canal de direcionamento do fluido pela superfície de folga e saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 288 m/min

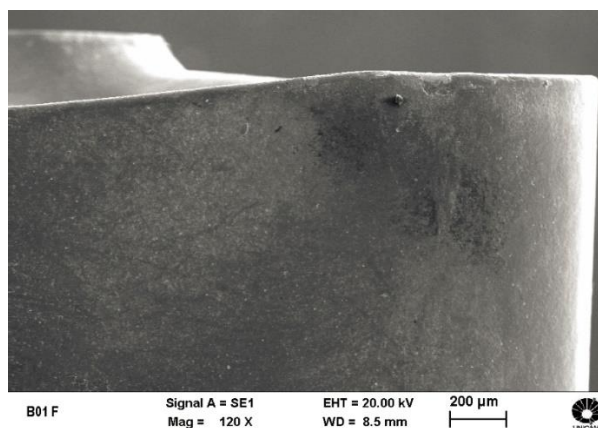


Figura 4.38 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Observando-se a figura 4.38 nota-se que em comparação com a figura 4.28 o desgaste apresenta-se mais pronunciado, porém numa região onde ocorre o contato ferramenta peça. Lembrando que com emulsão ocorria adesão no final desse contato. Conforme figura 4.39, é possível verificar no ponto de análise 1 uma pequena lasca ou cratera, expondo o substrato do metal duro. No ponto 2 é visto adesão do material e no ponto 3 é encontrado apenas elementos químicos pertencentes à cobertura do material.

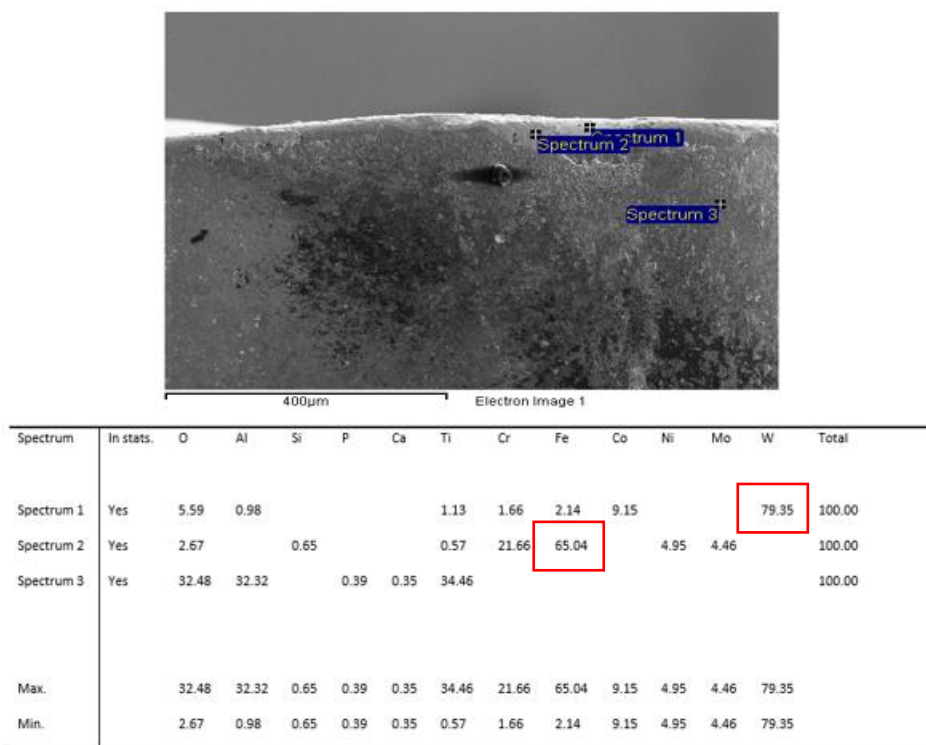


Figura 4.39 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Na superfície de saída da ferramenta de corte (região da quebra o cavaco), conforme figuras 4.40 e 4.41, é possível verificar craterização da ferramenta de corte aliada com um pequeno percentual de material da peça aderido na ferramenta. Na figura 4.41, no ponto de análise 1 é evidenciado o mecanismo de desgaste por abrasão e um pouco de material aderido muito próximo a essa cratera. Nota-se que esse desgaste se dá no ponto em que o cavaco é forçado a se curvar e não onde ocorre a formação de cavaco propriamente dita.

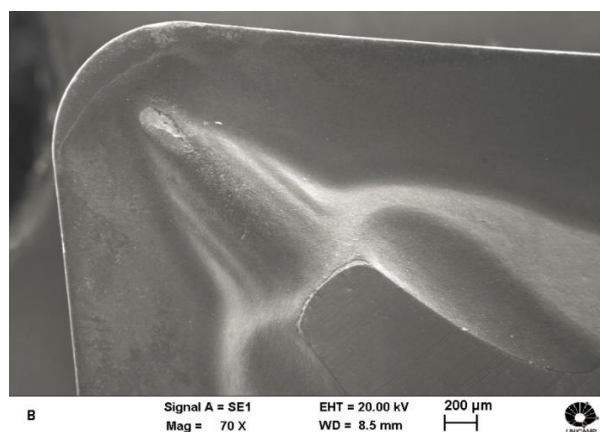
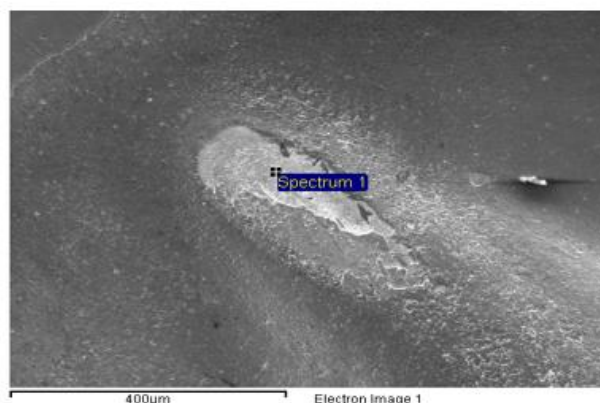


Figura 4.40 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.



Spectrum	In stats.	O	Cr	Fe	Co	W	Total
Spectrum 1	Yes	6.90	3.05	4.56	5.04	80.44	100.00
Mean		6.90	3.05	4.56	5.04	80.44	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		6.90	3.05	4.56	5.04	80.44	
Min.		6.90	3.05	4.56	5.04	80.44	

Figura 4.41– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Na figura 4.42, próximo a aresta de corte, no ponto 1 é evidenciado uma lasca ou cratera. Para os pontos 2 e 3 temos a presença de elementos químicos da cobertura da ferramenta de corte.

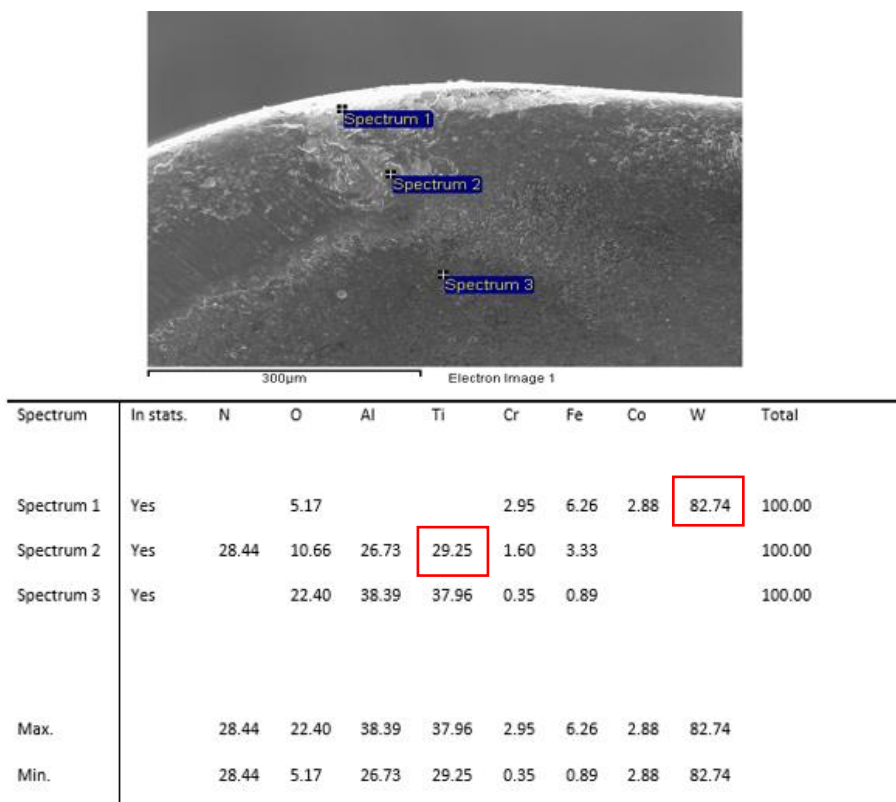


Figura 4.42– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 288 m/min.

As figuras 4.43, 4.44, e 4.45 mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 4, com o fluido de corte por CO₂, canal de direcionamento do fluido para superfície de folga e saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 346 m/min.

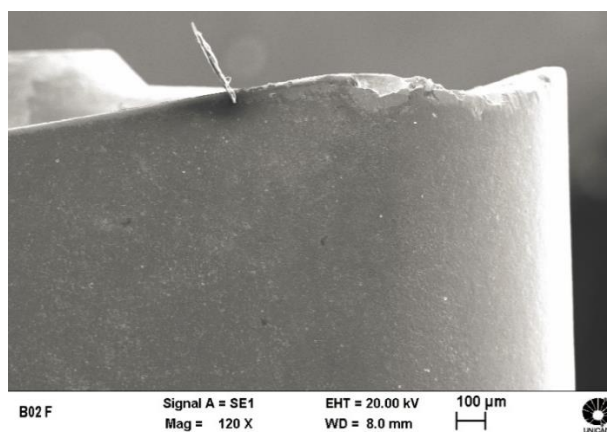


Figura 4.43 Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Na figura 4.43 é mostrada a superfície de folga da ferramenta em fim de vida nos ensaios feitos com CO₂, direcionamento do fluido para superfícies de folga e saída e velocidade de 346 m/min. Nota-se que o desgaste foi bastante significativo, haja vista que a aresta de corte está bastante danificada, ao contrário do que vinha ocorrendo até aqui.

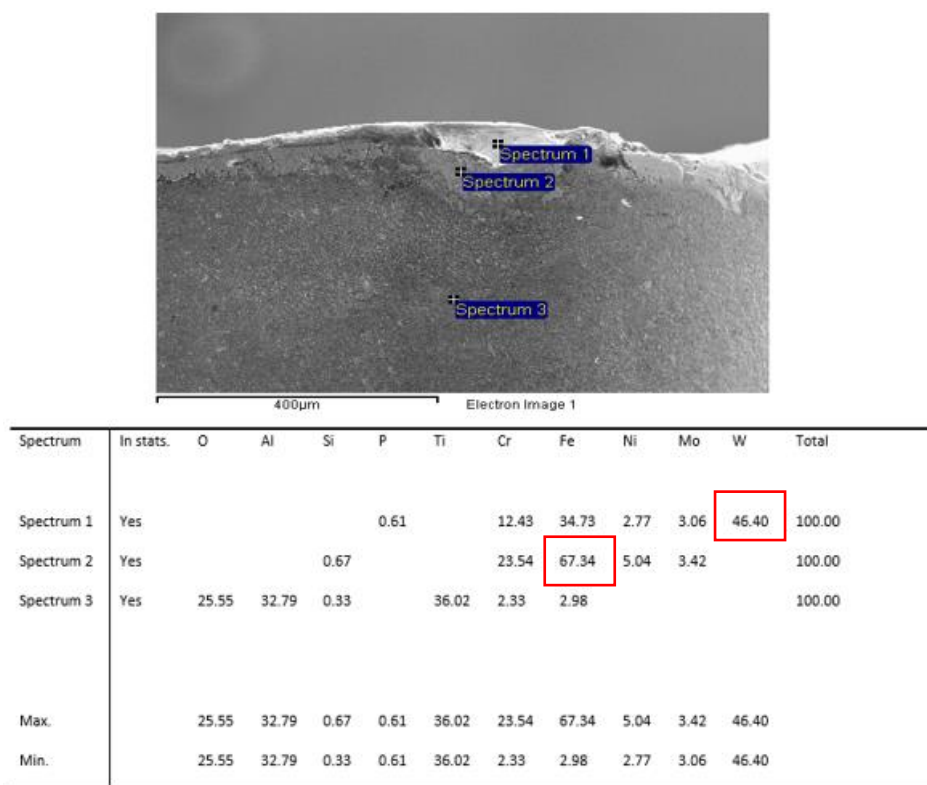


Figura 4.44– Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída,.

Conforme figura 4.43 e 4,44, é possível verificar lascas ou crateras ao longo do fio da aresta de corte (ponto 1) e um pouco de material da peça aderido na aresta (ponto 2). No ponto 3 é possível encontrar elementos do material da cobertura.

Na superfície de saída da ferramenta, figura 4.43, nos pontos 1 e 4 encontramos tungstênio que é o substrato da ferramenta de corte (metal duro) e assim definimos como desgaste por craterização o desgaste, nos pontos 2 e 3 encontramos material da peça aderido na ferramenta. No ponto 5 é possível encontrar os elementos químicos da cobertura da ferramenta de corte.

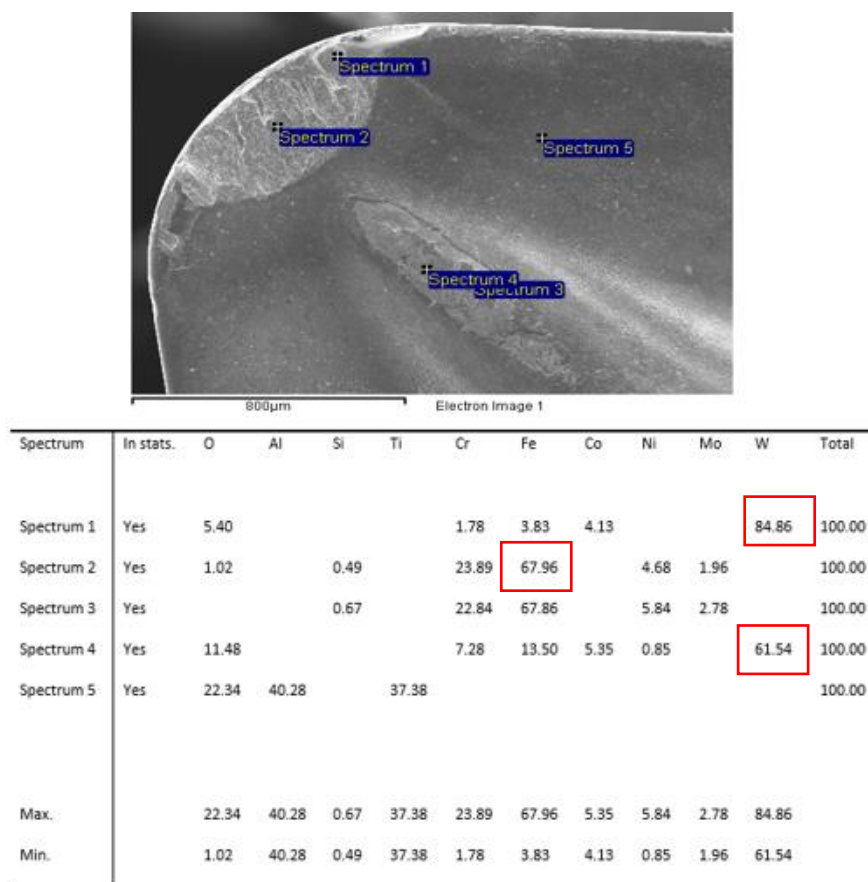


Figura 4.45– Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, folga – saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Na figura 4.45 é possível ver a extensão do desgaste da ferramenta na superfície de saída. Ao comparar-se a figura 4.45 com a figura 4.35 nota-se que a primeira apresenta um desgaste muito maior. Por outro lado, mesmo com o maior desgaste a rugosidade obtida nos ensaios com CO₂ direcionado para superfície de folga e saída e velocidade de corte de 346 m/min manteve-se baixa por mais tempo. Isso pode ter ocorrido pela temperatura atingida pela peça com a velocidade de 346 m/min associado com a aplicação de CO₂ na superfície de saída e folga.

Como comentado quando da discussão de vida de ferramenta, deve haver um patamar ótimo de temperatura para a usinagem do aço inoxidável duplex. Tal patamar de temperatura está relacionado à rugosidade, já que esta foi o parâmetro de medida da vida da ferramenta. Assim, temperaturas acima desse patamar provavelmente tornam o material excessivamente dúctil, prejudicando a rugosidade pela deformação excessiva da superfície. Por outro lado, temperaturas muito baixas ressaltam as imperfeições da aresta de corte. Assim, deve existir

um patamar que torne o material dúctil o suficiente para acomodar em certo grau as imperfeições da aresta mas não tão dúctil a ponto de deformar excessivamente. Acreditamos que esse patamar seja atingido com a ferramenta sendo refrigerada com CO₂ pelas superfícies de saída e folga e trabalhando com 346 m/min,

Comparando os ensaios 3 e 4, com velocidades de corte de 288 m/min e 346 m/min respectivamente é nítido a presença de lascas e crateras, principalmente com velocidade de corte de 346 m/min. Comparados com os ensaios com mesmos canais de refrigeração, entretanto com emulsão, os mecanismos de desgastes são diferentes, com emulsão (ensaio 1 e 2) é mais comum a presença de aresta postiça de corte e uma aresta de corte mais uniforme e com CO₂ (ensaio 3 e 4) mais comum a presença de lascas e crateras. Entretanto, as maiores vidas foram encontradas na usinagem com CO₂. A vida da ferramenta para o ensaio n° 3 foi de 7,33 min e para o ensaio n°4 foi de 10,49 min.

As figuras 4.46, 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50 mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 5, com o fluido de corte por emulsão, canal de direcionamento do fluido pela superfície de saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 288 m/min.

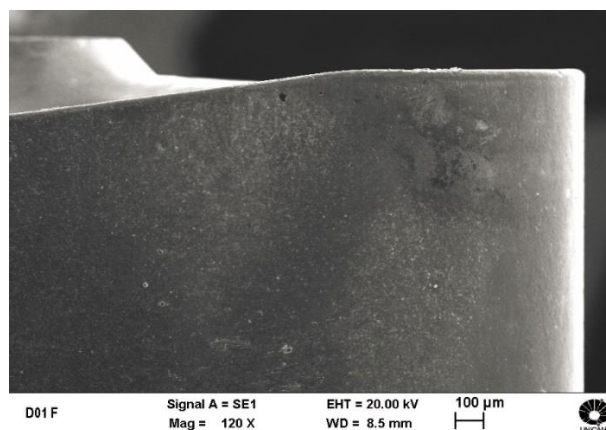


Figura 4.46– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Conforme figura 4.47, é possível verificar nos pontos de análise 1 e 2, pouco material da peça aderido, reflexo disso é um grande percentual de elementos químicos da cobertura presentes na análise. Já no ponto 3, é possível encontrar a presença de elementos químicos da cobertura do metal duro. A aresta de corte está com pouco desgaste e isento de lascas.

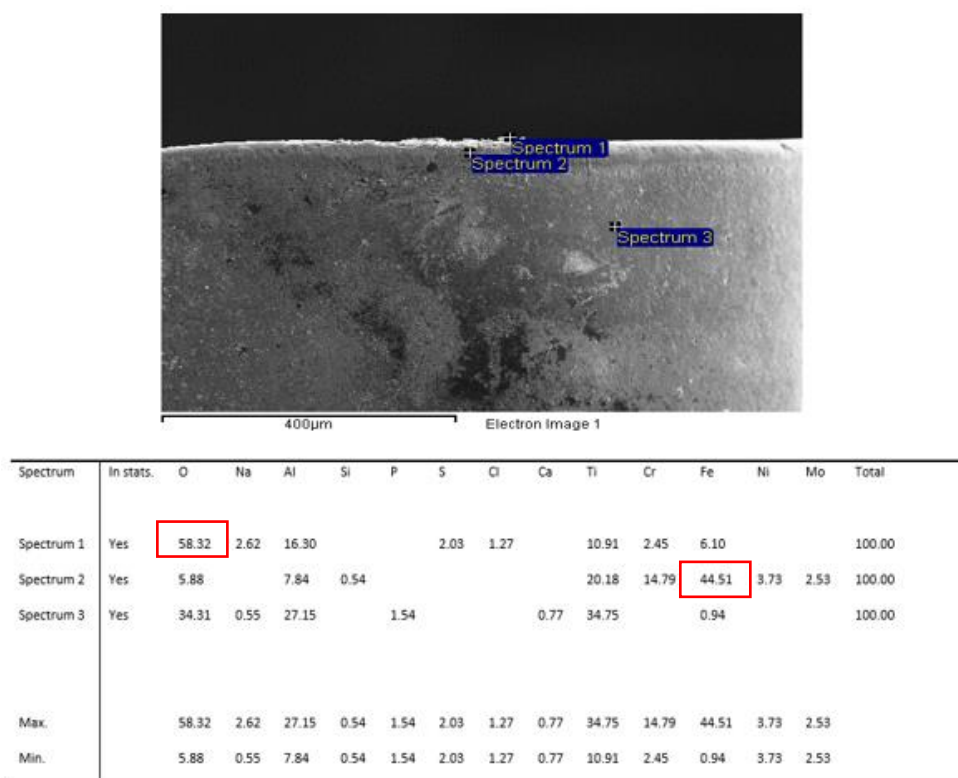


Figura 4.47– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min

Na superfície de saída da ferramenta de corte, conforme figuras 4.48 e 4.49, é possível verificar uma grande quantidade de material aderido na ferramenta de corte no ponto 1 da figura 4.48. Já no ponto 1 da figura 4.50 é possível encontrar uma cratera e também adesão de material da peça usinada. Os demais pontos das duas figuras são encontrados material da peça aderido na superfície da ferramenta.

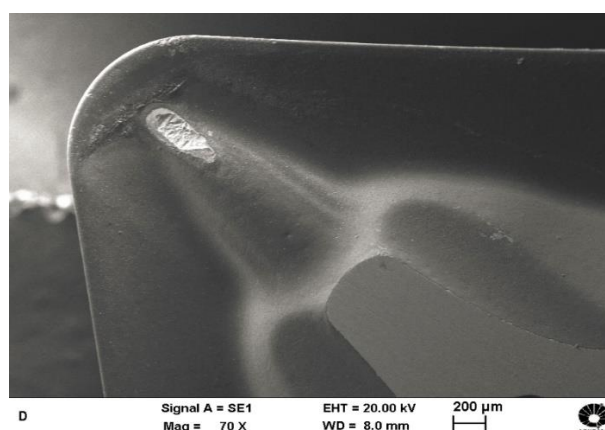


Figura 4.48– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

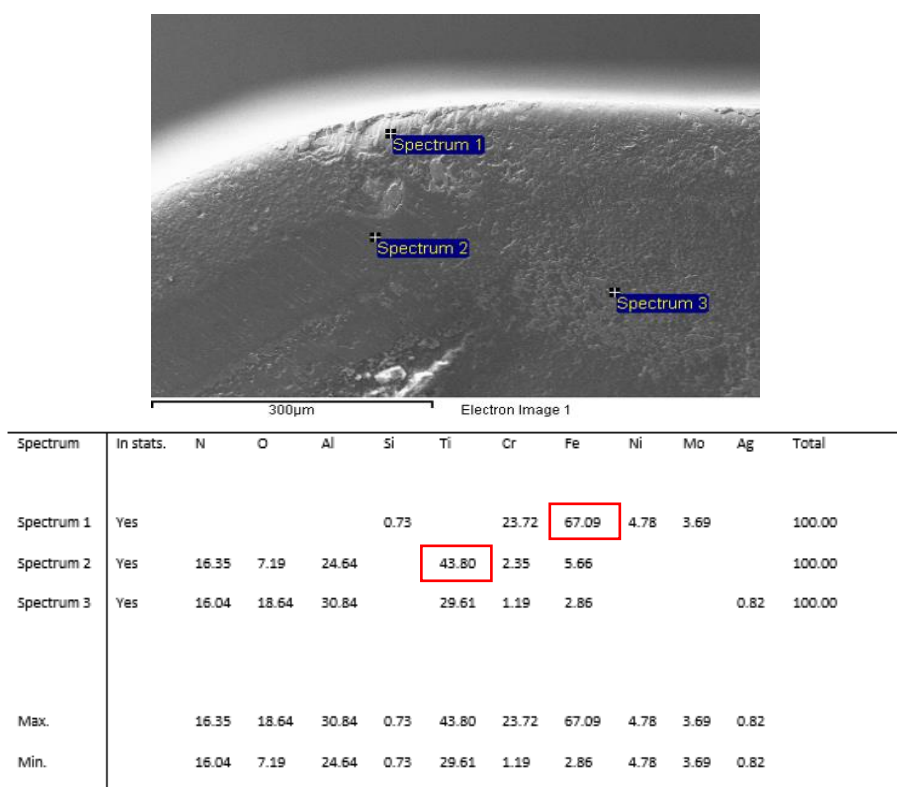


Figura 4.49– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

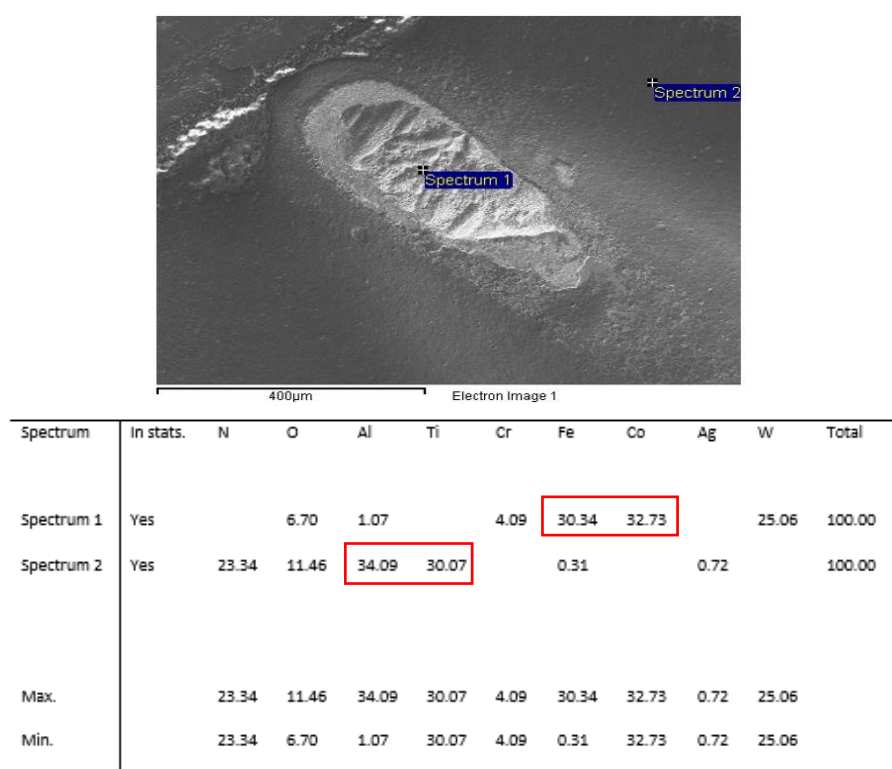


Figura 4.50– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Como já observado nos testes com emulsão com o direcionamento dos canais de refrigeração pela superfície de folga e saída, nesse ensaio com a refrigeração apenas na superfície de saída a aresta de corte se manteve mais estável e com pouco desgaste e isenta de trintas e lascas, entretanto a adesão foi a responsável pela baixa vida da ferramenta. Este ensaio com o canal de refrigeração apenas pela superfície de saída apresentou menos adesão quando comparado com os ensaios 1 e 2.

As figuras 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54, mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 6, com o fluido de corte por emulsão, canal de direcionamento do fluido pela superfície de saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 346 m/min.

Conforme figura 4.51 e 4.52 mostram a aderência de material da peça na superfície de folga da ferramenta de corte. A aresta de corte se mantém em boas condições com pequena presença de adesão, entretanto, diferentemente dos outros ensaios realizados com emulsão e independente da velocidade de corte ou canal de saída da refrigeração, para este ensaio é possível encontrar adesão em uma área maior da superfície de folga da ferramenta (e não somente na aresta de corte principal).

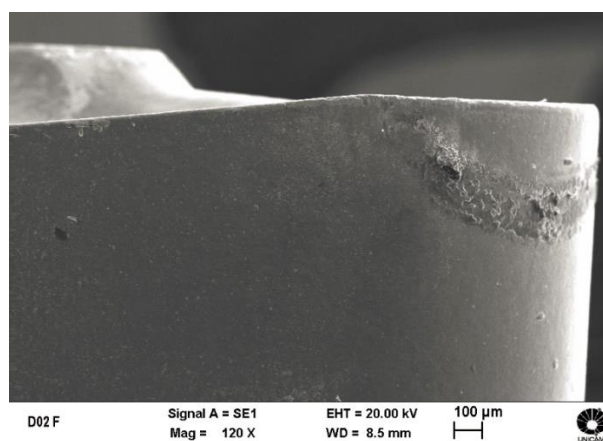


Figura 4.51– Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.

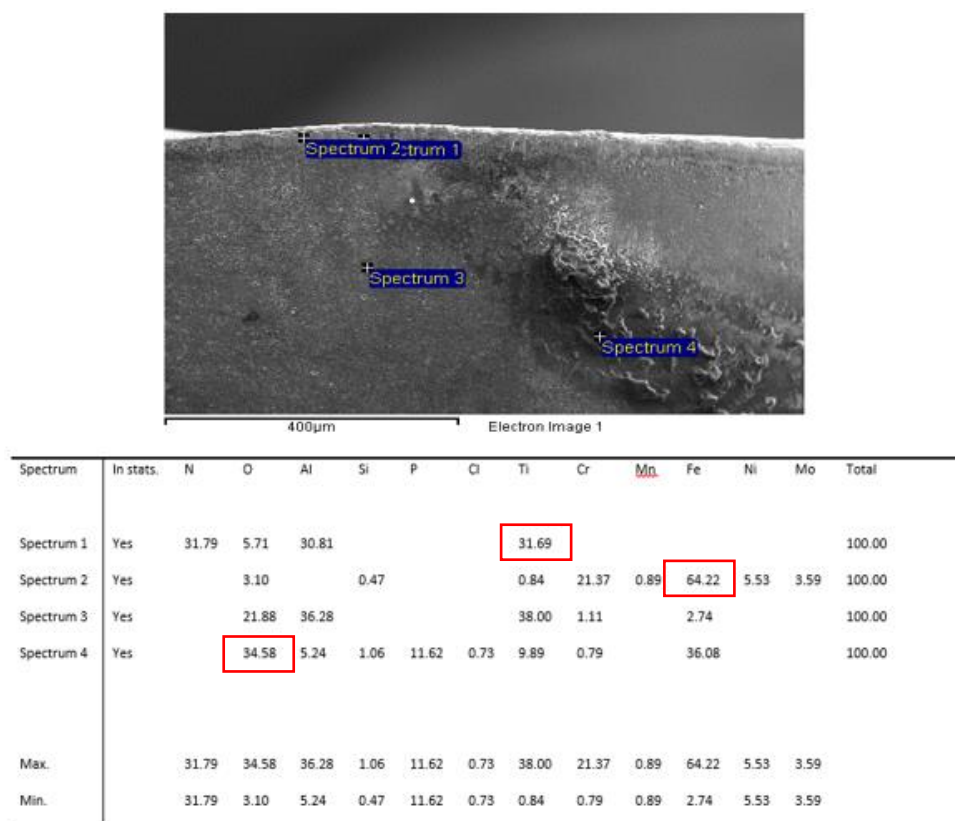


Figura 4.52 – Superfície de folga da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Na superfície de saída da ferramenta de corte, conforme figuras 4.53 e 4.54, é possível verificar a presença de adesão no ponto 1 (figura 4.54).

Comparando com o ensaio nº5 que tinha as mesmas condições de fluido de corte e canal de direcionamento, apenas alterando a velocidade de corte de 288 m/min para 346 m/min (no ensaio 6) podemos dizer que resultados são bem similares referente a estabilidade da aresta de corte e o mecanismo de desgaste encontrado. Para o ensaio nº 5 a vida foi de 5,91 min e para o ensaio nº 6, a vida foi de 3,91 min. Considerando a velocidade de corte de 346 m/min, conforme esperado a vida da ferramenta foi menor quando comparado com a velocidade de 288 m/min devido maior desgaste de flanco.

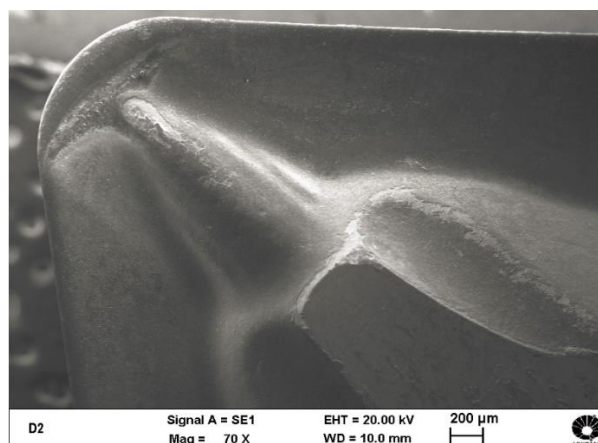
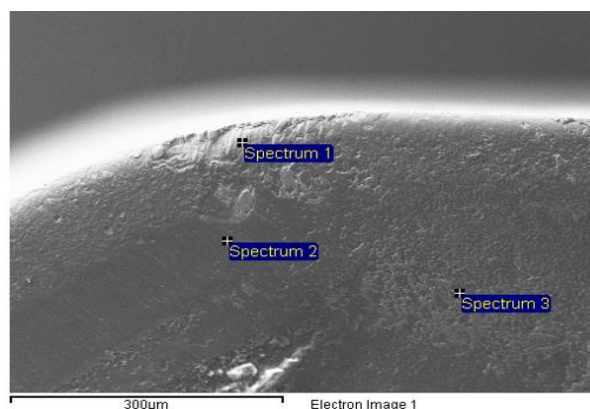


Figura 4.53– Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.



Spectrum	In stats.	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo	Ag	Total
Spectrum 1	Yes				0.73		23.72	67.09	4.78	3.69		100.00
Spectrum 2	Yes	16.35	7.19	24.64		43.80	2.35	5.66				100.00
Spectrum 3	Yes	16.04	18.64	30.84		29.61	1.19	2.86			0.82	100.00
Max.		16.35	18.64	30.84	0.73	43.80	23.72	67.09	4.78	3.69	0.82	
Min.		16.04	7.19	24.64	0.73	29.61	1.19	2.86	4.78	3.69	0.82	

Figura 4.54 – Superfície de saída da ferramenta de corte, emulsão, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.

As figuras 4.55, 4.56 e 4.57, mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 7, com o fluido de corte por CO₂, canal de direcionamento do fluido pela superfície de saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 288 m/min.

Conforme figura 4.55 e 4.56 mostram a forte aderência de material da peça na superfície de folga da ferramenta de corte. A aresta de corte apresenta aresta postiça de corte e alguns pontos de lascamento.

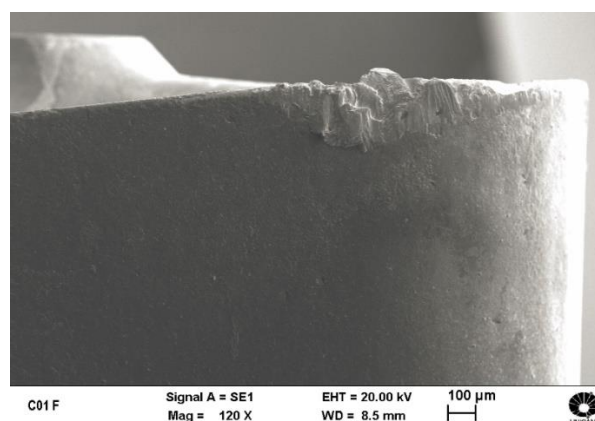
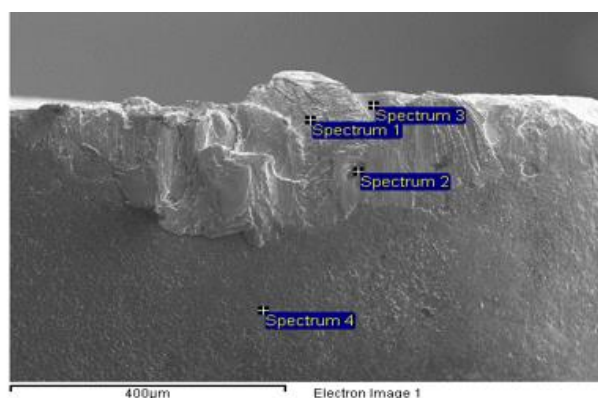


Figura 4.55 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.



Spectrum	In stats.	N	O	Na	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Ag	W	Total
Spectrum 1	Yes		2.70			0.64		22.88	64.90		5.51	3.38			100.00
Spectrum 2	Yes	7.63	5.33	1.15		0.67		20.14	57.17		4.79	3.14			100.00
Spectrum 3	Yes		2.60					3.55	7.15	3.82				82.87	100.00
Spectrum 4	Yes		24.05		30.22		33.95	2.60	8.24				0.94		100.00
Max.		7.63	24.05	1.15	30.22	0.67	33.95	22.88	64.90	3.82	5.51	3.38	0.94	82.87	
Min.		7.63	2.60	1.15	30.22	0.64	33.95	2.60	7.15	3.82	4.79	3.14	0.94	82.87	

Figura 4.56 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

Na superfície de saída da ferramenta de corte, conforme figura 4.57, é possível verificar adesão nos pontos de análise 1 e 3. Para os pontos 2 e 4, é encontrado predominantemente o material da cobertura da ferramenta.

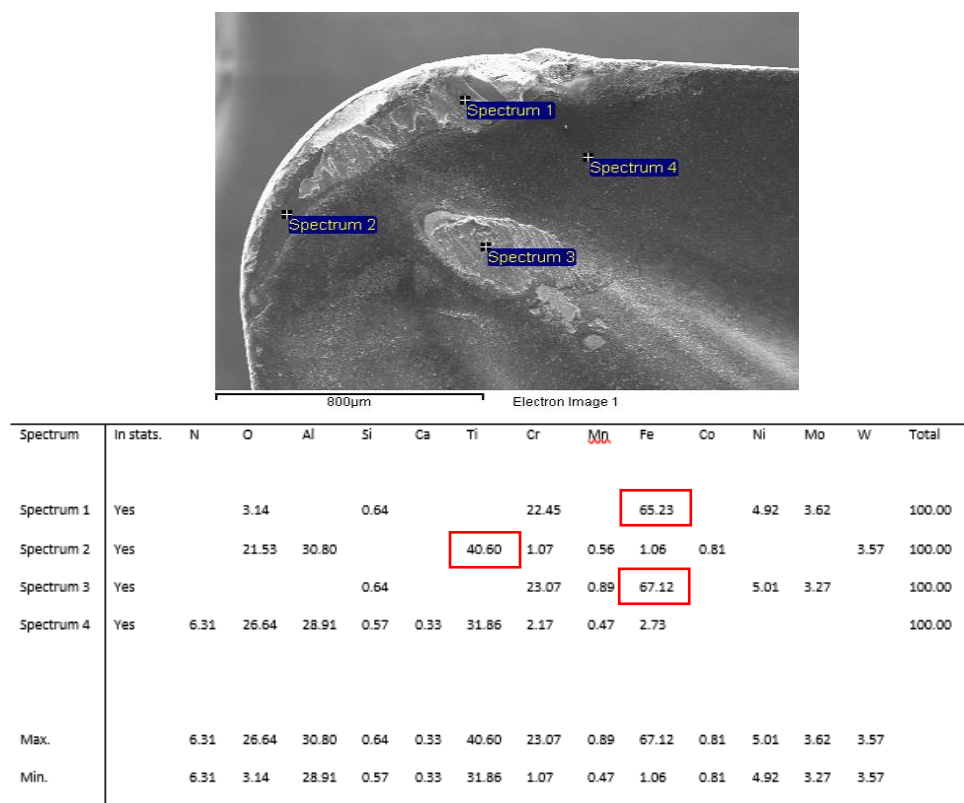


Figura 4.57 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 288 m/min.

As figuras 4.58, 4.59 e 4.60, mostram os mecanismos de desgaste do ensaio n° 8, com o fluido de corte por CO₂, canal de direcionamento do fluido para superfície de saída da ferramenta de corte e velocidade de corte de 346 m/min.

Nas figuras 4.58 e 4.59 são mostradas aderência de material da peça na superfície de folga da ferramenta de corte. Na figura 4.58 é possível verificar no ponto 1 uma forte aderência do material da peça (Fe, Cr, Ni, Mo), já nos pontos 2 e 3 predominantemente encontramos os elementos químicos presentes na cobertura da ferramenta de corte (Al, O, Ti).

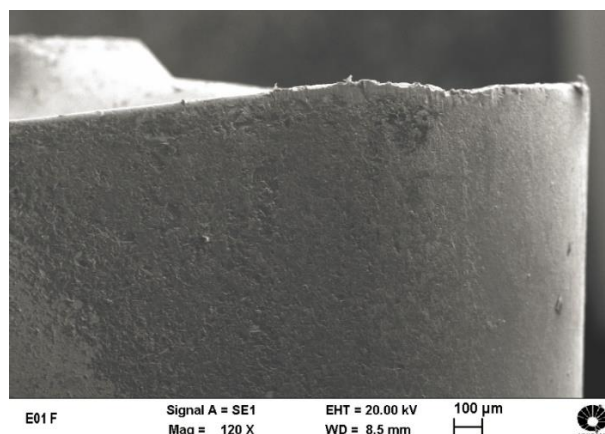
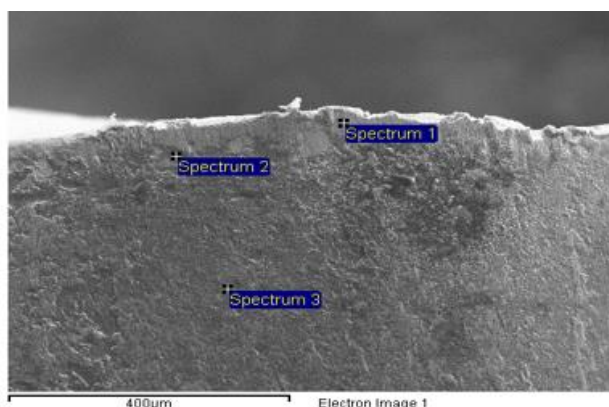


Figura 4.58 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.



Spectrum	In stats.	N	O	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W	Total
Spectrum 1	Yes				0.60			22.20	68.70		5.19	3.31		100.00
Spectrum 2	Yes		26.67	13.17		0.60	23.94	2.23	7.42	3.23	0.61		22.12	100.00
Spectrum 3	Yes	11.93	23.83	26.31			28.35	2.82	6.31		0.45			100.00
Max.		11.93	26.67	26.31	0.60	0.60	28.35	22.20	68.70	3.23	5.19	3.31	22.12	
Min.		11.93	23.83	13.17	0.60	0.60	23.94	2.23	6.31	3.23	0.45	3.31	22.12	

Figura 4.59 – Superfície de folga da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Na superfície de saída da ferramenta de corte, conforme figura 4.60, é possível verificar no fio da aresta de corte lascas com a presença de tungstênio (W) e cobalto (Co), que são materiais base do metal duro. No ponto 3 é possível encontrar uma cratera, com os mesmos elementos químicos do metal duro presente. No ponto 2, temos material da peça aderido e material da cobertura.

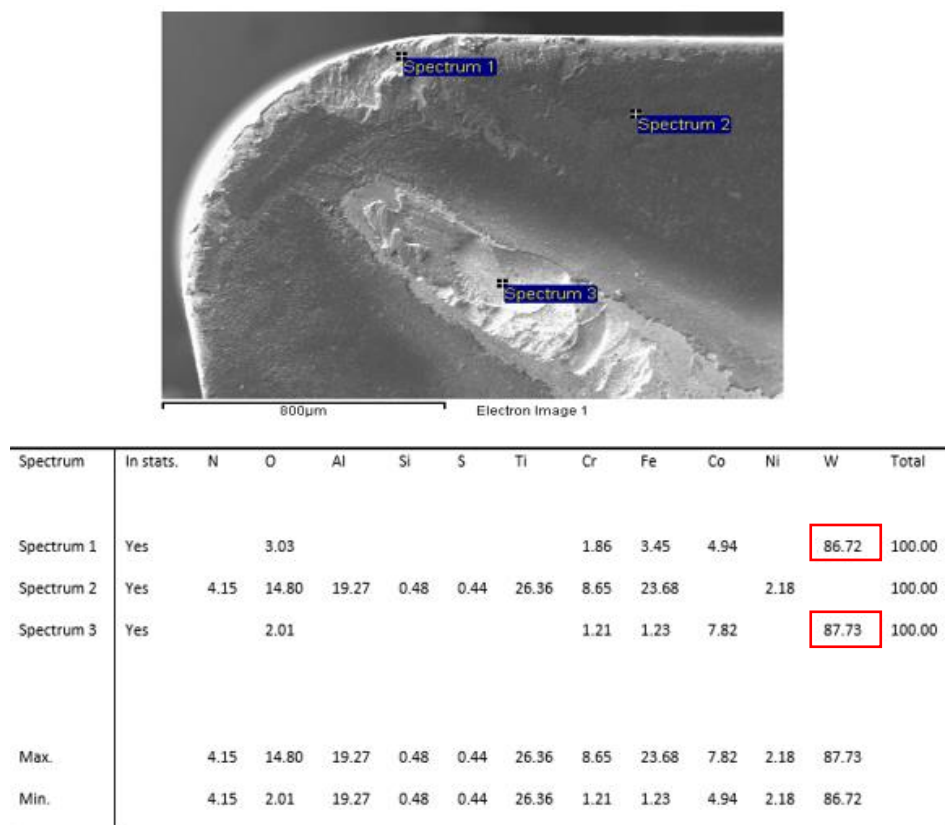


Figura 4.60 – Superfície de saída da ferramenta de corte, CO₂, superfície de saída, velocidade de corte de 346 m/min.

Comparando com o ensaio n° 7 que tinha as mesmas condições de fluido de corte e canal de direcionamento, apenas alterando a velocidade de corte de 288 m/min para 346 m/min, os resultados são diferentes, com velocidade menor tivemos mais aderência do material da peça na aresta principal de corte. Lascas foram encontradas nos dois ensaios (7 e 8). Já na superfície de saída da ferramenta, para velocidade de 288 m/min é possível encontrar predominantemente material da peça aderido, já com velocidade de 346 m/min, o desgaste predominante é de craterização (encontrado material base do metal duro).

Para o ensaio n° 7 a vida da ferramenta de corte foi de 7,08 min e para o ensaio n° 8, a vida foi de 7,46 min.

A conclusão parcial desse item é que os mecanismos de desgaste foram diferentes para as diferentes variáveis estudadas. Quando se usinou com emulsão houve principalmente adesão de material da peça na ferramenta de forma concentrada nas extremidades do contato peça ferramenta. Por outro lado, quando se usou o CO₂, observou-se remoção do revestimento da ferramenta e abrasão.

4.6 Corrosão.

Essa análise foi realizada com o intuito de evidenciar qualquer mudança na resistência à corrosão devido aos parâmetros de usinagem anteriormente apresentados. Para isso as superfícies das amostras foram avaliadas quanto à rugosidade e posteriormente submetidas a análise de corrosão.

As imagens obtidas através de microscopia óptica, mostram a microestrutura do material analisado em diferentes ampliações. Através das imagens é possível evidenciar as fases, onde a fase mais escura corresponde à ferrita que fora atacada quimicamente, dispersa em uma matriz austenítica, representada pela fase mais clara. As figuras 4.61 (a) e (b) mostram a composição de fases entre ferrita e austenita em diferentes ampliações.

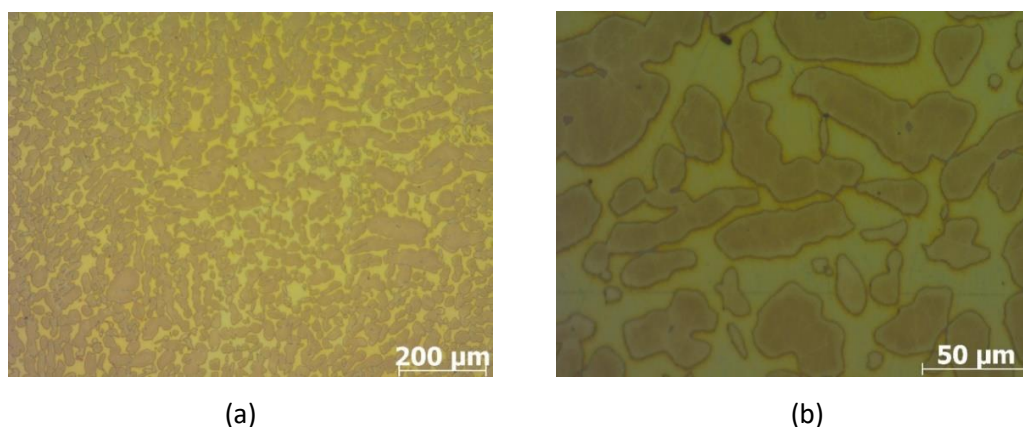


Figura 4.61 – Composição de fases do aço Duplex SAF2205 com ampliação de 100x (a) e 500x (b)

Através de um tratamento da imagem utilizando o *software ImageJ* foi possível levantar a proporção de fases no aço inoxidável. Na figura 4.62 é possível verificar a imagem original obtida no microscópio (a) e (b) é a imagem modificada com 8 bits e aplicação de *threshold*. A proporção de fases aproximada é de 70% de ferrita e 30% de austenita para o aço Duplex SAF2205 utilizado nos ensaios.

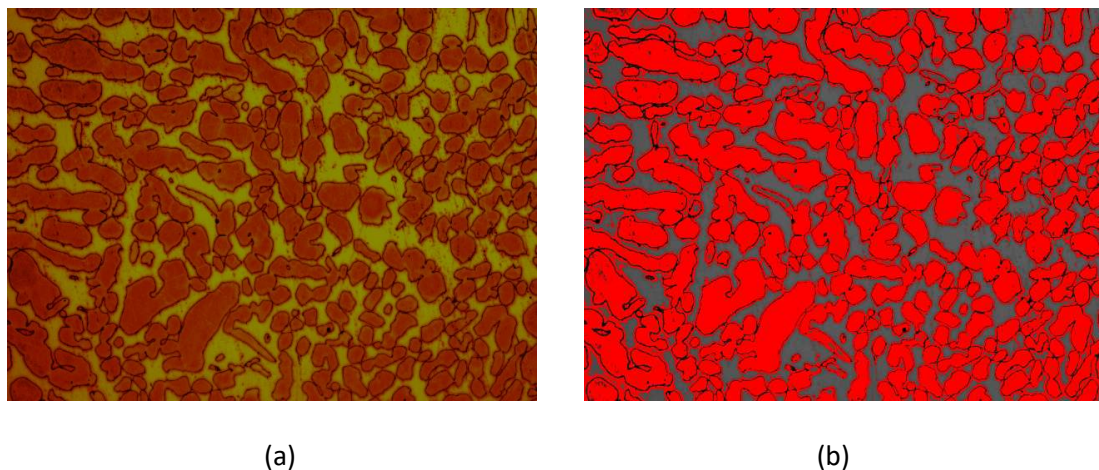


Figura 4.62 – Composição em percentual das fases ferrítica e austenítica do aço Duplex SAF2205.

Através da análise metalográfica foi possível estimar a proporção de fases do aço inoxidável duplex SAF2205, apresentando aproximadamente 70% de ferrita dispersa em 30% de fase austenítica. Segundo o *datasheet* do material a concentração de ferrita do material varia de 40-60%, uma faixa de variação muito grande e que é determinante na resistência à corrosão, por isso a necessidade de verificar a microestrutura. O material apresenta uma concentração de ferrita superior ao especificado.

Para a análise da caracterização eletroquímica foram produzidas curvas potencio dinâmicas de todas as amostras de 1 a 12 (referente aos ensaios de 1 a 6) conforme tabela 4.1. Os ensaios foram repetidos duas vezes para cada amostra. Através da curva pelo *Tafel fit* foi possível definir os valores de potencial de corrosão e corrente de corrosão para todas as amostras. A figura 4.63 apresenta os valores do potencial de corrosão e densidade de corrente para cada amostra analisada. A figura 4.64 apresenta uma análise da variação do potencial de corrosão em função da rugosidade. Não houve uma variação muito significativa entre as amostras visto que a rugosidade influencia consideravelmente o potencial de

corrosão e por se tratar de um duplex com alta proporção de ferrita e que o processo de usinagem não varia significativamente a temperatura a ponto de alterar as proporções das fases ferrita-austenita ou tamanho de grão. Conclui-se que as variáveis do processo não têm influência sobre a resistência à corrosão e que a maior influência é dada pela rugosidade ligada ao parâmetro de velocidade do processamento. Devido não haver significativas mudanças nos resultados dos ensaios de 1 a 6 e o fim do gás carbônico disponível, os ensaios 7 e 8 não foram realizados.

A tabela 4.1 mostra os parâmetros avaliados na análise eletroquímica.

Ensaio eletroquímico foi realizado na Potentiostat Galvanostat a VersaSTAT4						
Teste	Fluido	Direcionamento fluido	vc	Aresta de corte	Ecor (mV)	Icor (nA)
1	Emulsão	Sup. de Folga - Saída	288	Nova	-124,059	9,89
				Fim de Vida	-92,508	7,3
2	Emulsão	Sup. de Folga - Saída	346	Nova	-144,04	5,78
				Fim de Vida	-102,36	11,09
3	CO2	Sup. de Folga - Saída	288	Nova	-84,305	10,85
				Fim de Vida	-121,6	11,3
4	CO2	Sup. de Folga - Saída	346	Nova	-125,33	14,8
				Fim de Vida	-164,602	13,02
5	Emulsão	Sup. de Saída	288	Nova	-82,252	8,05
				Fim de Vida	-144,778	9,94
6	Emulsão	Sup. de Saída	346	Nova	-133,352	7,38
				Fim de Vida	-112,141	8,83
7	CO2	Sup. de Saída	288	Nova		
				Fim de Vida		
8	CO2	Sup. de Saída	346	Nova		
				Fim de Vida		

Tabela 4.1 – Parâmetros avaliados na análise eletroquímica.

A figura 4.63 mostra a variação do potencial de corrosão e densidade de corrosão para cada amostra analisada.

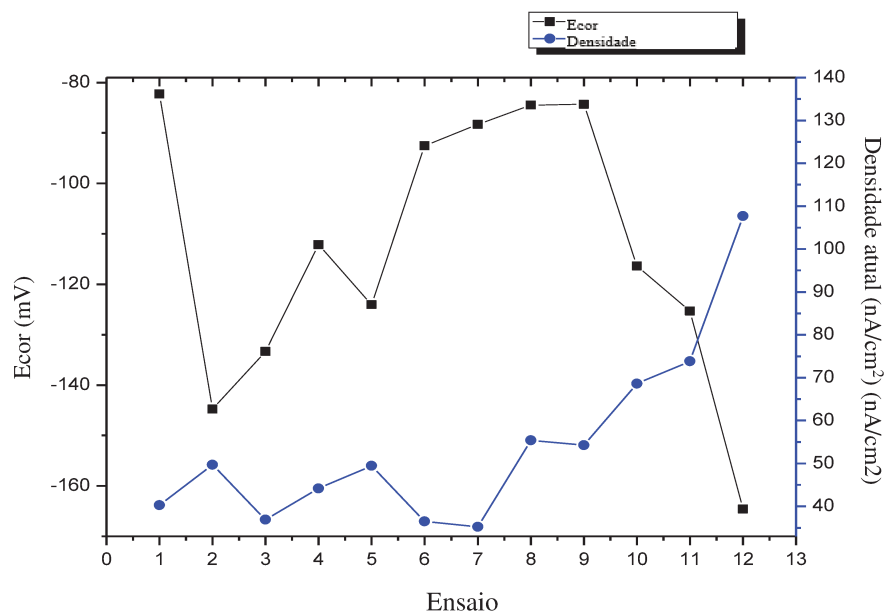


Figura 4.63 – Variação do potencial de corrosão e densidade de corrosão.

A figura 4.64 mostra a variação do potencial de corrosão e densidade de corrosão para cada amostra analisada.

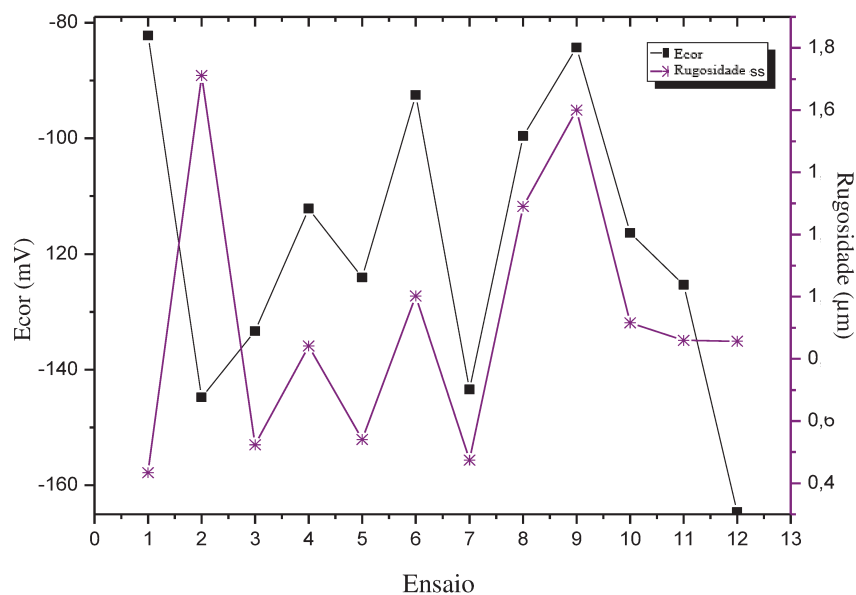


Figura 4.64 – Variação do potencial de corrosão e rugosidade.

A figura 4.65, mostra a curva potenciodinâmica do aço inoxidável SAF2205 comparado com a de um aço estrutural ASME AS 516. A resistência a corrosão do SAF2205 é superior a do aço 516 por apresentar um potencial de corrosão E_{cor} mais positivo e uma

densidade (I_{cor}) de corrente inferior. Um comparativo das amostras abordadas no estudo não foi necessário visto que foram evidenciadas poucas diferenças não ligadas à variação de temperatura da usinagem e sim aos valores de rugosidade. Como o processo não alterou a microestrutura e a proporção austenita-ferrita se manteve a resistência à corrosão também não foi influenciada.

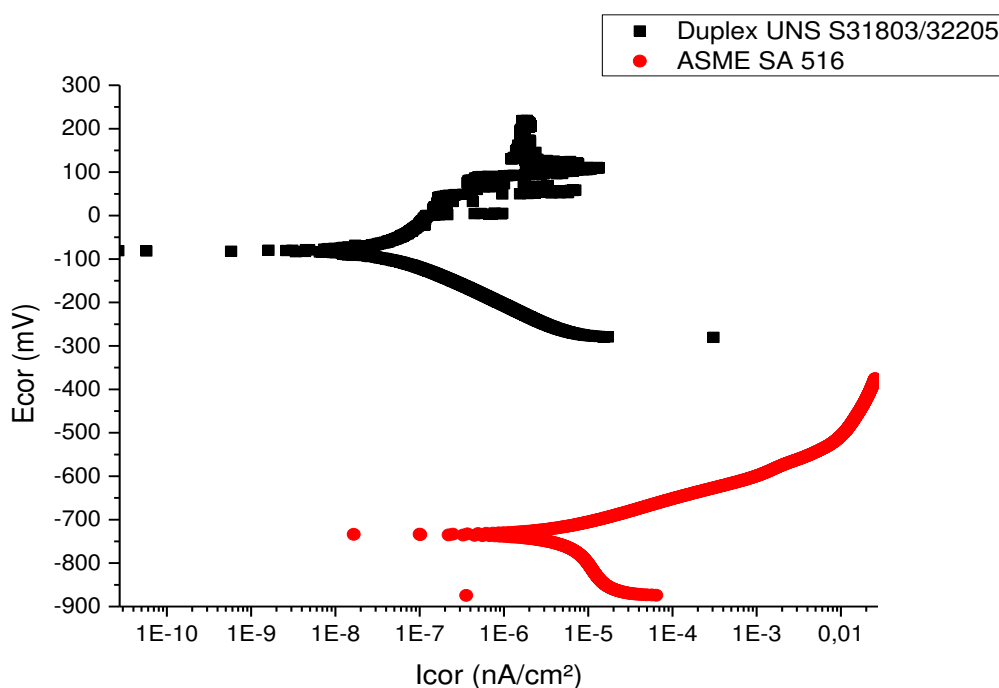


Figura 4.65 – Comparativo das curvas de polarização do aço duplex UNS S31803/SAF2205 com um aço estrutural micro ligado ASME AS 516.

CONCLUSÕES

Sobre a vida da ferramenta:

Nos ensaio realizados com emulsão é possível verificar que com o aumento da velocidade de corte, a vida da ferramenta cai independente do canal de direcionamento do fluido de refrigeração pela superfície de folga e saída ou só pela superfície de saída. Nos ensaio com CO₂, com o aumento da velocidade de corte, a vida da ferramenta é maior independentemente do canal de direcionamento do fluido.

O sistema de direcionamento do fluido de refrigeração na superfície de folga – saída da ferramenta de corte mostra-se mais eficiente que o sistema apenas para superfície de saída principalmente com o aumento da velocidade de corte e na aplicação de CO₂ como refrigerante.

Sobre a evolução dos desgastes:

Independente da velocidade de corte, a evolução do desgaste foi mais constante e estável na usinagem com emulsão. Na usinagem com CO₂ os desgastes foram irregulares devido a presença de micro lascas e lascas devido a aresta postiça de corte que se desprende da aresta de corte, entretanto, na usinagem com o gás carbônico foi onde encontramos as maiores vida da ferramenta (combinação entre o volume usinado e qualidade superficial).

Sobre a rugosidade:

Em geral, a usinagem com CO₂ obteve as menores rugosidade no início da usinagem (desde os primeiros metros lineares de usinagem), muito devido ao fato da aresta postiça de corte não ter influenciado decisivamente na rugosidade da peça como teve quando comparado com a usinagem com emulsão, isso se deu possivelmente ao fato da maior pressão e velocidade do gás atuando na interface peça, cavaco e ferramenta. O sistema de direcionamento do fluido pela superfície de folga e saída obteve os melhores resultados (menor rugosidade) principalmente com baixa velocidade de corte independentemente do tipo de fluido. Já as maiores velocidades de corte, independente do sistema de direcionamento do fluido, a usinagem com CO₂ obtivemos as menores rugosidades (e consequentemente maiores vida da ferramenta).

Sobre a temperatura do sistema peça, ferramenta e cavaco:

Nos ensaios com realizados com emulsão, independente do canal de direcionamento do fluido refrigerante na região de corte, a temperatura do sistema peça, inserto (ferramenta de corte) e cavaco se mantiveram próximos e constantes. Nos ensaios com CO₂, é possível verificar a maior eficiência na retirada do calor da interface peça, cavaco e ferramenta no sistema de direcionamento do fluido refrigerante na superfície de folga e saída da ferramenta pois apresentou menores temperaturas que a refrigeração apenas pelo canal da superfície de saída.

Em geral, nos ensaios com CO₂ foi onde encontramos as maiores temperaturas do cavaco (comparados com a temperatura da peça e ferramenta), independente da velocidade de corte ou canal de direcionamento do fluido.

Sobre o torque nos eixos X, Y e S:

O torque nos eixos “X” e “Y” se mostraram muito próximos independentemente do tipo de fluido de corte utilizado. No sistema com o direcionamento do canal do fluido de refrigeração via superfície de folga e saída, o torque no eixo “S” é maior para a refrigeração por CO₂ comparando com a Emulsão, principalmente para menores velocidades de corte (v_c 288 m/min).

Na usinagem com fluido refrigerante por CO₂, com o aumento da velocidade de corte, a potência eixo “S” (*spindle*) cai, independente do canal de direcionamento (mesmo com maiores temperaturas na peça, conforme figura 4.14). Mesmo com o aumento do volume de material removido por minuto, o esforço no eixo “S” foi reduzido. Algumas hipóteses podem ser levadas em consideração e estudadas mais a fundo em trabalhos futuros, como por exemplo a melhor formação do cavaco encontrado nesses testes (cavaco tipo hélice curta) e sua relação com a interface peça-cavaco-ferramenta.

Já na usinagem com fluido refrigerante por emulsão, com o aumento da velocidade de corte, a potência no eixo “S” (*spindle*) aumenta, independente do canal de direcionamento. Essa fato de dá conforme a teoria da usinagem, com o aumento da taxa de material removido por minuto, é encontrado um aumento da força necessária para o corte, entretanto, não

proporcional, pois o aumento da velocidade de corte causa o “amolecimento” de material e a redução do esforço necessário para o corte de uma porção do material.

Sobre a formação dos cavacos:

Em geral, os cavacos se mostram entre emaranhado, hélice oblíqua e hélice curta. Independente do fluido de corte, no sistema de direcionamento pela superfície de folga e saída, obtivemos a formação dos cavacos tipo hélice longa (além do emaranhado e hélice oblíqua). Na usinagem com fluido refrigerante por CO₂ obtivemos as melhores formações de cavaco possivelmente em função da maior pressão do fluido com 20 bar e também em função da menor temperatura da peça, que torna o material “mais duro” e consequentemente facilita a quebra do cavaco.

Sobre a análise MEV e EDS da ferramenta de corte:

Em geral, na superfície de folga da ferramenta de corte (inserto), é possível encontrar a presença de aresta postiça de corte. Na superfície de saída da ferramenta de corte, é possível encontrar um mix entre aderência (aresta postiça de corte) e craterização. A craterização ficou mais evidente na usinagem com CO₂ e a aderência na usinagem com emulsão.

No sistema de direcionamento do fluido refrigerante pela superfície de folga e saída e CO₂ como fluido, é encontrado lascas e crateras e pouca adesão em todos os ensaios realizados. Já no sistema de direcionamento do fluido refrigerante apenas pela superfície de saída e emulsão como fluido, é encontrado a forte presença de adesão na aresta principal de corte e também na superfície de saída da ferramenta.

Na refrigeração por emulsão, obtivemos um menor desgaste na aresta de corte da ferramenta, entretanto, a aresta postiça de corte teve forte influência na rugosidade da peça e consequentemente, uma menor vida da mesma. Com a refrigeração por CO₂, obtivemos maiores vida da ferramenta, menor presença de aresta postiça de corte em média, e a forte presença de lascas e crateras, entretanto, com menores influencia na vida da ferramenta quando comparado com a APC.

Sobre a análise de corrosão do material:

O processo de usinagem por CO₂ não alterou a microestrutura e/ou a proporção austenita-ferrita que se manteve dentro dos valores estabelecidos pelo fabricante do aço inoxidável. As variáveis do processo de usinagem (CO₂ ou emulsão e direcionamento dos canais de refrigeração) não tiveram influência sobre a resistência a corrosão.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se:**

- Comparativo de vida da ferramenta com a usinagem por Emulsão e CO₂ para operações de desbaste longitudinal.
- Análise dos impactos da usinagem com CO₂ na microestrutura, encruamento e tensões residuais no aço duplex.
- Comparativo de vida da ferramenta com a usinagem por alta pressão e CO₂ para operações de acabamento longitudinal.
- Comparativo de vida da ferramenta com a usinagem por alta pressão e CO₂ para operações de desbaste longitudinal.

REFERÊNCIAS

AMBROSY, F.; ZANGER, F.; SCHULZE, V.; JAWAHIR, I.S. An experimental study of cryogenic machining in nanocrystalline surface layer generation. 2. CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Alemanha, 2014.

ANSELMO, N. Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO₂saturated synthetic seawater. Materials Science and Engineering A, v.428, p. 73-79, 2006.

ATLAS STEEL. Grades Datasheets, 2013.

ASM - American Society for Metals; ASM Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. 10^a ed., v.1, 1618p., 2005.

ASM INTERNATIONAL. ASM Machining of Stainless Steels. In: Metals Handbook, v. 16 – Machining, 9 ed. Materials Park: ASM International, 1989. p. 681-691.

AURICH, J.C.; MAYER, P. ; KIRSCH, B.; EIFLER,D.; SMAGA, M.; SHORUPSKI, R. Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347.

BERNER, M.; LIU,H.P.; OLSSON, C.O.A- 14th Nordic Congress (NKM-14) Copenhagen, Denmark, 13th-15th May -2007.

BORDINASSI, E. C. Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super duplex após torneamento. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. 201 pag. ed. rev. São Paulo, 2006.

CARBÓ, H M; Aço Inoxidável-Aplicações e Especificação, Acesita, p.1-2, 2001.

CHATER, J.; The European market for duplex stainless steels”, Duplex Steel World, page1-4, www.stainless-steel-world.net, 2010.

- CHIAVERINI, V. “Aços e Ferros Fundidos- 7ª edição” Associação Brasileira de Metalurgia-ABM-São Paulo, Brasil, 2005.
- CALLISTER, D. William Jr., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. LTC, 589 p., 5ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- CURTIS, J. F.; KOVAK, W., High Performance Stainless Steels. Nickel Development Institute, 95 p., U.S.A., 2002.
- CHIAVERINI, V.; Aços e Ferros Fundidos. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 599p., 2002.
- CHILAIRE. “CO₂ technology is part of the solution. Case Study”. Chilaire™, 2014.
- CHILAIRE. “Drilling Titanium – Ti6Al-4V High temperature Alloy with PCD & carbide drills. Case Study”. Chilaire™, 2014.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L.; Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.
- EZUGWU, E. O., BONNEY, J., SILVA, R. B., MACHADO, A. R. Evaluation of the performance of different nano-ceramic tool grades when machining nickel-base, inconel 718, alloy. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.26 n.1 jan. /mar. 2004.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. In: Usinagem dos Metais, 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. v. 1.
- FERRARESI, D.; Fundamentos da usinagem dos metais. Ed. Edgard Blücher Ltda., 12ª reimpressão, São Paulo, Brasil, 2006.

GAMARRA, J. R.; Estratégias de usinagem no torneamento de aço inoxidável Super Duplex (UNS S32750). Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2017.

GRAVALOS, Márcio Tadeu, Efeitos da usinagem na integridade superficial de um aço inoxidável superaustenítico, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 122 p. Dissertação (Mestrado), 2008.

GRAVALOS, Márcio Tadeu, Efeitos da usinagem na integridade superficial de um aço inoxidável superaustenítico, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 122 p. Dissertação (Mestrado), 2008.

GROOVER, Mikell P. Introdução aos Processos de Produção. 1. ed. São Paulo: LTC, 2014.

HONG, S. Y.; DING, Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 10, p. 1417–1437, 2001.

HONG, S. Y. Economical and Ecological Cryogenic Machining. N. 338, Vol 123, Maio 2001.

INTERNATIONAL MOLYBINUM ASSOCIATION - IMOA “Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels - 2º edition”- International Molybinum Association, London, UK, 2009.

IMOA; Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex; p.4-5, 2012.

IMOA; Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels; p.4-5, 2014.

JAWAHIR, I.S.; PUSAVEC, F. ; GOVEKAR, E. KOPAC, J. The influence of cryogenic cooling on process stability in turning operations. CIRP Annal – Manufacturing Technology, 2011.

JAWAHIR, I.S. Cryogenic Manufacturing Process. CIRP Annal – Manufacturing Technology, Vol 2 - 2016.

KHAN, A. A.; AHMED M. L. Improving tool life using cryogenic cooling. J of Mat Proc Tech, 2008; 196:149-154.

KOPELIOVICH. D. “Stainless Steels”- Subs Tech, Substances & Technology, www.substech.com acesso dia 11/10 2018.

MACHADO, A.R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A.M.; SILVA, M.B.; Teoria da Usinagem dos Materiais, 3ª ed., 408 p., 2015.

MAGRI, A.; Uma Contribuição ao Estudo do Torneamento da Liga 625. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 99p., Tese (Mestrado), 2015.

NASCIMENTO, C.C.F.; VILARINHOS, L.O.; MARTINS. W.P.; MENESES. V. A.; RODRIGUES. J.R.P.; RODRIGUES. J.R.P. Estudo da influência do acabamento superficial de revestimento de aço inoxidável na resistência à corrosão por pite. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 18-21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brasil.

NILSSON, J. O.; Super duplex stainless steel “overview” Materials Science and Technology, v.8, 1992.

NOVASKI, O.; Introdução a engenharia de fabricação mecânica. 2. Ed. Campinas: Blucher, 2013.

OLIVEIRA, C.A; Usinagem e resistência à corrosão dos Aços Inoxidáveis Super Duplex. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.

PARO, J.; HÄNNIKEN, H.; KAUPPINEN, V.; Tool wear and machinability of HIPed P/M and conventional cast duplex stainless steels. Wear, v.249, p.279-284, 2001.

RAMANATHAN, L. V., Corrosão e seu controle, 339 p., 1ª ed., Hemus Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 1989.

ROTHER. Original operating Instruction. Aerosol Master 4000 cryolub. Rother technologie GMBH&CO, 2015.

SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY “ Duplex Stainlees Steels - Sandvik SAF 2505”, Sandvik Materials Technology, Sandviken, Sweeden, 2017.

SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY “ Duplex Stainlees Steels - Sandvik SAF 2505”, Sandvik Materials Technology, Sandviken, Sweeden, 2008.

SCAARSCHIDT, T. Cryogenic Machining – tooling requirements. Walter AG. Aero Structure Machining Day, 2014.

SCAARSCHIDT, T. Component Solutions / Strategic Components – Walter AG. Turbine Blades Day, 2015.

SCAARSCHIDT, T; CORDES, S.; HUBNER, F. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. CIRP International Conference on High Performance Cutting - HPC, 2014.

SENATORE, M ; FINZETTO, L ; PEREA, E ; Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): p.175-181, 2007.

SILVA, A. L. V. DA C. E; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006.

SILVA, A.L.C.; MEI, P.R. Aços e Ligas Especiais. 2 ed. Sumaré: ELETROMETAL S.A, 527p. (p.305-307), 1988.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas Especiais**. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2010.

STARRAG; WALTER AG. Starrag and Walter turbine technology day.2013.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446 p.

YAKUP,Y. MUAMMER, N. A review of cryogenic cooling in machining process. International Journal of Machine Tools & Manufacture V.48, 2008.

WALTER AG, “Treinamento Técnico de Torneamento”; Walter AG, 2010.

WALTER AG. “Turbo charger investigations with cryogenic cooling concepts (CO₂). Walter AG,2015.