

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FABIO DE SOUSA SANTOS

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO TRATAMENTO DE OZONIZAÇÃO
DE FLUIDOS DE CORTE SOLÚVEIS EM UM PROCESSO DE
FRESAMENTO**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

FABIO DE SOUSA SANTOS

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO TRATAMENTO DE OZONIZAÇÃO
DE FLUIDOS DE CORTE SOLÚVEIS EM UM PROCESSO DE
FRESAMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

- S273 Santos, Fabio de Sousa
Análise dos efeitos do tratamento de ozonização de fluidos de corte solúveis em um processo de fresamento / Fabio de Sousa Santos. – 2016.
121 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2016.
Bibliografia: p. 113-119.
1. Fluidos de corte. 2. Ozônio. 3. Catalisadores. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Gonçalves, Janaina Fracaro de Souza, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campus Cornélio Procópio

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



Título da Dissertação Nº 007:

“Análise Dos Efeitos Do Tratamento De Ozonização De Fluidos De Corte Solúveis Em Um Processo De Fresamento”.

por

Fabio De Sousa Santos

Orientadora: **Profa. Dra. Janaina Fracaro De Souza Gonçalves**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio, às 14h do dia 01 de abril de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Profa. Dra. Janaina Fracaro De Souza Gonçalves
(Orientadora – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Carlos Alberto Schuch Bork
(IFSUL – Sapucaia do Sul)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Campus Cornélio Procópio

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio e incentivo em todas as dificuldades encontradas mesmo apesar da distância.

A Prof^a. Dr^a. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves pela orientação, dedicação e auxílio durante todo o tempo de realização desse trabalho.

A todos os colegas e funcionários da pós-graduação pela paciência e ajuda durante esse estudo, em especial o André, Lucas, Malaquias, Marcelo, Genésio, Jomar.

Agradeço também a parceria feita com o programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da UTFPR-Câmpus Londrina, em especial a Danielle, Ana, Francielli e Gabriella, por toda a ajuda e disponibilidade nos experimentos físico-químicos.

Aos amigos Samir e Milena pelo apoio e conhecimento repassado durante as viagens ao Centro de Competência e Manufatura (CCM-ITA).

A empresa MGL pelo interesse, suporte e fornecimento do material utilizado nas pesquisas desenvolvidas.

A Capes pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

SANTOS, Fabio de Sousa. Análise dos efeitos do tratamento de ozonização de fluidos de corte solúveis em um processo de fresamento. 2016. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

O descarte de fluido de corte degradado é um custo adicional aos processos de usinagem, como também prejudicial ao meio ambiente. Para reduzir os custos com usinagem alguns pesquisadores estão utilizando técnicas para tratar os fluidos de corte durante a própria usinagem, garantindo uma maior vida útil e minimizando os volumes de descarte. Este trabalho, por meio de um catalisador eletrofísico, verificou os efeitos do processo de tratamento por ozonização, tanto para um fluido de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*) quanto em um produto de base mineral semisintético ROCOL ULTRACUT 360°, em um processo de fresamento utilizando como matéria-prima o ferro fundido nodular GGG60. Para isso, foram avaliadas as características mecânicas durante o processo de fresamento e as características físico-químicas do fluido de corte. Os resultados na comparação do fluido novo com o fluido tratado, foi que o fluido tratado em relação às características mecânicas como desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e dureza dos corpos de prova foram constantes em relação ao fluido novo, enquanto houve uma melhora no consumo de potência de corte durante o fresamento e uma piora na oxidação da peça usinada. Nas características físico-química dos fluidos de corte, o pH conseguiu ser restaurado enquanto o oxigênio dissolvido não houve alteração significativa e a eliminação de microrganismos não obteve o resultado esperado.

Palavras-chave: Fluidos de corte. Tratamento de fluido de corte degradado. Ozônio. Catalisador eletrofísico.

ABSTRACT

SANTOS, Fabio de Sousa. Analysis of the effects of ozonation treatment to cutting soluble fluids on a milling process. 2016. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

The disposal of degraded cutting fluid is an additional cost to machining processes, but has also damaged to the environment. To reduce machining costs some researchers are using techniques to treat cutting fluids during the machining, ensuring a longer product life and minimizing disposal volumes. This work, through an electrophysical catalyst, verified the effects of treatment process for ozonation, for either a fluid of vegetable based Jatropha (*Jatropha curcas*) as for a product of semisynthetic mineral base ROCOL ULTRACUT 360 °, in a milling process using nodular cast iron GGG60 as raw material. To it were evaluated the mechanical characteristics on during the milling process and the physicochemical characteristics of the cutting fluid. The results in new fluid composition to the treated fluid is the fluid treated in relation to the mechanical characteristics such as tool wear, surface roughness and hardness of the specimens were constant for the new fluid, while there was an improvement in consumption cutting power for milling and a worsening in the oxidation of workpiece. The physicochemical characteristics of cutting fluids, the pH could be restored while the dissolved oxygen no significant change and the elimination of microorganisms did not get the expected result.

Keywords: Cutting fluids. Treatment of degraded cutting fluid. Ozone. Electrophysical catalyst.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Demanda mundial de fluido de corte	21
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos tipos de fluido de corte	32
Tabela 3 – Classificação dos ferros fundidos nodulares segundo a DIN 1963.	41
Tabela 4 – Comparação das propriedades entre ferro fundido cinzento, vermicular e nodular	41
Tabela 5 – Valores recomendados para o comprimento da amostragem	46
Tabela 6 – Composição química das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60.....	49
Tabela 7 – Propriedades mecânicas das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60.....	50
Tabela 8 – Caracterização do ferro fundido nodular GGG60	51
Tabela 9 – Propriedades físicas e químicas do fluido de corte solúvel ROCOL ULTRACUT360°	53
Tabela 10 – Propriedades físicas e químicas do fluido de corte solúvel vegetal de Pinhão-manso (<i>Jatropha curcas</i>)	53
Tabela 11 – Precisão do Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult-K	57
Tabela 12 – Condições de usinagem utilizados nos ensaios	60
Tabela 13 – Matriz de experimentos	62
Tabela 14 – Composição química (% peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado.....	68
Tabela 15 – Parâmetros de rugosidade tridimensionais com ensaios no fluido de corte mineral.....	83
Tabela 16 – Parâmetros de rugosidade tridimensionais com ensaios no fluido de corte vegetal.....	85
Tabela 17 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido mineral novo	89
Tabela 18 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido mineral tratado.....	89
Tabela 19 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido vegetal novo	90

Tabela 20 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido vegetal tratado	91
Tabela 21 – Dureza dos corpos de prova usinados no fluido mineral	92
Tabela 22 – Dureza dos corpos de prova usinados no fluido vegetal	92
Tabela 23 – Consumo energético durante o fresamento utilizando o fluido mineral	94
Tabela 24 – Consumo energético durante o fresamento utilizando o fluido vegetal.....	94
Tabela 25 - Análise de variância para desgaste de ferramenta no fluido mineral	103
Tabela 26 - Análise de variância para rugosidade superficial no fluido mineral	103
Tabela 27 – Resultados rugosidade superficial no fluido mineral grupos $F_N F_2$ e $F_T F_1$	104
Tabela 28 - Análise de variância para potência consumida no fluido mineral	105
Tabela 29 – Resultados de potência consumida no fluido mineral para todos os grupos	106
Tabela 30 - Análise de variância para desgaste de ferramenta no fluido vegetal	106
Tabela 31 - Análise de variância para rugosidade superficial no fluido vegetal	107
Tabela 32 - Análise de variância para potência consumida no fluido vegetal	108
Tabela 33 – Resultados de potência consumida no fluido mineral para todos os grupos	108
Tabela 34 – Classificação dos grupos em relação ao desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ranking dos 20 maiores países em demanda de fluido de corte em 2014	22
Figura 2 – Demanda de fluido de corte no Brasil de 2008 até 2014.....	22
Figura 3 – Volume de fluido de corte coletado ou contaminado que foi rerefinados	23
Figura 4 – Esquema de tratamento com catalisador eletrofísico.....	26
Figura 5 – Tipos de fluido de corte	29
Figura 6 – Formas representativas da molécula de ozônio.....	35
Figura 7 – Diagrama de fase Ferro-Carbono.....	38
Figura 8 – Formas da grafita: (I) cinzenta; (II) intermediária; (III) vermicular....	40
Figura 9 – Formas da grafita identificadas por microscopia eletrônica de varredura.....	40
Figura 10 – Desgaste de flanco de um inserto de metal duro em usinagem da liga Inconel 718	43
Figura 11 – Desgaste por adesão de um inserto de WC: (A) aumentado 2000x; (B) aumentado 41x.....	43
Figura 12 – Critérios de fim de vida de ferramenta conforme ISO 3685/1993 .	45
Figura 13 – Esquematização dos parâmetros R_a e R_t	45
Figura 14 – Esquematização do parâmetro R_z	47
Figura 15 – Blocos fundidos disponíveis para os ensaios de usinagem	50
Figura 16 – Micrografia do ferro fundido nodular GGG60	51
Figura 17 – Modelo da ferramenta SPHX 1205 PC TRG PBK - KY3500	52
Figura 18 – Fresa frontal: (A) fresa com o cone; (B) fresa com os insertos	52
Figura 19 – Máquina CNC Romi-D600 utilizada nos ensaios de usinagem: (A) parte	54
Figura 20- Microscópio Dino-Lite Pro modelo AM-313T.....	55
Figura 21 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P.....	55
Figura 22 - pH-Meter CG 818.....	55
Figura 23 - Catalisador Eletrofísico da fabricante Oil Trat.....	56
Figura 24 - Durômetro de bancada da marca Pantec	56
Figura 25 – Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120	57

Figura 26 – Microscópio eletrônico de varredura	58
Figura 27 – Interferômetro de luz branca da marca Taylor Hobson -	58
Figura 28 – Corpos de prova prontos para os ensaios de usinagem	59
Figura 29 – Fluxograma dos ensaios de usinagem	61
Figura 30- Esquema dos parâmetros avaliados	63
Figura 31 – Captação de desgaste de ferramenta pelo <i>software</i> DinoCapture	64
Figura 32 – Posições das medições da rugosidade superficial	64
Figura 33 – Captação de potência pelo <i>software</i> LabView	65
Figura 34 – Medição do pH do fluido de corte	66
Figura 35 – Locais dos espectros de uma das peças usinadas	68
Figura 36 – Microrganismos encontrados no fluido de corte degradado: (a) fungo no	69
Figura 37 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_1 no fluido mineral	72
Figura 38 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios na condição de usinagem F_1 com fluido de corte mineral: (A) fluido novo; (B) fluido tratado	72
Figura 39 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_2 no fluido mineral	73
Figura 40 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_2 com fluido de corte mineral: (A) fluido novo; (B) fluido tratado	74
Figura 41 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_1 no fluido vegetal.....	74
Figura 42 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_1 com fluido de corte vegetal: (A) fluido novo; (B) fluido tratado	75
Figura 43 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_2 no fluido vegetal.....	76
Figura 44 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_2 com fluido de corte vegetal: (A) fluido novo; (B) fluido tratado	76
Figura 45 – Rugosidade superficial R_a fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	78
Figura 46 – Rugosidade superficial R_t fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	79
Figura 47 – Rugosidade superficial R_z fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	79

Figura 48 – Rugosidade superficial R_a fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	80
Figura 49 – Rugosidade superficial R_t fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	80
Figura 50 – Rugosidade superficial R_z fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2	81
Figura 51 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido mineral novo: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D.....	83
Figura 52 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido mineral tratado: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D.....	84
Figura 53 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido vegetal novo: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D.....	85
Figura 54 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido vegetal tratado: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D.....	86
Figura 55 – Alinhamento das moléculas polares e apolares	87
Figura 56 – Imagem obtida por MEV com aumento de 200x dos espectros para determinação da composição química da superfície da peça final usinada em fluido mineral: (a) novo; (b) tratado	88
Figura 57 – Imagem obtida por MEV com aumento de 200x dos espectros para determinação da composição química da superfície da peça final usinada em fluido vegetal: (a) novo; (b) tratado.....	90
Figura 58 – Valores do pH no fluido mineral durante o tratamento	96
Figura 59 – Valores do pH no fluido vegetal durante o tratamento	96
Figura 60 – Coloração das amostras retiradas do óleo mineral e vegetal.....	99
Figura 61 – Proliferação de bactérias no fluido mineral	100
Figura 62 – Proliferação de fungos no fluido mineral	100

Figura 63 – Proliferação de bactérias no fluido vegetal.....	101
Figura 64 – Proliferação de fungos no fluido vegetal	101
Figura 65 – Teste de Tukey para rugosidade superficial no fluido mineral	104
Figura 66 - Teste de Tukey para potência consumida no fluido mineral	105
Figura 67 - Teste de Tukey para potência consumida no fluido vegetal	108
Figura 68 – Esquematização das conclusões obtidas.....	113

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta Postiça de Corte
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> - (Instituto Alemão de Normalização)
EDX	<i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X)
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – (Organização Internacional de Normalização)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas
POAs	Processos Oxidativos Avançados
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de usinagem [mm]
dx	Comprimento diferencial no eixo x [μm]
dy	Comprimento diferencial no eixo y [μm]
f	Velocidade de avanço [mm/min]
F_1	Condições de usinagem com parâmetros otimizados
F_2	Condições de usinagem com parâmetros da empresa
F_N	Fluido de corte novo
F_T	Fluido de corte tratado
$f(x, y)$	Altura da superfície no ponto (x, y) em relação ao plano médio
\bar{f}	Altura do plano médio [μm]
f_z	Avanço por inserto [mm/dente]
HB	Dureza Brinell [HB]
i	Parâmetro de contagem
KT	Profundidade de cratera [mm]
KF	Distância frontal entre cratera e flanco [mm]
L_x	Extensão da área de amostragem no eixo x [μm]
L_y	Extensão da área de amostragem no eixo y [μm]
n	Rotação
NA	Não Analisado
ND	Não Definido
n_{p_i}	Altura dos picos mais altos da área de amostragem [μm]
n_{v_i}	Altura dos vales mais profundos da área de amostragem [μm]
$n_{v_{máx}}$	Altura do maior vale da área de amostragem [μm]
O_3	Ozônio
rpm	Rotação por minuto
R_a	Rugosidade média [μm]
R_t	Rugosidade total [μm]
R_z	Rugosidade de profundidade média [μm]
S_a	Parâmetro de rugosidade relacionado com a média aritmética das alturas das rugosidades [μm]
S_v	Parâmetro de rugosidade relacionado à profundidade do vale mais profundo da área de amostragem [μm]
S_z	Parâmetro de rugosidade relacionado com a média de dez pontos da rugosidade, sendo cinco valores associados aos picos mais altos e outros cinco associados aos vales mais profundos [μm]
V_b	Desgaste de flanco médio [mm]
V_{bMax}	Desgaste de flanco máximo [mm]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
WC	Carboneto de tungstênio
λ_c	<i>Cut Off</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	20
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivos Específicos.....	24
1.3 JUSTIFICATIVA.....	25
1.4 METODOLOGIA	25
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 FLUIDOS DE CORTE	28
2.1.1 Classificações dos Fluidos de Corte	29
2.1.1.1 Óleos integrais.....	29
2.1.1.2 Óleos solúveis em água.....	30
2.1.2 Tratamentos dos Fluidos de Corte	32
2.1.3 Tratamento do Fluido de Corte por Ozônio.....	35
2.2 FERRO FUNDIDO NODULAR GGG60	37
2.2.1 Definição de Ferro Fundido.....	37
2.2.2 Classificação do Ferro Fundido	39
2.2.3 Ferro Fundido Nodular	40
2.3 USINABILIDADE.....	42
2.3.1 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta	42
2.3.2 Critério de Fim de Vida da Ferramenta.....	44
2.4 TOPOGRAFIA	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 MATERIAIS.....	49
3.1.1 Corpo de Prova.....	49
3.1.2 Ferramenta de Corte.....	51
3.1.3 Fluidos de Corte.....	52
3.1.4 Máquina- Ferramenta	54
3.1.5 Equipamentos Utilizados para Captação dos Dados	54
3.2 MÉTODOS.....	59
3.2.1 Preparação da Máquina e Corpos de Prova	59

	17
3.2.2 Metodologia dos Ensaios	60
3.2.3 Captação dos Dados	62
3.2.3.1 Desgaste da ferramenta de corte.....	63
3.2.3.2 Rugosidade superficial do corpo de prova.....	64
3.2.3.3 Potência consumida durante a usinagem	65
3.2.3.4 Tratamento do fluido de corte utilizando método catalisador eletrofísico	65
3.2.3.5 Dureza superficial do corpo de prova usinado	66
3.2.3.6 Análise topográfica da ferramenta de corte	66
3.2.3.7 Microscopia eletrônica por varredura (MEV) da ferramenta de corte e dos corpos de prova usinados.....	67
3.2.3.8 Análises microbiológicas e físico-químicas dos fluidos de corte	69
3.2.4 Métodos para Análise Estatística dos Resultados (ANOVA e teste de Tukey)	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 DESGASTE DE FERRAMENTA.....	71
4.1.1 Fluido Mineral	71
4.1.2 Fluido Vegetal	74
4.1.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	77
4.2 TOPOGRAFIA DA PEÇA USINADA E DAS ARESTAS DA FERRAMENTA	77
4.2.1 Rugosidade Superficial da Peça Usinada.....	77
4.2.1.1 Fluido mineral	78
4.2.1.2 Fluido Vegetal.....	79
4.2.1.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	81
4.2.2 Análise Topográfica das Ferramentas	82
4.2.2.1 Fluido Mineral	82
4.2.2.2 Fluido Vegetal.....	84
4.2.2.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	86
4.3 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X.....	87
4.3.1 Fluido Mineral	87
4.3.2 Fluido Vegetal	89
4.3.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	91
4.4 DUREZA DOS CORPOS DE PROVA USINADOS.....	91

4.4.1 Fluido Mineral	92
4.4.2 Fluido Vegetal	92
4.4.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	93
4.5 POTÊNCIA CONSUMIDA DURANTE O FRESAMENTO	93
4.5.1 Fluido Mineral	93
4.5.2 Fluido Vegetal	94
4.5.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	95
4.6 pH	95
4.6.1 Fluido Mineral	95
4.6.2 Fluido Vegetal	96
4.6.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	97
4.7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	97
4.7.1 Oxigênio Dissolvido	98
4.7.2 Quebra de Emulsão	98
4.7.3 Análise Microbiológica	99
4.7.3.1 Fluido Mineral	99
4.7.3.2 Fluido Vegetal.....	100
4.7.3.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	101
4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS	102
4.8.1 Fluido Mineral	102
4.8.2 Fluido Vegetal	106
4.8.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal	109
5 CONCLUSÕES	110
REFERÊNCIAS.....	114
ANEXO A - Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey	121

1 INTRODUÇÃO

O primeiro pesquisador a utilizar o fluido de corte foi F. W. Taylor em 1894, conseguindo um aumento na velocidade de corte em 33%, sem prejuízo na vida útil da ferramenta, quando foi utilizada água. A função principal do fluido de corte é introduzir uma melhora no processo da usinagem dos metais, como redução do atrito entre ferramenta e cavaco, proporcionando uma melhoria na vida útil da ferramenta e também auxiliando na refrigeração do processo (FERRARESI, 1977).

Atualmente, existe uma grande variedade de fluidos de corte de origem mineral e vegetal consumido nas indústrias de processamento metal mecânico, que acarreta em um grande prejuízo ambiental em função do elevado potencial tóxico e da sua baixa biodegradabilidade desses fluidos. Além disso, pode provocar problemas à saúde do operador e dentre as principais doenças originadas pelo contato prolongado dos fluidos de corte, estão os problemas respiratórios e epidemiológicos, além da contaminação do meio ambiente devido à disposição incorreta e às vezes antecipada destes fluidos (MORAIS, 2014).

Nas últimas décadas, o consumo de recursos naturais, a poluição do ar e os resíduos industriais vêm despertando grande preocupação dos órgãos ambientais e das autoridades públicas, no sentido de viabilizar a harmonia entre as atividades industriais e o meio ambiente. O estudo da recuperação do óleo está intimamente ligado ao processo de desemulsificação empregado. A formação de uma emulsão estável depende, principalmente, da presença de um filme emulsionante capaz de manter as gotas de óleo dispersas na água. A desestruturação deste filme é a condição básica para a quebra da emulsão. A desemulsificação de uma emulsão pode ser sumarizada por quatro fenômenos que podem ocorrer sequencialmente ou simultaneamente, envolvendo os processos usuais de floculação, coalescência e separação de fases (ZIMMERMAN, 2004).

Muitas técnicas são utilizadas, na prática, para provocar o fenômeno da desemulsificação, destacando-se os métodos físicos e químicos. Embora cada

técnica possua seu próprio princípio de atuação, em geral a operação de desemulsificação consiste em se “quebrar a emulsão”, ou seja, conseguir que as gotículas coalesçam e aumentem gradativamente de tamanho até darem origem à separação nítida de fases. Em resumo, as etapas a serem desenvolvidas para quebrar uma emulsão consistem em destruir o filme emulsionante, na coalescência e sedimentação das gotículas (MAIA, 2007).

Os métodos físicos que fazem uso de temperatura ou campo elétrico agem de forma a aumentar a frequência de contato entre as gotas dispersas e assim, provocar a separação entre as fases (ICHIKAWA et al., 2004). Já os métodos químicos envolvem o uso de desemulsificantes (sais e ácidos) que afetam as propriedades interfaciais da superfície adsorvida e aumentam a taxa de coalescência das gotas dispersas (CHANG et al., 2000).

Desse modo, o descarte de fluido de corte degradado vem se tornando um custo adicional aos processos de usinagem, como também tem prejudicado muito o meio ambiente. Isso devido aos atos de descarte incorretos e a tratamentos não eficazes. Para reduzir os custos com usinagem alguns pesquisadores estão utilizando técnicas para tratar os fluidos de corte durante a própria usinagem, garantindo uma maior vida útil e minimizando os volumes de descarte. Um método que está sendo bastante utilizado em tratamento de efluentes é a utilização de catalisadores eletrofísicos. Este gera ozônio pelo efeito corona, que por sua vez age na estrutura das bactérias, até eliminar os microrganismos e recuperar o pH do fluido em decomposição (ALMEIDA, 2004).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O primeiro estudo sobre fluidos de corte foi realizado por W. H. Northcott em 1868 com um livro intitulado “*A Treatise on Lathes and Turning*”. No meio da década de 1890, F. W. Taylor foi quem salientou que a utilização de fluidos de corte era o que permitia a utilização de maiores velocidades de corte, resultando em maior vida útil da ferramenta e superiores taxas de remoção de material. Com isso, concluiu-se que a utilização do fluido de corte

tornaria mais fáceis os processos de usinagem (DEGARMO, 2003), (SHAW, 1991), (SCHEY, 2000).

A Tabela 1 (FUCHS, 2014) apresenta a demanda mundial de fluido de corte dos últimos 15 anos. É possível perceber que do ano 2000 até 2008 ocorreu uma variação entre 35 até 37 milhões de toneladas, com uma queda acentuada para 32 milhões de toneladas em 2009 devido à crise mundial, voltando a crescer em 2010 para o patamar de 35 milhões de toneladas, e que se mantém até 2014.

Tabela 1 – Demanda mundial de fluido de corte

Ano	Demanda Mundial (Milhões de Toneladas)
2000	36,4
2001	35,6
2002	35,7
2003	35,4
2004	36,1
2005	36,5
2006	36,9
2007	37,1
2008	36,0
2009	32,3
2010	34,5
2011	35,1
2012	35,0
2013	35,3
2014	35,4

Fonte: Adaptado de Fuchs (2014).

A Figura 1 apresenta os 20 maiores consumidores de fluido de corte no ano de 2014, sendo liderado pela China e EUA, seguidos pela Índia, Rússia e Japão nas cinco primeiras posições e o Brasil aparecendo no 6º lugar.

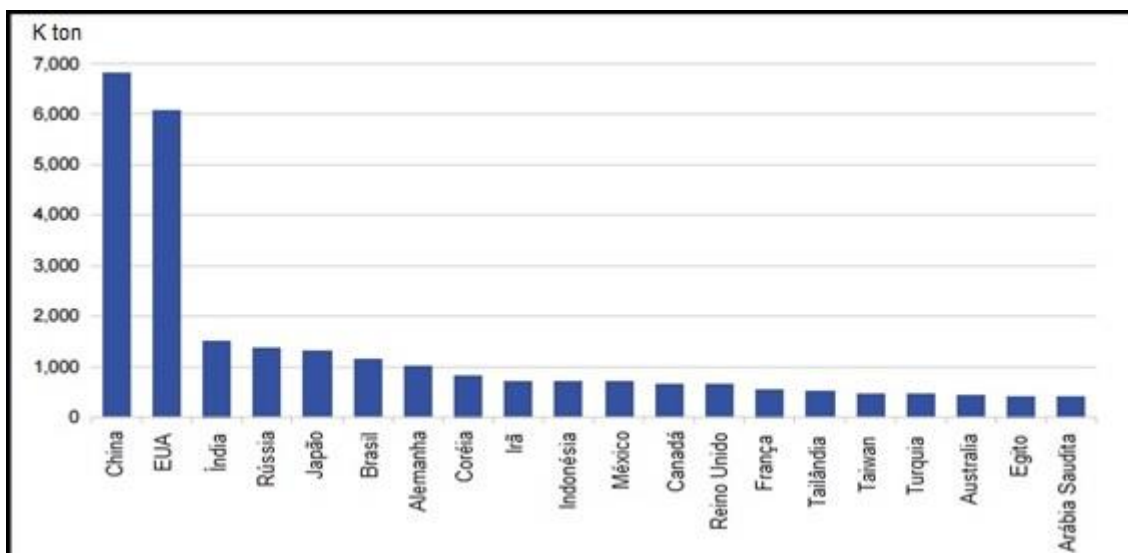


Figura 1 – Ranking dos 20 maiores países em demanda de fluido de corte em 2014
Fonte: Adaptado de Fuchs (2014).

A Figura 2 apresenta o consumo de fluido de corte no Brasil no período de 2008 até 2014, sendo verificado que em 2009 o consumo também caiu drasticamente devido a crise, mas logo em seguida voltou a crescer e se estabilizou. No ano de 2014 houve uma pequena redução, explicada pela indústria, devido ao período da Copa do Mundo e como consequência aos diversos feriados, o tempo de produção foi muito menor que nos anos anteriores.

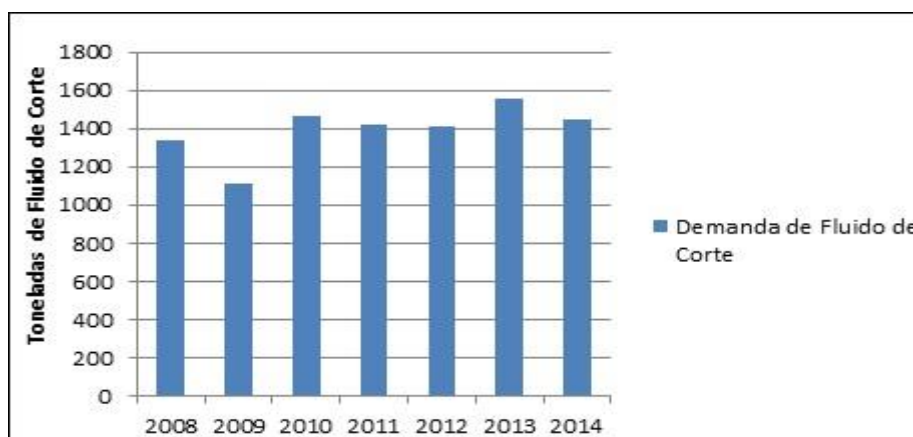


Figura 2 – Demanda de fluido de corte no Brasil de 2008 até 2014
Fonte: Adaptado de Lubes (2014).

Devido às emergentes desvantagens do uso de fluido de corte, este está se tornando um alvo significativo, para reduzi-lo ou não utilizá-lo. Devido a

poluição ambiental e para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores, estes problemas já despertaram uma grande atenção do mundo. Para isso, tem-se que explorar novas técnicas e novas tecnologias da utilização e descarte de fluido de corte para proteger o meio ambiente e seus recursos, e também para manter o desenvolvimento sustentável da sociedade humana (ZHANG, 2011).

As próprias indústrias percebem que os despejos industriais são perdas de insumo e energia, e que os recursos naturais são limitados, aparecendo a necessidade de modificar os processos de consumo/tratamento dos fluidos de corte. Para evitar perdas e diminuir a quantidade de material a ser tratado depois do descarte, mudou-se o foco de tratar os efluentes gerados para utilizar meios de reduzir a geração dos mesmos (JUNIOR, 2006).

Um dado importante nessa área de reutilizar o fluido de corte está sendo aplicado aqui no Brasil, como é visualizado pela Figura 3, onde mostra o volume de fluido de corte reutilizado (rerefinao), o que diminui a quantidade que precisa ser fabricado ou importado para atender a demanda. No ano de 2014 foram rerefinaos 451,9 toneladas de fluido de corte (31,3 % do consumo total anual), o que exibe um aumento considerável nesse quesito de reciclagem de fluido de corte já que em 2008 foram rerefinaos apenas 293,0 toneladas (21,8% do consumo anual).



Figura 3 – Volume de fluido de corte coletado ou contaminado que foi rerefinao
Fonte: Adaptado de Lubes (2014).

Neste contexto o presente trabalho busca reduzir o consumo de fluido de corte, aumento da sua vida útil, diminuindo a quantidade de descarte, sendo ambientalmente favorável, além de diminuir custos de usinagem e colaborar para reduzir e prevenir riscos à saúde do operador com a eliminação de microrganismos durante o tratamento com o catalisador eletrofísico (ozonização).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral analisar os efeitos do processo de ozonização como forma de tratamento de fluidos de corte degradados por meio de um catalisador eletrofísico, tanto para um fluido de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*) quanto em um produto de base mineral semissintético ROCOL ULTRACUT 360°, em um processo de fresamento.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Analisar se houve alterações nas características mecânicas (desgaste de ferramenta, consumo de potência, rugosidade superficial, dureza e topografia da peça usinada) durante a usinagem com os fluidos novos em comparação com os fluidos tratados ou mudança na qualidade do produto final;
- Avaliar a eficiência da ozonização por meio do catalisador eletrofísico na eliminação de microrganismos e de testes físico-químicos como a quantidade de oxigênio dissolvido e a coloração após o tratamento do fluido degradado.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para qualquer empresa, a redução de custos é um fator muito importante, mas principalmente para os setores de usinagem que podem ser beneficiadas com o tratamento utilizando ozônio por meio do catalisador eletrofísico, sendo possível recuperar o fluido de corte degradado, além de diminuir os custos, melhorando as condições de trabalho, eliminando os microrganismos, e prevenindo riscos à saúde do operador.

Outro aspecto importante é o ambiental. Com a recuperação do fluido degradado, a sua vida útil tende a aumentar e o volume do descarte diminuir, assim tendo menos água em tratamentos de recuperação para posteriormente ser recolocada nos corpos hídricos.

Com isso, se faz necessária a verificação se o método de tratamento por ozonização é eficaz e se não interfere no produto final ou altera alguma característica mecânica durante a usinagem e que seja prejudicial para o meio ambiente, para a saúde do operador ou eleve os custos de usinagem.

O método de tratamento de ozonização por meio de catalisador eletrofísico, deve ser realizado próximo ao local de armazenamento do fluido de corte, devido à instabilidade do ozônio. Esse processo transforma o oxigênio do ambiente em ozônio, que é gerado pela descarga elétrica (efeito de corona), onde o ar ambiente passa entre dois eletrodos que possuem uma diferença de potencial. E o custo para utilização desse tratamento é apenas o consumo de energia elétrica, que é muito pequeno.

1.4 METODOLOGIA

O trabalho utilizou como material de usinagem o ferro fundido nodular (GGG60), que foi usinado (fresamento) em um centro de usinagem ROMI D600 no laboratório de Comando Numérico Computadorizado (CNC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio.

Para o tratamento do fluido degradado foi usado o catalisador eletrofísico que produz ozônio pelo processo de descarga de corona, sendo direcionado o seu fluxo para que o fluido de corte fosse tratado diretamente no reservatório da máquina, que possui uma capacidade de 300 litros. O tempo de tratamento foi de 15 dias com o catalisador funcionando 24 horas por dia, em uma frequência de 15 minutos acionado e 45 minutos desligado por meio de um *timer*. A Figura 4 mostra o esquema de tratamento eletrofísico.



Figura 4 – Esquema de tratamento com catalisador eletrofísico
Fonte: Autoria própria.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo este primeiro a introdução, que contém a delimitação do tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a metodologia básica empregada.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, contendo breves introduções sobre fluidos de corte e seus tipos de tratamento, tratamento por ozônio, ferro fundido em geral e com uma abordagem específica sobre o ferro

fundido nodular, usinabilidade desse material e comentários sobre rugosidade superficial e tridimensional.

O capítulo 3 traz os materiais utilizados nos ensaios e os métodos empregados para as análises das características mecânicas do material e das características microbiológicas e físico-químicas dos fluidos de corte.

No capítulo 4 são apresentados os resultados de desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e tridimensional, potência consumida, dureza superficial do material usinado, MeV das arestas da ferramenta de corte, EDX das peças usinadas, pH, oxigênio dissolvido, coloração, análises microbiológicas do fluido de corte e as análises estatísticas desses resultados pela análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey.

O capítulo 5 traz as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica referente aos fluidos de corte e seus tipos de tratamento, ferro fundido em geral e com uma abordagem específica sobre o ferro fundido nodular, usinabilidade do ferro fundido e rugosidade superficial e tridimensional.

2.1 FLUIDOS DE CORTE

Fluidos de corte são utilizados no processo de usinagem com o objetivo de arrefecimento e lubrificação da peça em usinagem e da ferramenta de corte. Para que isso ocorra, a composição do fluido de corte deve ser estável de modo que as propriedades não se modifiquem com a diferença de temperatura durante o tempo de usinagem para não provocar corrosão na peça ou na ferramenta e não deteriorar o óleo lubrificante e os componentes da máquina (WAKIL, 2002).

A importância ambiental do fluido de corte se torna aparente quando é considerado o fato de que a cada ano 580 toneladas de fluido de corte têm de ser eliminados na Alemanha (KOCH et al., 2014). Globalmente, o consumo anual de água para a utilização de fluido de corte é estimado em 40 milhões de toneladas (CHENG, 2006).

Apesar do enorme benefício que os fluidos de corte trazem para a usinagem, há problemas econômicos e riscos ecológicos. A contaminação microbiana e a degradação da água miscível são problemas que levam a preocupações funcionais e de higiene, pois são propensas à contaminação por bactérias e fungos (KOCH, 2008). A degradação microbiana dos fluidos provoca uma série de problemas começando com a descoloração da emulsão e da evolução do mau cheiro, para a perda de qualidade das peças de trabalho, o aumento do desgaste da ferramenta e o surgimento de peça fora do especificado. Além disso, também altera as propriedades físicas e químicas, como diminuição do valor de pH ou a capacidade de prevenção de corrosão e

altas cargas de contaminação bacteriana ou fúngica que são um problema higiênico e representam um risco para a saúde dos operadores das máquinas. (RABENSTEIN et al., 2009).

2.1.1 Classificações dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte podem ser classificados em dois grupos distintos: óleos integrais e emulsões aquosas. Os tipos de fluido de corte e suas subdivisões podem ser visualizados na Figura 5.

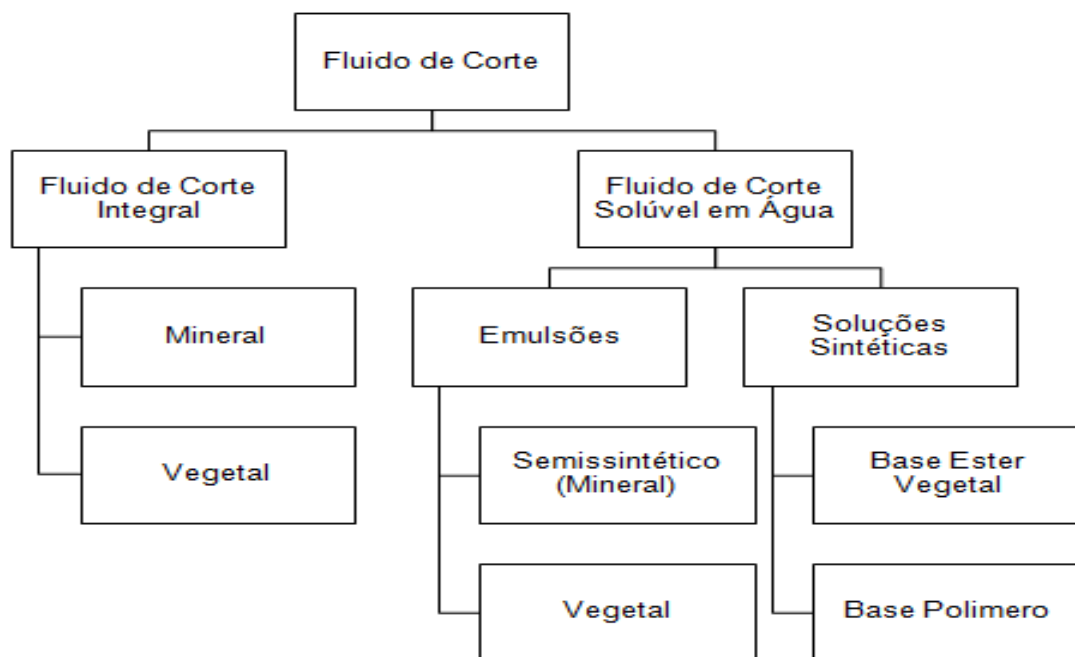


Figura 5 – Tipos de fluido de corte
 Fonte: Adaptado de RUNGE e DUARTE (1990).

2.1.1.1 Óleos integrais

São os óleos puros, sem mistura com a água e a variedade de viscosidade e níveis de aditivos é grande. Esse tipo de fluido é muito eficiente

para lubrificação e resistência à corrosão, porém são ruins no quesito refrigeração, além de serem inflamáveis o que impossibilita a utilização em usinagem com temperaturas elevadas por formarem neblina e fumaça (SHOKRANI, 2012).

Os fluidos integrais são, preferencialmente, empregados em operações que necessitam de boa capacidade lubrificante e são basicamente compostos por óleos minerais, agentes antioxidantes, agentes de extrema pressão e agentes de oleosidade. Devido a esse aspecto lubrificante, esse óleo proporciona menores forças de corte, o que faz com que o coeficiente de atrito seja reduzido e com isso, a vida útil da ferramenta aumenta e também melhora o acabamento da superfície usinada (RUNGE; DUARTE, 1990).

2.1.1.2 Óleos solúveis em água

Emulsão é uma mistura entre dois líquidos imiscíveis, água com óleo por exemplo, por meio de surfactantes tensoativos. A fase oleosa é responsável pela lubrificação, sendo que a água promove o resfriamento. A água é considerada um líquido refrigerante satisfatório devido à sua alta condutividade térmica e o alto calor específico. As características refrigerantes e lubrificantes podem ser balanceadas pela concentração de água que, normalmente, varia de acordo com a operação mecânica a ser desenvolvida (WEI, 2003).

As propriedades físico-químicas das emulsões podem ser melhoradas segundo Maia et al. (2007) pela seleção criteriosa dos aditivos, tais como biocidas, antiespumantes, anticorrosivos, detergentes, aditivos de extrema pressão, dentre outros. Contudo, as características lubrificantes e refrigerantes também podem ser alteradas por meio da concentração, que depende das necessidades do processo.

Os fluidos emulsionáveis são classificados em base vegetal, mineral, semissintético e sintético, e são indicados para operações em que a refrigeração é um ponto mais crítico do que a lubrificação e são utilizados em

operações de usinagem com baixos e médios avanços, baixas e médias profundidade de corte, e médias e altas velocidade de corte.

Os óleos de base vegetal são compostos por aproximadamente 98% de triglicerídeos e os 2 % restantes referem-se a mono e diglicerídeos, ácidos graxos livres, fosfolípidios, constituintes insaponificáveis, ésteres de forbol, tocoferóis, clorofila, dentre outros. Onde triglicerídeos são longas cadeias de moléculas de glicerol ligadas com três ácidos graxos (MAIA, 2007).

Fluidos de base mineral não possuem boa capacidade de refrigeração, mas protegem contra a corrosão e oxidação. A sua capacidade de lubrificação fica dividida entre os óleos ativos que possuem boa lubrificação e os inativos que dependem da adição de aditivos para melhorar a lubrificação.

Nas emulsões, o óleo mineral está disperso em forma de gotículas na água, devido à presença de emulsificantes, os quais reduzem o tamanho das gotículas de óleo mineral, mantendo-as dispersas e conferindo às mesmas, cargas repulsivas, evitando assim sua coalescência. Este sistema torna-se um ambiente favorável à manutenção e reprodução de uma ampla variedade de microrganismos, que alteram as propriedades do fluido e reduzem o seu tempo de vida (RUNGE; DUARTE, 1990).

Fluidos semissintéticos são fluidos que contêm uma menor quantidade de óleo mineral quando comparado aos fluidos emulsionáveis convencionais. Um termo mais apropriado para este tipo de fluido de corte seria óleo solúvel com baixo teor de óleo mineral (RUNGE; DUARTE, 1990).

Fluidos sintéticos são os que não contêm óleos minerais e que possuem substâncias químicas solúveis em água. São compostos por aditivos, biocidas, antiespumantes, dentre outros adicionados à água (MAIA, 2007).

Na Tabela 2 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de fluido de corte de acordo com KURAM et al. (2013).

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos tipos de fluido de corte

Tipo de Fluido de Corte	Vantagens	Desvantagens
Óleos integrais	Boa lubrificação e resistência à corrosão.	Baixa refrigeração, cria neblina e fumaça a altas temperaturas e limitado a operações de baixa velocidades.
Óleos solúveis	Boa lubrificação e refrigeração.	Problemas de corrosão, perda por evaporação e crescimento bacteriano.
Semissintéticos	Boa lubrificação, boa refrigeração e bom controle microbiano.	Estabilidade depende da dureza da água utilizada, é facilmente afetado por outros fluidos da máquina e cria espuma.
Sintéticos	Boa refrigeração, bom controle microbiano, resistência à corrosão, não cria espuma e neblina.	Baixa lubricidade e é facilmente afetado por outros fluidos da máquina

Fonte: Adaptado de KURAM (2013).

2.1.2 Tratamentos dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte se contaminam com o uso, perdendo sua eficácia e suas propriedades, e devem ser substituídos por novos, produzindo assim, fluidos de corte residuais, que são geralmente ricos em DQO (Demanda Química de Oxigênio), COT (Carbono Orgânico Total) e turbidez. A quantidade de fluido de corte gerado, a partir de operações de usinagem, aumenta a cada ano, constituindo um sério perigo para o ambiente devido à sua elevada superfície-ativa e cargas de poluentes orgânicos. Estes fluidos exigem um tratamento, como por exemplo a microfiltração, ultrafiltração, adsorção, coagulação química e biológica (processo aeróbio e anaeróbio), antes da

eliminação para atender aos padrões de descarga de esgotos locais, (KOBAYA et al., 2007).

Vários métodos são usados para tratar resíduos dos fluidos de corte e estes métodos envolvem a separação da fase oleosa, a partir da fase aquosa e o tratamento de cada fase independentemente. O concentrado de fase oleosa pode ser incinerado, por exemplo, em uma indústria de cimento, e a fase aquosa é eventualmente condicionada e enviada para uma estação de tratamento de esgoto. O grande problema na gestão dos fluidos de corte na indústria está ligado com o ataque biológico por microrganismos. Isto tende a provocar uma deterioração do desempenho do fluido e induz a todos os tipos de outros problemas tais como a corrosão, a geração de odor e riscos de saúde para os trabalhadores (AZMI, 2014).

Existem os processos físicos, biológicos e químicos para tratar esses fluidos de corte, sendo na sequência descritos e mostrados alguns exemplos.

Processos físicos são utilizados para separar os resíduos dos fluidos, e os normalmente utilizados são: separação de fases (decantação, filtração, centrifugação), transição de fases (destilação, evaporação), transferência de fases (extração por solvente) e separação molecular (microfiltração, ultrafiltração, diálise). Alguns desses processos ocorrem pela utilização de membranas que, devido a sua permeabilidade, separam as substâncias de diferentes tamanhos e formas (HILAL, 2004).

Nos processos biológicos se destacam os métodos de lagoas aeradas, sistemas aeróbios com biofilmes e reator anaeróbio. Esses processos visam reproduzir o que acontece em um corpo d'água, mas em um espaço menor e de forma mais econômica, retirando os sólidos coloidais e estabilizar a matéria orgânica, o que ocorre por meio da atividade dos microrganismos (MONTEIRO, 2006).

O que difere esses processos biológicos é o crescimento biológico (suspenso ou aderido), quanto ao fluxo (contínuo ou intermitente) e quanto às características hidráulicas (mistura completa, fluxo de pistão ou fluxo arbitrário) (MENDONÇA, 2002).

Existem também os processos químicos que devido à adição de produtos químicos ou devido a reações químicas, removem ou transformam os contaminantes potencialmente perigosos em compostos menos danosos ao ser

humano e ao meio ambiente. Os principais processos são a floculação, precipitação química, oxidação química e correção de pH.

Recentemente os processos de degradação química mais utilizados têm sido por oxidação química, comumente chamados de Processos Oxidativos Avançados (POAs), pois possibilitam a degradação de compostos que causam contaminação da água, principalmente os recalcitrantes, transformando-os em CO₂ e H₂O em tempos de reação de apenas algumas horas. Os POAs são baseados na geração do radical hidroxila (OH[•]), com característica fortemente oxidante, o que faz com que incorpore o hidrogênio e gere radicais orgânicos e a adição de oxigênio molecular leva a produção de peróxido, Equação (1), os quais são poucos estáveis e reagem com outros materiais formando compostos mais simples, Equação (2), (LEGRINI, 1993).



Mas devido à alta reatividade do radical hidroxila, deve ser gerado no próprio meio reacional e como alternativa, os POAs podem ser usados como um pré ou pós-tratamento para aumentar a biodegradabilidade dos resíduos. Podem ser classificados em homogêneos ou heterogêneos, em função da forma dos catalisadores, assistidos ou não por radiação ultravioleta (BAUER, 1999).

O catalisador eletrofísico é utilizado para tratar o fluido de corte durante a usinagem, com o propósito de aumentar a vida útil do fluido sem precisar ficar descartando todo o conteúdo do reservatório para um tratamento posterior e, nesse caso, o equipamento utiliza ozônio para realizar esse tratamento simultâneo. Alguns dos pontos positivos é que a produção não precisa parar para realizar o tratamento, a matéria prima utilizada é apenas o ar ambiente e o custo de produção é apenas a energia elétrica, sendo o consumo muito pequeno. O ozônio possui um poder oxidativo 1,5 vezes maior que o do cloro, com isso é capaz de eliminar totalmente os microrganismos.

2.1.3 Tratamento do Fluido de Corte por Ozônio

Van Marum, um físico holandês, foi o primeiro a relatar sobre o ozônio em 1785 quando observou uma descarga elétrica no ar provocar um odor irritante (RIDEAL, 1920). Entretanto, a descoberta do ozônio só foi anunciada oficialmente em 1840 por Schönbein, que deu esse nome devido à palavra grega “ozein” que significa cheiro (SCHÖBEIN, 1840).

Devido as investigações de Hunt (1848) foi possível determinar que a molécula de ozônio é constituída por três átomos de oxigênio, como ilustrado por Bailey (1978) na Figura 6.

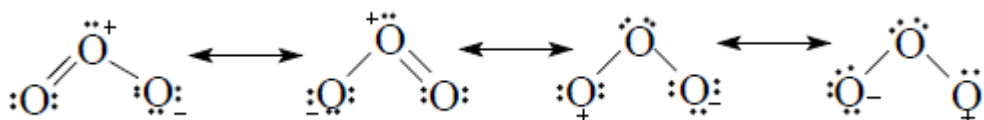


Figura 6 – Formas representativas da molécula de ozônio
 Fonte: BAILEY (1978) apud SILVA (2004).

Após 1840, o primeiro gerador de ozônio foi fabricado em Berlim por Von Siemens. O químico francês Marius Paul Otto foi a primeira pessoa a fundar uma companhia especializada em fabricação e instalação de equipamentos de ozônio: “*Compagnie des Eaux et de l’Ozone*” em 1897. A primeira instalação de tratamento de água utilizando ozônio para desinfecção de água potável foi construída em 1893 na Holanda em Oudshoorn. Outra unidade foi instalada em Nice, França em 1906. O cloro ainda era preferido em relação ao ozônio para desinfecção de água pela força do hábito e não precisar readequar todo o sistema de tratamento. No entanto, a partir de 1970, as aplicações de ozônio nos Estados Unidos e Europa começaram a aumentar. Este aumento aconteceu devido à descoberta dos trihalometanos que são subprodutos tóxicos resultantes das reações de desinfecção do cloro em 1973 (LANGLAIS et al., 1991 apud PACHECHO, 2012).

Devido à instabilidade do ozônio, que se mantém por aproximadamente 3 segundos na fase gasosa, impedindo a sua armazenagem, torna-se necessário a sua geração “*in situ*”. O processo de produção utilizado é por uma

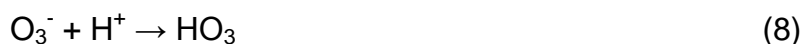
descarga elétrica, a qual é a técnica que possui maior taxa de transformação do oxigênio em ozônio, também conhecida como efeito corona. Esse método consiste em passar o ar ou oxigênio puro entre dois eletrodos que possuem uma diferença de potencial de aproximadamente 10kV (BALAKRISHNAN, 2002). A transformação do oxigênio em ozônio (O_3) ocorre pelas Equações (3) e (4):



Devido aos recentes avanços nos sistemas de geração de ozônio, a energia requerida para sua produção vem diminuindo, aumentando a utilização desse processo (BELTRÁN, 2004).

O ozônio entrando em contato com o efluente aquoso pode atuar diretamente como agente oxidante ou proporcionar uma oxidação indireta do poluente por meio das espécies de radicais que possuem um elevado poder de oxidação, provenientes de sua decomposição (HOIGNE et al., 1982).

Segundo Hoigne et al. (1982) a velocidade de reação de decomposição do ozônio na fase aquosa aumenta com a elevação do pH, e com essa reação ocorre a produção da hidroxila OH^\bullet que é o radical que oxida os compostos orgânicos devido ao seu elevado potencial de oxidação. As reações de decomposição do ozônio no estado aquoso para formar a hidroxila são visualizadas pelas Equações (5) até (9):



Em face destas constatações, grandes esforços têm sido feitos para elevar a velocidade de degradação do O_3 em fase aquosa, objetivando assim reduzir a quantidade de ozônio necessária na reação e elevar a eficiência do processo de degradação (WINARNO et al., 2002 apud SILVA, 2004).

Segundo Almeida (2004), os avanços dos processos oxidativos vêm contribuindo para o desenvolvimento do controle da poluição ambiental. O processo de ozonização apresenta-se eficiente, principalmente no aumento da biodegradabilidade de diferentes tipos de efluente, mas a eficiência do processo de ozonização depende de diversos fatores, tais como o pH, tipos de contaminantes.

O ozônio, além de decompor os compostos orgânicos dos efluentes, também é capaz de reduzir a Demanda Química de Oxigênio e é eficiente na recuperação de cor original, eliminando o mau cheiro e reduzindo assim o ambiente para proliferação de novos microrganismos (TREVIZANI, 2012).

2.2 FERRO FUNDIDO NODULAR GGG60

Esta seção irá tratar do material de corte que será utilizado, sobre a definição e classificação do ferro fundido em geral, e mais especificadamente, sobre ferro fundido nodular GGG-60.

2.2.1 Definição de Ferro Fundido

As ligas ferrosas, constituídas principalmente por ferro, são as mais utilizadas devido à abundante quantidade de ferro existente na crosta terrestre e por possuir uma grande variedade nas escalas das propriedades mecânicas, além de ser relativamente um processo econômico (CALLISTER, 2007).

Uma ampla faixa da liga Ferro – Carbono é denominada como Ferro Fundido, normalmente possuindo uma quantidade de Carbono entre 1,7% a 6,7%, ferro balanceado, além de elementos como silício, manganês, enxofre e fósforo encontrados em porcentagens pequenas, onde são consideradas impurezas normais (CHIAVERINI, 2005).

Os ferros fundidos têm um baixo ponto de fusão, assim requerem menor energia para uma fabricação e possuem uma fácil moldação, sendo um

material barato e versátil para fins de projeto e produto (VAN VLACK, 1984). Como sua resistência é menor que o aço, principalmente ao choque, o ferro fundido é empregado em peças de menor responsabilidade ou sujeitas a tensões mais moderadas.

No diagrama de fase Ferro-Carbono (Figura 7) pode-se observar que, quanto maior o teor de carbono, a temperatura necessária para a fusão completa do produto vai diminuindo até 4,3% (ponto G) no qual a temperatura é de 1148°C. Acima desse limite, a referida temperatura começa a aumentar novamente, à medida que o teor de carbono continua aumentando. A liga com 4,3% é a que tem menor ponto de fusão, razão pela qual é dado o nome à mesma de “eutética”, o que indica qual liga se funde na menor temperatura. Os ferros fundidos com menos de 4,3% chamam-se hipoeutéticos e os com mais de 4,3% de hipereutéticos. A composição química e a velocidade de resfriamento são dois fatores determinantes na estrutura dos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2005).

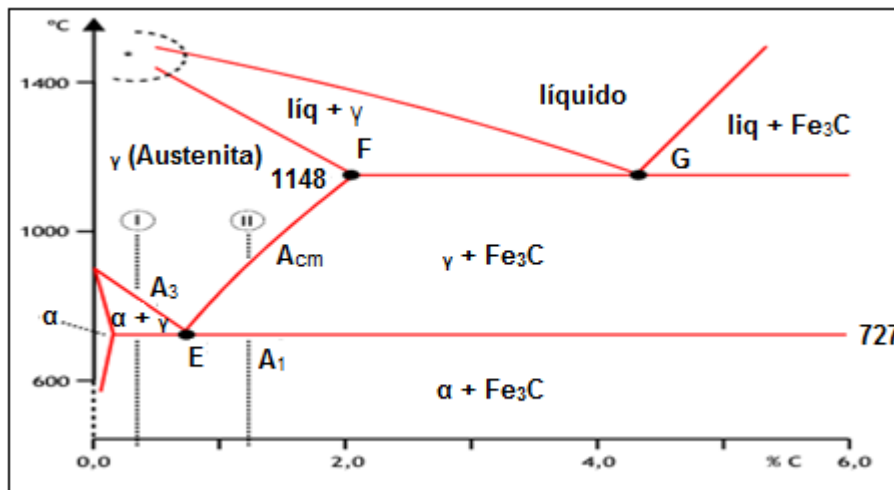


Figura 7 – Diagrama de fase Ferro-Carbono
Fonte: Adaptado de Callister (2007).

2.2.2 Classificação do Ferro Fundido

Segundo Callister (2007), são 6 os tipos mais comuns de ferro fundido: branco, cinzento, mesclado, nodular, maleável e vermicular.

Uma classificação bastante utilizada no Brasil foi compilada por Santos (1991), onde o ferro fundido branco exibe todo carbono presente na liga na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos. O cinzento apresenta as fases formadas na solidificação na forma de austenita e grafita, conforme diagrama de equilíbrio estável, onde se obtém grafita em forma de veios e quando a solidificação resulta na formação de regiões de ferro fundido branco e cinzento, é nomeado de mesclado.

No ferro fundido nodular, a grafita se apresenta na forma de nódulos no estado bruto de fusão, enquanto que no maleável a grafita se solidifica como nos ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetida a um tratamento térmico (maleabilização), onde a cementita se decompõe em grafita e austenita. Na classificação como vermicular se obtém no estado bruto de fusão, por meio da adição de elementos de liga, a chamada grafita vermicular (SANTOS, 1991).

Outro aspecto na classificação dos ferros fundidos é em relação à grafita, principal componente do ferro fundido, sendo modificada principalmente pelo carbono e pelo silício. A morfologia da grafita é um fator muito importante na caracterização das propriedades dos ferros fundidos (WARRICK, 1999).

Segundo a norma *International Organization for Standardization* (ISO) 945 de 2008, a grafita pode ser classificada em seis formas típicas, como apresentada na Figura 8. Na grande maioria dos casos as formas da grafita podem indicar o tipo e ferro fundido, por exemplo, as formas IV, V e VI representam ferro fundido nodular, enquanto as I e III são típicas dos ferros fundidos cinzento, devido a certos fatores como espessura da seção do fundido, quantidade de alguns elementos químicos etc (MARTINS, 2012).

A Figura 9 mostra, por meio de técnicas de reconstrução tridimensional, as formas de grafita (lamelar, vermicular e nodular) encontradas através de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV (COLPAERT, 2008 apud MARTINS, 2012).

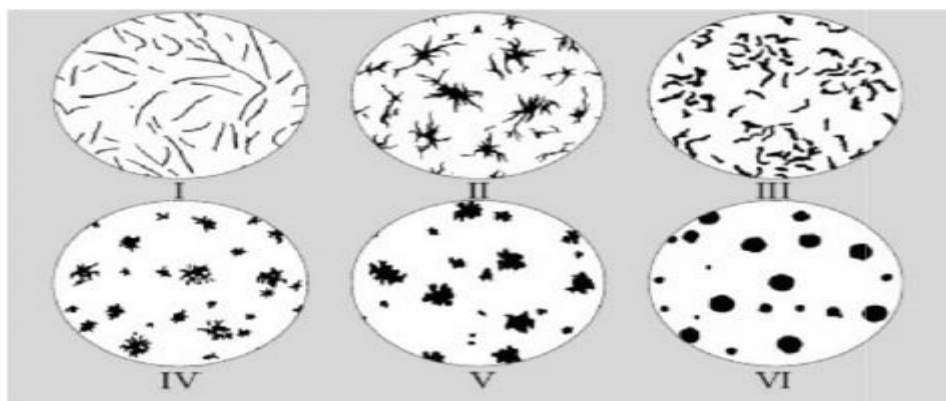


Figura 8 – Formas da grafita: (I) cinzenta; (II) intermediária; (III) vermicular; (IV) nodular irregular; (V) nodular incerta; (VI) nodular
 Fonte: ISO 945 (2008) apud MARTINS (2012).

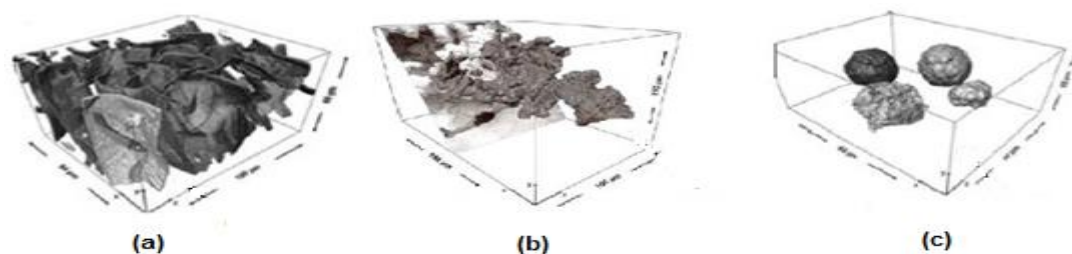


Figura 9 – Formas da grafita identificadas por microscopia eletrônica de varredura:
 (a) lamelar; (b) vermicular; (c) nodular
 Fonte: COLPAERT (2008) apud MARTINS (2012).

2.2.3 Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular possui uma excelente resistência mecânica e resistência à fadiga para a usinagem em comparação com os ferros fundidos branco e cinzento e, com isso, tem sido escolhido para alterar os tipos de materiais e várias peças nos últimos anos, principalmente na área automotiva devido as suas boas propriedades mecânicas (GRZESIK et al., 2008).

A grafita presente nos ferros fundidos nodulares resulta da adição de magnésio, conseguindo um aumento na resistência mecânica do material em relação aos demais. Também oferece uma maior diversidade das propriedades, resistência à fadiga, ductilidade e tenacidade. São muito empregados em pistões, engrenagens, eixo cardã, bombas etc. Colocando o

ferro fundido nodular juntamente com uma liga de níquel e cobre melhora ainda mais a usinabilidade reduzindo as forças de corte (YIGIT, 2008).

Pela norma DIN 1963, a especificação dos ferros fundidos nodulares é precedida do prefixo GGG, seguido do limite de resistência à tração em kgf/mm², como visualizado na Tabela 3 (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 3 – Classificação dos ferros fundidos nodulares segundo a DIN 1963

Classe	Limite Resistência (kgf/mm²)	Limite Escoamento (kgf/mm²)	Alongamento (%)	Dureza (HB)	Resistência ao choque (kgf/mm²)
GGG38	38	25	17	140/180	10
GGG42	42	28	12	150/200	8
GGG45	45	35	5	160/240	2
GGG50	50	35	7	170/240	6
GGG60	60	42	2	210/300	4
GGG70	70	50	2	230/320	2

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2005).

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

Tabela 4 – Comparação das propriedades entre ferro fundido cinzento, vermicular e nodular

Propriedades	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à Tração (MPa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (GPa)	105	145	160
Condutividade Térmica (W/(mK))	48	37	28
Dureza (HB)	179-202	217-241	217-255
Capacidade de amortecimento relativa	1,0	0,35	0,22

Fonte: Adaptado de DAWNSON (2001).

2.3 USINABILIDADE

Usinabilidade é uma propriedade global que resulta da combinação entre a peça e a ferramenta. É a maneira que o material se comporta durante a usinagem, sendo expressa por meio do índice de usinabilidade, que é um valor comparativo do conjunto de propriedades de usinagem de um metal em relação a outro metal que foi adotado como padrão (FERRARESI, 1977).

Segundo Machado e Silva (1999), as variáveis que influenciam no índice de usinabilidade de um material são: vida da ferramenta, temperatura de corte, energia consumida durante a usinagem, forças de corte, rugosidade superficial, entre outras. Para Diniz et al. (2008) além da combinação entre a peça e a ferramenta, as características da ferramenta, tipos de refrigeração, modo de fixação da peça também influenciam diretamente na usinabilidade de um determinado material.

2.3.1 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta

Conhecer os mecanismos de desgaste no material a ser usinado é um dos principais fatores para a escolha da ferramenta (RAO, 1977). Para König (1990) os mecanismos mais comuns durante o processo de usinagem são: desgaste por abrasão, desgaste por adesão, desgaste por fadiga, desgaste químico e de difusão.

No mecanismo de abrasão, o atrito da peça com a superfície de flanco da ferramenta faz com que aconteça o lascamento de finos particulados de material, devido às partículas duras do material usinado que, no caso de ferro fundido, podem ser carbonetos precipitados. E quanto maior o número dessas inclusões, maior será essa taxa de desgaste (DINIZ, 2008). Normalmente, devido a abrasão, ocorre o desgaste de flanco como apresentado na Figura 10.

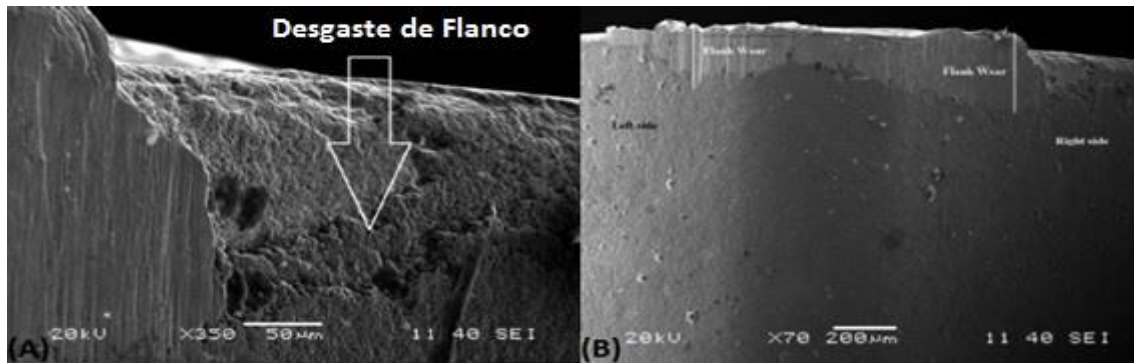


Figura 10 – Desgaste de flanco de um inserto de metal duro em usinagem da liga Inconel 718: (A) aumentado 350x; (B) aumentado 70x
Fonte: Adaptado de Yadav (2015).

Desgaste por adesão ocorre quando o contato da ferramenta sobre a peça é descontínuo e o fluxo de material é irregular. É associada à zona de escorregamento do cavaco na superfície de saída da ferramenta, onde por meio de um ciclo de adesão do material da peça, formando a aresta postiça de corte (APC), incide na remoção de partículas da ferramenta. APC é basicamente uma camada de cavaco que se adere à aresta de corte e vai se desprendendo aos poucos modificando o comportamento da usinagem em relação à força de corte. Devido a essas inclusões duras da superfície usinada para a ferramenta e a remoção simultânea da fase ligante na ferramenta de metal duro, é difícil obter um bom acabamento superficial quando a APC se acumula sobre a superfície de saída da ferramenta (NARUTAKI, 1993). A Figura 11 mostra o desgaste por adesão de uma ferramenta de carboneto de tungstênio (WC).

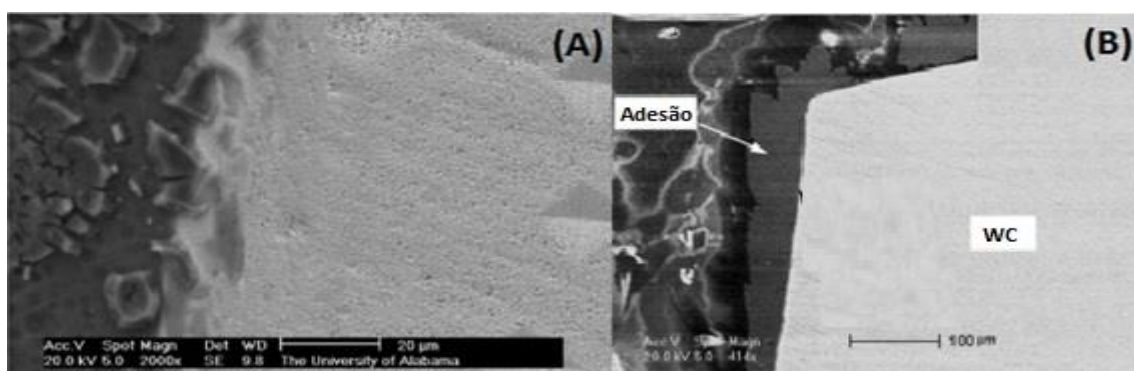


Figura 11 – Desgaste por adesão de um inserto de WC: (A) aumentado 2000x; (B) aumentado 41x
Fonte: Adaptado de Chou (2007).

Para o mecanismo de desgaste por fadiga, Rau (2003) comprova que por meio de carregamento térmicos ou mecânicos aparecem as trincas de fadiga. As trincas termodinâmicas são devido às elevadas temperaturas de corte na interface peça-ferramenta e pela ação refrigerante do fluido de corte em um período de corte descontínuo. O crescimento dessas trincas pode levar ao microlascamento da aresta de corte. As trincas mecânicas acontecem quando a dureza relativa entre peça e o material da ferramenta não é muito elevada e a força de corte é instável.

Tanto o processo de desgaste por difusão quanto o químico, acontecem devido à transferência de átomos entre a peça e a ferramenta. Esse tipo de mecanismo está conectado diretamente a velocidade de corte, temperatura, afinidade química dos materiais da peça e do material da ferramenta e pelo tempo de contato (DINIZ, 2008).

2.3.2 Critério de Fim de Vida da Ferramenta

Segundo a norma “*Tool-life testing with single-point turning tools*”, ISO 3685/1993, os critérios estabelecidos para fim de vida de ferramenta são:

- desgaste de flanco médio, $V_B = 0,3$ mm;
- desgaste de flanco máximo, $V_{BMáx} = 0,6$ mm;
- profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$;
- distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02$ mm.

Onde $V_{BMáx}$ é levado em consideração se o desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco. Na Figura 12 tem-se uma melhor visualização desses critérios, onde V_{BN} é o $V_{BMáx}$, conforme a ISO 3685.

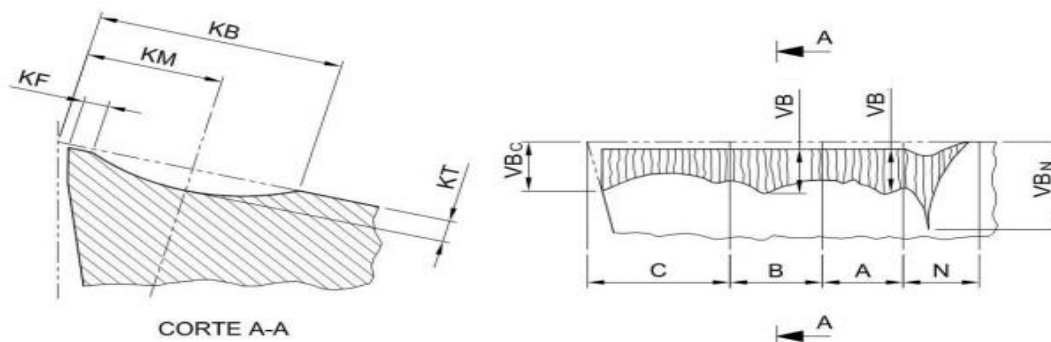


Figura 12 – Critérios de fim de vida de ferramenta conforme ISO 3685/1993
Fonte: ISO 3685 (1993).

2.4 TOPOGRAFIA

Na usinagem é comum a qualidade geral de uma superfície usinada ser classificada apenas em função da medição do parâmetro da rugosidade (SHAW, 2005). Existem dois métodos para quantificar a rugosidade, (a) medindo-se as alturas pico-vale e (b) medindo-se a altura média (WHITEHOUSE, 1994). Normalmente no Brasil é utilizado o sistema da linha média, adotando a norma “Rugosidade das superfícies”, ABNT NBR 6405/1988.

Um dos parâmetros avaliados é a rugosidade média (R_a) que é definida como o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil em relação a uma linha média dentro de um dado comprimento de medição L . A rugosidade total (R_t) é definida como a distância vertical entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, em um dado comprimento de medição L (MELLO, 2012). A Figura 13 mostra os parâmetros R_a e R_t .

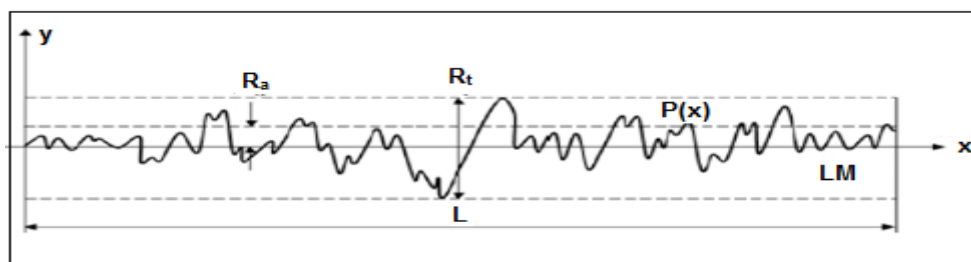


Figura 13 – Esquemática dos parâmetros R_a e R_t
Fonte: MELLO (2012).

O parâmetro R_a não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter o mesmo valor para as superfícies originadas de processos diferentes de usinagem, não existindo distinção entre os picos e vales. A medida R_t é feita também em todo o comprimento da amostragem, avaliando a profundidade total (máxima deterioração da superfície vertical da peça), e assim complementando a informação do R_a (SHAW, 2005).

Na Tabela 5 observa-se os valores recomendados para o comprimento da amostragem (*cut off*), segundo a norma “Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos – Procedimento”, NBR 8404/1984.

Rugosidade R_a (μm)	Mínimo comprimento de amostragem L (mm)
0 – 0,1	0,25
>0,1 – 2,0	0,80
>2,0 – 10,0	2,50
>10,0	8,00

Fonte: NBR 8404 (1984).

Um terceiro parâmetro avaliado é o R_z que avalia a distância média entre os cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos em cada uma das cinco áreas divididas do comprimento total de amostragem, segundo a norma “Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade”, ISO 4287/2002, como se pode visualizar na Equação (10) e na Figura 14.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (10)$$

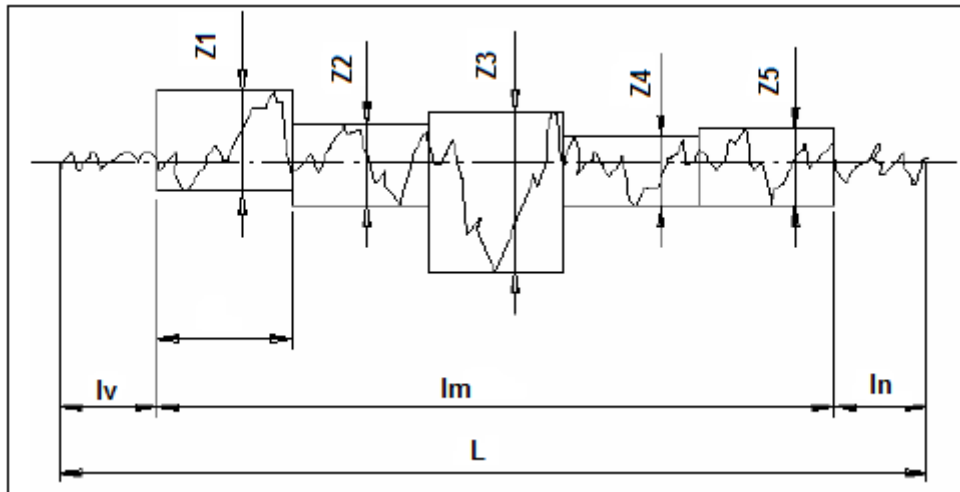


Figura 14 – Esquematização do parâmetro R_z
 Fonte: NBR 6405 (1984).

Existem também os parâmetros de rugosidade tridimensionais, S_a , S_v e S_z , equivalentes aos da rugosidade superficial, R_a , R_t e R_z . A diferença consiste que, para parâmetros 2D, são tomados comprimentos para a amostragem e, para os parâmetros 3D, são utilizados áreas de amostragem (NWAOGU et al., 2013).

O parâmetro S_a , [μm], está relacionado com a média aritmética das alturas das rugosidades em relação ao plano médio para a área de amostragem e é classificado como um parâmetro de amplitude. A fórmula é apresentada na Equação (11) (WHITEHOUSE, 1994 apud DO VALE, 2014).

$$S_a = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} |f(x, y) - \bar{f}| dx dy \quad (11)$$

onde:

L_x = Extensão da área de amostragem no eixo x [μm];

L_y = Extensão da área de amostragem no eixo y [μm];

$f(x, y)$ = Altura da superfície no ponto (x, y) em relação ao plano médio [μm];

\bar{f} = Altura do plano médio [μm];

dx = Comprimento diferencial no eixo x [μm];

dy = Comprimento diferencial no eixo y [μm].

Para o parâmetro S_v que está relacionado à medida da linha média até a altura do maior vale da área analisada é classificada como um parâmetro de amplitude e é calculado pela Equação (12) (WHITEHOUSE, 1994).

$$S_v = |n_{v_{m\acute{a}x}}| \quad (12)$$

onde:

$n_{v_{m\acute{a}x}}$ = Altura do maior vale da área de amostragem em relação ao plano médio [μm].

O parâmetro S_z representa a média de dez pontos da rugosidade, sendo cinco valores associados aos picos mais altos e outros cinco associados aos vales mais profundos, como mostrado na Equação (13) (WHITEHOUSE, 1994).

$$S_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |n_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |n_{v_i}|) \quad (13)$$

onde:

n_{p_i} = Altura dos picos mais altos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];

n_{v_i} = Altura dos vales mais profundos da área de amostragem em relação ao plano médio [μm];

i = Parâmetro de contagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nos experimentos, assim como os equipamentos necessários para as análises dos dados e os parâmetros empregados nos ensaios de usinagem.

3.1 MATERIAIS

Nesta seção serão apresentadas a matéria-prima, a ferramenta, os fluidos de corte, a máquina-ferramenta e os equipamentos utilizados para realização dos experimentos.

3.1.1 Corpo de Prova

O material usinado foi o ferro fundido nodular, cuja designação pela norma “*Ductile Cast Iron*”, DIN 1693-73 é GGG60. Todas as amostras têm a mesma composição química, visualizada na Tabela 6 e as propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 7. Esses ensaios foram realizados pelo departamento de controle e garantia de qualidade da empresa Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA, fornecedora da matéria-prima.

Tabela 6 – Composição química das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ni	Sn	Al
5,22	2,49	0,31	0,06	0,024	0,45	0,08	0,066	0,034	0,019

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60

Propriedades	Valores
Limite de escoamento (MPa)	498,57
Resistência à tração (MPa)	553,59
Dureza externa (HB)	260
Dureza no núcleo (HB)	271
Alongamento (%)	2,50

Fonte: Aatoria própria.

As peças de ferro fundido nodular disponíveis para usinagem são blocos retangulares de dimensão padrão de 130mm x 140mm x 215mm, como apresentados na Figura 15. Os blocos de ferro fundido nodular foram atacados com solução de nital de concentração 2% para serem analisados quantitativamente na sua metalografia



Figura 15 – Blocos fundidos disponíveis para os ensaios de usinagem

Fonte: Aatoria própria.

. As características do material podem ser visualizadas pela Tabela 8 e sua micrografia na Figura 16, ambos os resultados fornecidos pelo departamento de controle e garantia de qualidade da empresa Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA.

Tabela 8 – Caracterização do ferro fundido nodular GGG60

Propriedades	Característica
Grafita	Esferoidal
Tipo	VI
Tamanho	5
Grau de nodulização	95%
Matriz	90% Perlítica

Fonte: Autoria própria.

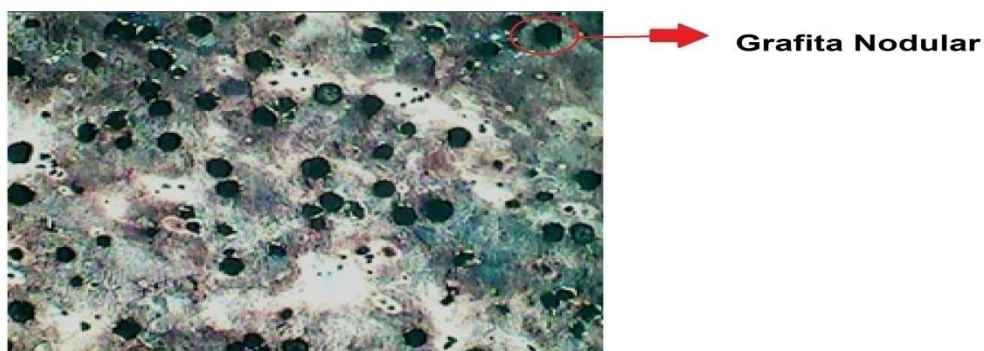


Figura 16 – Micrografia do ferro fundido nodular GGG60
Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte utilizada é a comercialmente codificada como SPHX 1205 PC TRG PBK - KY3500, sendo uma ferramenta de cerâmica, contendo nitreto de silício e classificada na classe K, específica para usinagem de ferro fundido. A especificação é de uma fresa frontal é A04 RP90 SP 12 CFP da empresa Kennametal que possui diâmetro de 50 milímetros e utiliza cinco insertos. Nos experimentos foi utilizado apenas um inserto do conjunto para o fresamento enquanto os outros quatro atuavam como balanceadores de massa. A Figura 17 apresenta o modelo e os ângulos da ferramenta, enquanto a Figura 18 (a) apresenta a fresa frontal com o cone de fixação e (b) a fresa frontal com os insertos.

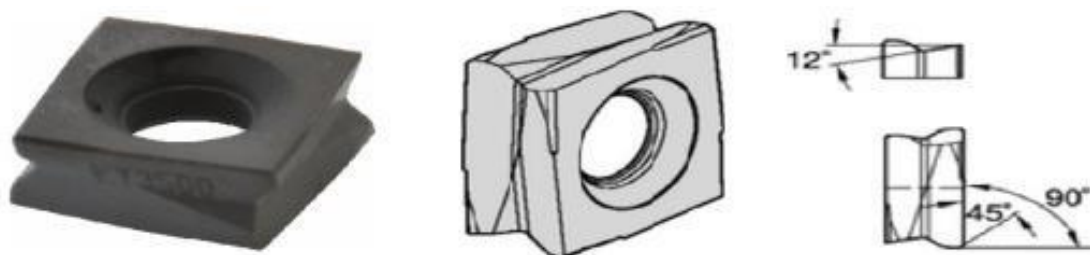


Figura 17 – Modelo da ferramenta SPHX 1205 PC TRG PBK - KY3500
Fonte: Kennametal (2014).

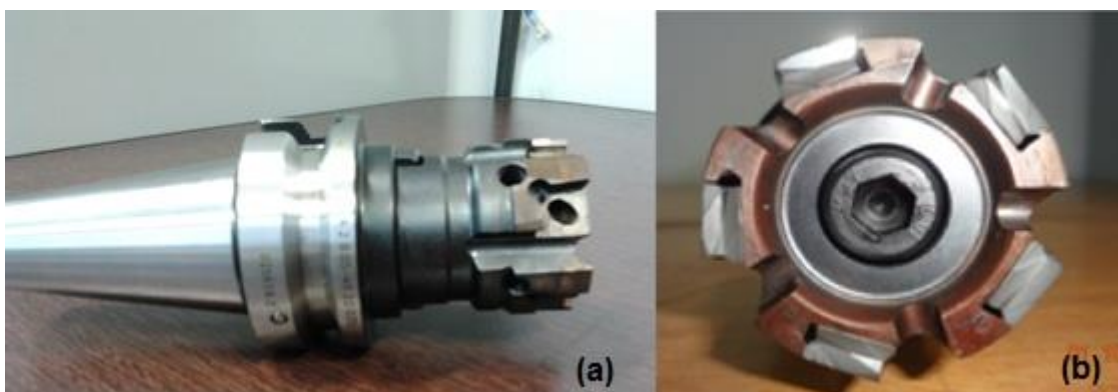


Figura 18 – Fresa frontal: (a) fresa com o cone; (b) fresa com os inserts
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Fluidos de Corte

Foram utilizados 2 tipos de fluido de corte; o primeiro sendo o de base mineral, semissintético ROCOL ULTRACUT 360°, enquanto o segundo de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*), que foi desenvolvido por Gonçalves (2013) (SOUZA, 2014). O produto vegetal é composto por anticorrosivos, antiespumantes siloxanos, sabões amínicos, ésteres/gorduras, tensoativos não iônicos etoxilados, aditivos de extrema pressão sulfurizados e biocidas.

As propriedades do fluido semissintético ROCOL ULTRACUT 360° estão apresentadas na Tabela 9, enquanto as propriedades do fluido vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*) estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 9 – Propriedades físicas e químicas do fluido de corte solúvel ROCOL ULTRACUT360°

Propriedades físicas e químicas	Dados característicos
Estado físico	Líquido
Odor	Característico
Cor visual	Amarelado
pH (diluído a 5,0% em H ₂ O)	8,5 a 9,9
Ponto de ebulição	>100°C
Faixa de destilação	NA
Temperatura de decomposição	NA
Ponto de fulgor	NA
Temperatura de autoignição	NA
Limite de explosividade inferior	NA
Limite de explosividade superior	NA
Densidade (a 20/3°C):	0,950 a 1,033 g/cm ³
Solubilidade	Parcialmente solúvel em hidrocarbonetos alifáticos
Solubilidade em água	Solúvel em água

Fonte: Adaptado da Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos (2009).

Tabela 10 – Propriedades físicas e químicas do fluido de corte solúvel vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*)

Propriedades físicas e químicas	Dados característicos
Estado físico	Líquido turvo
Odor	Característico
Cor visual	Castanho/âmbar a marrom
pH (diluído a 5,0% em H ₂ O)	9,0
Ponto de ebulição	240°C
Faixa de destilação	ND
Temperatura de decomposição	240°C
Ponto de fulgor	240°C
Temperatura de autoignição	NA
Limite de explosividade inferior	NA
Limite de explosividade superior	NA
Densidade (a 20/4°C)	0,950 g/cm ³
Solubilidade	Solúvel em éster e gorduras
Solubilidade em água	Solúvel em água

Fonte: Adaptado de SOUZA (2014).

3.1.4 Máquina- Ferramenta

Todos os ensaios de usinagem foram realizados no laboratório de Comando Numérico Computadorizado (CNC), em um centro de usinagem vertical ROMI D-600 Standard (Figura 19), com um motor de potência de 15 kW e uma potência total instalada de 30 kVA, que possui uma faixa de rotação de 7 a 7.500 rpm e magazine para 20 ferramentas e cone ISO 40 para sua fixação no cabeçote.

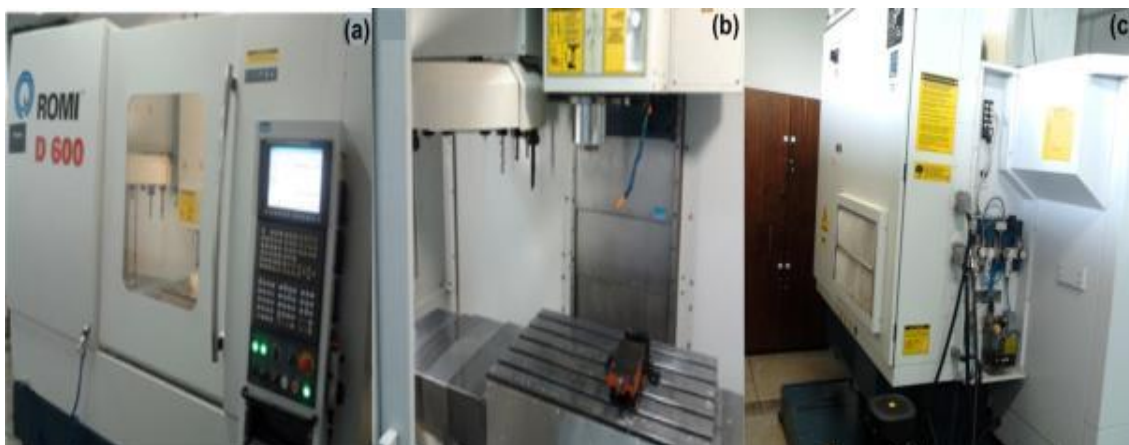


Figura 19 – Máquina CNC Romi-D600 utilizada nos ensaios de usinagem: (a) parte frontal; (b) parte interna; (c) parte traseira

Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Equipamentos Utilizados para Captação dos Dados

Para análises dos parâmetros avaliados da usinagem foram necessários alguns equipamentos como o microscópio da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313T com aumento de até 200x, utilizado na medição do desgaste de ferramenta, como mostra a Figura 20.



Figura 20- Microscópio Dino-Lite Pro modelo AM-313T
Fonte: Autoria própria.

Para avaliação dos dados de rugosidade (R_a , R_t e R_z), foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo, modelo SJ-201P, visualizado na Figura 21.



Figura 21 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P
Fonte: Autoria própria.

A medição do valor do pH do fluido de corte, durante o período do tratamento com ozônio, foi realizada por meio do pH-Meter CG 818, apresentado na Figura 22.



Figura 22 - pH-Meter CG 818
Fonte: Autoria própria.

Para o tratamento do fluido de corte foi empregado o equipamento Catalisador Eletrofísico da fabricante Oil Trat, mostrado na Figura 23.



Figura 23 - Catalisador Eletrofísico da fabricante Oil Trat
Fonte: Autoria própria.

A dureza foi medida pelo durômetro de bancada da marca Pantec, modelo RASN RBS, visualizado na Figura 24.



Figura 24 - Durômetro de bancada da marca Pantec
modelo RASN RBS
Fonte: Autoria própria.

Na medição da potência consumida durante os experimentos, foi utilizado um Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120 da KRON®. A Tabela 11 apresenta a precisão do equipamento, e a Figura 25 apresenta a placa instalada na, máquina-ferramenta.

Tabela 11 – Precisão do Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult-K 120

Variáveis	Precisão
Tensão, Corrente e Potência	0,2%
Frequência	0,1Hz
Fator de potência	0,5%
Energia	0,5%
Distorção Harmônica Total – THD	<3%

Fonte: Adaptado de Souza (2014).



Figura 25 – Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120 da KRON® instalado no painel da ROMI D600

Fonte: Autoria própria.

Após os ensaios de fresamento foram realizados testes de microscopia eletrônica por varredura (MEV) nas ferramentas de corte para averiguar os tipos de desgastes gerados.

O método EDX foi utilizado na superfície das peças usinadas para verificar possíveis pontos de oxidação devido à ação do ozônio. As imagens da superfície das amostras obtidas por MEV com equipamento marca Zeiss, modelo EVO-MA15, como mostrado na Figura 26.



Figura 26 – Microscópio eletrônico de varredura
Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas análises topográficas da aresta das ferramentas de corte, por meio da tecnologia de interferometria de luz branca para medição 3D sem contato, modelo CCI Talysurf Lite, fabricado pela Taylor Hobson, como mostrado na Figura 27. O interferômetro utiliza, para cada área de amostragem, 1024x1024 pontos medidos e resolução óptica entre 0,4 e 0,6 μm (TAYLOR HOBSON, 2013 apud DO VALE, 2014).



Figura 27 – Interferômetro de luz branca da marca Taylor Hobson -
modelo CCI Talysurf Lite
Fonte: Autoria própria.

Para as análises microbiológicas e físico-químicas foram utilizados um oxímetro da Politerm modelo POL-60 para medir a temperatura e o oxigênio dissolvido, pH-Meter CG 818 para medição do pH e tubos Falcon e placas Petri para quantificação dos microrganismos.

3.2 MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os métodos que foram aplicados para realização desses experimentos.

3.2.1 Preparação da Máquina e Corpos de Prova

Os corpos de prova foram serrados e antes do fresamento houve o faceamento de modo a eliminar a camada oxidada e nivelar a superfície a ser usinada. As dimensões finais dos corpos de prova foram de 130mm x 135mm x 50mm, (Figura 28).

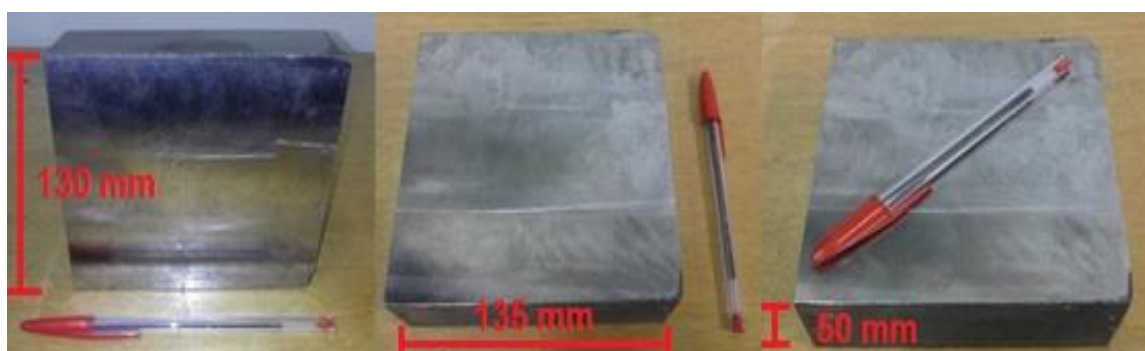


Figura 28 – Corpos de prova prontos para os ensaios de usinagem
Fonte: Autoria própria.

Para os experimentos foram utilizados duas condições de usinagem, primeiramente uma nomeada de F₂, esta sendo os parâmetros normalmente utilizados pela empresa Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA, e

posteriormente a condição designada F_1 que foram definidos por meio de pré-testes para obtenção de melhor desempenho da ferramenta para esse tipo de operação com ferro fundido nodular, (Tabela 12).

Tabela 12 – Condições de usinagem utilizados nos ensaios

	Condição F_1	Condição F_2
Avanço (f_z) mm/dente	0,04	0,02
Rotação (n) rpm	5500	6366
Velocidade de avanço (v_f) mm/min	1200	700
Velocidade de corte (v_c) m/min	864	1000
Profundidade de corte (a_p) mm	0,50	0,50

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Metodologia dos Ensaios

Inicialmente o reservatório, com capacidade de 300 litros, foi limpo com biocida para eliminar qualquer contaminante e em seguida colocou-se o fluido de corte semissintético Rocol ULTRACUT 360° na proporção de 1 litro de concentrado por 40 litros de água. A máquina-ferramenta CNC Romi D600 foi preparada com os equipamentos para captação dos dados e ajustada com os parâmetros de corte. Na sequência iniciaram-se os ensaios com os parâmetros de corte F_1 e F_2 . Após o término dos experimentos com F_1 e F_2 , foi realizado o tratamento desse fluido de corte com o catalisador eletrofísico operando em um ciclo de uma hora; sendo 15 minutos acionado e 45 minutos desligado, durante as 24 horas diárias em um período de 15 dias, e então se repetiu os experimentos com o fluido de corte tratado.

Após esses ensaios, realizou-se novamente a limpeza da máquina-ferramenta com biocida, e a troca do fluido mineral pelo fluido vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*), com um índice de refração de 1,47 a 25 % na proporção de 1 litro de concentrado por 40 litros de água e se reproduziu o

mesmo processo utilizado com o fluido semissintético. O fluxograma dos procedimentos dos ensaios é apresentado na Figura 29.

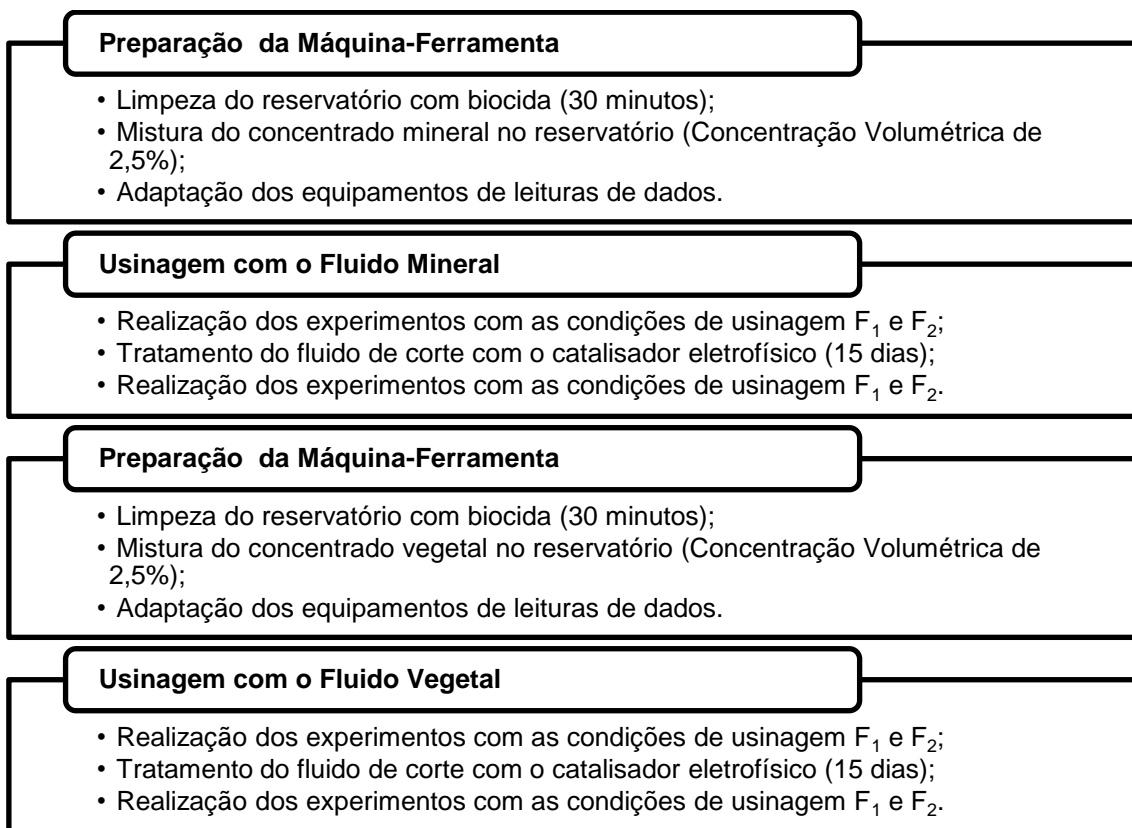


Figura 29 – Fluxograma dos ensaios de usinagem
Fonte: Autoria própria.

Foi realizado um planejamento experimental, utilizando o método planejamento fatorial completo, que inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento devido à pequena quantidade de variáveis e para este delineamento, foi utilizado o *software Action 2.6*. Que apresenta as variáveis como: fluido de corte mineral (F_M) ou fluido de corte vegetal (F_V), parâmetros de corte (F_1 e F_2), fluido de corte novo (F_N) ou fluido de corte tratado (F_T). A Tabela 13 apresenta a matriz dos experimentos.

Tabela 13 – Matriz de experimentos

Ordem	Repetições	Variáveis		
1	1	F_M	F_1	F_N
2	1	F_M	F_2	F_N
3	2	F_M	F_1	F_N
4	3	F_M	F_1	F_N
5	2	F_M	F_2	F_N
6	3	F_M	F_2	F_N
7	1	F_M	F_1	F_T
8	2	F_M	F_1	F_T
9	1	F_M	F_2	F_T
10	2	F_M	F_2	F_T
11	3	F_M	F_1	F_T
12	3	F_M	F_2	F_T
13	1	F_V	F_2	F_N
14	2	F_V	F_2	F_N
15	1	F_V	F_1	F_N
16	2	F_V	F_1	F_N
17	3	F_V	F_2	F_N
18	3	F_V	F_1	F_N
19	1	F_V	F_1	F_T
20	1	F_V	F_2	F_T
21	2	F_V	F_1	F_T
22	2	F_V	F_2	F_T
23	3	F_V	F_1	F_T
24	3	F_V	F_2	F_T

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Captação dos Dados

Os experimentos foram realizados em triplicatas para obter-se uma maior confiabilidade dos resultados. As medições de rugosidade e de desgaste de ferramenta foram efetuadas a cada cinco passes de 0,5 mm ou seja, a cada 0,3125m de comprimento usinado foram realizadas as medições de rugosidade das peças e V_B das ferramentas. A medição de potência consumida foi captada durante todo o período de usinagem, já o do pH foi verificado durante todo o período de tratamento enquanto a dureza do corpo de prova usinado, foi medida ao final dos experimentos, assim como as análises topográficas e a

microscopia eletrônica de varredura (MEV), como mostrado no esquema da Figura 30.

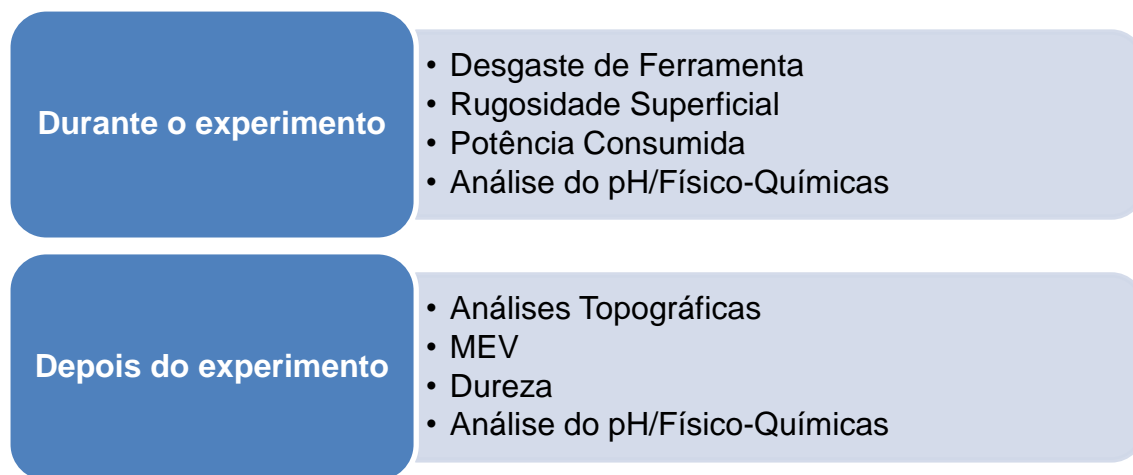


Figura 30- Esquema dos parâmetros avaliados

Fonte: Autoria própria.

3.2.3.1 Desgaste da ferramenta de corte

O desgaste de ferramenta foi medido por meio do microscópio da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313T com aumento de até 200x. Como parâmetros para a vida útil da ferramenta foi utilizado à norma ISO 3685/93, que traz como critério de fim de vida do inserto o desgaste de flanco (V_B) igual a 0,3 mm, foi realizada a medida com um aumento de 60 vezes ao final de cada passe, que representa 0,3125 m de comprimento usinado, assim sendo detectado quando o V_B atinge seu limite. Para captação das imagens utilizou-se o software DinoCapture, apresentado na Figura 31.

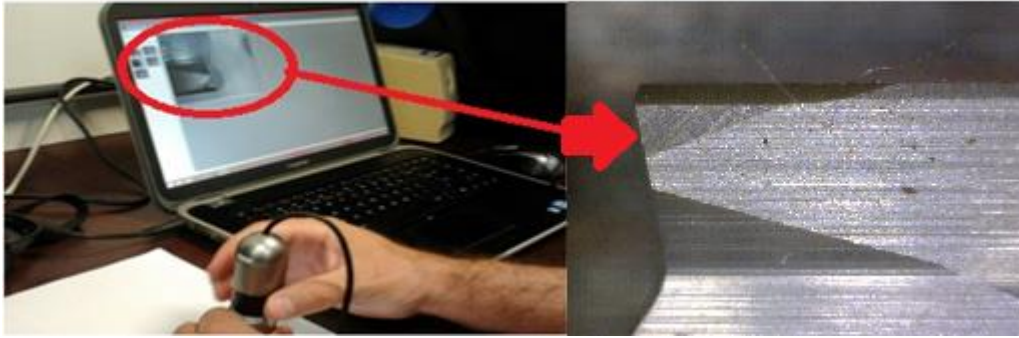


Figura 31 – Captação de desgaste de ferramenta pelo *software* DinoCapture
Fonte: Autoria própria.

3.2.3.2 Rugosidade superficial do corpo de prova

Os dados de rugosidade superficial (R_a , R_t , R_z) foram medidos ao final de cada passe e em três locais diferentes do corpo de prova, sendo realizadas três medições em cada ponto, a 33, 66 e 99 mm do início do corpo de prova garantindo um resultado de toda a superfície. As posições das medidas da rugosidade podem ser visualizadas na Figura 32.

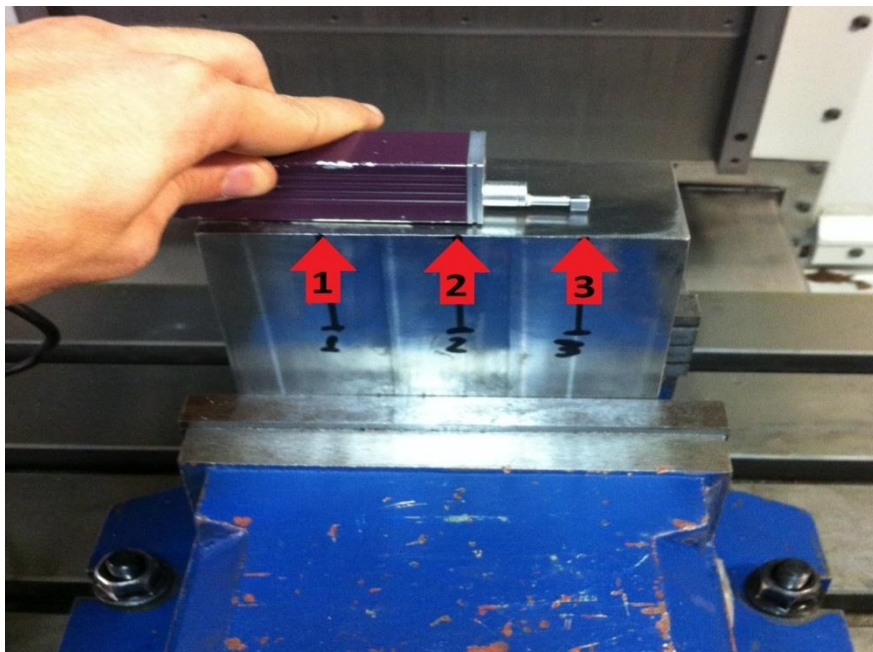


Figura 32 – Posições das medições da rugosidade superficial
Fonte: Autoria própria.

3.2.3.3 Potência consumida durante a usinagem

Para a análise de potência utilizou-se um Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120 da KRON®, interligado a um computador e por meio do software *LABVIEW* forneceu a potência trifásica consumida pela máquina-ferramenta com um intervalo de 1s a cada sinal, desde o seu início até o fim do 5º passe em cada experimento. Em seguida, os resultados foram dispostos em gráficos por meio do Excel, Figura 33.



Figura 33 – Captação de potência pelo software LabView
Fonte: Autoria própria.

3.2.3.4 Tratamento do fluido de corte utilizando método catalisador eletrofísico

No tratamento do fluido de corte utilizou-se o catalisador eletrofísico da Oil Trat, sendo conectado diretamente até o reservatório da máquina-ferramenta (300 litros) por meio de uma mangueira que direciona o fluxo de ozônio. A Figura 34 apresenta como foram realizadas as medições do pH no reservatório.

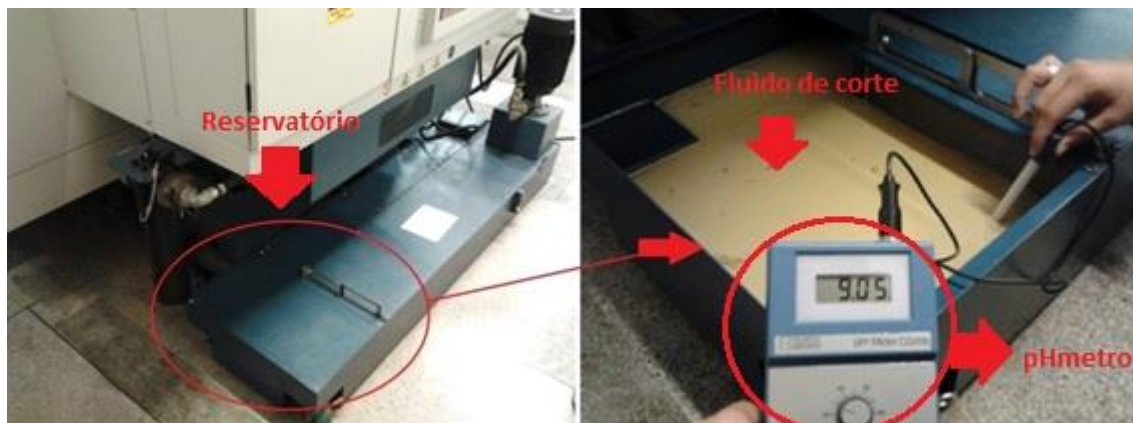


Figura 34 – Medição do pH do fluido de corte
Fonte: Autoria própria.

3.2.3.5 Dureza superficial do corpo de prova usinado

Utilizou-se a norma específica de ensaio de dureza Brinell para materiais metálicos: NBR-NM18 “Materiais metálicos – Dureza Brinell”, de 30 de maio de 1999. Para o ensaio em ferro fundido utilizou-se a esfera de diâmetro de 2,5mm e a carga aplicada foi de 187,5 kgf. Os ensaios de dureza foram realizados após todos os experimentos de usinagem, sendo realizadas 10 medidas em cada peça final para o cálculo de um valor médio.

3.2.3.6 Análise topográfica da ferramenta de corte

As análises de topografia foram realizadas nas arestas das ferramentas de corte, uma em cada experimento. Para cada área de amostragem foram obtidos: imagem da topografia em vista superior e em 3D, os parâmetros de rugosidade S_a , S_v , S_z e um perfil de rugosidade. Com esses dados foi possível verificar o desgaste de cada uma das arestas e assim encontrar padrões para cada variável, somado com a Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) que identificou o tipo de desgaste gerado.

3.2.3.7 Microscopia eletrônica por varredura (MEV) da ferramenta de corte e dos corpos de prova usinados

Foram realizadas medições nas arestas das ferramentas para identificar os tipos de desgastes que ocorreram.

Utilizou-se o procedimento de espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X (*EDX: Energy Dispersive X-ray*) nas peças usinadas de ferro fundido nodular para determinar a composição química, de modo a verificar se ocorreu oxidação.

As ferramentas de corte e as peças usinadas foram fixadas a um suporte de alumínio com fita adesiva de ouro que garante boa condutividade.

Entretanto, necessitou-se recobrir com ouro, a superfície a ser analisada, com camada estimada de 20 μm , devido a concentração de carbono do próprio material não deixar que ocorresse a visualização no MEV. Este procedimento permitiu melhorar a condução dos elétrons que são projetados pelo microscópio eletrônico por varredura, e também, de aumentar a dissipação de calor das amostras que tendem a aquecer durante o procedimento. O recobrimento, com tempo de deposição de 30s, foi realizado em equipamento modelo Q150R ES, marca Quorum.

O procedimento de energia dispersiva de Raios-X, que também é realizado no microscópio eletrônico por varredura, consiste em incidir um feixe de elétrons na amostra. Desta forma, são emitidos vários tipos de radiação pelos átomos componentes da amostra, inclusive os Raios-X, os quais são usados na microanálise e utilizados para determinação química elementar de microrregiões. Para a determinação quantitativa, é necessária a utilização de padrões com concentrações conhecidas dos elementos a serem analisados (DO VALE, 2014).

A Figura 35 mostra os pontos onde foram realizadas as análises dos espectros de uma das peças usinadas, com um aumento de 200x, sendo o 1 correspondente a área interna total do quadrado rosa, enquanto o 2, 3 e 4 correspondem ao ponto local. A Tabela 14 apresenta os valores encontrados de cada elemento.

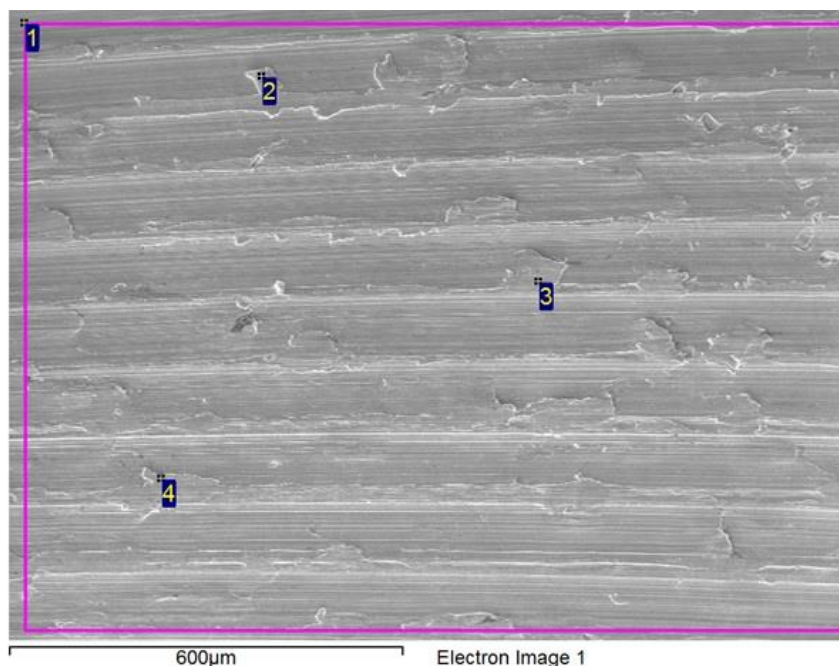


Figura 35 – Locais dos espectros de uma das peças usinadas
Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Composição química (% peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado

Espectro	C	Si	Fe	Cu
1	10,25	2,60	87,15	
2	15,19	2,85	81,28	0,68
3	13,51	2,73	83,76	
4	7,03	2,34	90,6	

Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos com o procedimento estão de acordo com os valores encontrados na Tabela 6. Desta forma, o método utilizado confirma a caracterização do material.

3.2.3.8 Análises microbiológicas e físico-químicas dos fluidos de corte

Durante o período dos ensaios, desde a troca pelo fluido novo, passando pelo tratamento até a retirada do mesmo para a colocação de outro, foi retirado semanalmente um volume de 5 litros de fluido de corte para realização das análises físico-químicas e aproximadamente 300 mililitros para análises microbiológicas.

Os experimentos físico-químicos realizados foram a medição de pH, medição de oxigênio dissolvido (OD) e a quebra da emulsão.

Para realizar a quebra da emulsão, foi adicionado NaCl para ocorrer a extração do óleo utilizado no fluido de corte. Pela densidade do óleo ser menor que a da água, acaba ficando na parte superior do recipiente, sendo coletada e transferida para um tubo Falcon. Na sequência foi adicionado hexano e colocado em centrifugação a 1000rpm para proporcionar a separação de fase e, após esse processo, foi recuperado o hexano por meio do rotavapor com banho-maria a 60°C deixando somente o óleo mineral ou vegetal (NAKAGAWA, 2016).

Nos experimentos microbiológicos utilizaram-se os meios de cultura Plate Count Agar para a contagem de bactérias e Sabouraud Agar para contagem de fungos no fluido de corte, sendo o resultado fornecido em unidade formadora de colônia por mililitros (UFC/ml). A Figura 36 apresenta os microrganismos encontrados no fluido degradado depois de ficarem incubados em meios de cultura para promover o seu desenvolvimento.

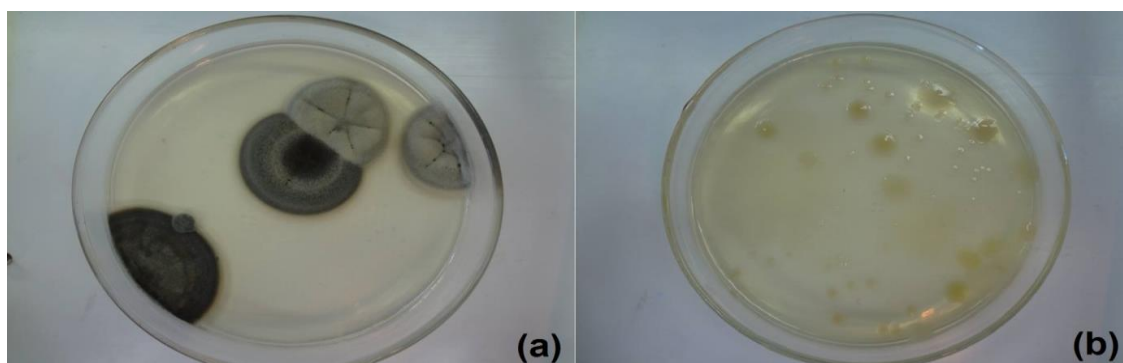


Figura 36 – Microrganismos encontrados no fluido de corte degradado: (a) fungo no meio de cultura S. Agar; (b) bactéria no meio de cultura P. C. Agar

Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Métodos para Análise Estatística dos Resultados (ANOVA e teste de Tukey)

Para avaliar os resultados obtidos utilizou-se o método estatístico da análise de variância (ANOVA), usando o Excel, e o teste de Tukey a um nível de significância (α) de 5%, utilizando o software Past3. O teste de Tukey foi empregado, pois conforme Sousa et al. (2012) esse teste apresenta “[...] maior controle da taxa de ocorrência dos erros tipo I sob distribuições normais” (Apud GOMES et al., 2014).

Primeiramente aplicou-se a análise de variância para verificação se ocorrem diferenças entre os 4 grupos analisados ($F_N F_1$, $F_N F_2$, $F_T F_1$, $F_T F_2$), verificando essa diferença sobre o desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida. Caso exista essa diferença, é aplicado o teste de Tukey que faz comparações múltiplas para identificar onde existem estatisticamente essas diferenças. A partir desses resultados, determinar-se quais foram os melhores resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o fresamento do ferro fundido nodular GGG60 e os testes físico-químicos realizados no fluido de corte semissintético ROCOL ULTRACUT 360° e no fluido de corte de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*).

4.1 DESGASTE DE FERRAMENTA

Como parâmetros de desgaste de ferramenta utilizou-se a norma ISO 3685/93 que têm como critério de fim de vida do inserto o desgaste de flanco (V_B) que é igual a 0,3 mm.

4.1.1 Fluido Mineral

Conforme a Figura 37 o desgaste da ferramenta utilizando a condição de corte F_1 (0,04 mm/dente, 5500 rpm, 1200 mm/min e 864 m/min), mostrou que a usinagem com o fluido novo (F_N) apresentou um aumento de 25% no meio da vida da ferramenta e um aumento de 54,8% no final da vida da ferramenta, em relação ao desgaste com o fluido tratado (F_T).

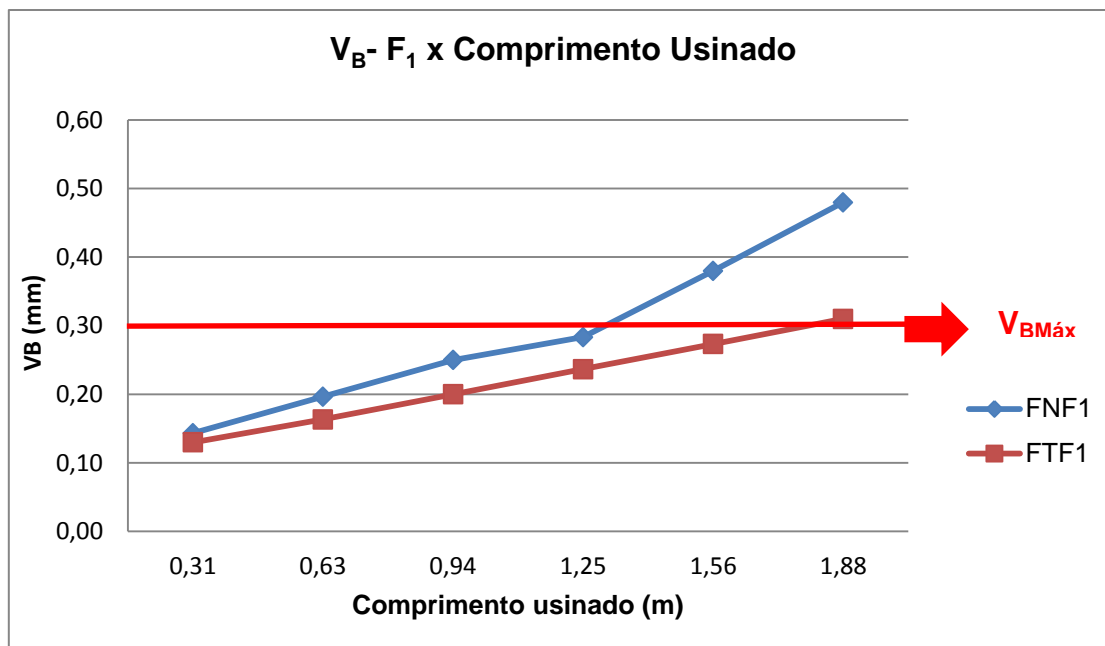


Figura 37 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_1 no fluido mineral
 Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 38, a imagem das ferramentas utilizadas (último passe) com a condição de usinagem F_1 no fluido mineral, (A) ferramenta utilizada com fluido novo e (B) ferramenta utilizada com fluido tratado, com aumento de 150x, mostrou que ambas sofreram desgaste de flanco, sendo que com o fluido novo houve mais desgaste do que a com fluido tratado, como verificado no gráfico da figura 37, não ocorrendo nenhum outro tipo de desgaste.

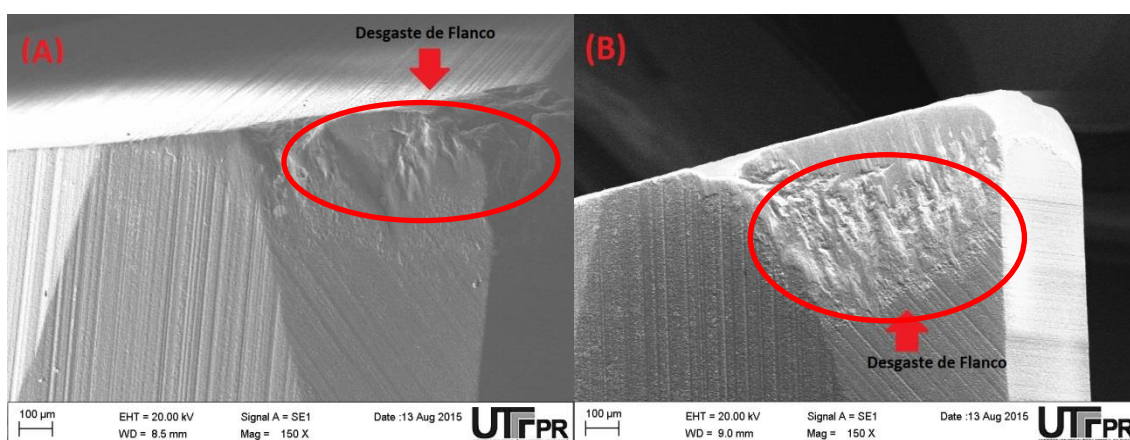


Figura 38 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios na condição de usinagem F_1 com fluido de corte mineral: (A) fluido novo; (B) fluido tratado
 Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 39 verifica-se que o desgaste começa e termina sendo numericamente igual em ambos os testes utilizando a condição de usinagem F_2 (0,02 mm/dente, 6366 rpm, 700 mm/min e 1000 m/min), ocorrendo um aumento de 20% no segundo passe do experimento com o fluido tratado em relação ao sem tratamento. Em comparação com a condição de usinagem F_1 , verifica-se que esse conseguiu atingir apenas a metade do comprimento usinado, indicando que um aumento na velocidade avanço e uma diminuição na rotação pode melhorar o rendimento dessa ferramenta.

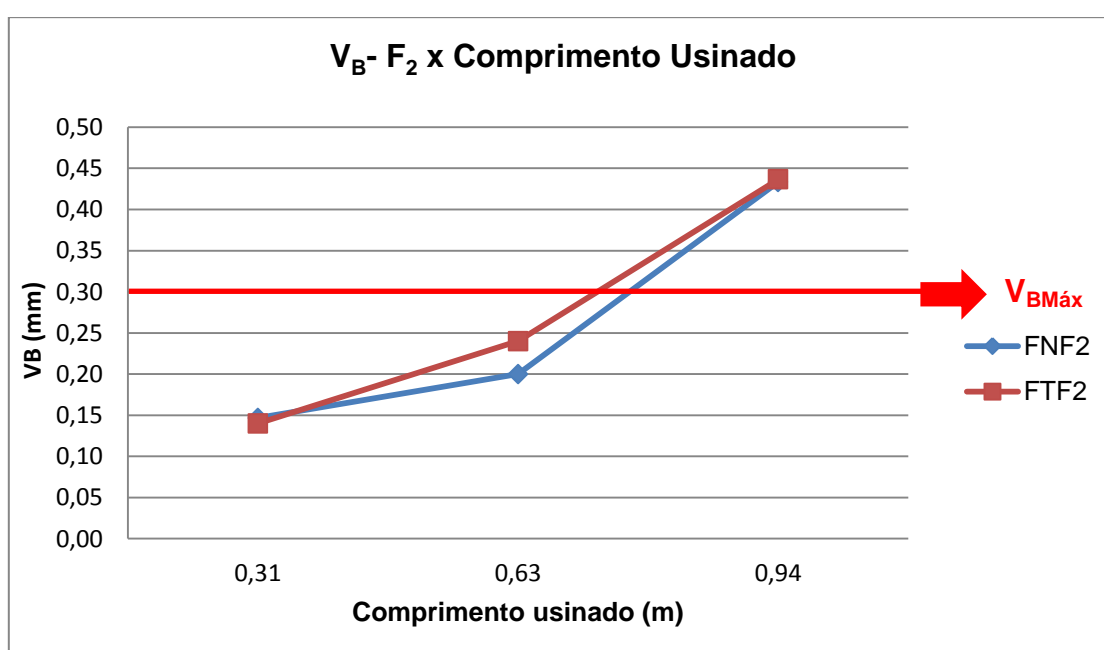


Figura 39 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_2 no fluido mineral
Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 apresenta a imagem das ferramentas utilizadas com a condição de usinagem F_2 no fluido mineral com aumento de 150x, (A) fluido novo e (B) fluido tratado, e observou-se que só ocorreu desgaste de flanco, porém com uma maior intensidade que a condição de usinagem F_1 , o que corrobora a figura 30 que identificou que utilizando a condição de usinagem F_2 só foi possível atingir 50% do comprimento usinado em relação ao F_1 .

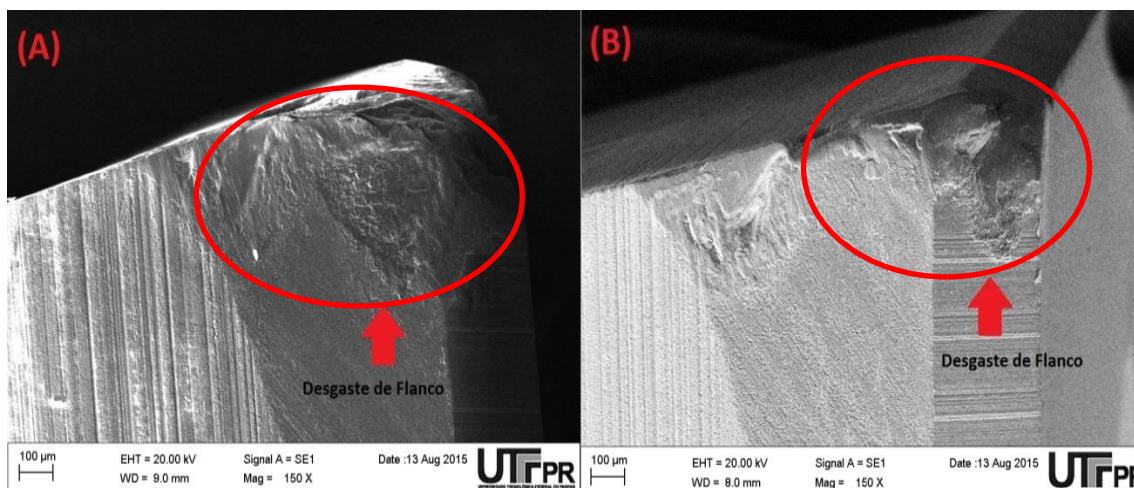


Figura 40 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_2 com fluido de corte mineral: (A) fluido novo; (B) fluido tratado
 Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Fluido Vegetal

Como apresentado pela Figura 41, o desgaste de ferramenta utilizando a condição de usinagem F_1 (0,04 mm/dente, 5500 rpm, 1200 mm/min e 864 m/min), com o fluido vegetal não se altera durante toda a vida da ferramenta, ocorrendo apenas uma pequena variação de 7 % de desgaste a mais na média dos testes no fluido tratado do que o usinado sem tratamento no final do terceiro passe.

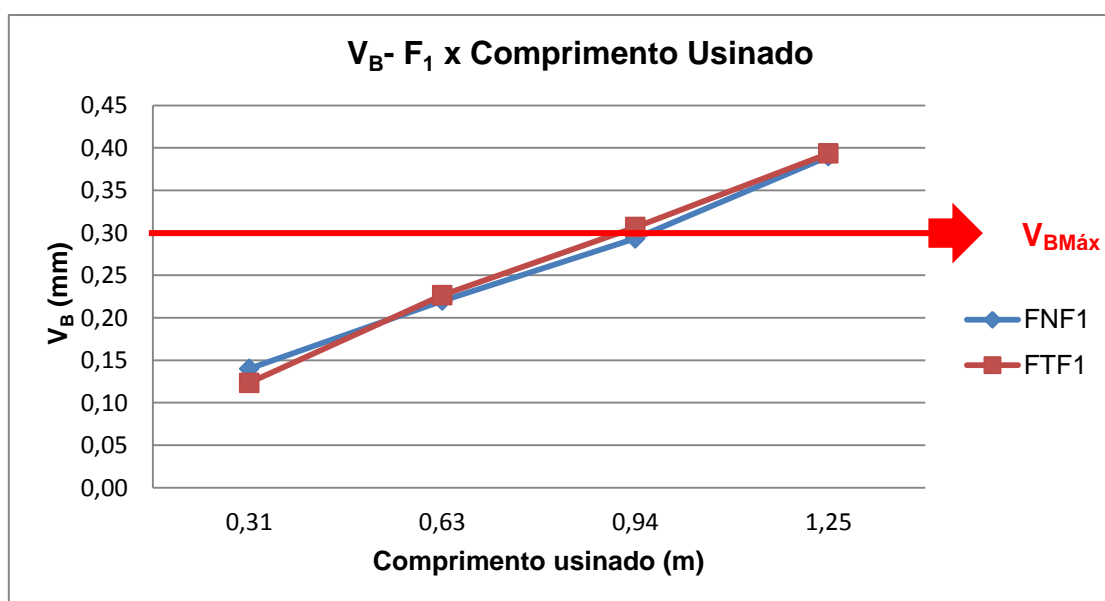


Figura 41 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_1 no fluido vegetal
 Fonte: Autoria própria.

De acordo com as análises de imagem das ferramentas utilizadas com a condição de usinagem F_1 no fluido vegetal com aumento de 150x, como mostrado na Figura 41 (A) fluido novo e (B) fluido tratado, verificou-se que ocorreu lascamento além do desgaste de flanco, mas não interferiu no desempenho como verificado na Figura 42.

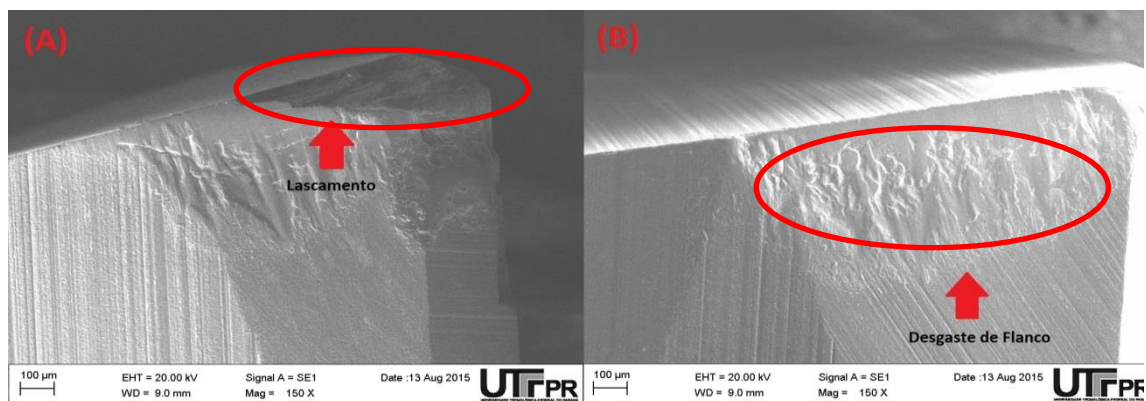


Figura 42 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_1 com fluido de corte vegetal: (A) fluido novo; (B) fluido tratado
Fonte: Autoria própria.

Na condição de usinagem F_2 (0,02 mm/dente, 6366 rpm, 700 mm/min e 1000 m/min), o fluido tratado e o sem tratamento começam e terminam com o mesmo valor de desgaste de ferramenta, enquanto no 2º passe existe um aumento de 8 % na usinagem com o fluido tratado. Comparando as condições de usinagem F_1 e F_2 , acontece um acréscimo no desgaste com a utilização do segundo, atingindo em torno de apenas 60 % do comprimento usinado em relação ao primeiro, confirmando que um aumento no avanço e uma diminuição na rotação pode melhorar o rendimento dessa ferramenta, como apresentado na Figura 43.

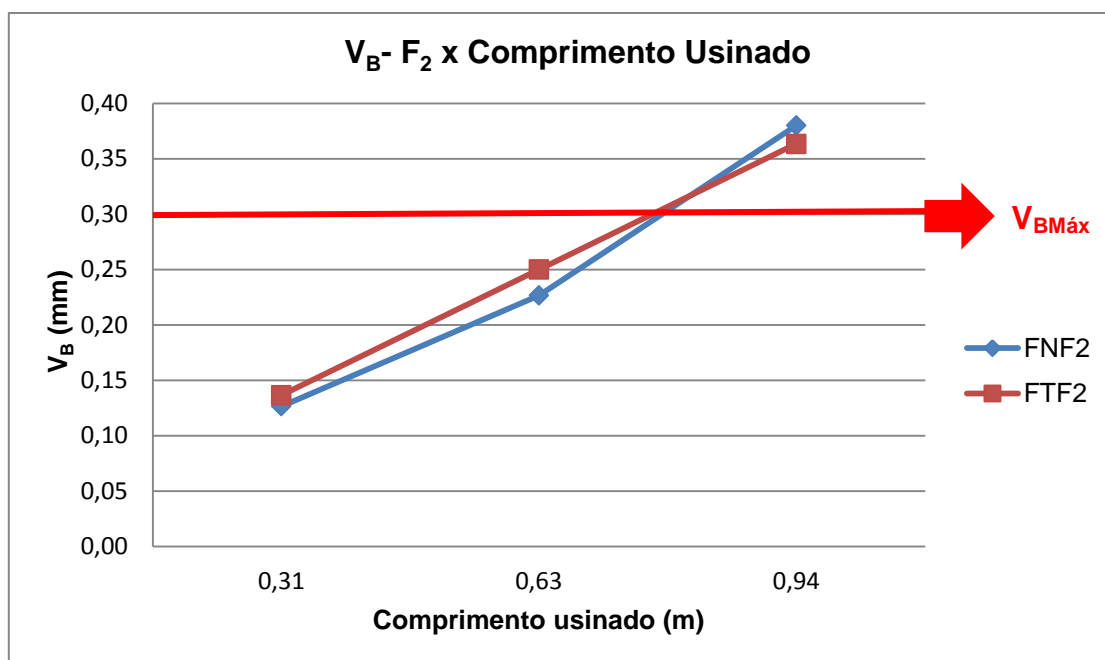


Figura 43 – Desgaste de ferramenta na condição de usinagem F_2 no fluido vegetal
Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 apresenta as análises de MEV das ferramentas utilizadas da ferramenta com a condição de corte F_2 no fluido vegetal com aumento de 150x, (A) fluido novo e (B) fluido tratado. Observou-se que ocorreu lascamento no fluido novo além do desgaste de flanco, porém com uma maior intensidade de lascamento em relação a condição de corte F_1 , o que corrobora a Figura 43 que identificou que utilizando a condição F_2 atingiu somente 75% do comprimento usinado em relação a condição F_1 .

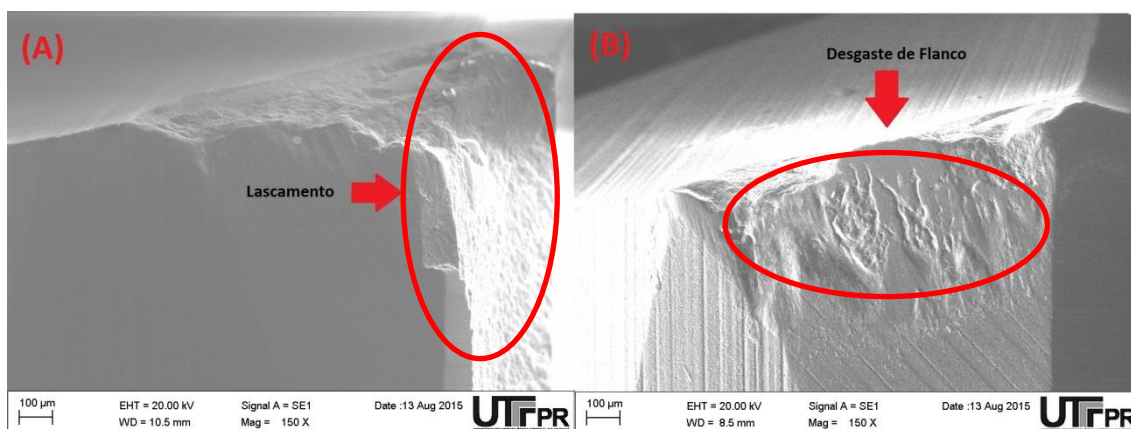


Figura 44 – MEV das ferramentas utilizadas nos ensaios com a condição de usinagem F_2 com fluido de corte vegetal: (A) fluido novo; (B) fluido tratado
Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

Todas as ferramentas de corte usinadas com o fluido de corte mineral apresentaram desgaste de flanco, devido à abrasão que ocorre, entre a peça e a ferramenta, por causa das partículas duras no material da peça usinada. Com esse tipo de desgaste é possível prever a vida útil da ferramenta, pois esse tipo de desgaste é estável durante toda a usinagem.

As ferramentas utilizadas na usinagem com fluido de corte vegetal apresentaram além do desgaste de flanco, também o desgaste do tipo lascamento, ocorrendo em ambos os parâmetros de corte, indicando que o fluido vegetal não é ideal para esse tipo de fresamento.

4.2 TOPOGRAFIA DA PEÇA USINADA E DAS ARESTAS DA FERRAMENTA

Este tópico irá discutir sobre a rugosidade superficial durante o fresamento e a análise topográfica feita nas ferramentas após os experimentos.

4.2.1 Rugosidade Superficial da Peça Usinada

Foram analisados três parâmetros de rugosidade superficial, a rugosidade média (R_a), a máxima deterioração superficial vertical da peça (R_t) e a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos em cada uma das cinco áreas divididas do comprimento total de amostragem (R_z).

4.2.1.1 Fluido mineral

Em relação ao parâmetro R_a com as condições de usinagem F_1 , os valores das peças usinadas sem e com tratamento foram semelhantes nos passes 1, 2, 3 e 6 e ocorreu um aumento com tratamento nos passes 4 e 5, em comparação com o sem tratamento (Figura 45 (A)). Analisando o parâmetro R_a e utilizando as condições de usinagem F_2 , as peças usinadas com o fluido tratado tiveram um aumento na rugosidade nos três passes, como pode ser observado na Figura 45 (B).

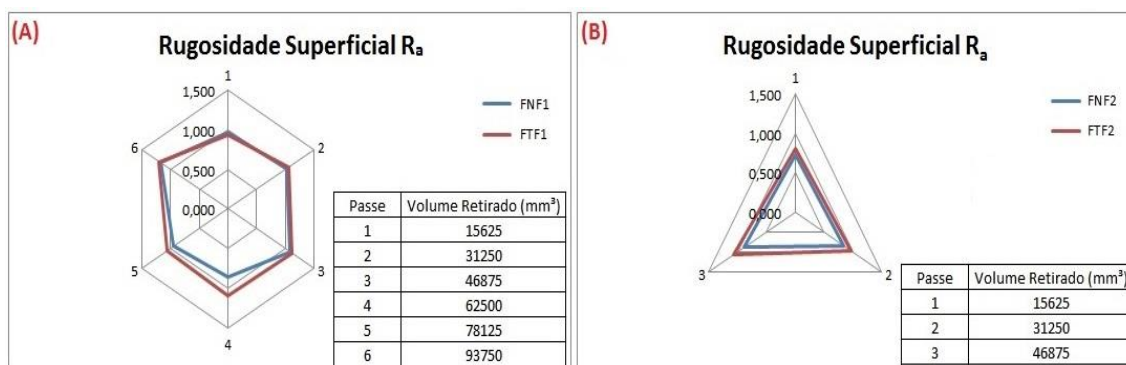


Figura 45 – Rugosidade superficial R_a fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
Fonte: Autoria própria.

Comparando o parâmetro R_t utilizando as condições de usinagem F_1 os valores das peças usinadas sem e com tratamento foram semelhantes nos passes 1, 2, 3, e ocorreu um aumento com tratamento nos passes 4 e 5 e uma diminuição no passe 6, em comparação com o sem tratamento como visto na Figura 46 (A). Para o parâmetro de rugosidade superficial R_t , utilizando as condições de usinagem F_2 , o fluido tratado teve um aumento na rugosidade nos passes 1 e 3 e um valor semelhante no passe 2, como mostrado na Figura 46 (B).

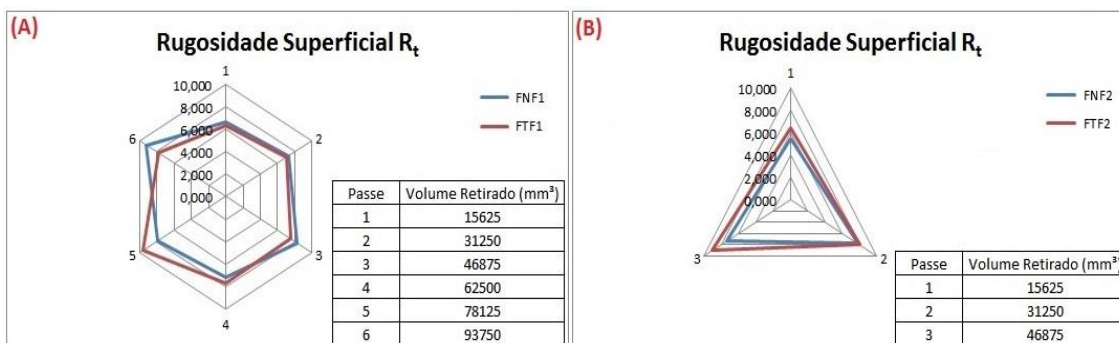


Figura 46 – Rugosidade superficial R_t fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
 Fonte: Autoria própria.

Nas condições de usinagem F_1 analisando o R_z , os valores das peças usinadas com tratamento foram menores nos passes 1, 2, 3 e 6 e ocorreu um aumento com tratamento no passe 4 em comparação com o sem tratamento, no passe 5 foram semelhantes como apresentado na Figura 47 (A). No parâmetro de rugosidade superficial R_z , utilizando as condições de usinagem F_2 , o fluido tratado teve um aumento na rugosidade nos passes 1 e 3 e um valor semelhante no passe 2, sendo visualizado na Figura 47 (B).

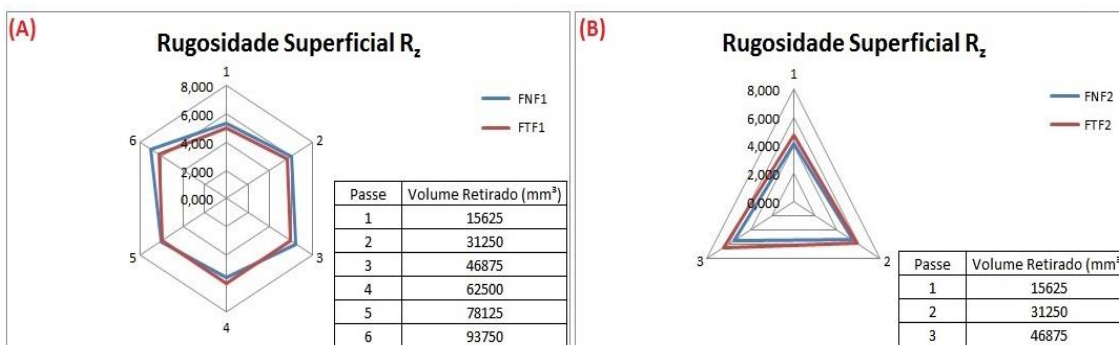


Figura 47 – Rugosidade superficial R_z fluido mineral: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
 Fonte: Autoria própria.

4.2.1.2 Fluido Vegetal

Nas condições de usinagem F_1 analisando o parâmetro R_a , foram semelhantes nos passes 1 e 2, enquanto o tratado foi melhor no passe 3 e no

último passe, acabou piorando em relação ao sem tratamento, como apresentado na Figura 48 (A). Nas condições de usinagem F_2 , os resultados do parâmetro R_a com o fluido tratado teve um desempenho melhor que o sem tratamento nos passes 1 e 2 e um valor semelhante no passe 3, como mostra a Figura 48 (B).

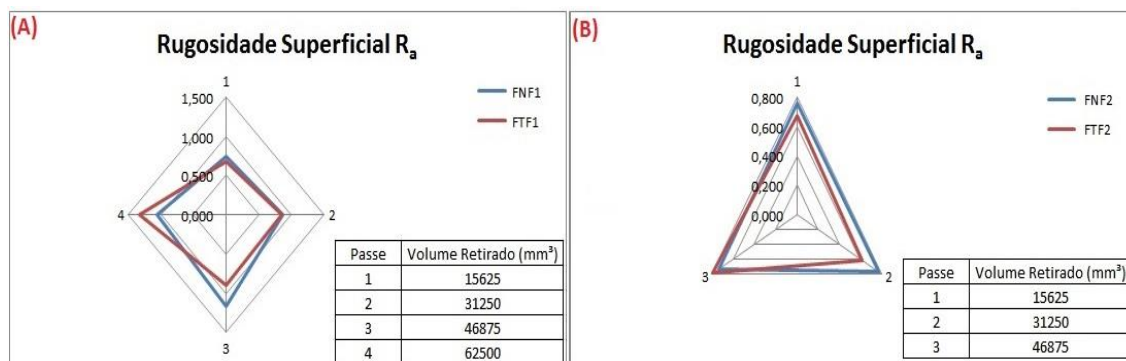


Figura 48 – Rugosidade superficial R_a fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
Fonte: Autoria própria.

Comparando o parâmetro R_t utilizando as condições de usinagem F_1 o fluido tratado teve um aumento na rugosidade no passe 4, uma melhora no passe 3 e um valor semelhante nos passes iniciais 1 e 2, como visto na Figura 49 (A). Analisando o parâmetro R_t , utilizando as condições de usinagem F_2 , o fluido tratado teve um valor semelhante em todos os passes em relação aos fluidos com e sem tratamento, como apresentado na Figura 49 (B).

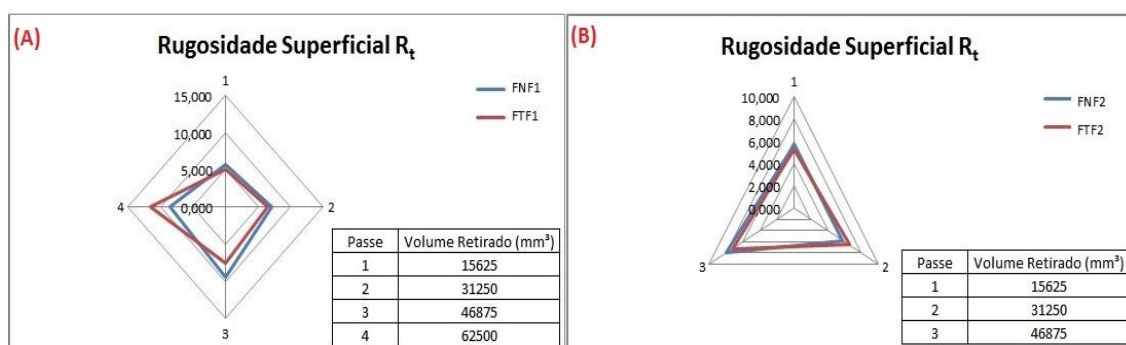


Figura 49 – Rugosidade superficial R_t fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
Fonte: Autoria própria.

Nas condições de usinagem F_1 analisando o parâmetro R_z , os valores das peças usinadas com tratamento foram iguais nos passes 1 e 2, enquanto melhoraram no passe 3 e ocorreu um aumento com tratamento no passe 4 em comparação com o sem tratamento como visualizado na Figura 50 (A). No parâmetro de rugosidade superficial R_z utilizando as condições de usinagem F_2 o fluido tratado teve um valor semelhante em todos os passes se comparado com o fluido sem tratamento, como visto na Figura 50 (B).

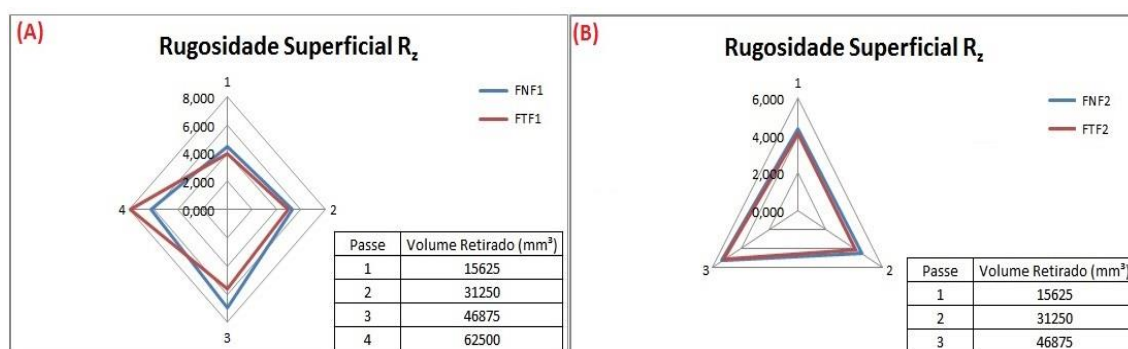


Figura 50 – Rugosidade superficial R_z fluido vegetal: (A) condições F_1 ; (B) condições F_2
Fonte: Autoria própria.

4.2.1.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

A rugosidade superficial se manteve similar ou com variação mínima entre o fluido tratado e sem tratamento, indiferentemente do fluido ser vegetal ou mineral, e essa pequena variação da rugosidade pode ser explicada por uma possível reação do ozônio com o fluido, que gerou uma camada de óxido. Para analisar esse fato foi realizado o ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), que comprovou que após o tratamento a quantidade de óxido aumenta em ambos os fluidos.

4.2.2 Análise Topográfica das Ferramentas

Para a análise topográfica das arestas de corte das ferramentas foram avaliados três parâmetros de rugosidade tridimensionais, sendo o parâmetro S_a , [μm], que está relacionado com a média aritmética das alturas das rugosidades em relação ao plano médio, para a área de amostragem. O parâmetro S_v que está relacionado à medida da linha média até a altura do maior vale da área analisada, enquanto o parâmetro S_z representa a média de dez pontos da rugosidade, sendo cinco valores associados aos picos mais altos e outros cinco associados aos vales mais profundos da área de amostragem.

4.2.2.1 Fluido Mineral

A Tabela 15 apresenta os valores de rugosidade tridimensional para os ensaios com o fluido mineral novo (F_N) e fluido mineral tratado (F_T) utilizando as condições de usinagem F_1 e F_2 .

Como se pode analisar houve uma melhora em todos os parâmetros da rugosidade tridimensional para com o fluido de corte tratado em relação ao fluido novo, indiferente do parâmetro de corte utilizado.

Na comparação apenas entre F_1 e F_2 , como os parâmetros utilizados em F_1 conseguiram um melhor desempenho na usinagem, obteve um pior desempenho na rugosidade e esse desempenho pode ser analisado pela Figura 51 onde se visualiza as topografias da aresta da ferramenta de corte obtidas por interferometria de luz branca, depois do ensaio com fluido mineral novo: (A) condição F_1 em vista superior, (B) condição F_1 em 3D, (C) condição F_2 em vista superior e (D) condição F_2 em 3D.

Enquanto a Figura 52 apresenta as topografias da aresta da ferramenta de corte obtidas por interferometria de luz branca, depois do ensaio com fluido mineral tratado: (A) condição F_1 em vista superior, (B) condição F_1 em 3D, (C) condição F_2 em vista superior e (D) condição F_2 em 3D.

Foi possível identificar uma melhora em torno de 50% em todos os parâmetros analisados para os experimentos com fluido mineral tratado em relação ao fluido mineral novo.

Tabela 15 – Parâmetros de rugosidade tridimensionais com ensaios no fluido de corte mineral

Parâmetros	$F_N F_1$	$F_N F_2$	$F_T F_1$	$F_T F_2$
S_a (μm)	3,585	2,643	1,568	1,375
S_v (μm)	34,060	29,010	18,060	9,619
S_z (μm)	63,600	63,220	30,110	17,880

Fonte: Autoria própria.

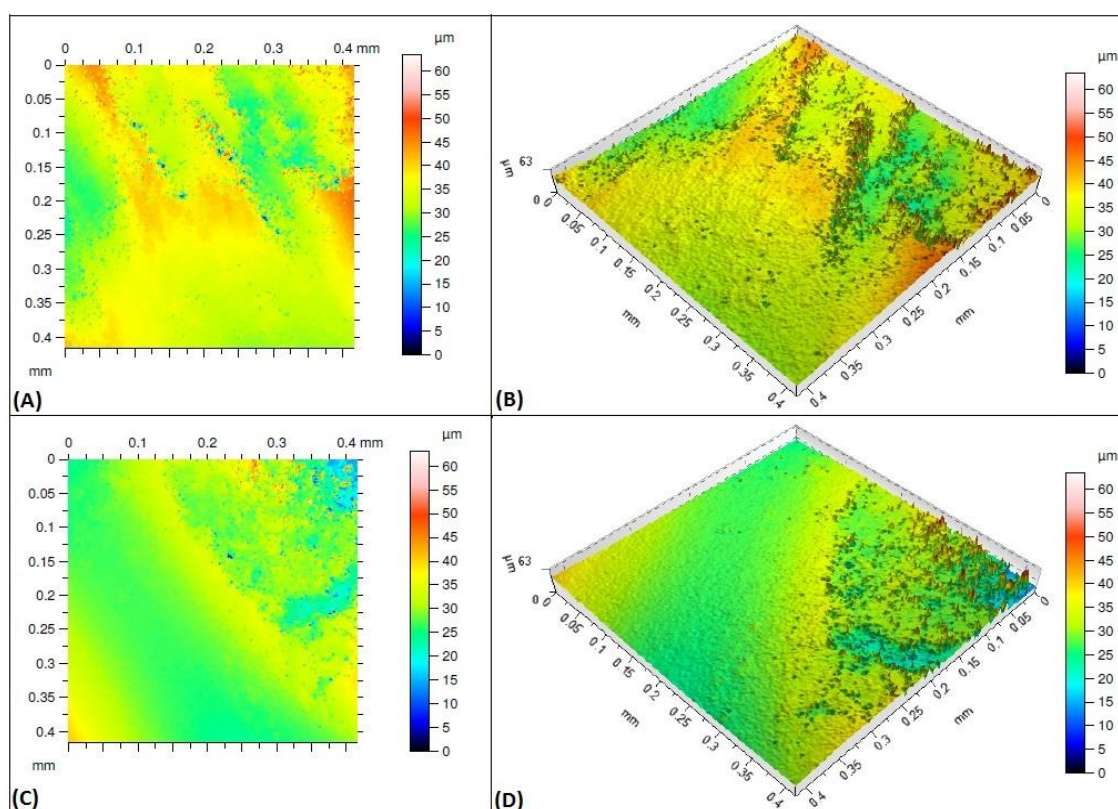


Figura 51 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido mineral novo: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D

Fonte: Autoria própria.

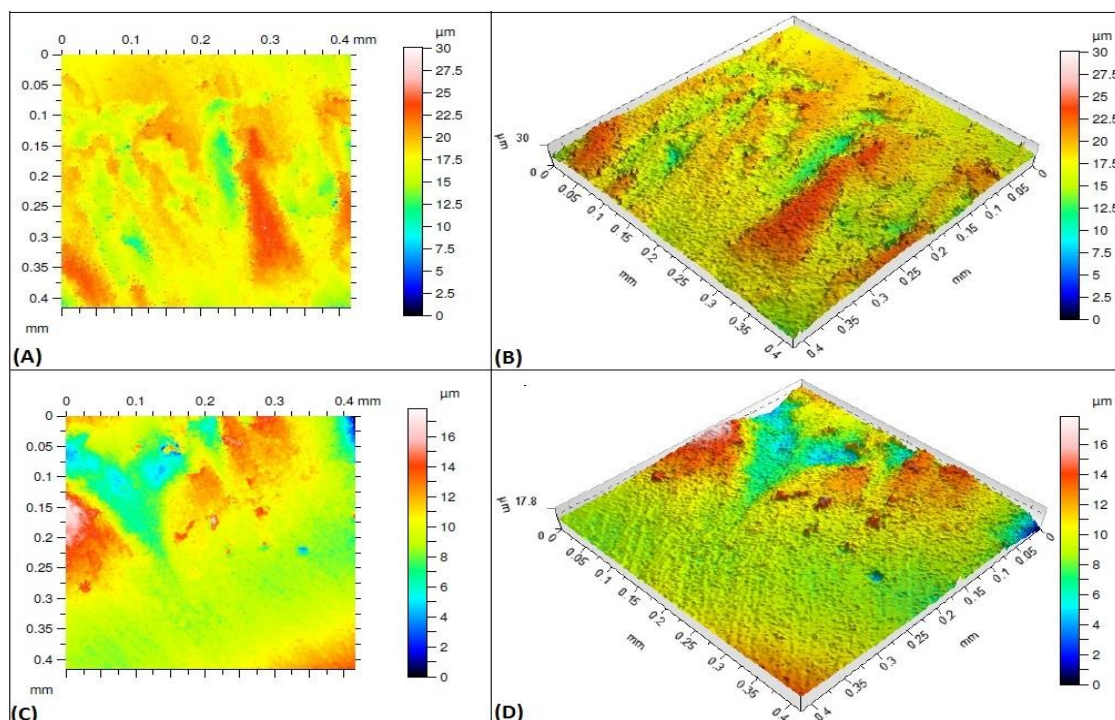


Figura 52 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido mineral tratado: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D
Fonte: Autoria própria.

4.2.2.2 Fluido Vegetal

Na Tabela 16 são mostrados os valores de rugosidade tridimensional para os ensaios com o fluido vegetal novo (F_N) e fluido vegetal tratado (F_T) utilizando as condições de usinagem F_1 e F_2 .

Como se pode analisar, houve uma pequena melhora em todos os parâmetros da rugosidade tridimensional para com o fluido de corte tratado em relação ao fluido novo, indiferente do parâmetro de corte utilizado.

Na comparação apenas entre F_1 e F_2 , como os parâmetros utilizados em F_1 conseguiram um melhor desempenho na usinagem, obteve um pior desempenho na rugosidade, esse desempenho pode ser analisado pela Figura 53 onde se visualiza as topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por interferometria de luz branca, depois do ensaio com fluido vegetal novo: (A) condição F_1 em vista superior, (B) condição F_1 em 3D, (C) condição F_2 em vista superior e (D) condição F_2 em 3D.

A Figura 54 apresenta as topografias da aresta da ferramenta de corte obtidas por interferometria de luz branca, depois do ensaio com fluido vegetal tratado: (A) condição F_1 em vista superior, (B) condição F_1 em 3D, (C) condição F_2 em vista superior e (D) condição F_2 em 3D.

Apesar dessa pequena diferença nos valores dos parâmetros de topografia entre os ensaios com fluido novo e fluido tratado, verifica-se que o tratamento com o catalisador não exerce influencia direta na rugosidade tridimensional nos experimentos com o fluido vegetal.

Tabela 16 – Parâmetros de rugosidade tridimensionais com ensaios no fluido de corte vegetal

Parâmetros	$F_N F_1$	$F_N F_2$	$F_T F_1$	$F_T F_2$
S_a (μm)	2,604	1,566	2,316	1,561
S_v (μm)	23,750	10,550	16,550	15,390
S_z (μm)	49,070	18,320	45,010	25,510

Fonte: Autoria própria.

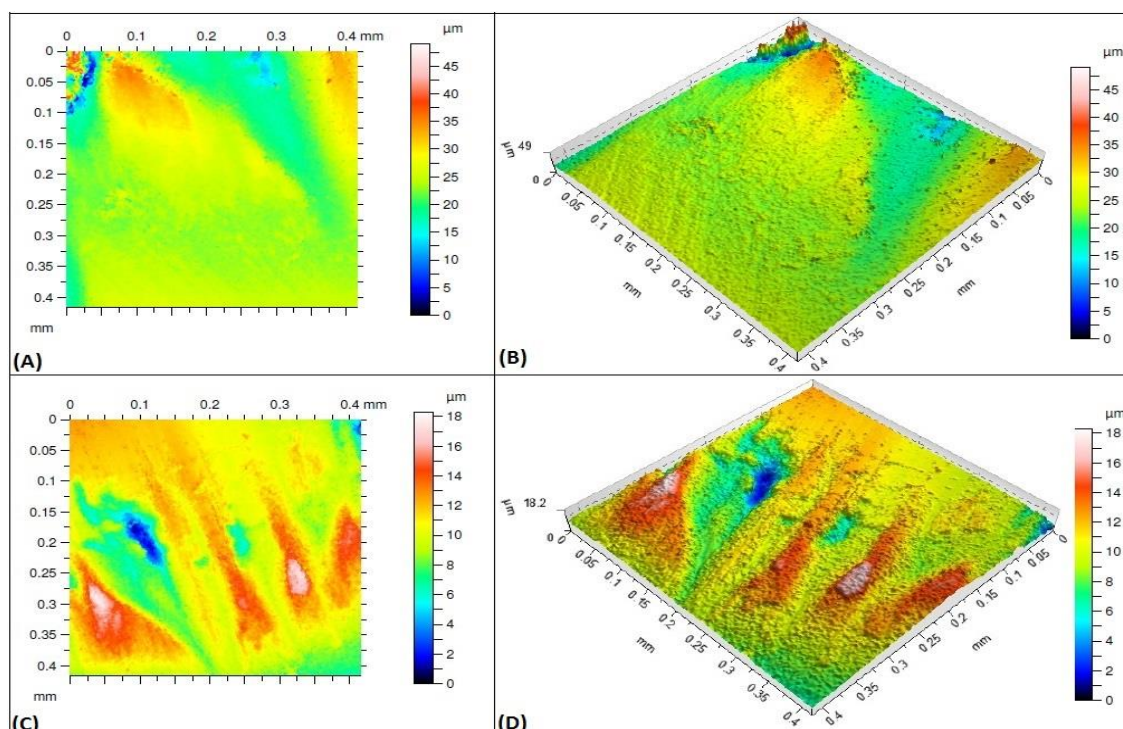
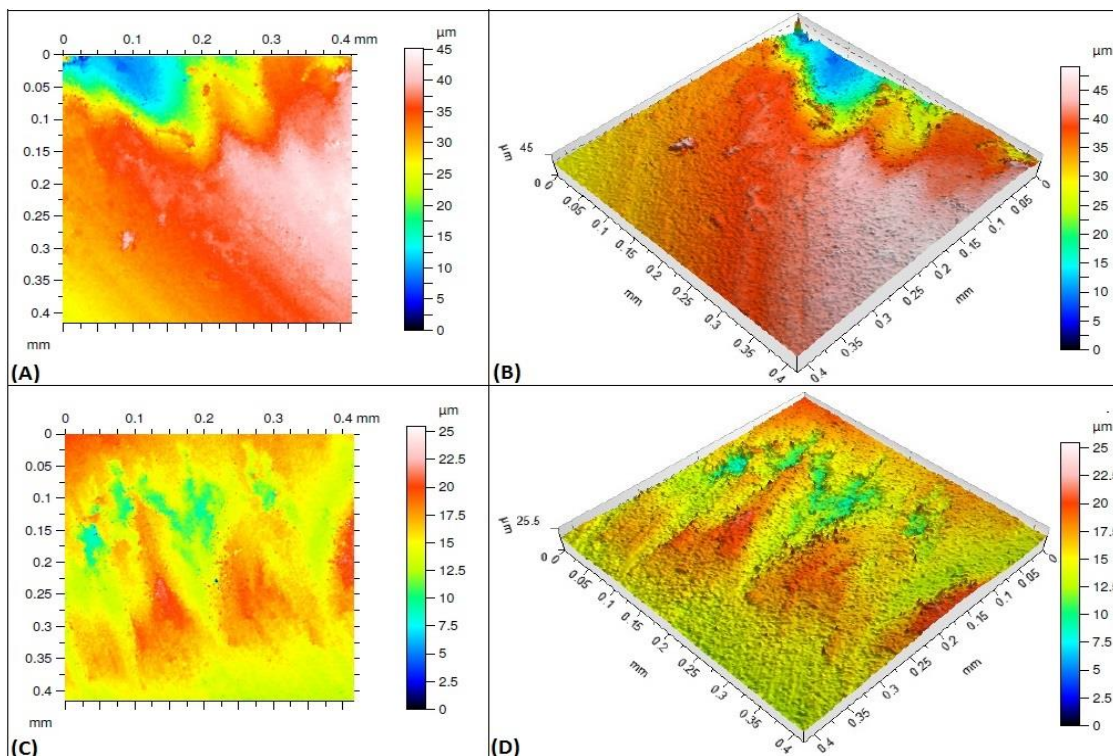


Figura 53 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido vegetal novo: (A) condição F_1 em vista superior; (B) condição F_1 em 3D; (C) condição F_2 em vista superior; (D) condição F_2 em 3D

Fonte: Autoria própria.



**Figura 54 – Topografias da aresta da ferramenta de corte, obtidas por IDLB, depois do ensaio com fluido vegetal tratado: (A) condição F₁ em vista superior; (B) condição F₁ em 3D; (C) condição F₂ em vista superior; (D) condição F₂ em 3D
Fonte: Autoria própria.**

4.2.2.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

Como se observa, os valores dos parâmetros de rugosidade tridimensional foram melhores para o fluido vegetal em relação ao mineral, isso ocorre devido à lubricidade do óleo vegetal ser maior do que a do óleo mineral, devido à polaridade da cadeia do óleo vegetal, já que proporciona uma maior aderência ao metal, melhorando a superfície de contato do fluido com a peça.

O fato de que os óleos vegetais possuem naturalmente atração elevada por superfícies metálicas é devido à polaridade inerente às moléculas de éster, o que contribui para um melhor desempenho de proteção contra desgaste e para uma maior solubilidade nos aditivos presentes (SOARES, 2013).

Como mostrado na Figura 55, à polaridade das moléculas do óleo provoca uma grande afinidade química com as superfícies metálicas, fazendo com que as mesmas se agarrem ao metal como pequenos ímãs. O resultado é

um alinhamento denso e homogêneo das moléculas de óleo vegetal, perpendicular à superfície do metal, o qual cria uma espessa camada de filme lubrificante (GONÇALVES, 2013).

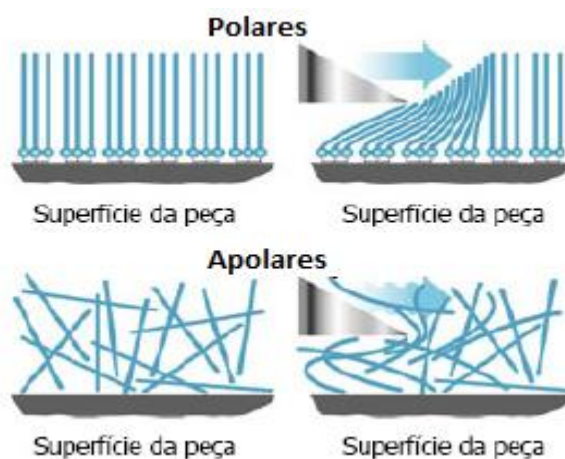


Figura 55 – Alinhamento das moléculas polares e apolares
Fonte: Kuroda (2006) apud Gonçalves (2013).

4.3 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X

Para verificar de oxidação na superfície da peça usinada, foi utilizado a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX).

4.3.1 Fluido Mineral

A Figura 56 apresenta a superfície final da peça usinada com fluido de corte mineral (a) novo e (b) tratado. Foram analisados os espectros sinalizados. O 1 corresponde a área total interna do quadrado rosa (média da composição química da amostra) enquanto nos demais espectros foram feitas as análises químicas nos pontos específicos.

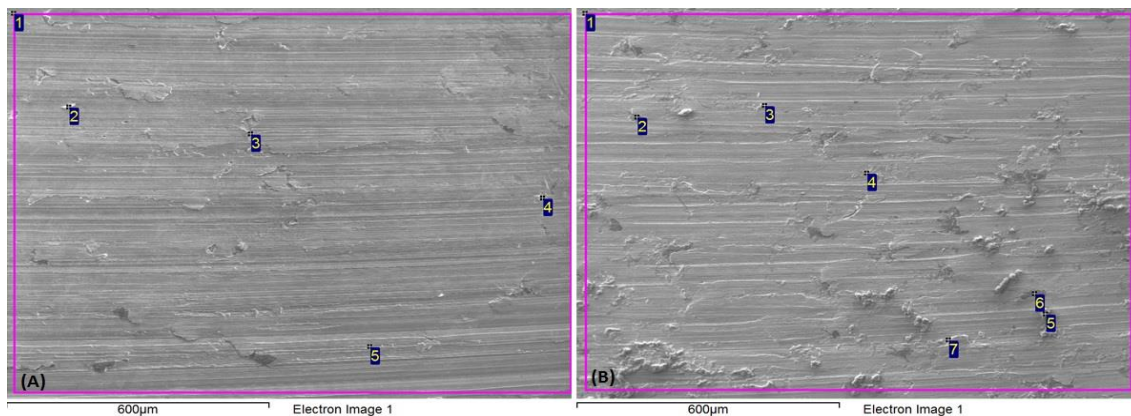


Figura 56 – Imagem obtida por MEV com aumento de 200x dos espectros para determinação da composição química da superfície da peça final usinada em fluido mineral: (a) novo; (b) tratado

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 mostra a composição química (% peso) obtida por EDX na superfície da peça usinada com fluido mineral novo, enquanto na Tabela 18 visualiza-se a composição química (% peso) na superfície da peça usinada com fluido mineral tratado com ozônio.

Nota-se que o EDX é uma técnica qualitativa e, portanto, os valores percentuais são comparativos e não porcentagens reais. Constatou-se a presença de: C, N, O, Na, Al, Si, P, S, Cl, Mn e Fe. Átomos de C, Si, Mn, Fe são provenientes do metal base e os demais componentes, possivelmente, provêm de impurezas no processo de fabricação do material.

Analisando apenas os valores do espectro 1 que é em relação a área total, temos que a área da superfície da peça usinada com fluido novo apresenta uma média de apenas 1,97% de óxidos, enquanto a tratada com ozônio contem 6,2%, ocorrendo um aumento de 3x.

Os demais espectros como analisam apenas o ponto em específico, mostram valores totalmente diferentes entre si, alguns com apenas 0,93% de óxidos no fluido novo, enquanto outros contem 41,48% no fluido tratado. Os outros elementos, mesmo nesses pontos específicos, não passam de 0,6% o que confirma que são apenas impurezas adquiridas do processo de fabricação do material.

Tabela 17 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido mineral novo

Espectro	C	N	O	Na	Al	Si	P	S	Cl	Mn	Fe
1	11,32		1,97			2,36				0,48	83,87
2	51,85	7,85	10,94	0,26		0,66	0,19	0,34	0,21		27,70
3	3,19		0,93		0,22	0,56	0,29			1,72	93,08
4	16,76		2,83			2,40					78,01
5	7,62		1,55			1,70					89,13

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido mineral tratado

Espectro	C	O	Na	Mg	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
1	16,08	6,20			2,22					75,40
2	92,68	4,14								3,18
3	1,36	10,67			1,31				0,51	86,15
4	11,10	39,91	0,43	0,59	5,26		0,56			42,16
5	6,75	41,48			0,44	0,24	0,25	0,34		50,49
6	94,03	3,46					0,16			2,35
7	30,01	10,51			2,10					57,38

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Fluido Vegetal

A Figura 57 mostra a mesma análise realizada na Figura 58, diferenciando somente o fluido utilizado, que neste caso é o fluido vegetal.

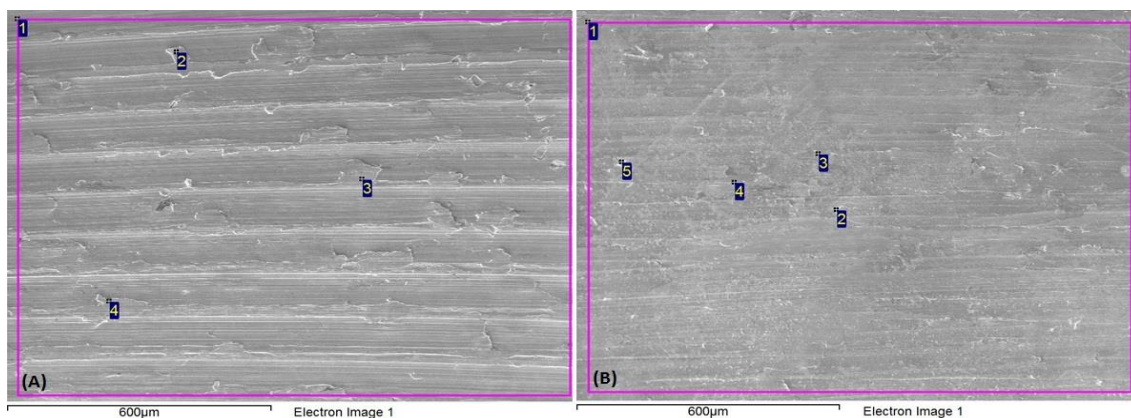


Figura 57 – Imagem obtida por MEV com aumento de 200x dos espectros para determinação da composição química da superfície da peça final usinada em fluido vegetal: (a) novo; (b) tratado

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 19 mostra a composição química (% peso) obtida por EDX na superfície peça usinada com fluido vegetal novo, enquanto a Tabela 20 visualiza-se a composição química (% peso) na superfície peça usinada com fluido vegetal tratado com ozônio. Verificou-se a presença de: C, O, Na, Mg, Al, Si, Cl, Ca, Mn, Zn e Fe. Átomos de C, Si, Mn, Fe são provenientes do metal base, enquanto os outros componentes, possivelmente, provêm de contaminação de impurezas no processo de fabricação.

Analisando apenas os valores do espectro 1 que é em relação a área total, temos que a área da superfície da peça usinada com fluido novo não apresenta valores de óxidos, enquanto a tratada com ozônio contem 5,08%.

Tabela 19 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido vegetal novo

Espectro	C	Si	Cu	Fe
1	10,25	2,60		87,15
2	15,19	2,85	0,68	81,28
3	13,51	2,73		83,76
4	7,03	2,34		90,63

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Composição química (% de peso) obtida por EDX da superfície do ferro fundido nodular usinado com fluido vegetal tratado

Espectro	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Mn	Zn	Fe
1	16,19	5,08				1,89			0,37		76,48
2	23,33	7,41				1,69	0,25		0,38		66,94
3	18,09	32,89	0,48	0,29		1,77	0,31	0,32		0,61	45,24
4	17,37	5,24				2,40					74,99
5	14,04	4,50			1,16	1,86	0,36		0,51		77,58

Fonte: Aatoria própria.

4.3.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

Foi comprovado que a quantidade de óxidos na superfície da peça usinada com fluido tratado aumentou em relação ao fluido novo, tanto no mineral (de 1,97% para 6,20%) quanto no vegetal (de 0% para 5,08%). Para verificar se essa quantidade é aceitável, se faz necessário à realização de outros testes.

4.4 DUREZA DOS CORPOS DE PROVA USINADOS

Foi mensurada a dureza Brinell do material após a usinagem sem e com tratamento. Os valores médios de dureza tabelados para ferro fundido nodular GGG60 é de 220 até 260 HB. Para atingir um valor médio foi repetido o teste dez vezes em cada peça usinada.

4.4.1 Fluido Mineral

Os valores obtidos da dureza superficial nos ensaios com fluido mineral são apresentados na Tabela 21. Como é possível perceber, os valores estão dentro do tabelado para o material e não existiu diferença significativa entre o fluido tratado e o sem tratamento.

Tabela 21 – Dureza dos corpos de prova usinados no fluido mineral

Parâmetros	Média da dureza (HB)
F _N F ₁	260 ± 2,4
F _T F ₁	257 ± 5,4
F _N F ₂	261 ± 3,1
F _T F ₂	256 ± 2,4

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Fluido Vegetal

Nos testes com as peças usinadas com o fluido vegetal mostrou um fato que todas as peças deram um valor maior do que o tabelado, mas a diferença entre as peças com e sem tratamento foram pequenas, como mostra a Tabela 22.

Tabela 22 – Dureza dos corpos de prova usinados no fluido vegetal

Parâmetros	Média da dureza (HB)
F _N F ₁	274 ± 2,7
F _T F ₁	278 ± 2,5
F _N F ₂	294 ± 3,3
F _T F ₂	286 ± 2,3

Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

Não houve alteração significativa entre os corpos de prova que foram usinado com o fluido novo ou tratado, independentemente do fluido ser mineral ou vegetal, sendo um indicador que o ozônio não interfere na dureza do material. Isso ocorreu devido ao fato do tempo de contato do fluido com a peça durante a usinagem ser pequeno e rápido, sem o tempo necessário para elevação da temperatura para que ocorresse mudança no interior do material.

4.5 POTÊNCIA CONSUMIDA DURANTE O FRESAMENTO

A análise da potência consumida nos processos de usinagem normalmente se dividem em três fases, o acionamento da máquina, a preparação e movimentações e a usinagem (ARAMCHAROEN; MANTIVEGA, 2014). Nesse trabalho foi avaliado apenas a potência consumida durante a usinagem.

As medições da Potência (W) pelo Tempo (s) ocorreram apenas durante o período de fresamento da peça. A captação começou com o início do primeiro passe e só foi interrompida no final de cada experimento, quando ocorreu o desgaste total da ferramenta de corte, fornecendo um resultado do processo inteiro, sendo possível quantificar o consumo energético em Wh e comparar o gasto entre os diferentes parâmetros de corte, tipos de fluido de corte e os fluidos com e sem tratamento.

4.5.1 Fluido Mineral

Na comparação entre os parâmetros de corte foi verificado que a redução da rotação (rpm) e o aumento do avanço (mm/min) conseguiu reduzir o consumo energético em 30% enquanto o tratamento com o catalisador

conseguiu diminuir o consumo em relação ao fluido sem tratamento em uma taxa de 10%. Conforme é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Consumo energético durante o fresamento utilizando o fluido mineral

Parâmetros	Média do consumo energético (Wh)
$F_N F_1$	$63,57 \pm 1,2$
$F_T F_1$	$57,44 \pm 1,8$
$F_N F_2$	$90,89 \pm 1,3$
$F_T F_2$	$82,66 \pm 0,9$

Fonte: Autoria própria.

4.5.2 Fluido Vegetal

Para o fresamento utilizando o fluido vegetal os resultados com a alteração do parâmetro de corte diminuíram em 30% para o fluido sem tratamento e 17% para o fluido tratado. E na relação entre o fluido catalisado e o não catalisado, utilizando o parâmetro de corte F_1 , o consumo ficou igual após o tratamento e com o parâmetro de corte F_2 o consumo diminuiu 14%, sendo mostrado na Tabela 24.

Tabela 24 – Consumo energético durante o fresamento utilizando o fluido vegetal

Parâmetros	Média do consumo energético (Wh)
$F_N F_1$	$78,99 \pm 1,7$
$F_T F_1$	$81,29 \pm 1,5$
$F_N F_2$	$113,37 \pm 1,1$
$F_T F_2$	$97,36 \pm 1,4$

Fonte: Autoria própria.

4.5.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

Balogun e Mativenga (2014) mostraram a diferença do consumo energético com condições de corte diferentes, onde aumentando o avanço e reduzindo a rotação o consumo diminui. A diferença em relação o fluido sem e com tratamento pode ser explicado pela eliminação dos microrganismos e, com isso, a viscosidade do fluido diminuir, fazendo com que a bomba do fluido gaste menos potência.

Em relação à diferença entre o fluido mineral consumir menos potência que o fluido vegetal, pode estar relacionado com o fato de que como as arestas das ferramentas usinadas com o fluido vegetal também sofreram o desgaste do tipo lascamento, isto contribuiu para um fresamento irregular e assim ocasionando maior força de corte.

4.6 pH

Durante o período de 15 dias de tratamento do fluido de corte com o catalisador eletrofísico que aplicava ozônio diretamente no reservatório, foi realizada a medição de pH diariamente utilizando o pH-Meter CG 818.

4.6.1 Fluido Mineral

Os resultados da medição no fluido de corte mineral apresentados na Figura 58, mostram que o valor do pH estava em 8,18 e identificou-se um aumento contínuo até 8,56, sendo coletado após os 15 dias de tratamento.

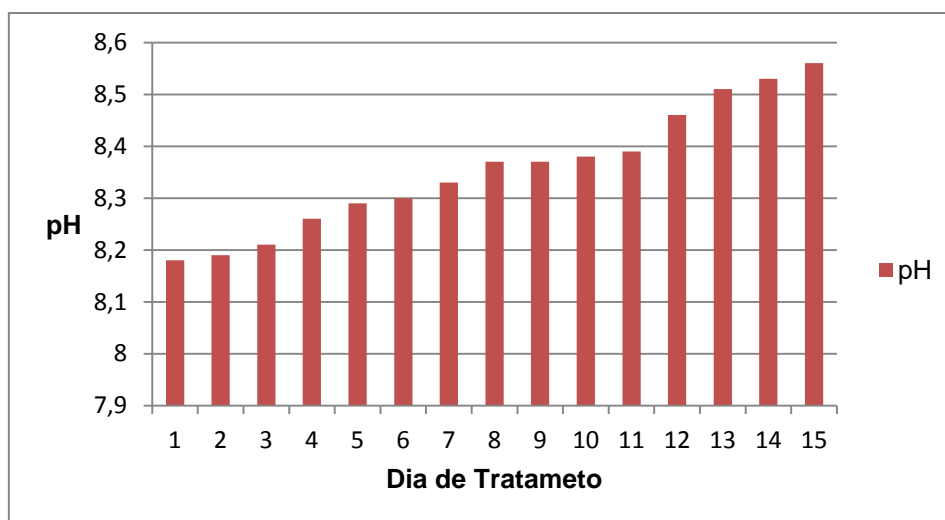


Figura 58 – Valores do pH no fluido mineral durante o tratamento
Fonte: Autoria própria.

4.6.2 Fluido Vegetal

Inicialmente o pH do fluido vegetal se encontrava com um valor de 7,81 e foi aumentando durante o tratamento até atingir o 8,26 depois dos 15 dias. A Figura 59 mostra esse crescimento devido ao ozônio eliminar os microrganismos e com isso deixando o pH mais básico.

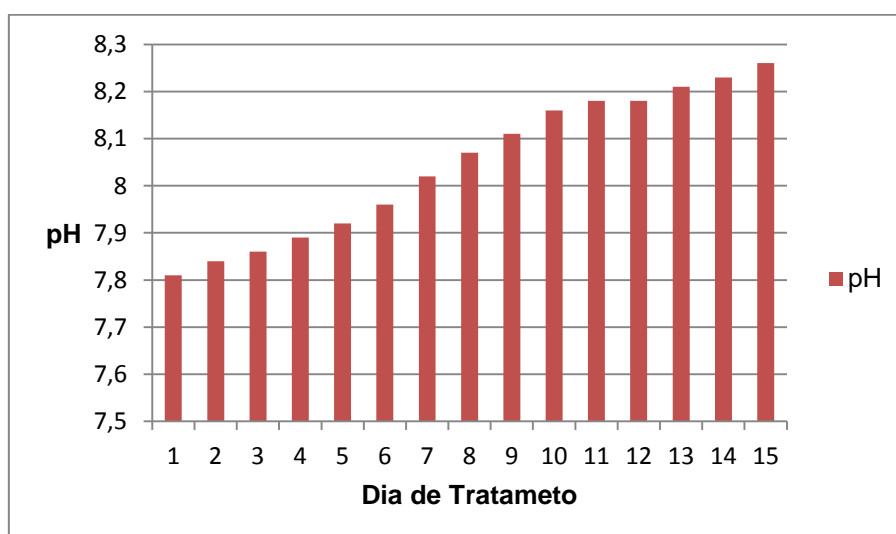


Figura 59 – Valores do pH no fluido vegetal durante o tratamento
Fonte: Autoria própria.

4.6.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

A provável razão para essa modificação na propriedade do pH em ambos os fluidos, foi que quando existia contaminação microbiana, a produção de metabólitos celulares, majoritariamente ácidos, reduzem o valor do pH (Runge e Duarte 1990), e como o tratamento com ozônio elimina esses microrganismos, a tendência é a recuperação do pH. A variação foi pequena por ser um ensaio de bancada (ambiente controlado). Em chão de fábrica essa alteração seria mais representativa devido a fatores como manutenção dos equipamentos, tipo de água utilizada, higiene do operador, entre outras.

A variação na recuperação do pH do fluido durante o tratamento foi a mesma para ambos, mas a degradação do fluido vegetal foi maior que a do mineral, pois contém mais material orgânico, já que a quantidade utilizada de biocida antes da realização dos testes foram iguais, mas não o suficiente para deixar que não ocorresse degradação.

4.7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Foram retiradas um total de 10 amostras para a realização da contagem microbiológica de fungos e bactérias e quebras de emulsão durante o período de testes de acordo com as horas máquinas trabalhadas, enquanto a medição do oxigênio dissolvido foi realizada no próprio reservatório da máquina-ferramenta. As amostras retiradas até 126 horas são do fluido novo (como branco); as amostras das 126, 138 e 153 horas foram retiradas durante o tratamento com o catalisador.

4.7.1 Oxigênio Dissolvido

Em relação ao oxigênio dissolvido medido dentro do reservatório, em ambos os fluidos foi obtido um valor acima de 6,5 mg/L em todas as amostras, o que é considerado um ambiente aeróbio, enquanto a temperatura dos fluidos de corte se manteve em todas as medições na faixa de 23°C a 25°C, sendo possível verificar que a alta temperatura gerada entre a ferramenta e a peça durante o fresamento não interfere na temperatura do fluido de corte no reservatório.

A degradação do fluido de corte em geral é determinada por uma série de fatores, tais como reações de oxidação, reações de polimerização, condensação e rupturas de cadeias. Os três fatores que mais influenciam a degradação são a presença de oxigênio, temperaturas elevadas e contato com substâncias quimicamente ativas dos materiais. O fluido permaneceu em um ambiente aeróbio (6,5 mg/L) e no contato entre ferramenta-peça-cavaco, a temperatura se eleva e este é um ambiente ideal para degradação do fluido de corte.

4.7.2 Quebra de Emulsão

A cor do óleo está relacionada com a quantidade de insaturações que nele existem inicialmente, pois quando estes são aquecidos ocorre a isomerização e migração de duplas ligações, levando à conjugação das mesmas. As duplas ligações conjugadas levam à absorção de quantidades maiores de luz azul, provocando um aumento de cores laranja e marrom no óleo. Cella et al. (2002) verificaram em seu trabalho que o escurecimento da cor do óleo vegetal analisado está diretamente ligado com a degradação do óleo.

Como se pode visualizar pela Figura 60, tanto o óleo mineral como o óleo vegetal tiveram mudança na coloração; o escurecimento do óleo ao longo da sua utilização é uma consequência da degradação.

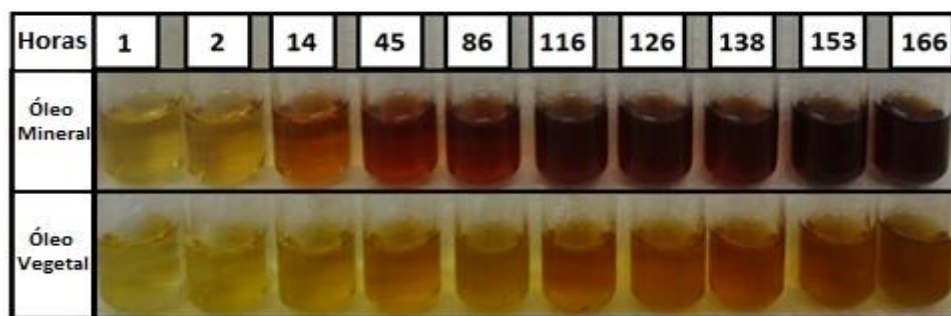


Figura 60 – Coloração das amostras retiradas do óleo mineral e vegetal
Fonte: Adaptado de Nakagawa (2016).

4.7.3 Análise Microbiológica

Neste tópico será apresentado o desenvolvimento da proliferação de bactérias e fungos no fluido mineral e no fluido vegetal, desde o fluido novo até o final do tratamento.

4.7.3.1 Fluido Mineral

A Figura 61, ilustra que a proliferação de bactérias foi diminuindo até às 45 horas trabalhadas e a partir daí aumentando até às 126 horas, quando começou o tratamento até o final das 153 horas, o crescimento estabilizou. Na Figura 62 a contaminação por fungos estava estabilizada até começar o tratamento e após o início houve uma redução na proliferação.

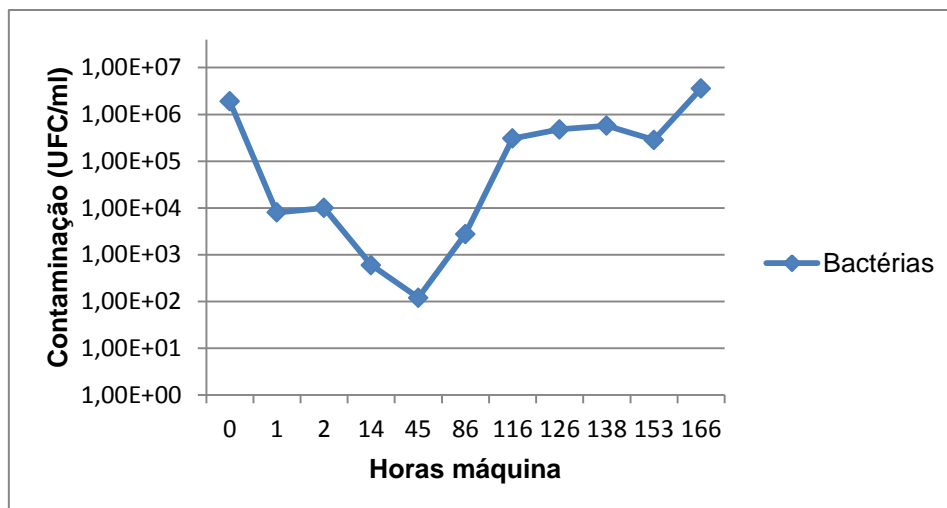


Figura 61 – Proliferação de bactérias no fluido mineral
Fonte: Autoria própria.

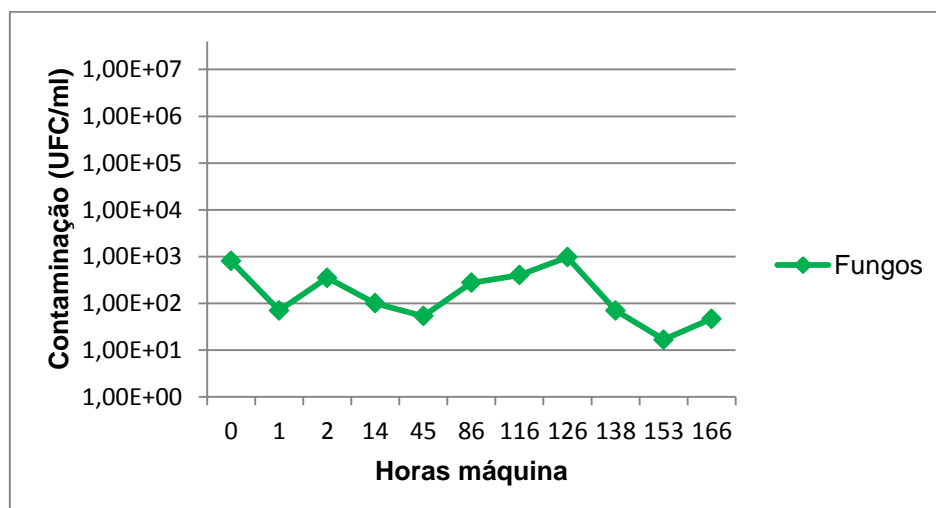


Figura 62 – Proliferação de fungos no fluido mineral
Fonte: Autoria própria.

4.7.3.2 Fluido Vegetal

As Figuras 63 e 64 apresentam, respectivamente, os valores de contaminação das bactérias e fungos no fluido de corte vegetal, ambas sofrendo uma redução até as 45 horas trabalhadas e elevando o nível até as 126 horas, quando começou o tratamento e assim estabilizando ou reduzindo essa proliferação.

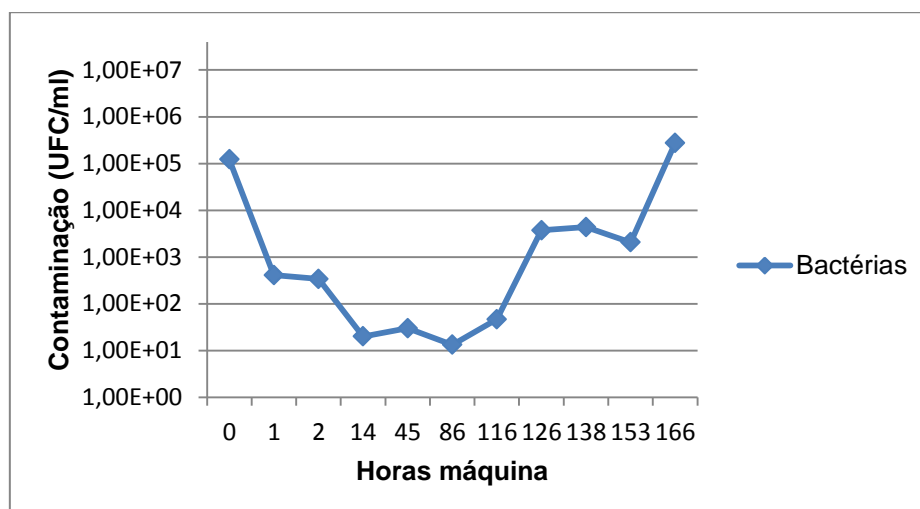


Figura 63 – Proliferação de bactérias no fluido vegetal
 Fonte: Autoria própria.

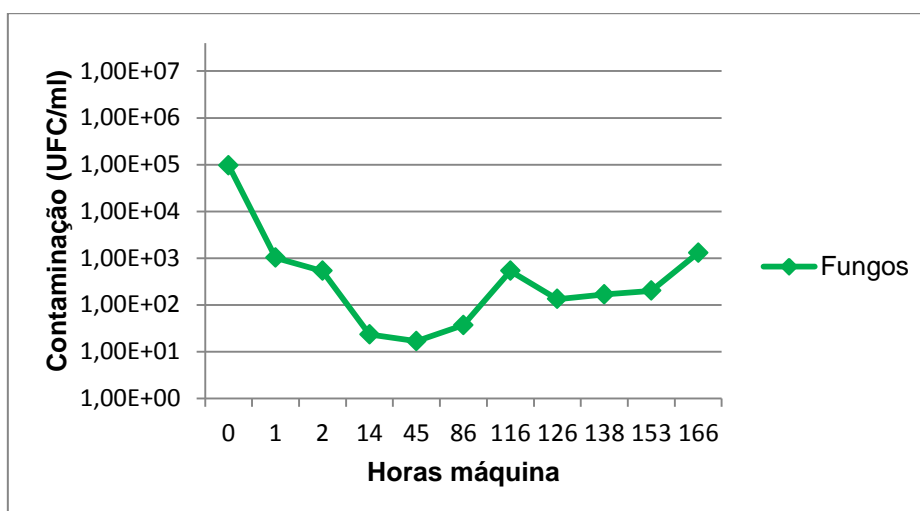


Figura 64 – Proliferação de fungos no fluido vegetal
 Fonte: Autoria própria.

4.7.3.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

O ozônio é conhecido por degradar os microrganismos rapidamente. Sendo assim, esses resultados com uma baixa redução dos fungos e bactérias podem ser explicados pela vazão do catalisador não ser suficiente para tratar os 300 litros do reservatório do fluido de corte.

4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

Foi utilizado o método ANOVA para verificar quais fatores apresentam diferença e posteriormente o Teste de Tukey para comprovar estatisticamente quais diferenças de fato ocorrem. Foram avaliados os fatores de desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida, para cada um dos fluidos de corte (mineral e vegetal), comparando entre os 4 grupos avaliados F_NF_1 , F_NF_2 , F_TF_1 e F_TF_2 .

4.8.1 Fluido Mineral

Este tópico apresentará os resultados estatísticos referentes aos testes realizados com fluido mineral, comparando os quatro grupos entre si (F_NF_1 , F_NF_2 , F_TF_1 e F_TF_2), separado nas categorias de desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida.

4.8.1.1 Desgaste de ferramenta

Na Tabela 25 apresenta-se a análise de variância para o desgaste de ferramenta entre os quatros grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e verifica-se que não ocorre diferença, pois o F é menor que o $F_{\text{crítico}}$ e o $P_{\text{-valor}}$ é maior que 0,05 (valor aceitável de erro com confiança de 95%).

Tabela 25 - Análise de variância para desgaste de ferramenta no fluido mineral

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	P-valor	F _{crítico}
Entre grupos	0,015678	3	0,0052259	0,38338	0,766599	3,343889
Dentro dos grupos	0,190833	14	0,0136309			
Total	0,206511	17				

Fonte: A autoria própria.

4.8.1.2 Rugosidade superficial

Analisando a Tabela 26, verifica-se a análise de variância para a rugosidade superficial entre os quatro grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e nota-se que existe diferença entre os grupos analisados, pois o F é maior que o $F_{crítico}$. Para identificar entre quais grupos existe essa diferença e se é realmente significativa, é necessário aplicar o Teste de Tukey.

Tabela 26 - Análise de variância para rugosidade superficial no fluido mineral

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	P-valor	F _{crítico}
Entre grupos	0,139592	3	0,046530704	4,449997	0,0214728	3,343889
Dentro dos grupos	0,146389	14	0,010456345			
Total	0,285981	17				

Fonte: A autoria própria.

O Teste de Tukey faz uma comparação grupo a grupo. Para identificar onde ocorre diferença significativa e de acordo com os resultados obtidos identificar as melhores condições. Esse teste foi realizado no programa Past3 e a Figura 65 apresenta os resultados para a rugosidade superficial no fluido mineral. Se o valor apresentado for menor que 0,05, a diferença é significativa e o quadro é colorido para facilitar a visualização pelo próprio programa. Como pode-se visualizar, só ocorre uma variação expressiva entre o grupo $F_N F_2$

(Fluido novo - Parâmetros de corte F2) com o $F_T F_1$ (Fluido tratado – Parâmetros de corte F1), nos demais casos a variação é insignificante.

	FnF1	FnF2	FtF1	FtF2
FnF1		0,7731	0,08552	0,8647
FnF2	1,359		0,01451	0,343
FtF1	3,69	5,049		0,2988
FtF2	1,095	2,455	2,595	

Figura 65 – Teste de Tukey para rugosidade superficial no fluido mineral

Fonte: A autoria própria.

Como verificado que ocorre diferença significativa apenas entre esses dois grupos, analisando o resultado pela tabela 27, que apresenta as médias da rugosidade superficial para cara grupo, verifica-se que o grupo $F_N F_2$ obteve melhores resultados em relação ao $F_T F_1$.

Tabela 27 – Resultados rugosidade superficial no fluido mineral grupos $F_N F_2$ e $F_T F_1$

	$F_N F_2$	$F_T F_1$
R_a (μm)	0,891	1,071
R_t (μm)	7,360	9,066
R_z (μm)	5,542	6,507

Fonte: A autoria própria.

4.8.1.3 Potência consumida

Por meio da Tabela 28, verifica-se a análise de variância para a potência consumida entre os quatros grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e nota-se que existe diferença entre os grupos analisados, pois o F é maior que o $F_{\text{crítico}}$ e o P -valor é menor que 0,05. Para identificar entre quais grupos existe

essa diferença e se é realmente significativa, é necessário aplicar o Teste de Tukey.

Tabela 28 - Análise de variância para potência consumida no fluido mineral

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	P-valor	F _{crítico}
Entre grupos	2975,801	3	991,933670	21,37945	0,00001710	3,343889
Dentro dos grupos	649,5523	14	46,3965916			
Total	3625,353	17				

Fonte: A autoria própria.

Utilizando o Teste de Tukey para identificar as diferenças, tem-se a Figura 66, que mostra uma variação entre o grupo $F_N F_1$ com os grupos $F_T F_1$ e $F_T F_2$, além do grupo $F_N F_2$ com o $F_T F_1$ e $F_T F_2$. Observa-se que ocorre diferença tanto entre o fluido novo com o fluido tratado, mas também entre os parâmetros de corte F_1 e F_2 .

	FnF1	FnF2	FtF1	FtF2
FnF1		0,5937	0,0004743	0,006952
FnF2	1,8		0,0002195	0,0008028
FtF1	8,023	9,824		0,3554
FtF2	5,606	7,406	2,417	

Figura 66 - Teste de Tukey para potência consumida no fluido mineral
Fonte: A autoria própria.

A Tabela 29 apresenta a média de consumo de potência de cada grupo, verificando que utilizando o parâmetro de corte F_1 , o valor consumido é em torno de 66% do consumido por F_2 , e na comparação entre o fluido novo com o tratado, o segundo obtém uma redução de 10%, classificando os grupos nessa ordem crescente de potência consumida quando se empregou fluido mineral: $F_T F_1$, $F_N F_1$, $F_T F_2$ e $F_N F_2$.

Tabela 29 – Resultados de potência consumida no fluido mineral para todos os grupos

	$F_N F_1$	$F_N F_2$	$F_T F_1$	$F_T F_2$
Potência Consumida (Wh)	63,57	90,89	57,44	82,66

Fonte: Autoria própria.

4.8.2 Fluido Vegetal

Este tópico apresentará os resultados estatísticos referentes aos testes realizados com fluido vegetal, comparando os quatro grupos entre si ($F_N F_1$, $F_N F_2$, $F_T F_1$ e $F_T F_2$), separado nas categorias de desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida.

4.8.2.1 Desgaste de ferramenta

Na Tabela 30 apresenta-se a análise de variância para o desgaste de ferramenta entre os quatros grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e verifica-se que não ocorre diferença, pois o F é menor que o $F_{\text{crítico}}$ e o $P_{\text{-valor}}$ é maior que 0,05.

Tabela 30 - Análise de variância para desgaste de ferramenta no fluido vegetal

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	P-valor	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,000601	3	0,0002	0,01547	0,997198	3,708265
Dentro dos grupos	0,129542	10	0,012954			
Total	0,130143	13				

Fonte: Autoria própria.

4.8.1.2 Rugosidade superficial

Analisando a Tabela 31, verifica-se a análise de variância para a rugosidade superficial entre os quatros grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e nota-se que não ocorre diferença, pois o F é menor que o $F_{\text{crítico}}$ e o $P_{\text{-valor}}$ é maior que 0,05.

Tabela 31 - Análise de variância para rugosidade superficial no fluido vegetal

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	$P_{\text{-valor}}$	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,183322	3	0,061107	1,718983	0,225945	3,708265
Dentro dos grupos	0,355485	10	0,035549			
Total	0,538807	13				

Fonte: Autoria própria.

4.8.1.3 Potência consumida

Por meio da Tabela 32, verifica-se a análise de variância para a potência consumida entre os quatros grupos: Fluido novo parâmetro F_1 , fluido tratado parâmetro F_1 , fluido novo parâmetro F_2 e fluido tratado parâmetro F_2 , e nota-se que existe diferença entre os grupos analisados, pois o F é maior que o $F_{\text{crítico}}$ e o $P_{\text{-valor}}$ é menor que 0,05. Para identificar entre quais grupos existe essa diferença e se é realmente significativa, é necessário aplicar o Teste de Tukey.

Tabela 32 - Análise de variância para potência consumida no fluido vegetal

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	P-valor	F _{crítico}
Entre grupos	2559,833	3	853,2775	8,626377	0,003988	3,708265
Dentro dos grupos	989,1494	10	98,91494			
Total	3548,982	13				

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o Teste de Tukey para identificar as diferenças, tem-se a Figura 67, que mostra uma variação entre o grupo $F_N F_1$ com o grupo $F_T F_1$, além do grupo $F_N F_2$ com o $F_T F_1$, verifica-se que ocorre diferença entre o fluido novo com o fluido tratado.

	FnF1	FnF2	FtF1	FtF2
FnF1		0,9935	0,005435	0,143
FnF2	0,3672		0,00801	0,2097
FtF1	6,355	5,988		0,2154
FtF2	3,374	3,007	2,981	

Figura 67 - Teste de Tukey para potência consumida no fluido vegetal

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 33 apresenta a média de consumo de potência de cada grupo, verificando que utilizando o fluido tratado em relação ao fluido novo aumenta o consumo de potência em 25 %, ocorrendo uma classificação entre os 3 grupos distintos nessa ordem crescente de potência consumida quando se empregou fluido vegetal: $F_N F_1$, $F_N F_2$ e $F_T F_1$.

Tabela 33 – Resultados de potência consumida no fluido mineral para todos os grupos

	$F_N F_1$	$F_N F_2$	$F_T F_1$	$F_T F_2$
Potência Consumida (Wh)	78,99	113,37	81,21	97,36

Fonte: Autoria própria.

4.8.3 Comparativo entre o Fluido Mineral e Fluido Vegetal

A Tabela 34 apresenta a classificação dos grupos que obtiveram os melhores resultados em cada tipo de fluido de corte em relação ao desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida. Para desgaste de ferramenta e potência consumida o parâmetro de corte F_1 obteve os melhores resultados, enquanto para rugosidade superficial foi o parâmetro F_2 . Em relação ao fluido mineral o fluido tratado (F_T) obteve melhores resultados que o sem tratamento (F_N), enquanto no vegetal ocorreu o inverso, devido ao fato do fluido vegetal não ser o ideal para esse tipo de usinagem.

Tabela 34 – Classificação dos grupos em relação ao desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e potência consumida

	Fluido Mineral	Fluido Vegetal
Desgaste de Ferramenta	$F_T F_1 - F_N F_1 - F_N F_2 - F_T F_2$	$F_N F_1 - F_T F_1 - F_T F_2 - F_N F_2$
Rugosidade Superficial	$F_N F_2 - F_T F_2 - F_N F_1 - F_T F_1$	$F_T F_2 - F_N F_2 - F_T F_1 - F_N F_1$
Potência Consumida	$F_T F_1 - F_N F_1 - F_T F_2 - F_N F_2$	$F_N F_1 - F_T F_1 - F_T F_2 - F_N F_2$

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Após o tratamento do fluido de corte com o catalisador eletrofísico durante o período de 15 dias foi possível apresentar as seguintes conclusões sobre a viabilidade da ozonização sobre as propriedades dos fluidos de corte:

- O catalisador conseguiu reduzir ou estabilizar o crescimento de fungos e bactérias em ambos os fluidos de corte, mas essa redução não foi muito significativa porque o volume de ozônio deveria ser maior para o tratamento dos 300 litros do reservatório da máquina;
- Mesmo com essa redução parcial dos microrganismos foi possível recuperar o pH de ambos os fluidos de corte, enquanto o pH do fluido mineral subiu de 8,18 para 8,56, o pH do fluido vegetal se elevou de 7,82 para 8,26 após o fim do período de tratamento;
- A medição do oxigênio dissolvido obteve um resultado de 6,5 mg/L em todas as amostras, o que é considerado um ambiente aeróbio, o que favorece a degradação do fluido de corte, enquanto a temperatura dos fluidos de corte se manteve em todas as medições na faixa de 23°C a 25°C;
- Tanto o óleo mineral como o óleo vegetal registraram um escurecimento durante a usinagem, esse escurecimento do óleo ao longo da sua utilização é uma consequência da sua degradação. A cor do óleo está relacionada com a quantidade de insaturações que nele existem inicialmente, pois quando estes são aquecidos, ocorre a isomerização e migração de duplas ligações, levando à conjugação das mesmas. As duplas ligações conjugadas levam à absorção de quantidades maiores de luz azul, provocando um aumento de cores laranja e marrom no óleo.

Em relação às características mecânicas da ferramenta e da peça usinada durante a usinagem empregando fluido de corte sem ou com tratamento e a qualidade da peça final, tem-se:

- O desgaste de ferramenta com o fluido de corte mineral utilizando a condição de usinagem F_1 resultou 25% maior na vida da ferramenta com o fluido sem tratamento até chegar a 54,8% maior no final do ultimo passe em relação ao fluido tratado. Entretanto, na condição de usinagem F_2 , ambos os fluidos mostraram o mesmo desempenho. Na comparação do desgaste entre os dois parâmetros, verificou-se que o primeiro conseguiu usinar 50% a mais de material em comparação com o segundo, sendo isso possível devido ao aumento do avanço e diminuição da rotação;
- Com a usinagem no fluido vegetal, o desgaste de ferramenta com a condição de usinagem F_1 teve uma alteração superior de 7% para o fluido tratado em comparação com o não tratado, enquanto na condição de usinagem F_2 , essa diferença foi de 8%. Na relação entre os parâmetros de corte, o primeiro conseguiu um aumento de 20% na retirada de material em relação ao segundo. Na análise entre os fluidos de corte mineral e vegetal, o segundo obteve um pior desempenho no desgaste de ferramenta;
- Pelo método EDX comprovou-se que o fluido tratado com ozônio realmente aumenta a quantidade de óxidos na superfície da peça usinada, tanto no fluido mineral quanto no fluido vegetal. Para verificação se a quantidade de óxidos é aceitável são necessários outros experimentos;
- Na análise da rugosidade superficial o fluido mineral obteve uma melhora em torno de 50% em todos os parâmetros analisados com os experimentos com fluido tratado em relação ao fluido novo. Verificou-se que o tratamento com o catalisador não exerceu influencia direta em nenhum dos parâmetros da rugosidade tridimensional, mantendo os mesmo valores nos experimentos com o fluido vegetal tratado e novo;
- Os valores dos parâmetros de rugosidade tridimensional obtiveram melhores resultados para o fluido vegetal em relação ao mineral. Isso ocorre devido à lubricidade do óleo vegetal ser maior do que a do óleo mineral, devido à polaridade da cadeia do óleo vegetal, já que

proporciona uma maior aderência ao metal, melhorando a superfície de contato do fluido com a peça;

- A dureza superficial das peças usinadas ficou dentro do valor esperado para o ferro fundido nodular GGG60 que é de 220 até 260 HB, a variação entre o fluido tratado e não tratado foi nula e a comparação entre o fluido mineral e o vegetal também não apresentou diferença significativa;
- Avaliando a potência consumida durante a usinagem, tanto com o fluido mineral quanto com o vegetal, existiu uma redução entre 10% a 15% utilizando o fluido tratado em relação ao não tratado. Esse fato pode ser explicado pelo tratamento eliminar os microrganismos, reduzindo a sua viscosidade e com isso a bomba do fluido gaste menos potência. Na comparação entre os parâmetros de corte, existiu uma redução de 30% se comparado o F_2 com o F_1 , porque aumentando o avanço e reduzindo a rotação o consumo energético diminui.

Utilizando o método Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey foi possível identificar que para desgaste de ferramenta e potência consumida a condição de usinagem F_1 obteve os melhores resultados, enquanto para rugosidade superficial foi a condição F_2 . Em relação ao fluido tratado (F_T) obteve melhores resultados no fluido mineral, enquanto que o fluido sem tratamento (F_N) conseguiu melhores resultados na comparação no fluido vegetal.

De uma maneira geral o tratamento com o catalisador eletrofísico fez com que a maioria dos testes realizados apresentasse uma melhora ou ficasse com a mesma eficiência na comparação do fluido sem tratamento, sem interferir nas características mecânicas da usinagem e da peça final de forma negativa, com exceção da quantidade de óxidos na superfície da peça usinada que aumentou depois do tratamento. A Figura 68 mostra o resumo dos resultados obtidos. Nesta figura o item “eliminação dos microrganismos” contém um asterisco devido ao fluxo insuficiente para eliminação de todos os fungos e bactérias, já que é de conhecimento que o ozônio consegue degradar totalmente esses microrganismos.

	Fluido Mineral	Fluido Vegetal
Desgaste Ferramenta	●	●
Rugosidade Superficial	●	●
Análise Topográfica	●	●
EDS – Raio-X	●	●
Dureza dos Corpos de Prova	●	●
Potência Consumida	●	●
pH	●	●
Oxigênio Dissolvido	●	●
Eliminação de Microrganismos	●*	●*




 Melhorou
  Manteve
  Piorou

Figura 68 – Esquemática das conclusões obtidas
 Fonte: Autoria própria.

Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar a viabilidade de outros métodos de tratamento de fluido de corte, tais como ultrassom e lâmpada UV;
- Verificar a viabilidade do ozônio para tratar o efluente final do fluido de corte de modo a reutilizar a água;
- Analisar a utilização do tratamento com ozônio no fluido descartado, pois é uma forma de tratamento de baixo custo e pode ser empregada no lugar de uma das técnicas citadas nos tratamentos;
- Avaliar os efeitos da ozonização com diferentes fluxos de produção de ozônio durante o tratamento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A.; **Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio**. Campinas, São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais metálicos – Dureza Brinell – Classificação NBR-NM18**. Norma Brasileira. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Rugosidade da superfície – Classificação NBR 6405**. Rio de Janeiro, 1988.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T.; **Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy**. *Journal of Cleaner Production*, pp. 63-74, 2014.

AZMI, N. S.; YUNOS, K. F. M.; **Wastewater treatment of palm oil mill effluent (POME) by ultrafiltration membrane separation technique Coupled with adsorption treatment as pre-treatment**. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* , pp. 257 – 264, 2014.

BAILEY, P. S.; **Ozonation in Organic Chemistry**. *Academic Press*: New York, 1978.

BALAKRISHNAN, P. A., ARUNAGIRI, A., RAO, P. G.; **Ozone generation by silent electric discharge and its application in tertiary treatment of tannery effluent**. *Journal of Electrostatics*, v.56, p.77-86, 2002.

BALOGUN, V.A., MATIVENGA, P.T.; **Impact of un-deformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes**. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-9, 2014.

BAUER, R.; **The Photo-Fenton Reaction and the TiO₂/UV process for Wastewater treatment novel developments**. *Catalysis Today*, v.53, p.131-144, 1999.

BELTRÁN, F. J., RIVAS, F. J.; **TiO₂ catalyst to improve the Ozonation of oxalic acid in water**. *Applied Catalysis B: Environmental*, v.47, p.101-109, 2004.

CALLISTER, W. D.; **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7^a Ed., 2007.

CELLA, R.C.F.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B., SPOTO, M.H.F; **Comportamento do óleo de soja refinado utilizado em fritura por imersão com alimento de origem vegetal.** *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 22, 111-116, 2002.

CHANG, C.H.; MAA, J.R.; YANG, M.Y.; LU, C.H.; CHEN, C.M.; **Influence of pH on the Stability of Oil-inwater Emulsions Stabilized by a Splittable Surfactant.** *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 170, 173, 2000.

CHENG, C., PHIPPS, D., ALKHADDAR, R. M.; **Thermophilic aerobic waste water treatment of waste metalworking fluids.** *Journal Water Environ*, pp. 227-232, 2006.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos.** 7ª Ed., São Paulo, 2005;

CHOU, K.; HU, J.; **Characterizations of cutting tool flank wear-land contact.** *Wear*, pp. 1454–1458 , 2007.

COSTA NETO, P. L. O.; **Estatística.** São Paulo: Edgard Blücher, p.264, 1977;

DAWSON, S.; **The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron.** *SAE World Congress*, 2001.

DEGARMO, E.P.; BLACK, J.T.; KOSHER, R.A.; **Materials and Processes in Manufacturing.** 9ª Ed., *John Wiley and Sons*, United States, p. 543-544, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 6ª Ed., São Paulo, Editora Artliber, p.262, 2008.

DO VALE, J. L.; **Estudo do Comportamento Tribológico do Politetrafluoretileno em Deslizamento sem Lubrificação Contra Aço Inoxidável.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

FERRARESI, D.; **Fundamentos da usinagem dos metais.** 9ª Ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher, p.751, 1977.

FILHO, U. D.; **Introdução a Bioestatística - Para simples mortais.** São Paulo: Negócio Elsevier. p.158 , 1999.

FISPQ, **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos.** Produto: Fluido de corte solúvel Rocol ULTRACUT360º; Disponível em: <http://www.rocol-sintetica.com.pt/sites/sintetica.pt/files/Rocol_FDS_Ultracut_360_Plus.pdf>. Acesso em 15 de setembro de 2014.

FUCHS; **Macroeconomic Factors Impacting The Global & European Lubricants Industry.** Disponível em: < https://www.fuchs-oil.de/fileadmin/fuchs_upload/pdf_addons/Unternehmensinfos/_The_Macroeconomics_in_the_European_Lubricants_Market___ueil_distribution_version.pdf >. Acesso em 22 set 2015.

GALVÃO, L.F.O.; SANTOS, R.T.; **Avaliação de Mapas de Zonas de Manejo utilizando métodos estatísticos.** ERI-MT, Cuiabá, p.6 , 2015.

GOMES, M. C.; ANDRADE, P. C. R.; GONÇALVES, R. A.; **Análise Estatística da Usinagem de Compósitos Metálicos.** Universidade do Vale do Rio Verde, Três Corações, 2014.

GONÇALVES, J. F. D. S.; **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

GRZESIK, W.; RECH, J.; ZAK, K.; CLAUDIN, C. **Machining performance off pearlitic-ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicone nitride ceramic tools.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 125-133, 2008.

HILAL, N; **The Use of UF and nanofiltration membranes in the treatment of metal-working fluids.** *Journal Desalination*, v.167, p.227-238, 2004.

HOIGNE, J., RICE, R. G., NETZER, A.; **Handbook of Ozone Technology and Applications.** *Ann Arbor Science: Michigan*, p.341, 1982.

ICHIKAWA, T.; ITOH, K.; YAMAMOTO, S.; SUMITA, M.; **Rapid Demulsification of dense Oil-in-Water Emulsion by Low External Electric Field. I. Experimental Evidence.** *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 242, 21, 2004.

ISO, 3685. **Tool Life Testing with Single Point Turning.** ISO 1993.

ISO, 4287; **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** ISO, 1997.

ISO, 945-1; **Microstructure of cast irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis.** ISO 2008.

JUNIOR, A. O.; **Avaliação de tecnologias avançadas para o reuso de água em indústria metal-mecânica.** Curitiba, 2006.

KENNAMETAL, Catálogo 2014. **Site da Kennametal, 2014**. Disponível em: <http://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/pt/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/A1403586_KMT_Innovations2015_PT_BR_LR.pdf>. Acesso em: 15 de setembro de 2014.

KOBYA, M.; CIFTCI, C.; BAYRAMOGLU, M.; SENSOY, M. T.; **Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation**. *Separation and Purification Technology*, pp. 285–291, 2008.

KOCH, T.; PASSMAN, F.; RABENSTEIN, A.; **Comparative study of Microbiological monitoring of water miscible metalworking fluids**. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014.

KOCH, T.; **Auswirkungen des mikrobiellen Befalls von wassergemischten Kühlschmierstoffen auf das Zerspanergebnis**. *HTM Härtereitechnische Mitteilungen*, pp. 115-132, 2008.

KÖNIG, W.; MESSER, J.; **Dressing conventional grinding whells with polycrystalline diamond**. *Industrie-Anzeiger*, v.102, p.35-38, 1990.

KURAM, E., OZCELIK, B., BAYRAMOGLU, M., DEMIRBAS, E., TOLGA S. B.; **Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments**. *J. Clean. Prod.*, pp. 159-166, 2013.

LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A.M.; **Photochemical processes for water treatment**. *Revista Chemical Engineer*, v.93, p.671-698, 1993.

LUBES EM FOCO; **O Mercado em Foco. Uma estimativa do mercado relativa ao ano de 2014**. *Lubes em Foco*, n. 46, p. 28, 2015. Disponível em: <<http://www.lubes.com.br/edicoes/edicao46/index.html>>. Acesso em 25 set 2015.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; **Usinagem dos metais**. 4ª Ed., Uberlândia, Editora da Universidade Federal de Uberlândia, p.224, 1999.

MAIA, D. A. S.; GUIMARÃES, A. P.; ARAÚJO, R. S.; CAVALCANTE, C. L.; SANT'ANA, H. B.; **Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade**. Campinas: PDPETRO. p.1-10, 2007.

MARTINS, R. R. R.; **Comparação das propriedades mecânicas e de fadiga entre ferro fundido vermicular e cinzento utilizados em blocos de motor diesel**. Porto Alegre, 2012.

MELO, M. S.; SOUSA, A. J.; GEIER, M.; **Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140.** 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM VII), São Luís, 2012.

MENDONÇA, L. C.; **Microbiologia e cinética de sistemas de lodos ativados como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbico de leito expandido.** Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

MORAIS, H. L. O.; **Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação.** Belo Horizonte, 2014.

MONTEIRO, M. I.; **Tratamento de efluentes oleosos provenientes da indústria metal-mecânica e seu reuso.** Lorena, São Paulo, 2006.

NAKAGAWA, D. H.; **Investigação da degradação do óleo presente em fluido de corte por bactérias e fungos.** UTFPR-Campus Londrina, Londrina, 2016.

NARUTAKI, N.; YAMANE, Y.; **High-speed Machining of Inconel718 with Ceramic Tools.** *Annals of the CIRP*, Vol. 42, 1993.

NWAOGU, U. C.; TIEDJE, N. S.; HANSEN, H. N.; **A non-contact 3D method to characterize the surface roughness of castings.** *Journal of Materials Processing Technology*, v.213, p.59-68, 2013.

PACHECO, J. R.; **Avaliação de um sistema de ozonização baseado em coluna de borbulhamento.** Campinas, 2012.

RABENSTEIN, A.; KOCH, T.; REMESCH, M.; BRINKSMIEIER, E.; KUEVER, J.; **Microbial degradation of water miscible metal working fluids.** *International Biodeterioration & Biodegradation*, pp. 1023–1029, 2009.

RAO, I. V.; **Tool life at high speed cutting.** *International Journal of Machine Tool and Design Research*, v.17, p.197-201, 1977.

RAU, K.; BECK, T.; LOHE, D.; **Isothermal, Thermal-mechanical and Complex Thermal-mechanical fatigue Tests on AISI 316L Steel – A Critical Evaluation.** *Materials Science and Engineering A345* pp.309-318, Elsevier, 2003.

RIDEAL, E. K.; **Ozone.** *Constable and Co*: London, 1920.

RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N.; **Lubrificantes nas indústrias.** Triboconcept Editora Ltda. Carapicuíba-SP. cap.4, p.71-172, 1990.

SANTOS, A. B. de; CASTELLO BRANCO, C. H.; **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**, IPT, 1991.

SCHEY, J. A.; **Introduction to Manufacturing Processes. 3ª Ed., McGrawHill International, Singapore, p. 636-639, 2000.**

SCHÖNBEIN, C. F.; **Comptes Rendus Hebd. Seances Acad. Sci.v.20, 1840.**

SHAW, M. C.; **Metal Cutting Principles. Clarendon Press, Oxford, England, p. 292-332, 1991.**

SHAW, M. C.; **Metal Cutting Principles. 2ª edição, Oxford Press, New York, 2005.**

SHOKRANI, A., DHOKIA, V., NEWMAN, S.T.; **Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. Int. J. Mach. Tool. Manu.; pp. 83-101, 2012.**

SILVA, L. M.; **Investigação da tecnologia eletroquímica para a produção de ozônio: aspectos fundamentais e aplicados.** Ribeirão Preto, 2004.

SOARES, R. M.; **Avaliação Técnica, Mercadológica e de Tendências da Utilização de Óleos Lubrificantes de Base Vegetal.** Rio de Janeiro, 2013.

SOUSA, C. A.; JUNIOR, M. A. L.; FERREIRA, R. L. C. **Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias.** Revista Ceres, Viçosa, p. 350-354, 2012.

SOUZA, M. C.; **Avaliação das dimensões técnico/econômica, ambiental e social no fresamento com aplicação de distintas técnicas de Lubri-refrigeração.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

TREVIZANI, J. L. B.; **Tratamento de efluente têxtil pelo processo de ozonização.** UTFPR, Campus Campo Mourão, 2012.

UTFPR; **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

VAN VLACK, H.; **Princípios de ciências e tecnologias dos materiais. 4ª Ed.,** Rio de Janeiro, 1984.

VIEIRA, S.; HOFFMANN, R.; **Estatística experimental.** São Paulo: Atlas, p.175, 1989.

WAKIL, S.D.E.; **Physics of Metal Cutting. In: Processes and Design for Manufacturing.** Waveland Press, United States of America, pp. 331-357, 2002.

WARRICK, R. J.; ELLIS, G. G.; GRUPKE, C. C.; KHAMSEH, A. R.; MCLACHLAN, T. H.; GERKITS, C.; **Development and Application of Enhanced Compacted Graphite Iron for the Bedplate of the New Chrysler 4.7 Liter V-8 Engine.** SAE Paper. p.99-144, 1999.

WEI, Y.H.; YONG, T.; BANGYAN, Y.; *Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle.* **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v.43, p.1163-1170, 2003.

WINARNO, E. K.; GETOFF, N.; **Radiation physics and chemistry.** p. 387, 2002.

WHITEHOUSE, D. J.; **Handbook of surface metrology.** Institute of physics publishing, Londres, 1994.

YADAV, R. K.; ABHISHEK, K.; MAHAPATRA, S. S.; **A simulation approach for estimating flank wear and material removal rate in turning of Inconel 718.** *Simulation Modelling Practice and Theory*, pp. 1-14, 2015.

YIGIT, R.; CELIK, E.; KOKSAL, S.; **Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated cutting tools in turning nodular cast iron.** *Journal of Materials Processing Technology*, 2008.

ZHANG, J.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; *Control of Cutting Fluid in Metal Cutting and Dry Cutting.* **Remote Sensing, 2011 International Conference on Environment and Transportation Engineering (RSETE)**, p.4886-4889, 24-26 Jun 2011.

ZIMMERMAN, J. B.; HAYES, K. F.; SKERLOS, S. J.; **Influence of Ion accumulation on the Emulsion Stability and Performance of Semi-Syntetic Metalworking Fluids.** *Environ, Sci. Technol*, 38, 2482, 2004.

ANEXO A - Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey

O ANOVA *one-way* (um fator) é um teste paramétrico usado para comparar mais de 2 amostras independentes, verificando a existência de diferenças significativas entre 2 ou mais grupos, mas sem identificar quais grupos são diferentes (FILHO, 1999).

Os dados a serem comparados por este teste foram agrupados com base em um único critério. As amostras devem seguir uma distribuição normal, além disso, os grupos (ou amostras) devem ser independentes e deve haver homogeneidade das variâncias entre os grupos, ou seja, as variâncias dentro de cada grupo devem ter valores similares entre os grupos. O ANOVA *one-way* irá testar a hipótese nula (H_0) de que todas as populações têm médias idênticas contra a hipótese alternativa (H_1) de que uma ou mais médias são diferentes das demais (FILHO, 1999).

Apesar do ANOVA *one-way* ser usado para verificar se há uma diferença significativa entre grupos, não fornece nenhuma informação sobre quais grupos são diferentes entre si. Outro fator considerado no ANOVA *one-way* foi o valor F obtido nos resultados dos testes, sendo $F = \text{dispersão entre os grupos} / \text{dispersão dentro dos grupos}$, onde $F > F_{\text{crítico}}$ indica a existência de diferença entre os grupos (GALVÃO et al., 2015).

Quando a análise de variância de um experimento mostra que as médias de tratamento não são estatisticamente iguais, é apenas lógico perguntar quais são as médias que diferem entre si. O pesquisador em geral gostaria de aplicar um teste para comparar médias, duas a duas. Considere um experimento para comparar três tratamentos, A, B e C. Se a análise de variância mostrar que as médias desses tratamentos não são estatisticamente iguais, é bastante possível que o pesquisador procure um teste estatístico para comparar as médias de A e B, A e C, B e C.

Mas como se faz à comparação de médias, duas a duas? O pesquisador precisa de um método que forneça a diferença mínima significativa entre duas médias. Essa diferença seria o instrumento de medida. Toda vez que o valor absoluto da diferença entre duas médias é igual ou maior do que a diferença mínima significativa, as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecida (VIEIRA et al., 1989).

O teste de Tukey, baseado na amplitude total (“*studentized range*”, em inglês) pode ser utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. O teste é exato e de uso muito simples quando o número de repetições é o mesmo para todos os tratamentos. No caso de comparações múltiplas entre amostras de tamanhos iguais, o procedimento mais eficiente parece ser o proposto por Tukey, que utiliza valores críticos da amplitude, que denotamos por “q” (COSTA NETO, 1977).

O valor único proposto por Tukey coincide com o valor máximo do SNK, ou seja, equivalente à comparação entre a maior e a menor média.

$$d. m. s. (Tukey) = q \cdot \sqrt{\frac{Se^2}{r}}$$

onde “q” é o valor tabelado por Tukey em função do número de tratamento e dos graus de liberdade do resíduo.

Para obter o valor da diferença mínima significativa “d.m.s.” pelo teste de Tukey basta calcular:

$$d. m. s. = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}}$$

onde “q” é o valor dado na tabela ao nível de significância estabelecido, “QMR” é o quadrado médio do resíduo da análise de variância e “r” é o número de repetições de cada um dos tratamentos.