

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ ALONSO RIBEIRO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA FERRAMENTA DE
CORTE CERÂMICA REAFIADA NA USINAGEM DO FERRO
FUNDIDO NODULAR GGG-60**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

ANDRÉ ALONSO RIBEIRO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CORTE DE UMA
FERRAMENTA CERÂMICA REAFIADA NA USINAGEM DO
FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-60**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

- R484 Ribeiro, André Alonso
 Análise de desempenho de uma ferramenta de corte cerâmica reafiada na usinagem do ferro fundido nodular GGG-60 / André Alonso Ribeiro. – 2016.
 136 f. : il. color ; 30 cm
- Orientadora: Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2016.
 Referências: p. 116-123.
1. Usinagem. 2. Ferro fundido. 3. Ferramentas de corte. 4. Cerâmica para ligações metálicas.
 I. Gonçalves, Janaína Fracaro de Souza, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA FERRAMENTA DE CORTE CERÂMICA REAFIADA NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG-60

Por

ANDRÉ ALONSO RIBEIRO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 16/05/2016.

Edson Hideki Koroishi, Prof. Dr.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, Profa. Dra.
Orientadora

Paulo Alberto Silveira Wrege, Prof. Dr.
Instituto Federal de São Paulo

Carlos Elias da Silva Junior, Prof. Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rogério Akihide Ikegami, Prof. Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

À Graciela, minha esposa, pela compreensão em meus momentos de isolamento e ausência. Vejo em você a amiga indispensável, auxiliadora sempre presente e a mulher virtuosa cheia do Espírito Santo.

Ao Gabriel, meu primogênito e a minha princesa Isabela. Obrigado por vocês existirem e estarem sempre ao meu lado. Amo vocês!

Aos meus amados pais, Wilson e Neuza, e ao meu querido irmão Renato. Vocês foram peças fundamentais para eu chegar aqui. Tenho orgulho de fazer parte dessa família!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me ouviu em orações e como sempre fez as melhores escolhas para minha vida, guiando meus passos e iluminando o meu caminho.

A Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, minha orientadora neste trabalho, que mesmo pela dificuldade da distância, nunca mediu esforços em encontrar maneiras para me ajudar. Foi a grande responsável em me ensinar os pequenos detalhes da usinagem. Também recebeu sua benção durante a realização do trabalho, deu à luz a linda Ana Clara.

Ao Prof. Genésio, grande amigo, que me incentivou e apoiou para iniciar este trabalho.

Ao Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno, pela oportunidade confiada.

Ao Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami e ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior pelas importantes contribuições ao trabalho durante a qualificação.

Ao Sr. João Marcelo, supervisor de qualidade da empresa MGL Mecânica de Precisão LTDA, pelo auxílio na fabricação dos corpos de prova e no fornecimento das ferramentas, suporte de ferramentas e fluidos de corte.

Ao Prof. Msc. João Luiz do Vale pelo imenso suporte dado para as análises de difração de raios-X e por Microscopia Eletrônica de Varredura.

A Adriana Dias Souza Silva pelo seu auxílio e presteza na correção do trabalho.

Ao aluno de mestrado e amigo Fábio Souza Santos, pelo grande companheirismo e auxílio durante a realização deste trabalho.

Ao Alexandre José Gonçalves, técnico de laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UTFPR, Câmpus Curitiba, pelo apoio nas análises.

A direção, aos professores e aos amigos da ETEC Pedro D'Arcádia Neto, pelo apoio e compreensão no desenvolvimento do trabalho

Aos demais professores do PPGEM que me ajudaram com suas importantes contribuições.

Aos amigos que sempre torceram por esse dia.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente me ajudaram a concretizar mais este objetivo.

“Se algum de vocês tem falta de sabedoria, peça-a Deus, que a todos dá livremente, de boa vontade; e lhe será concedida”
Tiago 1:5

RESUMO

RIBEIRO, André A. **Análise de Desempenho de Corte de uma Ferramenta Cerâmica Reafiada na Usinagem do Ferro Fundido Nodular GGG-60**. 2016. 136 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Neste trabalho estudou-se as vantagens e desvantagens do reuso de ferramentas de corte por meio da reafiação. Por meio do acompanhamento sistemático dos insertos comparou-se o desempenho de ferramentas novas e reafiadas na usinagem de ferro fundido nodular GGG-60. Para atingir este objetivo foi realizado o fresamento do material ferro fundido nodular com inserto de cerâmica de nitreto de silício (Si_3N_4) novo (IN) e reafiado (IR), onde foram utilizados dois parâmetros de corte, um recomendado pelo fabricante da ferramenta (P2) e outro otimizado durante pré-testes (P1). Objetivando um processo sustentável foram utilizados, como fluido de corte, um óleo solúvel semissintético mineral (FM) e um vegetal (FV) extraído de fontes renováveis. Com auxílio do software Action 6.0 realizou-se o planejamento experimental (DOE) fatorial completo, com três variáveis independentes em dois níveis. Avaliou-se as seguintes respostas: desgaste de ferramenta, qualidade superficial da peça usinada (rugosidade) e potência consumida. Nos ensaios observou-se que os principais mecanismos de desgaste, tanto da ferramenta nova quanto da reafiada, foram por abrasão e por adesão, gerando desgaste de flanco. Notou-se também que a ferramenta reafiada elevou a os picos de rugosidade superficial da peça e a potência consumida, quando comparada com a ferramenta nova. A melhor interação estatisticamente obtida para as variáveis do processo, neste tipo de usinagem, foi encontrada para a ferramenta nova (IN) com parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM), porém a tentativa de definir um processo econômico e sustentável não pode ser descartada.

Palavras-chave: Ferramentas de Cerâmica. Ferro Fundido Nodular. Reuso de Ferramentas. Vida da Ferramenta. Redução de Custos.

ABSTRACT

RIBEIRO, André A. **Cutting Performance Analysis Silicon Nitride Ceramic Tools Reground in the Machining Nodular Cast Iron GGG -60**. 2016. 136 f. Master Thesis (Master Degree in Mechanical Engineer) – Post-degree Program in Mechanical Engineer, Federal University of Technology – Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

It was studied in this work the advantages and disadvantages of cutting tools reuse by regrinding. Through systematic monitoring of the inserts the performance of new tools and reground in machining nodular cast iron GGG-60 were compared. To achieve this goal it was performed the nodular cast iron milling with silicon nitride ceramic insert (Si₃N₄) New (IN) and reground (IR), where two cutting parameters were used, one recommended by the manufacturer of the tool (P2) and another optimized for pretesting (P1). Cutting fluid, an oil soluble mineral semisynthetic (FM) and a vegetable (FV) extracted from renewable sources were used to achieve a sustainable process. With Action 6.0 Software support it was held the experimental design (DOE) full factorial, with three independent variables on two levels. The following responses were evaluated: tool wear, surface quality of the workpiece (roughness) and power consumed. In the tests it was observed that the main wear mechanisms, both new tool or reground tool were abrasion and adhesion, leading flank wear. It was also noted that the reground tool increased surface roughness of the workpiece and the power consumption compared with the new tool. The best interaction statistically obtained for the process variables, in this type of machining, was found for the new tool (IN) with cutting parameters P1 and mineral cutting fluid (FM), but the attempt to define an economic and sustainable process cannot be ruled out.

Keywords: Ceramic Tools. Nodular cast iron. Reuse Tools. Life tool. Cost Reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cunha de corte de uma ferramenta qualquer	27
Figura 2 - Gumes e superfícies que formam a cunha cortante de uma ferramenta de barra.....	28
Figura 3 – Elementos da cunha cortante de uma fresa frontal.....	28
Figura 4 - Ângulos da cunha de corte e planos do sistema de referência da ferramenta	29
Figura 5 - Volume de material removido em relação aos dois tipos de ferramentas utilizadas	35
Figura 6 - Tipos de desgaste da ferramenta de corte.....	38
Figura 7 – Desgaste de flanco VB_B para ferramenta cerâmicas a base de nitreto de silício revestidos vs. Comprimento usinado.....	40
Figura 8 - Gráfico dos efeitos dos parâmetros de corte no desgaste de flanco	41
Figura 9 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro revestido com carboneto de tungstênio (WC) com rotação de 421 rpm, profundidade de corte de 1 mm e avanço de 0,20 mm/ver	41
Figura 10 – Desgaste de entalhe	42
Figura 11 - Gume da ferramenta de metal duro com lascamento	44
Figura 12 - Desgaste do entalhe de gume primário (a) e secundário (b) ferramenta de cerâmica Si_3N_4 com $v_c = 240$ m/min.....	46
Figura 13 - Imagens MEV das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular austemperado. (a) G2 e (b) G3	47
Figura 14 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte	50
Figura 15 - a) Microscopia do Ferro fundido cinzento; b) Microscopia do Ferro fundido nodular; P = Perlita; F = Ferrita	52
Figura 16 - Teste de vida de ferramenta. $v_c = 120$ m/min, $f = 0,18$ mm/rev. $a_p = 2$ mm	56
Figura 17 – Fluxograma do processo realizado	57
Figura 18 – a) Blocos do material do corpo de prova e b) corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem.....	58
Figura 19 - Micrografia do ferro fundido nodular GGG60 com nital 2%.....	60
Figura 20 - Ferramenta SPHX 1205 PC TRG PBK - KY3500	61

Figura 21 - Ângulos da cunha de corte e planos do sistema de referência da ferramenta	62
Figura 22 - Cabeçote de fresar 50A05RP90SP12CUFP	63
Figura 23 – Posicionamento das ferramentas no cabeçote de fresar	64
Figura 24 – Esquema da usinagem.....	64
Figura 25 - Planos do sistema de referência da ferramenta reafiada.....	66
Figura 26 - Ângulos da cunha de corte da ferramenta reafiada	66
Figura 27 – Comparação da geometria entre as ferramentas: a) nova e b) reafiada	67
Figura 28 - Esquema da vista superior da face usinada com as indicações dos pontos e sentido de medição da rugosidade.....	73
Figura 29 - a) Fixação do corpo de prova – b) Pontos de medição da rugosidade superficial	73
Figura 30 – Esquema da captação do consumo de potência.....	74
Figura 31 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P1 utilizando fluido de corte mineral (FM)	78
Figura 32 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P2 utilizando fluido de corte mineral (FM)	79
Figura 33 – Desgaste de flanco VBc vs. Tempo de corte para diferentes velocidades de corte e avanço de corte de 0,08 mm/rev	80
Figura 34 - Comparação do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros P1 e P2 utilizando fluido de corte mineral (FM)	81
Figura 35 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P1 utilizando fluido de corte vegetal (FV)	82
Figura 36 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P2 utilizando fluido de corte vegetal (FV)	83
Figura 37 - Comparação do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros P1 e P2 utilizando fluido de corte vegetal (FV)	84
Figura 38 - Desgaste de flanco observado nas ferramentas. Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P2	85
Figura 39 - Desgaste de flanco observado nas ferramentas. Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P2	86
Figura 40 - Micrografias e a análise da composição EDX no ponto A na face do desgaste de flanco da ferramenta de corte revestida com WS ₂ /Zr após 480 m de corte a seco a uma velocidade de 160 m/min.	86

Figura 41 – Análise de composição EDX evidenciando adesão do material usinado na ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) parâmetros P2.	87
Figura 42 - Análise de composição EDX evidenciando adesão do material usinado na ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) parâmetros P2.	88
Figura 43 - Fissuras responsáveis pelo lascamento da ponta da ferramenta de corte nova (IN), parâmetros de corte P1 e fluido vegetal (FV).	89
Figura 44 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências no desgaste da ferramenta. a) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e os parâmetros de corte (P1 e P2) b) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV))	91
Figura 45 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo no desgaste das ferramentas	91
Figura 46 - Impressões na superfície da peça para diferentes avanços	93
Figura 47 - Rugosidade (Ra) para ferramenta nova (IN), parâmetros (P1 e P2) e fluido mineral (FM).....	95
Figura 48 - Rugosidade (Ra) para ferramenta nova (IN), parâmetros (P1 e P2) e fluido vegetal (FV).....	96
Figura 49 – Rugosidade (Ra) para ferramenta reafiada (IR), parâmetros (P1 e P2) e fluido mineral (FM)	97
Figura 50 – Rugosidade (Ra) para ferramenta reafiada (IR), parâmetros (P1 e P2) e fluido vegetal (FV).....	98
Figura 51 – Comparação entre as Ferramentas novas (IN) e reafiadas (IR) em relação à rugosidade superficial para as condições ensaiadas	99
Figura 52 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências na rugosidade superficial. a) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). b) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos de fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e as condições das ferramentas nova (IN) e reafiada (IR).....	101
Figura 53 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo na rugosidade superficial	101

Figura 54 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas novas (IN), fluido de corte mineral (FM) e variações dos parâmetros P1 e P2	104
Figura 55 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas novas (IN), fluido de corte vegetal (FV) e variações dos parâmetros P1 e P2	105
Figura 56 – Consumo de potência dos ensaios: a) Ferramentas novas (IN), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P1. b) Ferramentas novas (IN), variando o fluido de corte mineral (FM e FV) com parâmetros P2.....	106
Figura 57 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas reafiadas (IR), fluido de corte mineral (FM) e variações dos parâmetros P1 e P2.....	107
Figura 58 – Consumo de potência dos ensaios com as ferramentas reafiadas (IR), fluido de corte vegetal (FV) e variações dos parâmetros P1 e P2.....	108
Figura 59 – Consumo de potência dos ensaios: a) Ferramentas reafiadas (IR), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P1. b) Ferramentas reafiadas (IR), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P2.....	109
Figura 60 – Comparação entre as Ferramentas novas (IN) e reafiadas (IR) em relação ao consumo de potência para as condições ensaiadas.	110
Figura 61 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências no consumo de potência. a) interação entre as condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). b) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) as condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV))	112
Figura 62 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo na potência consumida durante a usinagem.....	112
Figura 63 - Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P1.....	132
Figura 64 - Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P1	132
Figura 65 - Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P2.....	132
Figura 66 - Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P2	133
Figura 67 - Ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) e parâmetros P1	133
Figura 68 - Ferramenta reafiada (IR), fluido vegetal (FV) e parâmetros P1	133
Figura 69 - Ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) e parâmetros P2	134
Figura 70 - Ferramenta reafiada (IR), fluido vegetal (FV) e parâmetros P2	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tendências de aplicação de ferros fundidos e materiais para ferramentas de corte na indústria automotiva	35
Tabela 2 - ANOVA para o desgaste de flanco.....	40
Tabela 3 - Classificação dos ferros fundidos nodulares	53
Tabela 4 - Composição química dos corpos de prova de Ferro Fundido Nodular GGG60 (% em peso).....	59
Tabela 5 - Propriedades mecânicas das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60	59
Tabela 6 - Porcentagem de perlita e caracterização da grafita dos materiais usinados	60
Tabela 7 - Propriedades físicas e químicas do óleo mineral	68
Tabela 8 - Propriedades físicas e químicas do óleo vegetal	69
Tabela 9 - Especificações técnicas da máquina-ferramenta ROMI D 600	70
Tabela 10 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....	70
Tabela 11 - Precisão do Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult-K 120	74
Tabela 12 - Desgaste da ferramenta e comprimento usinado para todos os ensaios realizados.....	76
Tabela 13 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados	87
Tabela 14 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados	88
Tabela 15 - ANOVA para o desgaste da ferramenta.....	89
Tabela 16 – Resultados dos valores médios de rugosidade Ra, Rt e Rz para cada ensaio.....	92
Tabela 17 - ANOVA para a rugosidade superficial.....	100
Tabela 18 – Resultados dos valores de potência consumida durante a usinagem .	102
Tabela 19 - ANOVA para o consumo de potência.....	111
Tabela 20 - Níveis das variáveis testadas (Etapa 1)	127
Tabela 21 - Planejamento fatorial fracionário 2^{5-1} (Etapa 1).....	127
Tabela 22 - Fatores de controle e os níveis adotados no ensaio	128
Tabela 23 - Simplificação dos níveis dos fatores de controle.....	128
Tabela 24 - Matriz de experimentos	129

Tabela 25 - Matriz de experimentos do presente projeto	130
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBN	<i>Cubic boron nitride</i>
CERMET	Cerâmica mista (Compósito de cerâmica e metal)
CGI	<i>Compacted Graphite Iron</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DIN	Instituto alemão de normas
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FM	Fluído de corte mineral
FV	Fluído de corte vegetal
IN	Ferramenta nova
IR	Ferramenta reafiada
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LTDA	Sociedade limitada
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
NBR	Norma Brasileira
P1	Parâmetros de corte P1
P2	Parâmetros de corte P2
PCBN	<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
NA	Não se aplica
ND	Não determinado
RPM	Rotação por Minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e	Penetração de trabalho
Al	Alumínio
a_p	Profundidade de corte
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
f	Avanço
Fe	Ferro
f_z	Avanço por dente
HB	Dureza Brinell
HRc	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
L	Comprimento da amostragem da rugosidade
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
MPa	Mega Pascal
n	Rotação
Ni	Níquel
R_a	Rugosidade média
R_t	Rugosidade total
R_z	Rugosidade de profundidade média
S	Enxofre
Si	Silício
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{B_{Max}}$	Desgaste de flanco máximo
VB_C	Desgaste de entalhe no gume secundário
VB_n	Desgaste de entalhe
v_c	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
W	Tungstênio
λ_c	<i>Cutoff</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo geral	22
1.1.2	Objetivos específicos	22
1.2	JUSTIFICATIVA	23
1.3	HIPÓTESES	24
1.4	METODOLOGIA	24
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	26
2.2	AFIAÇÃO E DESCARTE DE FERRAMENTAS DE CORTE	30
2.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	33
2.3.1	Características das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular	34
2.3.1.1	Ferramentas de cerâmica	36
2.3.2	Desgastes e avarias da ferramenta	38
2.3.2.1	Desgastes	38
2.3.2.2	Avarias	43
2.3.2.3	Mecanismos de desgaste	44
2.3.3	Crítérios de fim de vida da ferramenta	49
2.4	FERRO FUNDIDO NODULAR	51
2.4.1	Usinabilidade dos ferros fundidos nodulares	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO CORPO DE PROVA	58
3.2	FERRAMENTAS DE CORTE	60
3.2.1	Afiação da ferramenta de corte	65
3.3	FLUIDOS DE CORTE	67
3.4	MÁQUINA-FERRAMENTA	69
3.5	PARÂMETROS DE CORTE	70
3.6	MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA	71
3.7	MONITORAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL	72

3.8 AQUISIÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA.....	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 DESGASTE DA FERRAMENTA.....	76
4.1.1 Mecanismos de desgaste	85
4.1.2 Análise estatística da influência das variáveis no desgaste da ferramenta	89
4.2 RUGOSIDADE SUPERFICIAL	92
4.2.1 Ferramentas novas.....	93
4.2.2 Ferramentas reafiadas.....	96
4.2.3 Análise estatística da influência das variáveis na rugosidade superficial	99
4.3 POTÊNCIA CONSUMIDA.....	102
4.3.1 Ferramentas novas.....	103
4.3.2 Ferramentas reafiadas.....	106
4.3.3 Análise estatística da influência das variáveis no consumo de potência durante a usinagem.....	110
5 CONCLUSÕES.....	113
6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS.....	116
APÊNDICE A	124
ANEXO 1.....	132
ANEXO 2.....	135
ANEXO 3.....	136

1 INTRODUÇÃO

O mercado atual exige das empresas do setor metal-mecânico agilidade, flexibilidade, foco nos clientes, desenvolvimento de novas tecnologias bem como o grande desafio da redução de seus custos sem perda de qualidade, onde, por conseguinte significa uma incessante busca pela melhoria contínua dos processos.

Neste contexto, os processos de usinagem, dentro da indústria metal-mecânica, têm uma parcela significativa no que se diz respeito a custos de produção e as ferramentas de corte representam grande parte desses custos.

Segundo Trent e Wright (2000) os processos de usinagem representam 15% do valor do produto final e de acordo com Grzesik (2008) as ferramentas de corte, geralmente, representam 4% do custo de produção.

Consigna-se, que com o objetivo de diminuição do custo de produção relacionado a usinagem durante o processo, algumas tentativas são realizadas, como por exemplo, utilização de processos por MQL (mínima quantidade de lubrificante), tratamento dos fluidos de corte, ajustes de parâmetros de corte, desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte, variação da geometria da ferramenta de corte, entre outros. Essas tentativas, no geral, elevam a vida da ferramenta de corte, assim, o custo de produção será menor quanto maior for a vida da ferramenta.

A vida da ferramenta é definida pelo tempo que a mesma trabalha efetivamente e é verificada quando perde sua característica de corte dentro de um critério pré-determinado e alguma variável do processo é afetada, como exemplos: acabamento e rugosidade superficial, vibração e ruído da máquina, forma do cavaco, etc.

A norma ISO 3685/1993 - *Tool Life Testing with Single Point Turning* define a taxa de desgaste permitida, já que diversos desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de corte, sendo que os principais desgastes são: deformação plástica do gume, lascamento, trinca, quebra e desgastes de flanco e de cratera. Em consequência destes desgastes, as ferramentas ao serem colocadas em trabalho podem apresentar baixo rendimento gerando problemas como: aquecimento excessivo, aumento do esforço de corte, o acabamento não satisfatório da peça, além do aumento do tempo de usinagem (DINIZ et al., 2008).

Quando a ferramenta atinge sua vida máxima, recomenda-se sua troca ou afiação para prosseguimento do processo, isto porque a afiação é a operação que restaura o corte ou o perfil de ferramentas desgastadas pelo uso e é feita somente nas superfícies que determinam os ângulos de incidência, de cunha e de saída (FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO, 1996).

Atualmente, algumas empresas estão utilizando ferramentas de corte reafiadas para diminuir o custo da produção. Um dos grandes empecilhos para consolidar esta prática é o temor de que as ferramentas recondicionadas não tenham a mesma capacidade de corte se comparadas com as novas, ressaltando que alguns fornecedores de ferramentas contam com programas de recondicionamento de ferramentas e de acordo com Kennametal (2015), há uma economia de 50% quando as ferramentas são recondicionadas.

MACHADO (2013) diz que ferramentas reafiadas não podem interferir de forma negativa no processo de usinagem, ou seja, as condições de corte, bem como, a vida da ferramenta devem ser mantidas ou melhoradas quando comparadas às ferramentas novas, assim, em seus estudos em bedames de metal duro, dependendo do tipo de reafiação e da cobertura utilizada, a ferramenta reafiada tem uma eficiência em relação a vida de até 60% em comparação com a ferramenta nova. Neste sentido Sandvik Coromant (2015a) garante 100% de confiabilidade nas ferramentas inteiriças de metal duro recondicionadas com mesmo desempenho da original, até a 3ª reafiação.

Um outro ponto que deve ser levado em consideração além da redução de custos com a utilização das ferramentas reafiadas é a questão da sustentabilidade, uma vez que o descarte da ferramenta é retardado devido a reutilização das mesmas. Além do recondicionamento, alguns fornecedores contam também com programas de reciclagem de ferramentas de corte, contudo, tanto o recondicionamento quanto a reciclagem são restritos às ferramentas de metal duro.

Neste trabalho foram explanadas as vantagens e desvantagens obtidas quanto ao reuso das ferramentas de corte de cerâmica por meio da reafiação, realizando o acompanhamento sistemático do insertos reafiados comparando o desempenho com ferramentas novas na usinagem de ferro fundido nodular GGG-60.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos que direcionam o presente trabalho estão divididos em objetivo geral e específico.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste projeto foi comparar o desempenho das ferramentas de corte novas e reafiadas utilizadas no processo de usinagem do ferro fundido nodular GGG-60 de peças utilizadas no setor automotivo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar os ciclos de vida das ferramentas novas e reafiadas;
- Avaliar os mecanismos de desgastes das ferramentas, consumo de potência e rugosidade superficial durante a usinagem do ferro fundido nodular com as ferramentas novas e reafiadas;
- Apreciar o desempenho de um processo sustentável por meio da reafiação das ferramentas e utilização de fluido de corte de fontes renováveis;
- Analisar estatisticamente, por meio de análise de variância (ANOVA), as variáveis mais influentes no desempenho de corte das ferramentas utilizadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Levando-se em consideração que o objetivo principal da empresa é a produção e o da universidade é a pesquisa, a integração destes dois setores é um passo importante para a melhoria dos processos industriais.

Frisa-se que as ferramentas de corte são essenciais no campo de usinagem dos metais, pois são elas as responsáveis pelo corte.

Nesse ponto, a utilização correta das ferramentas de corte vem acompanhada de inúmeras variáveis, tais como: tipo de material, parâmetros de corte, características da máquina, geometrias do inserto, sistemas de refrigeração e lubrificação, entre outras.

Empresas de manufatura que utilizam ferramentas de corte em seus processos tem dificuldade de mensurar qual o valor gasto com essas ferramentas, dificultando a distribuição desses gastos. Segundo Grzesik et al. (2008), as ferramentas de corte representam cerca de 4% do valor de gastos com insumos.

Observa-se que no mercado atual, opções para reduzir custos com a usinagem não faltam e uma saída interessante para este problema é o condicionamento das ferramentas de corte por meio da reafiação.

Nesse enfoque, diante de inúmeras variáveis, um estudo aprofundado sobre a eficácia destas ferramentas de corte condicionadas se faz necessário dentro das empresas.

1.3 HIPÓTESES

Por meio de um método de Análise de Decisão este trabalho sugerirá a melhor especificação técnica de uma ferramenta de corte para ser usada no processo de usinagem da empresa MGL Mecânica de Precisão LTDA. Neste enfoque as hipóteses são:

- Levantar as variáveis que realmente influenciam na qualidade do processo de usinagem por fresamento utilizando ferramentas de cerâmicas reafiadas;
- Avaliar os requisitos e as restrições de se utilizar ferramentas reafiadas;
- Redução do descarte de ferramentas o que contribuirá com a sustentabilidade da empresa.

1.4 METODOLOGIA

Com o intuito de investigar e comparar o desempenho de corte de ferramentas de cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4) novas e reafiadas na usinagem do ferro fundido nodular GGG-60, foi programado e realizado para tanto uma série de experimentos práticos, tais como ensaios de vida da ferramenta, consumo de potência na usinagem e a rugosidade superficial, onde realizou-se a caracterização do material como: aferição de dureza, análise metalográfica e verificação de propriedades mecânicas por meio do ensaio de tração.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, que são descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a parte inicial do texto, na qual constam o tema e a delimitação do assunto tratado, objetivos da pesquisa, justificativa e hipóteses do trabalho.

O Capítulo 2 mostra a revisão da literatura para o desenvolvimento deste trabalho, citando e descrevendo os métodos tradicionais e mais utilizados no estudo da geometria das ferramentas de corte, desgaste e vida das ferramentas de corte, bem como as características químicas e mecânicas do ferro fundido nodular e sua usinabilidade.

No capítulo 3, são retratados os materiais utilizados e estabelece o método adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 4, são discutidos os resultados dos ensaios realizados.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e, por fim, no Capítulo 6 estão descritas as propostas de continuidade e referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado o levantamento do estado da arte referente ao desempenho da ferramenta na usinagem do ferro fundido. De modo geral, focou-se as discussões na ferramenta cerâmica, material de estudo da presente dissertação. Inicialmente, são abordados os conceitos fundamentais da geometria das ferramentas, seguido de uma discussão sobre os programas de afiação e descarte das ferramentas. Posteriormente, é apresentado um estudo sobre os materiais para ferramentas de corte e os critérios de fim de vida da ferramenta.

Acrescentou-se, ainda, uma breve discussão sobre as características dos ferros fundidos nodulares, pois este material foi utilizado como corpo de prova.

2.1 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A geometria da ferramenta exerce grande influência no corte, juntamente com outras variáveis durante o processo de usinagem dos metais. A parte da ferramenta em que se origina o cavaco é denominada cunha cortante e devido a essa importância, é necessário caracterizar a ferramenta por meio dos ângulos da cunha cortante. Para isso, algumas definições são adotadas de acordo com a norma NBR 6163/1980 - Conceitos da Técnica de Usinagem - Geometria da Cunha Cortante Terminologia”.

- Cunha de corte: cunha formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte (MACHADO et al., 2015).
- Superfície de saída (A_γ): superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco desliza durante sua saída da região de corte (MACHADO et al., 2015).
- Superfície principal de folga (A_α): superfície da cunha de corte da ferramenta que contém seu gume principal e que defronta com a superfície em usinagem principal (MACHADO et al., 2015).

- Superfície secundária de folga ($A'\alpha$): superfície da cunha da ferramenta que contém seu gume secundário e que defronta com a superfície em usinagem secundária (MACHADO et al., 2015).
- Gume principal S: gume da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal, gera na peça a superfície em usinagem principal (MACHADO et al., 2015).
- Gume secundário S': gume da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária, gera na peça a superfície em usinagem secundária (MACHADO et al., 2015).
- Ponta de corte: parte da cunha de corte onde se encontram o gume principal e o secundário, assim a ponta de corte pode ser uma intersecção dos gumes, ou a concordância dos dois gumes por meio de um arredondamento, alternativamente pode ser o encontro dos dois gumes por meio de um chanfro (MACHADO et al., 2015).

A Figura 1 ilustra a cunha cortante de uma ferramenta qualquer, a Figura 2 mostra uma ferramenta de barra e suas superfícies e gumes e na Figura 3 são apresentados os elementos de cunha cortante de uma fresa frontal (MACHADO et al., 2015).

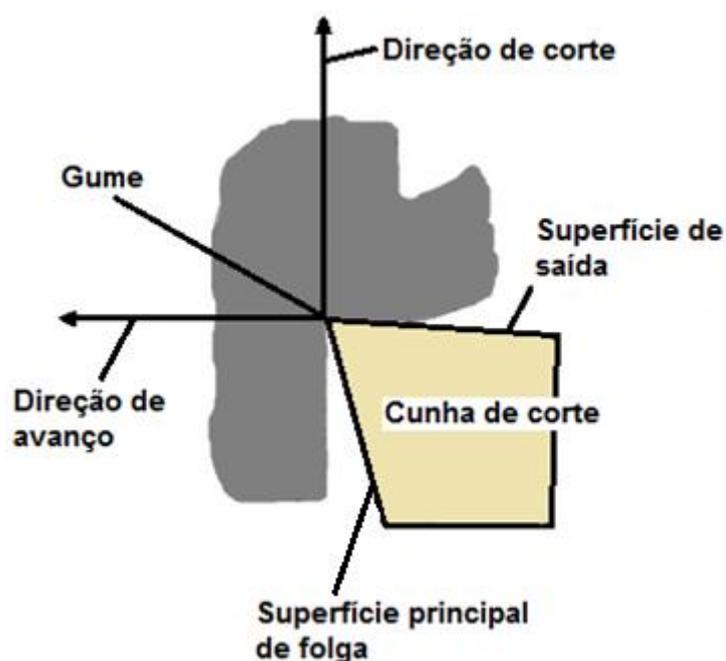


Figura 1 - Cunha de corte de uma ferramenta qualquer
Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015).

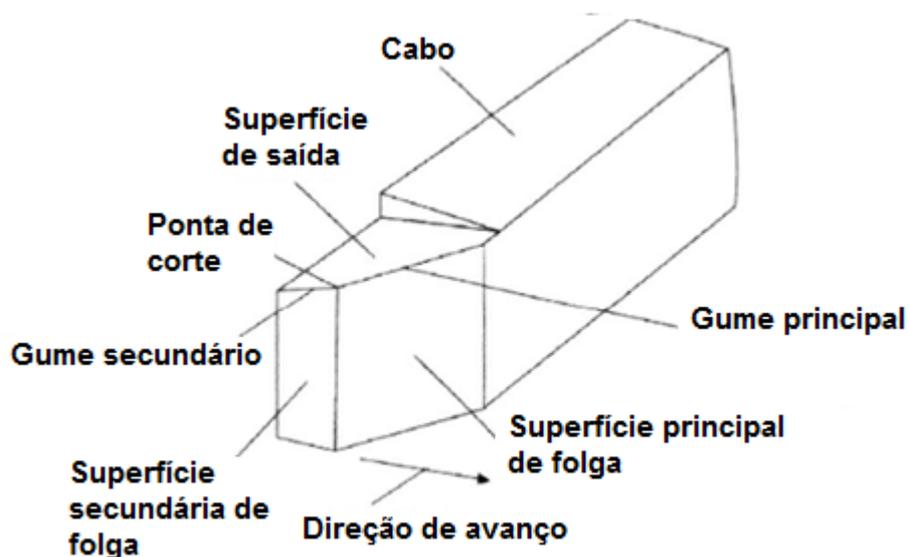


Figura 2 - Gumes e superfícies que formam a cunha cortante de uma ferramenta de barra
 Fonte: Machado et al. (2015).

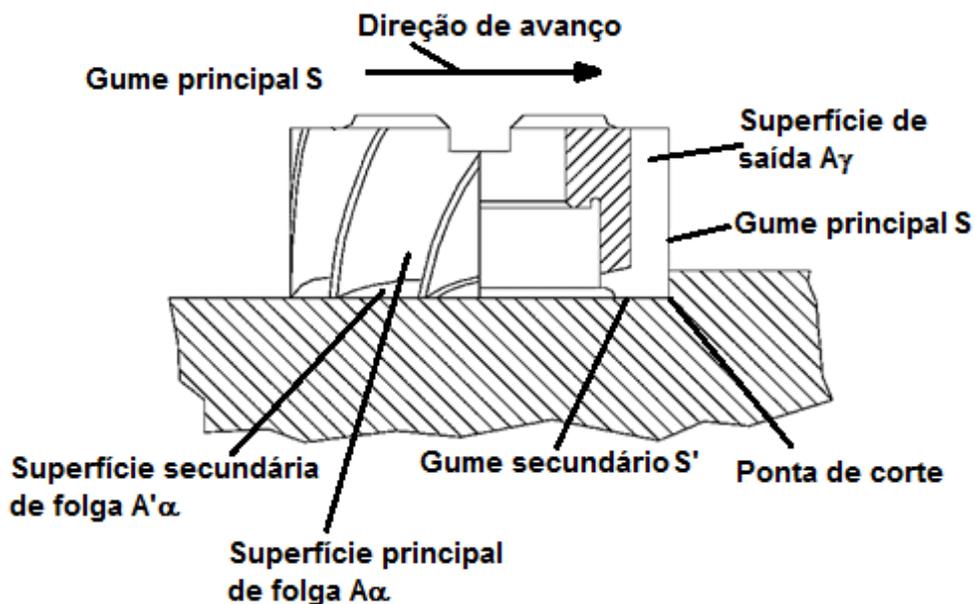


Figura 3 – Elementos da cunha cortante de uma fresa frontal
 Fonte: Machado et al. (2015).

A cunha de corte dispõe de alguns ângulos, mostrados na Figura 4 que determinam a posição e a forma da cunha de uma ferramenta durante o processo de corte e são determinados de acordo com planos imaginários associados à ferramenta.

Nesse sentido, o plano de referência passa pelo ponto de corte e é perpendicular à direção efetiva de corte, ao ponto que o plano de corte passa pelo ponto de corte escolhido, é tangente ao gume e perpendicular ao plano de referência. O plano de medida passa pelo ponto de corte e é perpendicular aos planos de referência e de corte (SANTOS e SALES, 2007).

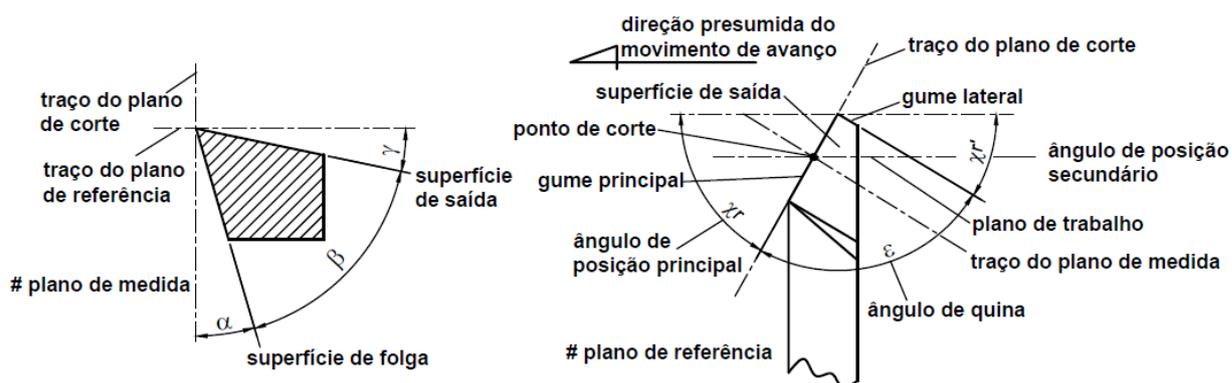


Figura 4 - Ângulos da cunha de corte e planos do sistema de referência da ferramenta
Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

O ângulo de posição, (χ_r) normalmente varia de 45° a 95° e pode influenciar a direção de saída do cavaco e a quebra do mesmo, neste caso, quanto maior o ângulo de χ_r , maior será a espessura do cavaco, conseqüentemente devido a maior deformação a frio (encruamento), mais fácil será a quebra (DINIZ et al., 2008).

O ângulo de ponta, (ϵ_r) é definido pela projeção dos gumes secundários e principal sobre o plano de referência e define o formato da ferramenta, por exemplo, 90° insertos quadrados e 60° insertos triangulares, tendo como sua principal função aumentar a resistência mecânica da ferramenta, visto que, quanto menor o ângulo de ponta, menor é a resistência da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

O ângulo de folga, (α), é formado entre a superfície de folga e o plano de corte da ferramenta e sua função é evitar o atrito entre a peça e a superfície principal de folga, assim se o ângulo de folga $\alpha = 0^\circ$, a superfície de contato da ferramenta de corte com a peça se dá de forma integral gerando intenso calor, o que pode acarretar em perda prematura da afiação e o acabamento pode ser prejudicado.

Frisa-se que se o ângulo de folga for grande, seguramente acarretará a fragilidade da cunha cortante, conduzindo a ferramenta à falha, assim, os valores ideais para o ângulo de folga variam entre 5° e 20° (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Machado (2013) com o ferro fundido nodular ferrítico, proveniente de sua maior ductilidade, pode ocorrer a aderência do material na superfície de folga da ferramenta em altas velocidades, causando esforços e temperaturas elevadas, além de um acabamento não satisfatório na peça usinada, problema este que pode ser resolvido aumentando-se o ângulo de folga da ferramenta.

O ângulo da cunha, (β), é formado pelas superfícies de folga e de saída e sua função principal é aumentar a resistência mecânica da mesma.

O ângulo de saída, (γ), é formado pela superfície de saída e pelo plano de referência e pode ser classificado em positivo, neutro (0°) e negativo. De acordo com Machado et al. (2015) o ângulo de saída depende do calor gerado no processo de corte, da velocidade de avanço e da resistência do material da ferramenta e da peça, assim, materiais de reduzida usinabilidade requerem ângulos menores ou negativos, garantindo maior resistência a cunha de corte e materiais de elevada usinabilidade, como ligas de alumínio, necessitam de ângulos positivos, com a finalidade de facilitar o escoamento do cavaco evitando áreas de adesão do material da peça com a ferramenta.

2.2 AFIAÇÃO E DESCARTE DE FERRAMENTAS DE CORTE

Segundo Stemmer (1995), insertos de metal duro e cerâmicas fixados mecanicamente raramente eram afiados e um dos destinos mais prováveis para as ferramentas de corte usadas, principalmente aquelas de metal duro, eram as caçambas de cavaco ou o próprio lixo seco das empresas.

Salienta-se que não que isto tenha sido totalmente eliminado, muitas empresas, por falta de conhecimento, ainda descartam de forma prematura e não controlada suas ferramentas, mas em se tratando de sustentabilidade, o recondicionamento tem sido cada vez mais o foco das principais fornecedoras de

ferramentas do mundo, uma vez que essas ferramentas são compostas de materiais de alto valor agregado, como por exemplo o tungstênio, que são originados de fontes não renováveis (BORGES, 2010).

Infere-se também que recondicionar ferramentas é uma forma inteligente para a empresa e para o meio ambiente, pois assim há uma economia de dinheiro e evita-se o desperdício de material. Nesta linha de pensamento escreveu Sandvik Coromant (2105c): o processo de recondicionamento e reciclagem, além de sustentável, é lucrativo, pois um de seus clientes, um fabricante de acessórios e peças de automóveis, de médio porte em Michigan, nos EUA, foi reembolsado em cerca de 3% dos gastos anuais com compras de metal duro, o que representou mais de 300.000 dólares.

Machado (2013) estudou a eficiência de bedames intercambiáveis reafiados de metal duro com diferentes revestimentos no torneamento do ferro fundido nodular GGG-50. Concluiu que esta prática é viável, pois segundo ele, dependendo do tipo de afiação um bedame pode ter sua vida aumentada em cerca de 60% em comparação com um bedame novo, ou seja, um bedame reafiado remove 2181,3 cm³ de material enquanto um bedame novo remove 1323 cm³ de material.

Da mesma forma, Moura (2012) estudou o fresamento de aço para matrizes VP20ISO F com fresas de topo inteiriças de metal duro novas e reafiadas revestidas de TiAlN e AlCrN e verificou que a ferramenta reafiada com cobertura de AlCrN obteve uma maior vida e um melhor acabamento superficial quando comparada com a ferramenta nova.

Por outro lado, Souza (2011), estudou o desempenho de brocas reafiadas sem cobertura e com cobertura de TiAlN e AlCrN na furação de aço DIN 19MnCr5G empregado na fabricação de coroas cilíndricas utilizadas em caixa de câmbio automotivo e apurou que as ferramentas reafiadas aumentaram as taxas de desgaste, os esforços de usinagem, os desvios geométricos de circularidade e cilíndricidade e também elevaram a rugosidade dos furos realizados.

É imperioso ressaltar que nos dias atuais a maioria dos fornecedores de ferramentas contam com programas para reciclagem das ferramentas de corte, sobretudo as de metal duro. Segundo Sandvik Coromant (2015b), a mesma recupera mais de 80% do metal duro que vende, além disso 95% de uma ferramenta de metal duro pode ser reciclada e 70% menos energia é gasta para fabricar ferramentas novas

a partir de material reciclado. Ainda de acordo com Borges (2010), uma ferramenta de metal duro pode conter cerca de 20% de material reciclado em sua composição sem que ela perca suas características de resistência mecânica e de desgaste.

Notam-se números expressivos quando se fala em ferramentas de metal duro, porém há uma lacuna nos programas de condicionamento e reciclagem quando o assunto são as ferramentas de cerâmica, já que esses mesmos fornecedores não contam com programas para reciclagem ou condicionamento destas ferramentas.

A empresa Seco (2015), em seu site, descreve as condições para reciclagem das ferramentas. Cita que produtos isentos de cermet, cerâmicas e PCD ou PCBN sólidos podem ser reciclados. Ainda segundo a empresa, para o condicionamento, além do tipo de material, poucas geometrias podem ser condicionadas dentre os quais pode-se citar como passíveis de reafiação: brocas, fresas de topos inteiriças, alargadores e machos.

O processo para condicionamento é semelhante entre os fornecedores, os quais disponibilizam caixas personalizadas e exclusivas aos seus clientes, onde são acondicionadas as ferramentas usadas que serão reafiadas. Elas são enviadas ao fornecedor que executa o processo de afiação e as devolve para o cliente. Segundo Sandvik Coromant (2105a) uma ferramenta pode ser condicionada até três vezes, mantendo-se as mesmas características de corte da original. Após isto, quando o condicionamento não é mais lucrativo, as ferramentas de metal duro podem ser recicladas.

No processo de afiação, algumas condições devem ser levadas em consideração, visto que no desbaste a profundidade máxima de usinagem deve ser de 0,01mm por passe e no acabamento esse valor não deve ultrapassar 0,003mm, pois o rebolo deve exercer mínima pressão sobre a ferramenta evitando o excesso de calor gerado e uma possível alteração estrutural na ferramenta. Recomendando-se que o rebolo gire contra o gume principal, afim de evitar a formação de rebarba (STEMMER, 1995).

2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte são responsáveis pelo cisalhamento do cavaco durante a usinagem e estão sujeitas a altas temperaturas, altas pressões de contato e atrito com o cavaco e a superfície já usinada da peça, sendo certo que a escolha correta da ferramenta para o processo de usinagem é um fator essencial para o sucesso do mesmo.

De acordo com Diniz et al. (2008), para uma seleção criteriosa do material da ferramenta deve-se levar em consideração uma série de fatores, tais como: material a ser usinado, processo de usinagem, rigidez da máquina-ferramenta, formas e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de operação e usinagem, etc.

Infere-se que, seja qual for o material da ferramenta, durante a aplicação, deve apresentar as seguintes propriedades (STEMMER, 2005):

- Resistência ao desgaste: especialmente ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito, para garantir uma durabilidade compatível com o processo;
- Dureza: principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho;
- Tenacidade: a ferramenta deve resistir a impactos e esforços cíclicos, comuns nas operações de usinagem;
- Estabilidade química: para que o material da ferramenta não reaja com o material da peça ou contamine-o, por meio do desgaste por difusão.

As ferramentas para usinagem podem ser classificadas de acordo com suas características químicas em uma ordem crescente de dureza e resistência ao desgaste (DINIZ et. al., 2008):

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto cúbico de boro (CBN);

- Diamante.

2.3.1 Características das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular

Como descrito no item 2.3, existe um número grande de ferramentas para as mais diversas aplicações, porém dentre as ferramentas utilizadas na usinagem de metais, para usinagem de ferro fundido, destacam-se as ferramentas de metal duro e as cerâmicas. Geralmente, para usinagem de ferros fundidos a ferramenta de cerâmica é preferida em relação as ferramentas de metal duro, principalmente devido a sua alta resistência ao desgaste e boa estabilidade química e térmica.

Neste sentido Diniz e Ferrer (2008), em seu estudo compararam o desempenho de uma ferramenta de cerâmica a base de nitreto de silício com uma de metal duro revestida no fresamento de superfícies irregulares de ferro fundido cinzento. Concluíram que a ferramenta de cerâmica a base de nitreto de silício tem uma vida maior que a ferramenta de metal duro revestida. Como pode ser visto Figura 5, a ferramenta de cerâmica atingiu uma vida muito maior do que a ferramenta de metal duro, mesmo as ferramentas de cerâmica utilizando uma velocidade de corte 2,2 vezes maior do que para ferramentas de metal duro, fazendo o corte 2,2 vezes mais rápido. Assim, o autor afirma que neste tipo de operação as ferramentas de cerâmica são muito mais adequadas do que as ferramentas metal duro.

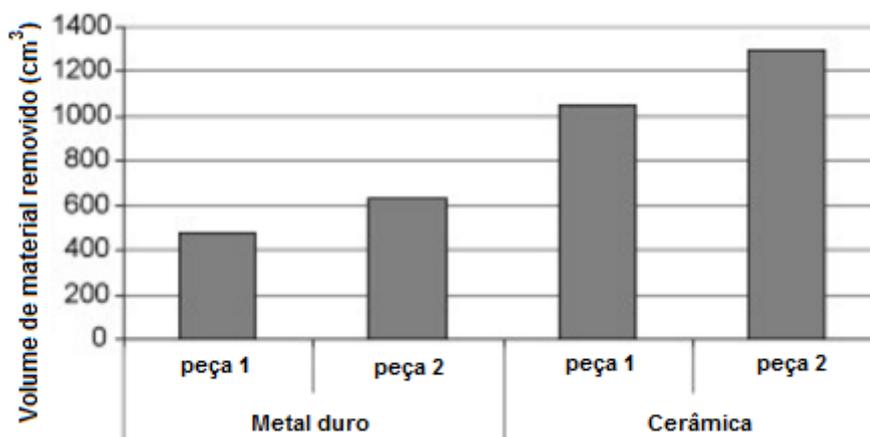


Figura 5 - Volume de material removido em relação aos dois tipos de ferramentas utilizadas

Fonte: Adaptado de Diniz e Ferrer (2008).

As tendências na aplicação dos ferros fundidos na indústria automotiva e os materiais para ferramentas de corte recomendadas são apresentadas na Tabela 1 (SCHULZ e REUTER, 2001, apud GRZESIK, 2009).

Tabela 1 - Tendências de aplicação de ferros fundidos e materiais para ferramentas de corte na indústria automotiva

Tipo de ferro fundido	Tendência	As principais peças de usinagem	Materiais para ferramentas de corte
Fundido cinzento EN-GJL	Em baixa	Blocos de cilindros, cabeçotes e tambores de freio e discos	-Revestida com carboneto de Al_2O_3 ; - Nitreto de silício Si_3N_4 - CBN
Vermicular CGI	Em alta	Blocos de cilindro de motores diesel, retentores e fixadores	De acordo com os requisitos do processo
Nodular EN-GJS	Em alta	Cambotas, eixos de comando e engrenagens	- Multicamadas MT-CVD e com cobertura PVD TiCN; - Al_2O_3 ; - TiN; - TiCN; - CERMET (cerâmica mista); - Si_3N_4 ; - CBN.

Fonte: Adaptado de Monker, 1998 apud GRZESIK, 2009.

2.3.1.1 Ferramentas de cerâmica

As ferramentas cerâmicas têm larga aplicação na usinagem do ferro fundido em peças de automóveis e estes materiais têm um crescimento significativo na indústria automobilística, como relatado por BYRNE et al. (2003) em relação ao crescimento do uso do ferro fundido vermicular na fabricação de blocos de motor e motores a diesel de alta performance.

O material cerâmico é utilizado no segmento de usinagem desde a década de 1950, do século XX, porém seu uso só se tornou considerável a partir da década de 1980.

As ferramentas confeccionadas à base de materiais cerâmicos são formadas por várias classes de insertos, os quais estão divididos em dois grandes grupos em função do material empregado como matriz, conforme apresentado no Quadro 1, óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4) (PEREIRA, 2006).

Quadro 1 - Classificação das ferramentas de cerâmicas

Ferramentas a base de óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3)	Cerâmicas puras;
	Cerâmicas mistas;
	Cerâmicas reforçadas com <i>Whisker</i> .
Ferramentas a base de nitreto de silício (Si_3N_4)	Cerâmicas puras;
	Sialon.

Fonte: Adaptado de Diniz et al. (2008).

As propriedades das classes das ferramentas cerâmicas são descritas a seguir:

- Cerâmicas pura de nitreto de silício (Si_3N_4) apresentam alta tenacidade. Classes de nitreto de silício são bem-sucedidas em ferros fundidos cinzentos, porém a falta de estabilidade química limita seu uso em outros materiais;
- Cerâmicas mistas em comparação com a cerâmica pura, apresentam uma boa dureza e estabilidade química e péssima tenacidade;

- Cerâmicas reforçadas com *Whisker* usam *whiskers* de carboneto de silício (SiCw) para o aumento da tenacidade e permitir o uso de fluido refrigerante. Cerâmicas reforçadas com *Whisker* são ideais para usinagem de ligas à base de Ni.
- Cerâmica Sialon (SiAlON) combinam a resistência de uma rede autorreforçada de nitreto de silício com estabilidade química aprimorada que são ideais para usinagem de superligas resistentes ao calor.

O Quadro 2 apresenta uma comparação de propriedades entre as ferramentas de cerâmica e as de metal duro.

Quadro 2 – Propriedades relativas dos materiais cerâmicos comparadas com o metal duro

	Tenacidade	Dureza a quente	Resistência ao choque térmico	Estabilidade química (Fe)	Estabilidade química (Ni)
Cerâmica pura	2	2	1	5	5
Cerâmica mista	1	3	2	4	4
Cerâmica com <i>whiskers</i>	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal duro	5	1	5	3	1

Fonte: SANDVIK (1990) apud DINIZ (2008).

As ferramentas de cerâmica podem ser aplicadas em uma ampla variedade de processos e materiais, tais como: operações de torneamento com alta velocidade, mas também em operações de canais e fresamento.

Nesse aspecto, as propriedades específicas de cada classe de cerâmica permitem obter alta produtividade quando aplicadas corretamente.

É importante frisar que as limitações gerais da cerâmica incluem resistência a choques térmicos e tenacidade ao impacto. Em contrapartida, Diniz e Ferrer (2008) concluíram que ferramentas de cerâmica a base de nitreto de silício são mais resistentes aos impactos e outras causas de lascamento inerentes ao tipo de superfície usinada quando comparadas às ferramentas de metal duro, uma vez que não foi encontrado lascamento nos gumes primários e considerando que lascamento foi a causa do fim da vida útil da ferramenta de metal duro.

2.3.2 Desgastes e avarias da ferramenta

Neste item serão descritos os desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de corte durante o processo de usinagem, assim como também os vários fatores que são capazes de gerar esses desgastes e avarias.

2.3.2.1 Desgastes

De acordo com a norma ISO 3685/93 - *Tool Life Testing with Single Point Turning*, o desgaste de uma ferramenta é o resultado de mudanças em sua geometria a partir do seu estado original, que acontecem durante o processo de corte na usinagem.

Alguns autores como Trent e Wright (2000) e Machado et al. (2015), afirmaram que três fatores podem levar à substituição da ferramenta de corte durante o processo de usinagem: avaria, deformação plástica e o desgaste propriamente dito.

A Figura 6 apresenta os três tipos de desgaste encontrados em ferramentas de corte durante a usinagem. São eles o desgaste de cratera (A), de flanco (ou frontal) (B) e de entalhe (C e D).

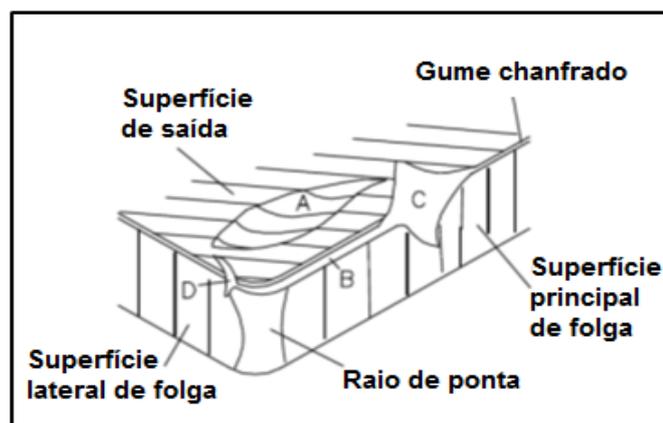


Figura 6 - Tipos de desgaste da ferramenta de corte
Fonte: Machado et al. (2015).

O desgaste de flanco é o tipo de desgaste mais comum, todo o processo de usinagem causa desgaste frontal e é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Esse tipo de desgaste deteriora o acabamento superficial da peça e, por modificar a forma do gume original, faz com que a tolerância dimensional seja afetada. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte (SANTOS e SALES, 2007).

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída (deslizamento do cavaco). É causado, principalmente, pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Assim quando o desgaste de cratera encontra o desgaste de flanco, gera o colapso da ferramenta de corte, logo, afere-se que a cratera gerada pode constituir uma região de concentração de tensões, sendo um causador de quebras de ferramentas (DINIZ et al., 2008).

Esse fato se deve porque a profundidade e a largura da cratera, formada na superfície de saída da ferramenta, estão relacionadas à velocidade e ao avanço de corte empregado durante a usinagem (FERRARESI, 2003).

Grzesik e Małecka (2011) concluíram em seus experimentos que ferramentas de cerâmicas a base de nitreto de silício revestidos com Al_2O_3/TiN quando utilizadas no torneamento de ferro fundido nodular da classe EN-GJS-500-7, indicam maior resistência ao desgaste abrasivo com velocidades de corte entre 160-240 m/min. A Figura 7 mostra a comparação entre as velocidades de corte utilizadas em seus ensaios.

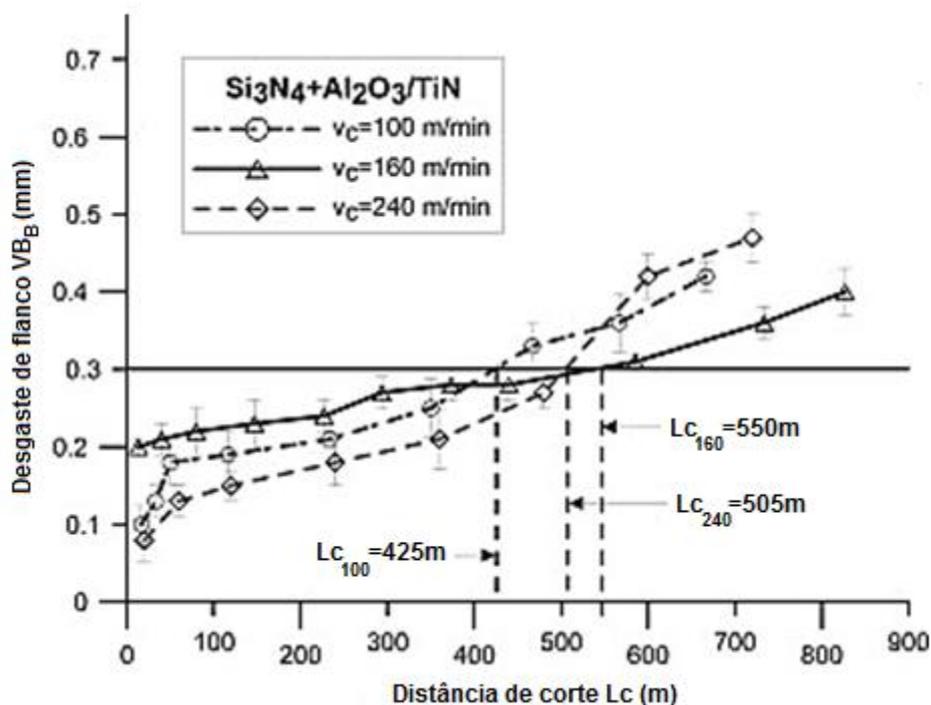


Figura 7 – Desgaste de flanco VB_B para ferramenta cerâmicas a base de nitreto de silício revestidos vs. Caomprimento usado
 Fonte: Adaptado de Grzesik e Malecka (2011).

Yadav et al. (2015) tornearam Inconel 718 com ferramentas de metal duro revestidas de carboneto de tungstênio (WC) utilizando diferentes parâmetros de corte e observaram que a rotação do fuso e a profundidade de corte são os fatores que mais influenciam no desgaste de flanco. Na Tabela 2 pode-se verificar a influência destes parâmetros observando a análise ANOVA para o desgaste de flanco. A Figura 8 mostra o gráfico dos efeitos de cada parâmetro no desgaste de flanco e a Figura 9 mostra o desgaste de flanco para a condição mais severa para o mesmo, ou seja, 421 rpm, profundidade de corte de 1 mm e avanço de 0,20 mm/rev.

Tabela 2 - ANOVA para o desgaste de flanco

Fonte	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	SS Ajustado	Ajustado MS	F-valor	P-valor
Velocidade do eixo	3	13635,0	13635,0	4.545,01	54,36	0.000
Profundidade de corte	3	14075,0	14075,0	4.691,66	56,11	0.000
Taxa de alimentação	3	430,0	430,0	143,32	1.71	0,263
Erro residual	6	501,7	501,7	83,61		
Total	15	28641,7				

Fonte: Yadav et al. (2015).

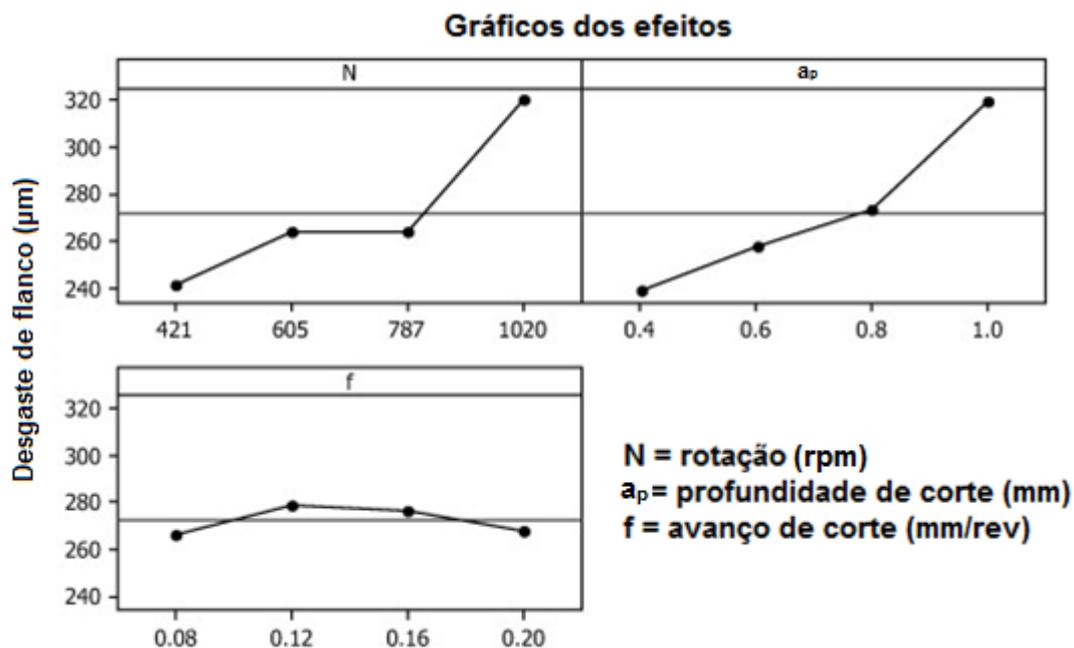


Figura 8 - Gráfico dos efeitos dos parâmetros de corte no desgaste de flanco
 Fonte: Adaptado de Yadav et al. (2015).

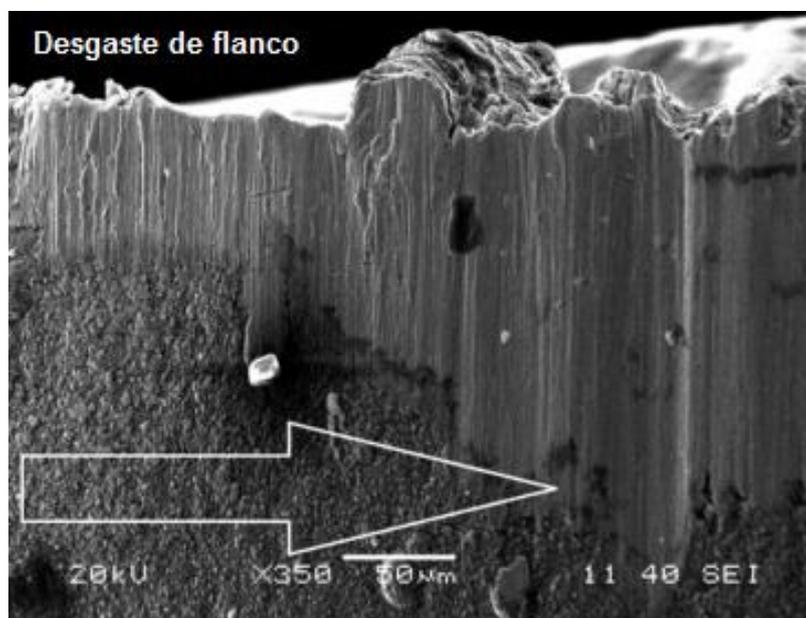


Figura 9 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro revestido com carboneto de tungstênio (WC) com rotação de 421 rpm, profundidade de corte de 1 mm e avanço de 0,20 mm/ver

Fonte: Adaptado de Yadav et al. (2015).

Segundo Santos e Sales (2007), o desgaste de entalhe aparece nas regiões próximas nos pontos da fronteira do contato cavaco-ferramenta, coincidentes com as laterais do cavaco; isso ocorre, principalmente, em materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento, na qual existem evidências de que óxidos, formados continuamente nessa região, aderem à ferramenta e são posteriormente removidos pelo cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000).

ZHUANG et al. (2014) tornearam Inconel 718 tratado termicamente com dureza de 430-460 HV, com uma ferramenta de cerâmica Sialon e concluíram que o principal modo de falha da ferramenta de corte é o desgaste de entalhe e que a camada endurecida da superfície da peça de trabalho é a principal causa do alto nível de desgaste de ferramentas de corte de cerâmica, apresentado na Figura 10.

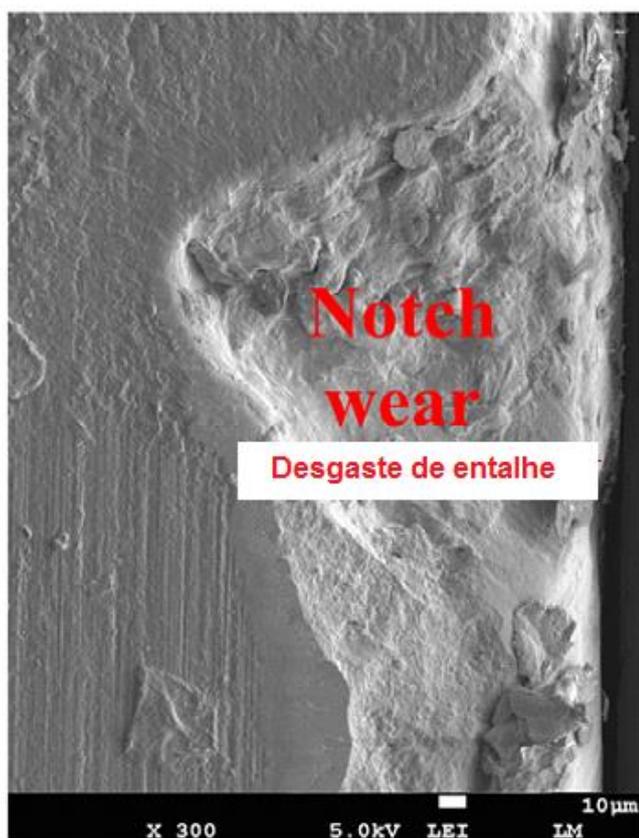


Figura 10 – Desgaste de entalhe
Fonte: Zhuang et al. (2014).

2.3.2.2 Avarias

Machado et al. (2015) definem avaria como o fenômeno que ocorre de forma repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca do gume, diferente do desgaste, que é a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material da mesma. A deformação plástica é definida como a mudança da geometria do gume pelo deslocamento de material e as avarias em uma ferramenta de corte podem ser assim elencadas:

Lascamento ou quebra: esta avaria é resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica. Ocorre quando partículas maiores de material das ferramentas são retirados de uma só vez. Se esta retirada de material for crescente, pode acontecer a quebra da ferramenta.

Trincas: estas avarias são provocadas quando a temperatura no gume muda rapidamente de quente para frio. Trincas térmicas são relativas a cortes interrompidos, comuns em operações de fresamento e agravadas pelo uso de fluidos de corte.

Diniz e Ferrer (2008) realizaram uma comparação entre ferramentas de cerâmicas Si_3N_4 e ferramentas de metal duro no faceamento de superfícies irregulares; deste modo a Figura 11 mostra um dos gumes da ferramenta no final da vida útil e pode ser visto que um grande lascamento foi provocado no gume e os pontos 1 e 2 mostram que elementos do substrato da ferramenta estão presentes (W e Co), mas na região da fronteira lascada (ponto 3) há a presença de elementos da peça (Fe e Si).

Denota-se que algum atrito pode ter ocorrido e, seguramente, o lascamento, gerado pelos impactos entre a ferramenta e a peça foi, diretamente responsável pelo fim da vida útil da ferramenta.

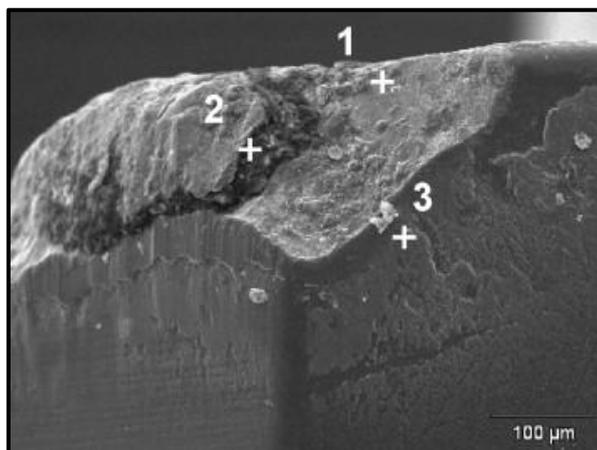


Figura 11 - Gume da ferramenta de metal duro com lascamento
Fonte: Diniz e Ferrer (2008).

2.3.2.3 Mecanismos de desgaste

Como já visto nos itens 2.3.2.1 e 2.3.2.2, desgastes e avarias são inevitáveis em todas as ferramentas, porém isto pode ser retardado se forem conhecidos os mecanismos que levam à ocorrência destes.

A classificação quanto aos mecanismos de desgaste na literatura não é unânime, porém, grande parte dos trabalhos existentes considera pelo menos cinco mecanismos diferentes, tais mecanismos são os seguintes: gume postiço, abrasão mecânica, aderência (*attrition*), difusão e oxidação (TRENT e WRIGHT, 2000).

Registra-se que o gume postiço é constituído por partículas de material usinado que aderem e se fundem na superfície de saída da ferramenta (FERRARESI, 2003).

Com posterior fluxo, soma-se mais cavaco sobre essa porção que se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e agindo como gume que tende a crescer gradualmente até que em certo momento rompe-se bruscamente, causando uma perturbação dinâmica (DINIZ et al., 2008).

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, incentivado pela presença de partículas duras na peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta, na qual essas partículas são arrancadas

à alta pressão e temperatura devido ao deslocamento com atrito entre a ferramenta e a peça usinada (STEMMER, 2005).

Tanto o desgaste de flanco quanto o de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém é mais proeminente o desgaste de flanco, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco (DINIZ et al., 2008).

A aderência (*attrition*) está presente na formação do gume postiço, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação do gume postiço, sendo que o fenômeno do desgaste adesivo ocorre geralmente a baixas velocidades e temperaturas de corte. Este tipo de desgaste é decorrente de microcaldeamentos na superfície de saída da ferramenta: assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro e alguns fatores como a utilização adequada de fluido de corte e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o TiN tem grande influência na diminuição desse tipo de desgaste, no microscópio, as áreas desgastadas por adesão têm aparência áspera (MACHADO et al., 2015; SANTOS e SALES, 2007; KÖNIG e KLOCKE, 1997; DINIZ et al., 2008).

Trent e Wright (2000) abordaram a aderência como sendo a remoção de microfragmentos da ferramenta pelo material da peça que estava aderido na superfície de saída da ferramenta; as partículas da ferramenta que são removidas pela continuidade do movimento de escorregamento entre as duas superfícies seguem aderidas ao fluxo do cavaco ou peça e como elas são bastante duras, ao atriarem com regiões da ferramenta acabam provocando o desgaste por abrasão.

Grzesik e Małecka (2011) detectaram dois mecanismos de desgaste dominantes, ou seja, o desgaste abrasivo e adesivo, quando utilizadas ferramentas de cerâmicas Si_3N_4 no torneamento de ferro fundido nodular com velocidades de corte mais altas, por exemplo, $v_c = 240$ m/min ou superior como mostra a Figura 12; além disso, o desgaste por oxidação ocorre localmente causando desgaste do tipo entalhe nos gumes primários e secundários.

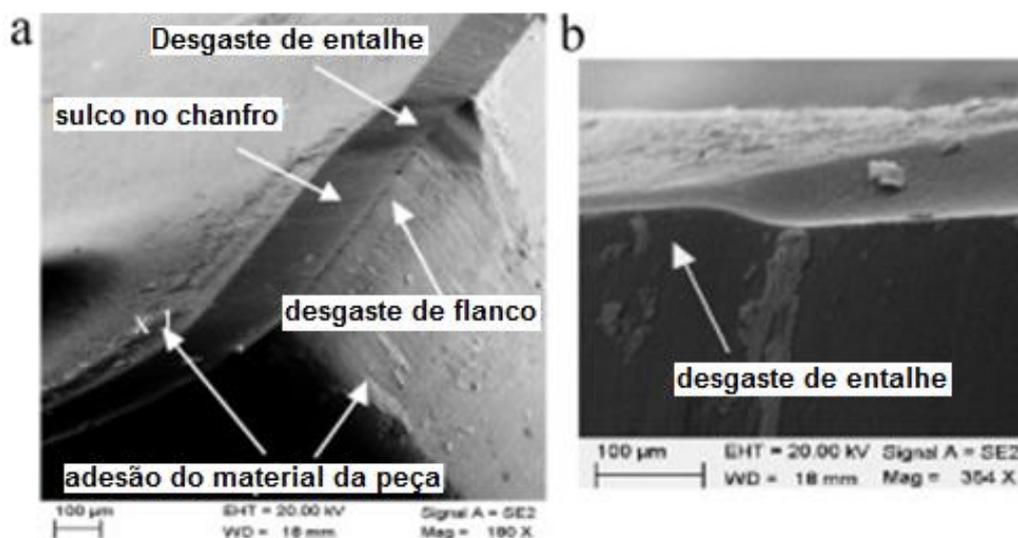


Figura 12 - Desgaste do entalhe de gume primário (a) e secundário (b) ferramenta de cerâmica Si_3N_4 com $v_c = 240$ m/min
 Fonte: Adaptado de Grzesik e Malecka (2011).

Adesão e abrasão também foram os principais mecanismos de desgaste observados por Carvalho et al. (2013) no torneamento do ferro fundido nodular austemperado dos grupos G2 e G3, de acordo com a ASTM, com velocidade de corte de 120 m/min, avanço de 0,18 mm/rev e profundidade de corte de 2 mm. A Figura 13 mostra a imagem da microscopia eletrônica por varredura das ferramentas utilizadas na usinagem e nota-se uma aparência áspera evidenciando que a adesão foi mais intensa na usinagem do G2, enquanto que na usinagem do G3 nota-se ranhuras verticais, o que indica desgaste por abrasão.

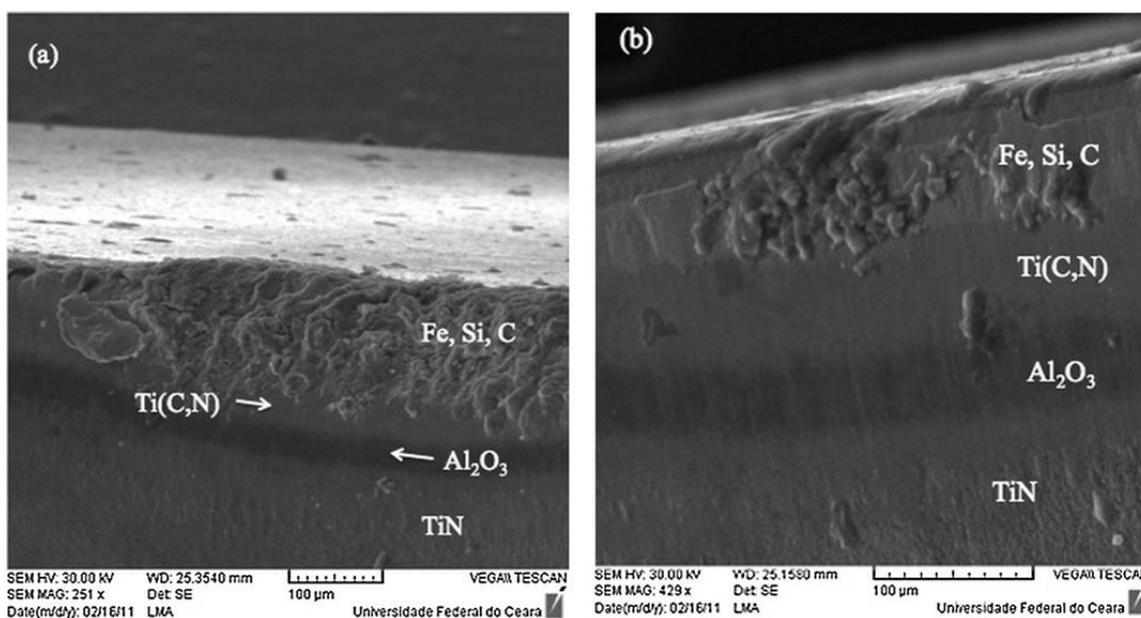


Figura 13 - Imagens MEV das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular austemperado. (a) G2 e (b) G3

Fonte: Carvalho et al. (2013).

Diniz e Ferrer (2008), no fresamento do ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas, determinaram que o tipo principal de desgaste foi o de flanco, provocado pela adesão do material Fe presente na peça de trabalho; isto é explicado, pois em análises microscópicas não observaram presenças de ranhuras na direção de corte, descartando assim o desgaste por abrasão.

O mecanismo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte que envolve a transferência de átomos de um material para outro, formando ligas menos resistentes e mais suscetíveis ao desgaste (DINIZ et al., 2008; STEMMER, 2005).

As velocidades relativas entre ferramenta e o cavaco são altas e o tempo de contato entre esses materiais é muito pequeno, razão pela qual o mecanismo de difusão poderia ser desprezível, se não fosse a existência de uma zona de aderência (zona de fluxo) na interface cavaco-ferramenta, onde as temperaturas são elevadas o suficiente para promover o processo difusivo (TRENT e WRIGTH, 2000).

Bhattacharyya et al. (1989), em seus experimentos, analisaram os mecanismos de desgaste no torneamento de ferros fundidos, utilizando três tipos de ferramentas de cerâmica: pura, mista e Sialon. As ferramentas de cerâmica pura possuem ótima estabilidade química, como já descrito anteriormente. Porém, quando

utilizadas em baixas velocidades de corte, inferiores a 300 m/min, observou-se desgaste por abrasão e em altas velocidades de corte, acima de 300 m/min, observou-se desgaste por difusão, demonstrando que a difusão pode ocorrer mesmo em ferramentas de alta estabilidade química quando utilizadas altas velocidades de corte.

A oxidação ocorre na maioria dos materiais metálicos em temperaturas elevadas na presença de ar e água (presente nos fluidos de corte) nos processos de usinagem.

No tocante ao desgaste gerado pela oxidação, formam-se pequenas bolhas de óxido nas áreas adjacentes de contato cavaco-ferramenta ou zona de escorregamento. Durante o corte, o tungstênio e o cobalto presentes nas ferramentas de corte de metal duro, por exemplo, formam óxidos porosos sobre a ferramenta, essa camada óxida pode ser removida pelo atrito entre a peça e a ferramenta, gerando a marca de desgaste (TRENT e WRIGHT, 2000; KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Segundo Diniz et al. (2008) as condições de usinagem, velocidade de corte, o avanço e por último, a profundidade de usinagem, influenciam diretamente no desgaste e na vida da ferramenta.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia o desgaste, pois com o aumento da mesma, aumenta-se a geração de calor sem que a área que recebe este calor seja alterada. Consigna-se que em relação ao avanço, seu aumento também causa maior geração de calor, porém simultaneamente observa-se o aumento da área de troca de calor. Por fim, a profundidade de usinagem é a condição de menor influência no desgaste da ferramenta, pois aumentando a profundidade de usinagem, aumenta-se também a porção de material removido por unidade de área, ou seja, um maior volume de cavaco é removido por meio de uso de uma maior porção do gume.

2.3.3 Critérios de fim de vida da ferramenta

Segundo Machado et al. (2015), controlando os fatores citados, ou seja, desgastes, avarias ou deformações, é possível determinar se uma ferramenta deve ou não ser substituída, ou ainda, reafiada durante uma operação de usinagem.

Kalpakjian (1995) afirmou que a vida da ferramenta é definida pelo tempo que a mesma trabalha efetivamente e é verificado quando ela perde sua característica de corte, dentro de um padrão pré-determinado, e alguma variável do processo é afetada, como exemplos: acabamento e rugosidade superficial, vibração e ruído da máquina, forma do cavaco, dentre outras, frisando-se que a norma ISO 3685/1993 - *Tool Life Testing with Single Point Turning* é que define a taxa de desgaste permitida para se determinar o fim da vida da ferramenta.

De acordo com Amorim (2003) esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição; este período é denominado de “tempo de vida da ferramenta de corte” (T).

Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro conforme ilustrados na Figura 14 são:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{B_{\max}} = 0,6 \text{ mm}$, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço)
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02 \text{ mm}$
- Falha catastrófica.

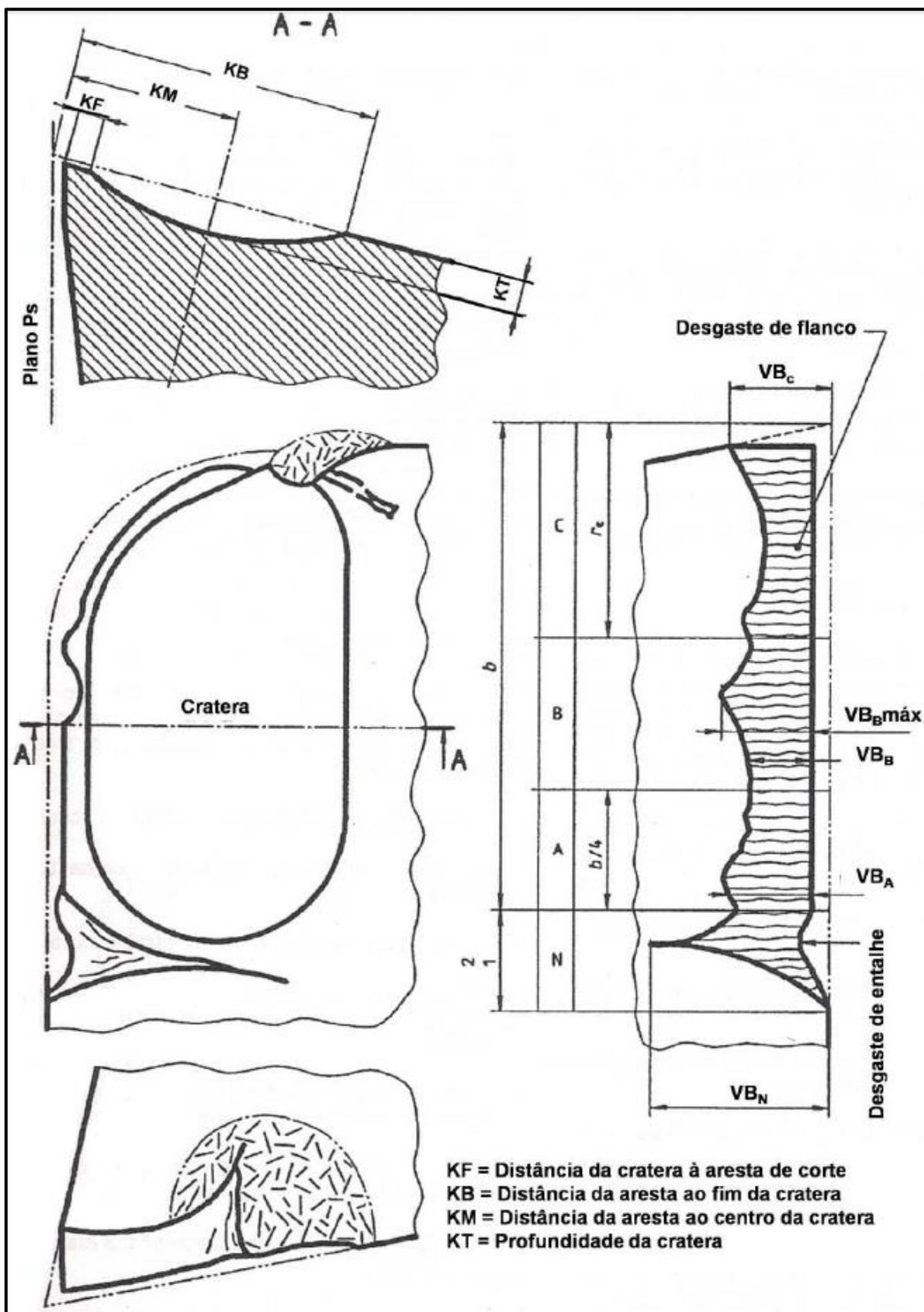


Figura 14 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte
 Fonte: Adaptado da norma ISO 3685 apud AMORIM (2003).

Para ferramentas de cerâmica, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos indicados para ferramentas de metal duro. A norma ISO 3685/93 - *Tool Life Testing with Single Point Turning*, recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um destes limites.

O critério mais comum em ensaios de vida de ferramenta é a utilização do desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3$ mm.

Ying et al. (2014), em seu estudo definiram como critério de fim de vida da ferramenta o desgaste de flanco de $VB_B=0,3$ mm no torneamento de ferro fundido cinzento HT250 e do aço de alta dureza AISI 4340, utilizando insertos cerâmicos de nitreto de silício não revestido e revestidos com TiN/AlCrO.

Jie et al. (2014) também definiram como critério de fim de vida da ferramenta o desgaste de flanco de $VB_B=0,3$ mm no torneamento contínuo do ferro fundido cinzento, utilizando insertos cerâmicos de nitreto de silício não revestido e revestidos com TiN/Al₂O₃.

Já Lutif et al. (2015), no fresamento do ferro fundido vermicular CGI com ferramenta de metal duro, utilizaram como critério de fim de vida o VB_{Bmax} de 0,2 mm.

2.4 FERRO FUNDIDO NODULAR

Por definição teórica, ferro fundido é uma liga binária de ferro (Fe) e carbono (C) acima de 2%. Entretanto, devido ao elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício (Si) torna-se necessário classificá-lo como liga ternária de Fe-C-Si (CHIAVERINI, 2008).

Consoante ao que diz Chiaverini (2008), os ferros fundidos podem ser classificados nos seguintes tipos de liga:

- Ferro fundido cinzento – apresenta como elementos fundamentais o carbono e o silício e sua estrutura possui grande parcela de carbono no estado livre (grafita lamelar, apresentado na Figura 15a) e outra parcela no estado combinado (Fe₃C);

- Ferro fundido branco – devido às condições de fabricação e menor teor de silício apresenta o carbono quase todo na forma combinada (Fe_3C);
- Ferro fundido mesclado – caracterizado por uma mescla das variáveis do ferro fundido branco e cinzento;
- Ferro fundido maleável – obtido a partir do ferro fundido branco por meio de tratamento térmico especial com praticamente toda a grafita na forma nodular.
- Ferro fundido nodular – apresenta carbono livre na forma de grafita esferoidal, demonstrado na Figura 15b, que lhe confere boa ductilidade;
- Ferro fundido de grafita compacta (vermicular) – considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular, este possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade.

O ferro fundido nodular é obtido por meio da adição controlada de pequenas quantidades de nodularizantes de magnésio ou cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido, de modo a produzir a forma desejada de grafita (esferoidal) e contrabalançar alguns elementos de liga indesejáveis tais como o titânio, chumbo, bismuto e arsênio que interferem no processo de nodulização.

A estrutura normal do ferro nodular no estado fundido bruto é constituída de uma matriz perlítica com grafita esferoidal, podendo apresentar ferrita ou cementita livre (CHIAVERINI, 2008).

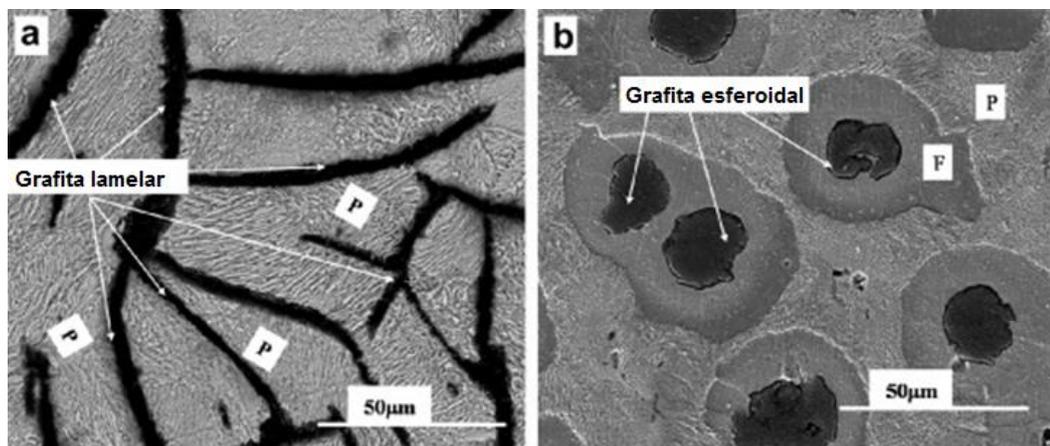


Figura 15 - a) Microscopia do Ferro fundido cinzento; b) Microscopia do Ferro fundido nodular; P = Perlita; F = Ferrita

Fonte: Cheng et al. (2014).

Os ferros fundidos nodulares, junto com os aços têm uma importância fundamental para indústria pois, a inserção de elementos de liga e a aplicação de tratamentos térmicos adequados, viabilizou o uso do ferro fundido nodular em aplicações antes exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 2008).

A principal aplicação dos ferros fundidos ocorre em peças automotivas. Este setor exige estudos constantes para melhor entender o comportamento desses materiais durante a aplicação ou o processamento. Portanto, para atendimento do setor automotivo investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos são fatores chaves no mercado (SILVA et al., 2011).

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são determinadas pela quantidade, forma, tamanho e distribuição da grafita. Independente da sua forma, lamelar ou nodular, a grafita possui a mesma estrutura cristalina e propriedades mecânicas (JUNIOR, 2003).

Destacam-se entre os ferros fundidos nodulares os de matriz ferrítica, perlítica e os de matriz ferrítica-perlítica.

O ferro fundido nodular utilizado neste estudo foi o GGG-60 segundo a norma DIN 1693 - *Cast Iron with Nodular Graphite Unalloyed and Low Alloy Grades*, é considerado perlítico/ferrítico, como pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação dos ferros fundidos nodulares

Classe	Limite de resistência a tração mín. (MPa)	Limite de escoamento (0,2%) mín. (MPa)	Alongamento mín. (%)	Estrutura
GGG-40	400	250	15	Predominantemente ferrítica
GGG-50	500	320	7	ferrítica/perlítica
GGG-60	600	380	3	perlítica/ferrítica
GGG-70	700	440	2	Predominantemente perlítica
GGG-80	800	500	2	perlítica

Fonte: Adaptado DIN 1693 (1973).

2.4.1 Usinabilidade dos ferros fundidos nodulares

Ferraresi (2003) define a usinabilidade de um metal como sendo uma grandeza tecnológica, que indica o grau de dificuldade de se usinar um determinado tipo de material quando comparado a outro tomado como padrão.

Destaca-se que a usinabilidade depende das propriedades mecânicas, dureza, composição química, operações anteriores realizadas sobre o material (a frio ou a quente) e do eventual grau de encruamento, mas é uma função das condições do processo empregado.

Trent e Wright (2000) afirmaram que o comportamento da usinagem dos ferros fundidos cinzentos e nodulares é semelhante e, portanto, pode-se utilizar técnicas similares e no que tange aos cavacos do ferro fundido nodular são mais longos, mas ainda com baixa resistência mecânica, sendo mais próximos aos cavacos dos ferros fundidos cinzentos do que aos dos aços.

Em comparação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido nodular apresenta melhores resistência mecânica, tenacidade e ductilidade, condição esta que se deve a morfologia da grafita esferoidal presente na microestrutura do material. Devido às suas melhores propriedades, o ferro fundido nodular é empregado na fabricação de componentes que necessitam de maior resistência mecânica e ao desgaste, principalmente em componentes de máquinas como cames, virabrequins, carcaças de bombas, articulações de direção, entre outros; entretanto o ferro fundido nodular possui pior usinabilidade que o ferro fundido cinzento.

Em outro ponto, em comparação de usinabilidade do ferro fundido nodular com o aço forjado recozido, a experiência adquirida pela General Motors durante a usinagem de blanques de ferro fundido nodular para a produção de engrenagens revelou melhorias na vida útil da ferramenta que variam de 20% a mais de 900%, além de melhorar a vida da ferramenta e reduzir os custos de ferramentas, a usinabilidade melhorada levou a aumentos significativos de produtividade (MULLINS, 2008). Esta boa usinabilidade atribuída aos ferros fundidos nodulares é devido a presença da grafita na estrutura, que possui densidade muito baixa sendo considerada como vazios na matriz dos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2008). A mesma atua como quebra-cavacos e aumenta a lubrificação entre a ferramenta de corte e a peça usinada, por este motivo, segundo Machado et al. (2015), geralmente na usinagem do ferro fundido não se utiliza o fluido de corte.

Neste sentido, Diniz et al. (2008) afirmaram que a utilização do fluido de corte pode transportar minúsculos cavacos até as áreas de atrito da máquina ferramenta vindo a danificá-las. Em contrapartida, Nayyar et al. (2012) em seus experimentos, concluíram que com a utilização de fluido de corte no torneamento de ferros fundidos nodulares, a vida da ferramenta é aumentada e a força de corte é diminuída e aconselham a utilização de fluidos de corte a uma velocidade de corte acima de 200 m/min, com ferramentas de metal duro revestida, pois com essas condições pode haver a adesão do material da peça de trabalho na ferramenta.

De acordo com Souza et al. (2014), a aplicação de óleo vegetal de pinhão-manso por MQL no fresamento do ferro fundido vermicular (CGI) com insertos de metal duro tem influência no efeito de diminuir a força de usinagem, a potência consumida e rugosidade média (R_a), em comparação com o corte a seco, esses valores são diminuídos respectivamente em 8%, 10% e 18%.

Carvalho et al. (2013), ao comparar resultados de vida de ferramenta na usinagem do ferro fundido nodular austemperado graus 2 (G2) e 3 (G3) segundo a ASTM, com velocidade de corte de 120 m/min, com os obtidos por Moncada et al. (1998 apud CARVALHO, 2013), verificaram que o uso de fluido de corte aumentou significativamente a vida da ferramenta: uma liga semelhante ao G2 que foi utilizada no trabalho de Moncada usinada com um inserto de metal duro, a 80 m/min sem fluido de corte, apresentou uma vida aproximada de 6 min, enquanto o G2 apresentou vida em torno de 18 min com a utilização do fluido de corte.

A usinabilidade dos ferros fundidos pode ser melhorada com a adição de elementos de liga, como exemplo, Si, Ni, Al, Cu, S que são grafitizantes, mas por outro lado a adição de Cr, Co, Mn, Mo e W é prejudicial, pois os mesmos são formadores de carbonetos que são partículas muito duras e abrasivas (DINIZ et al., 2008).

Ulvi et al. (2003) estudaram o torneamento de ferros fundidos nodulares com a adição de Ni e Cu em diferentes concentrações e obtiveram como melhor resultado em termos de esforços de corte e acabamento superficial o material com 0,7% Ni e 0,7%Cu.

Um outro indicador de usinabilidade é a dureza do ferro fundido, porém não é necessariamente um fator determinante (MACHADO et al., 2015). Nayyar et al. (2012) realizaram um estudo comparativo de vida de ferramenta no torneamento de um ferro fundido nodular perlítico com 230 HB de dureza e um ferrítico com 155 HB.

O inserto utilizado foi o CNMA 120412 KR3215 e as ferramentas utilizadas no torneamento do ferro fundido nodular ferrítico, ou seja, o de menor dureza, apresentaram vidas aproximadamente 200% maiores do que as utilizadas no ferro fundido nodular perlítico.

Em contrapartida, Carvalho et al. (2013) realizaram testes de vida com uma ferramenta de metal duro revestida e utilizaram ferro fundido nodular austemperado grau 2 (G2) e 3 (G3) segundo a ASTM e concluíram que a ferramenta de corte tem uma vida menor no torneamento do G2 com dureza de 29,2 HRC em comparação com o G3 de 38,2 HRC conforme mostra a Figura 16.

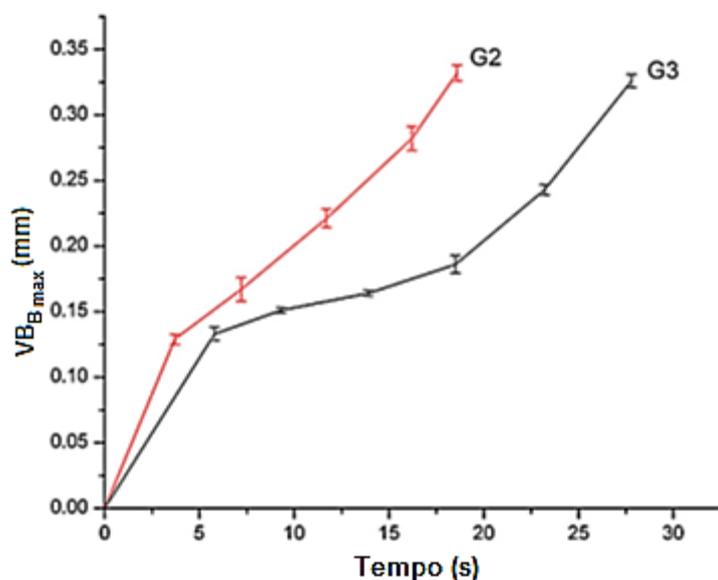


Figura 16 - Teste de vida de ferramenta. $v_c = 120$ m/min, $f = 0,18$ mm/rev. $a_p = 2$ mm

Fonte: Carvalho et al. (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho são apresentados e descritos os materiais, equipamentos e métodos dos ensaios utilizados destacando-se que os experimentos de usinagem foram realizados no laboratório de CNC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio. A Figura 17 mostra o fluxograma do desenvolvimento dos experimentos realizados.

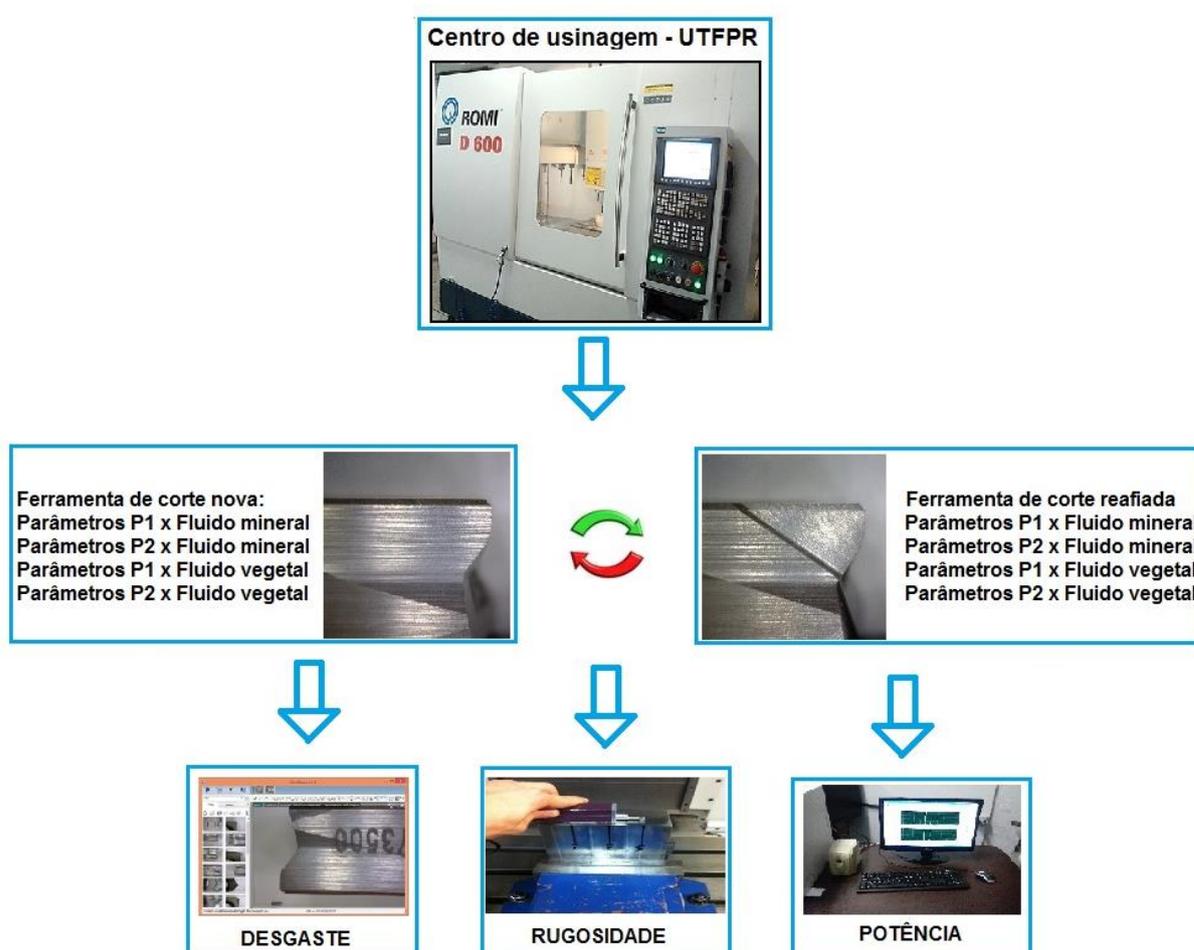


Figura 17 – Fluxograma do processo realizado

Fonte: Autoria própria.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CORPO DE PROVA

O material do corpo de prova utilizado nos ensaios foi o ferro fundido nodular, cuja designação é GGG-60, esses blocos foram fornecidos pela empresa Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA de forma retangular de dimensões padrão de 215 mm x 140 mm x 130 mm conforme observado na Figura 18a.

Os corpos de prova foram cortados dos blocos fundidos, esquadrejados e pré usinados com o objetivo de se remover a camada bruta de fundição e evitar influência desta no desgaste das ferramentas, informa-se que os corpos de provas tinham uma dimensão de 135 mm x 130 mm x 50 mm, Figura 18b.

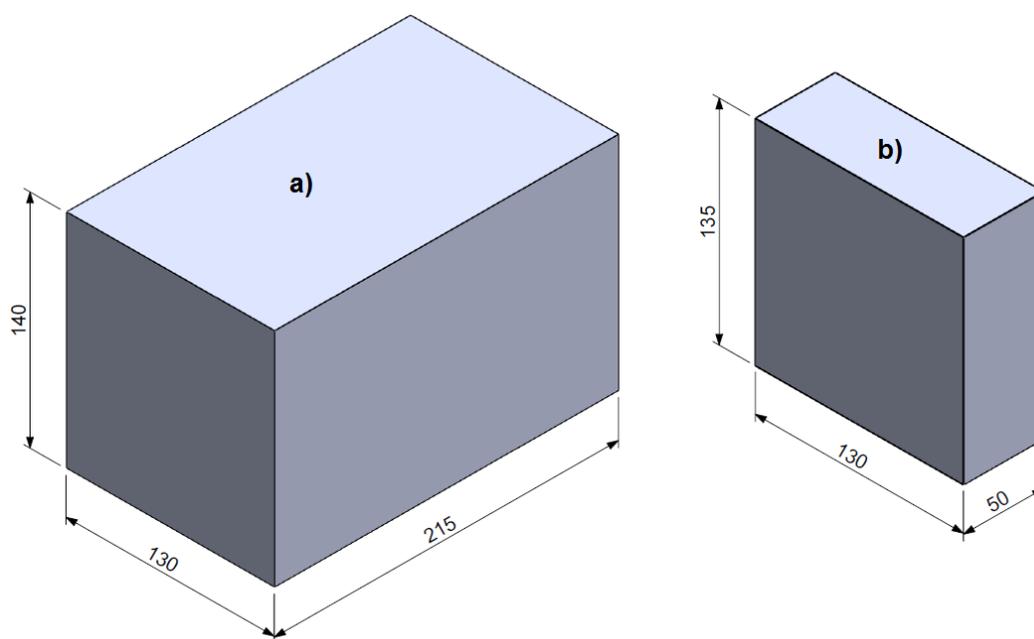


Figura 18 – a) Blocos do material do corpo de prova e b) corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem

Fonte: Autoria própria.

Todos os ensaios mecânicos e químicos foram realizados pelo Laboratório de Análises e Ensaios da empresa Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA e a composição química do material é apresentada na Tabela 4 obtida pelo ensaio de espectroscopia; o equipamento utilizado foi o espectrômetro SPECTROMAXx.

Com relação às propriedades mecânicas do material apresentadas na Tabela 5, as mesmas foram obtidas pelo ensaio de tração e o equipamento utilizado foi a máquina universal de tração KRATOS ECC.

Tabela 4 - Composição química dos corpos de prova de Ferro Fundido Nodular GGG60 (% em peso)

Porcentagem em peso dos elementos químicos do corpo de prova									
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: Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA (2014).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas das amostras de Ferro Fundido Nodular GGG60

Propriedade	Valor
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: Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA (2014).

A microestrutura dos ferros fundidos nodulares GGG60 consiste de uma matriz perlítica/ferrítica com a grafita em forma de nódulos. A metalografia do ferro fundido nodular GGG-60 com ataque de solução nital (2% de concentração) é mostrada na Figura 19 e os resultados quantitativos da análise metalográfica são sintetizados na Tabela 6.

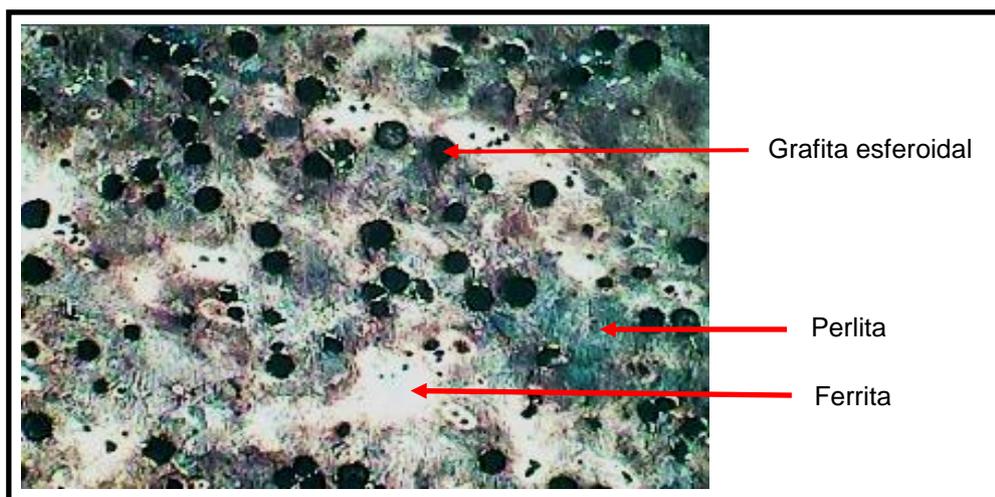


Figura 19 - Micrografia do ferro fundido nodular GGG60 com nital 2%
 Fonte: Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA (2014).

Tabela 6 - Porcentagem de perlita e caracterização da grafita dos materiais usinados

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

Fonte: Multimetal Indústria Metalúrgica LTDA (2014).

3.2 FERRAMENTAS DE CORTE

Foram utilizadas duas condições de ferramentas nos ensaios deste trabalho: ferramenta nova e reafiada.

Consoante as ferramentas de corte novas que foram utilizadas como referência em termos de comparação com os experimentos apresentados nesse trabalho foram fornecidas pela empresa Markvision Comércio e Representação de Ferramentas; fabricadas exclusivamente pela empresa Kennametal Inc. e é comercialmente codificadas como SPHX 1205 PCTRG PBK - KY3500; as mesmas possuem 8 gumes, consignando que se trata de uma ferramenta de cerâmica fabricada com nitreto de silício puro (Si_3N_4), conhecida como Sialon, sendo

equivalente a classe ISO K20, ou seja, específica para usinagem de ferro fundido, utilizada com altas taxas de avanço para a usinagem de desbaste, incluindo a usinagem com cortes interrompidos.

Observa-se que para os ferros fundidos, de acordo com o fabricante, as faixas recomendadas para os parâmetros de corte são as seguintes:

v_c - 527 - 633 m/min;

f_z - 0,10 – 0,43 mm/dente para um a_e de 50 a 100%

A Figura 20 apresenta a imagem e o modelo da ferramenta de corte que foi utilizada nos experimentos. Vale ressaltar que os insertos intercambiáveis têm seus ângulos de corte definidos, porém podem ser alterados quando fixos no suporte. Neste caso os planos e os ângulos foram definidos na posição real de corte, ou seja, já fixada no suporte. A Figura 21 mostra a configuração dos ângulos da ferramenta nova.

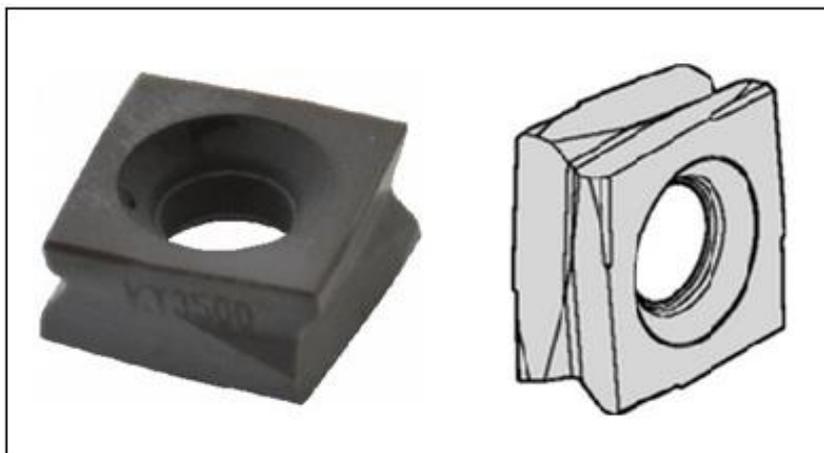


Figura 20 - Ferramenta SPHX 1205 PC TRG PBK - KY3500
Fonte: Kennametal (2014).

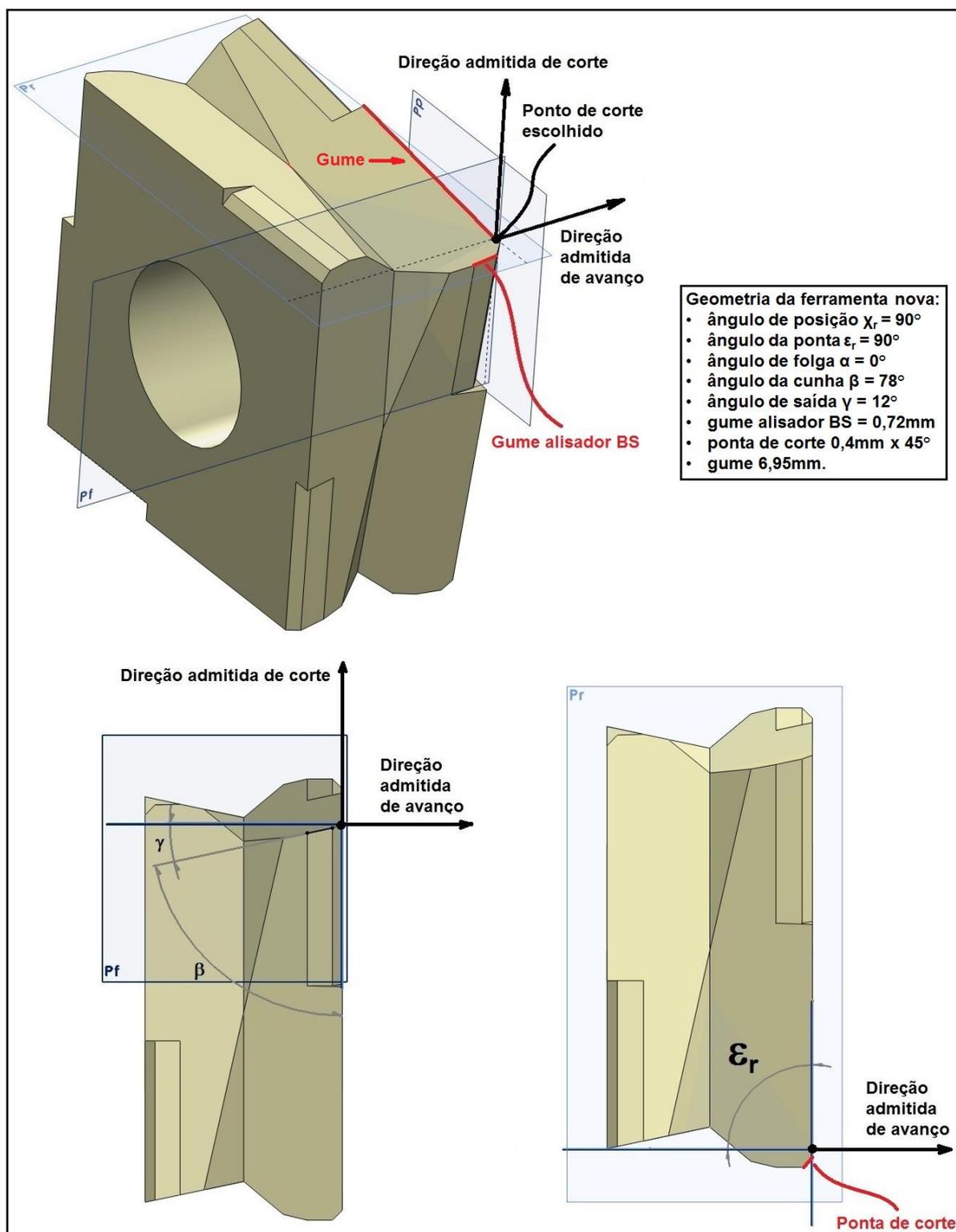


Figura 21 - Ângulos da cunha de corte e planos do sistema de referência da ferramenta
 Fonte: Autoria própria (2015).

Realça-se que para referida fixação das duas condições de ferramentas, ou seja, nova e reafiada, utilizou-se o mesmo cabeçote de fresar, não havendo necessidade de adaptação para a ferramenta reafiada, e o mesmo é codificado como 50A05RP90SP12CUFP cujas características são: diâmetro 50 mm, arraste por chaveta, 5 insertos, corte a direita, fixação pelo furo, ângulo de posição 90° conforme mostrado na Figura 22.



Figura 22 - Cabeçote de fresar 50A05RP90SP12CUFP
Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios, utilizou-se apenas um inserto cortante fixado no cabeçote de fresar. Os outros quatro insertos foram desbastados no esmeril para não entrarem em contato com a peça. Os mesmos serviram de contrapeso para o balanceamento do cabeçote, conforme mostrado na Figura 23.

Richetti et al. (2004) estudaram a influência do número de insertos fixados no cabeçote de fresar para avaliação da vida da ferramenta na usinagem de aços e concluíram que essa prática pode ser utilizada como índice de comparação da usinabilidade entre duas ou mais condições de usinagem.

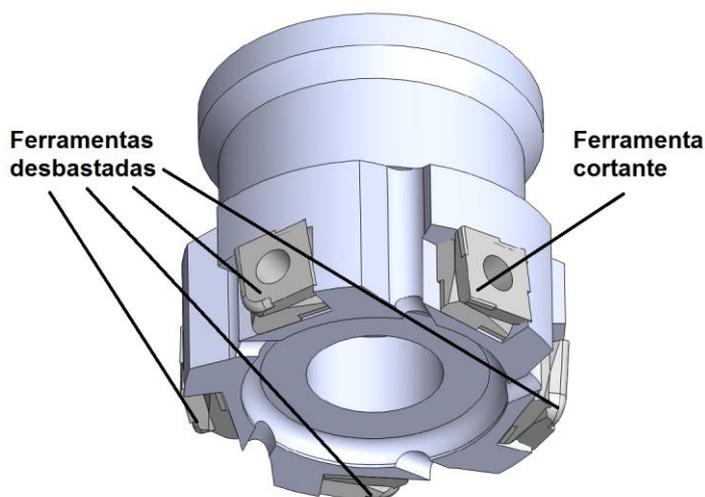


Figura 23 – Posicionamento das ferramentas no cabeçote de fresar

Fonte: Autoria própria.

A usinagem do corpo de prova ocorreu sempre no mesmo sentido, sendo executado 5 passes com $a_p = 0,5$ mm (conforme esquema da Figura 24), o que representa 2,5 mm de profundidade total e 0,31 m de comprimento usinado perfazendo um total de 15625 mm^3 de material removido. Após a usinagem a ferramenta foi retirada do suporte para medição do seu desgaste e da rugosidade superficial da peça. Nessas paradas também eram anotadas as captações do consumo de potência.

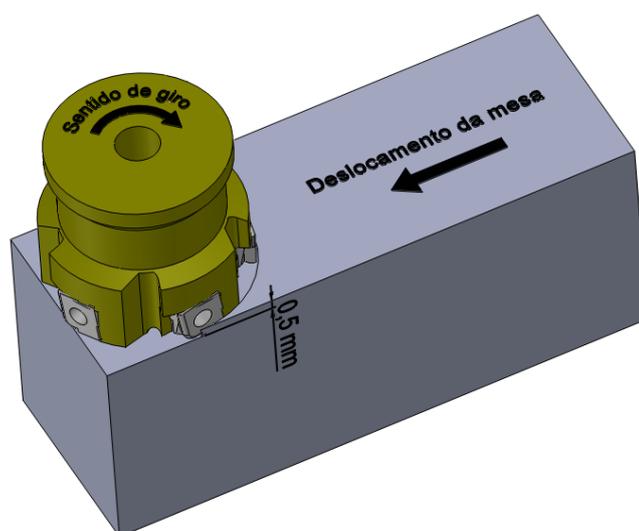


Figura 24 – Esquema da usinagem

Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Afição da ferramenta de corte

As ferramentas reafiadas utilizadas nos experimentos foram fornecidas pela empresa IKF Serviços e Ferramentas do Brasil, onde as mesmas recebem a igual codificação das ferramentas novas e os parâmetros de corte indicados também são os mesmos da ferramenta nova.

Acentua-se que na reafiação das ferramentas não há alteração dos ângulos de corte, pois a mesma é realizada apenas na superfície de saída, onde ela é diminuída em 0,25 mm e que a maior alteração fica por conta do gume que inicialmente tinha 6,95 mm de comprimento e após a reafiação o mesmo passa para 3,74 mm; assim esse valor será a máxima profundidade de corte que a ferramenta reafiada pode atingir, sendo esse valor, 47% menor que a ferramenta nova. Houve também uma diminuição no volume da ferramenta reafiada em cerca de 2% em relação a nova, uma vez que a ferramenta nova tem um volume de 521.4 mm³ e a ferramenta afiada um volume de 512,9 mm³.

Destaca-se, na ótica ambiental, que o processo de reafiação é realizado a seco, não havendo utilização de fluido de corte, devido a pequena remoção de material; isto torna a ferramenta reafiada altamente sustentável já que o seu descarte é retardado e o processo de reafiação é considerado um processo limpo.

A Figura 25 mostra a afiação e a Figura 26 a configuração dos ângulos da ferramenta reafiada.

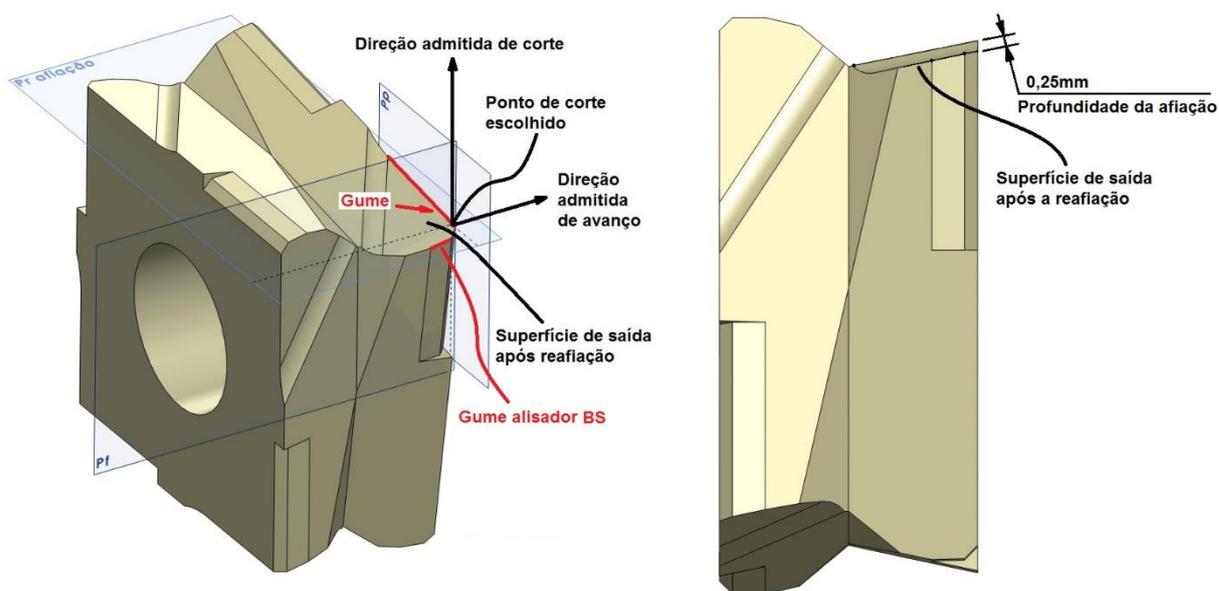


Figura 25 - Planos do sistema de referência da ferramenta reafiada
Fonte: Autoria própria.

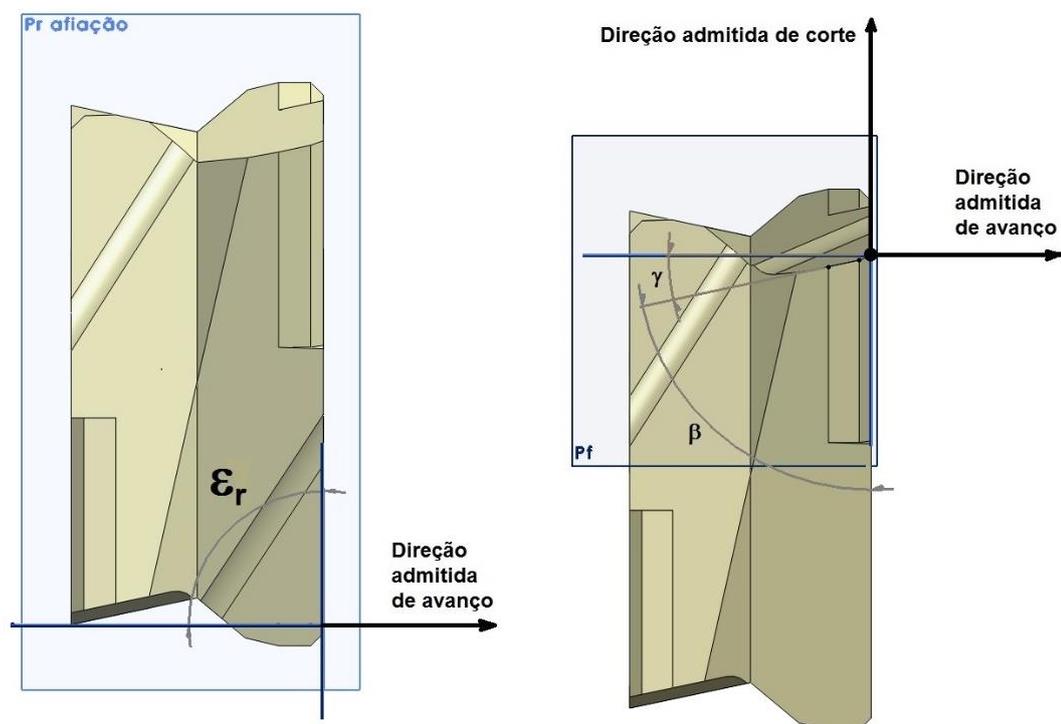


Figura 26 - Ângulos da cunha de corte da ferramenta reafiada
Fonte: Autoria própria.

A Figura 27a mostra a superfície de saída e o gume da ferramenta nova e a 27b mostra a superfície de saída e o gume da ferramenta reafiada.

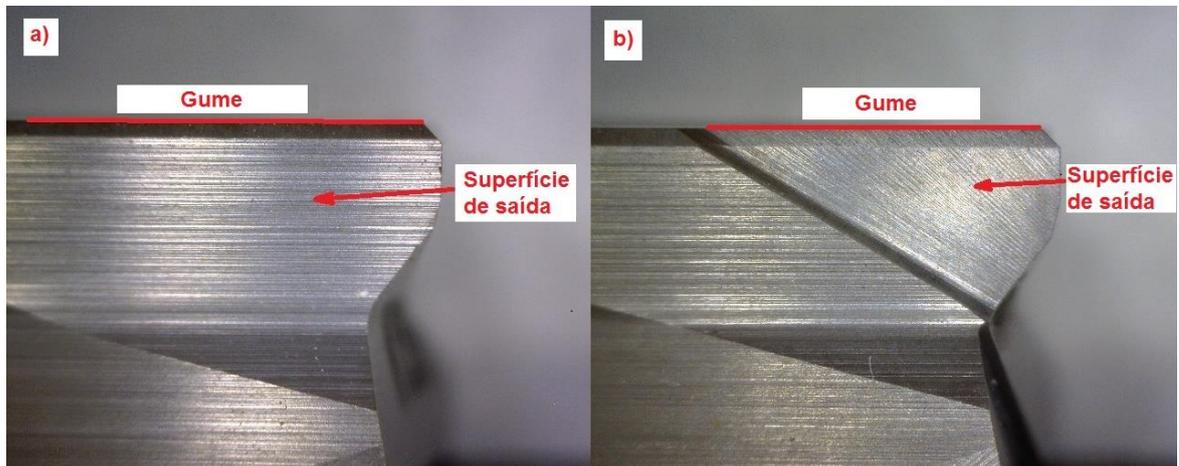


Figura 27 – Comparação da geometria entre as ferramentas: a) nova e b) reafiada
Fonte: Autoria própria (2015).

3.3 FLUIDOS DE CORTE

Geralmente a usinagem do ferro fundido é realizada a seco em virtude da presença da grafita e do sulfeto de manganês em sua microestrutura; isso porque a grafita tem ação lubrificante e o sulfeto de manganês favorece a quebra do cavaco. Entretanto, devido a forma da grafita, nos ferros fundidos nodulares a quebra do cavaco não ocorre tão facilmente como nos outros e o cavaco permanece mais tempo em contato com a ferramenta, neste caso a utilização do fluido de corte é recomendada (GUESSER, 2009).

Assim também ocorre com a utilização de ferramentas cerâmicas na usinagem. Por possuírem baixa condutividade térmica e alto coeficiente de expansão térmica, o uso do fluido de corte pode causar trincas superficiais na ferramenta, todavia, as ferramentas cerâmicas a base de nitreto de silício são menos suscetíveis a esse problema e assim o uso do fluido de corte pode prolongar a vida da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Nessa perspectiva, os fluidos de corte utilizados nos experimentos foram o óleo mineral solúvel semissintético ROCOL ULTRACUT 360° e o óleo solúvel de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*), ambos foram aplicados por inundação. O óleo mineral foi utilizado por se tratar do fluido aplicado no processo original, já o óleo vegetal foi empregado com fins de sustentabilidade, pois se trata de um fluido extraído de fontes renováveis, já que esse também é um dos propósitos do presente trabalho.

Neste ângulo, Lutif et al. (2015) estudaram a aplicação de diferentes bases de fluido de corte no fresamento do ferro fundido vermicular (CGI) pela técnica de aplicação por MQL e verificaram que o fluido vegetal de pinhão manso teve um desempenho melhor quando comparado com um fluido mineral com a mesma concentração, ou seja, 8%, nos ensaios de vida da ferramenta. De acordo com o autor, esse fato se deve, pois, os óleos vegetais possuem maior quantidade de ácidos graxos insaturados e cadeias carbônicas longas, todavia o resultado é invertido quando o assunto é consumo de potência, onde o fluido mineral leva vantagem em relação ao fluido vegetal de pinhão manso.

O óleo solúvel semissintético ROCOL ULTRACUT 360° é composto por óleos lubrificantes, tenso-ativos e inibidores de corrosão e foi fornecido pela ITW Chemical Products Ltda. As propriedades deste fluido estão na Tabela 7 e a diluição foi de 1 litro de concentrado de óleo para 40 litros de água, sendo uma concentração de 2,5%, concentração essa que é a utilizada pela empresa e foi mantida nos ensaios.

Tabela 7 - Propriedades físicas e químicas do óleo mineral

Propriedades físicas e químicas	Dados característicos
Estado físico	Líquido
Odor	Característico
Cor visual	Amarelado
pH (diluído a 6,0% em H₂O)	8,5 a 9,9
Ponto de ebulição	>100°C
Faixa de destilação	NA
Ponto de fulgor	NA
Temperatura de autoignição	NA
Limites de explosividade	ND
Limite de explosividade inferior	ND
Limite de explosividade superior	ND
Densidade (a 20/ +/- 3°C): g/ml	Min. 0,950 / Máx. 1,033
Solubilidade	Parcialmente solúvel em hidrocarbonetos alifáticos
Solubilidade em água	Solúvel em água

Fonte: Adaptado de FISPQ, 2009.

Já o óleo solúvel de base vegetal de Pinhão-manso (*Jatropha curcas*) foi desenvolvido e caracterizado 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 óleo vegetal estão na Tabela 8 e igualmente ao fluido mineral, a diluição foi de 1 litro de concentrado de óleo para 40 litros de água, sendo uma concentração de 2,5%.

Tabela 8 - Propriedades físicas e químicas do óleo vegetal

Propriedades físicas e químicas	Dados característicos
Estado físico	Líquido turvo
Odor	Característico
Cor visual	Castanho/âmbar a marrom
pH (diluído a 5,0% em H₂O)	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
Limites de explosividade	---
Limite de explosividade inferior	NA
Limite de explosividade superior	NA
Densidade (a 20/4°C): g/cm³	0,950
Solubilidade	Solúvel em éster e gorduras
Solubilidade em água	Solúvel em água

Fonte: Adaptado de SOUZA (2014).

3.4 MÁQUINA-FERRAMENTA

Para a realização dos ensaios de usinagem, utilizou-se um centro de usinagem ROMI D 600 pertencente ao Laboratório de CNC da UTFPR Câmpus de Cornélio Procópio, sendo que as características da referida máquina são apresentadas na tabela 9:

Tabela 9 - Especificações técnicas da máquina-ferramenta ROMI D 600

Característica	Especificações
Cone do eixo-árvore	ISO 40
Faixa de velocidades	7 a 7500 rpm
Curso da mesa superior (eixo X)	600 mm
Curso da mesa inferior (eixo Y)	530 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	580 mm
Superfície da mesa	840 x 500 mm
Largura das ranhuras x distância	18 x 89 mm
Número de ranhuras (rasgos "t")	5 un
Peso admissível:	800 kg
Capacidade de ferramentas	20 un.
Diâmetro máximo da ferramenta	80 mm
Comprimento máximo da ferramenta	254 mm
Comando Numérico	Fanuc Oi-md
Potência instalada motor principal	15 cv
Potência total instalada	30 Kva
Sistema de refrigeração de corte com pressão	2 bar, vazão 20 l/min

Fonte: Adaptado de ROMI (2014).

3.5 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte foram definidos por meio das bibliografias pesquisadas, trabalhos existentes e dos dados fornecidos pelo fabricante da ferramenta, após os pré-testes foram determinados dois parâmetros P1 e P2 para obtenção do melhor desempenho da ferramenta, os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Parâmetros	P1	P2
Avanço (f_z) mm/dente	0,044	0,022
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
a_e	100%	100%

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios de usinagem foram realizados priorizando a análise do desgaste de flanco médio do gume principal, durante o fresamento frontal do ferro fundido nodular GGG-60. O Quadro 3.1 mostra as variáveis dos experimentos.

Quadro 3 – Variáveis do experimento

Variáveis		Especificações
Fluido de corte	Vegetal	Pinhão-manso
	Semissintético	Rocol Ultracut 360°
Parâmetros de corte	Parâmetros P1	$v_c = 864$ m/min $v_f = 1200$ mm/min $a_p = 0,5$ mm
	Parâmetros P2	$v_c = 1000$ m/min $v_f = 700$ mm/min $a_p = 0,5$ mm
Ferramentas	Inserto novo	SPHX 1205 PCTRG PB KY3500
	Inserto reafiado	SPHX 1205 PCTRG PB KY3500

Fonte: Autoria própria.

Para aumentar a confiabilidade nos resultados dos experimentos foram efetuados um ensaio e duas réplicas de cada condição.

3.6 MONITORAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Para a análise das imagens e monitoramento do desgaste de flanco da ferramenta de corte, utilizou-se um microscópio digital portátil da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313T com ampliação de até 200x, com o auxílio do software para medição DinoCapture 2.0.

A medição do desgaste da ferramenta foi até que o mesmo atingisse o seu valor médio de $VB_B = 0,3$ mm no flanco da ferramenta, determinando seu fim de vida, limite esse determinado com base nas literaturas pesquisadas e na norma ISO 3685/93 - *Tool Life Testing with Single Point Turning*.

Para analisar os mecanismos de desgastes das ferramentas utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Zeiss, modelo EVO-MA15 do laboratório de microscopia eletrônica da UTFPR - Câmpus Curitiba.

Foram preparadas oito ferramentas, sendo um gume para cada condição ensaiada e em sequência as ferramentas foram imersas em álcool isopropílico, limpas por ultrassom por 10 minutos e secas com ar quente. Posteriormente, devido as ferramentas serem de material cerâmico, ou seja, más condutoras de eletricidade, as mesmas foram recobertas com uma fina camada de ouro.

Para a determinação da composição química da ferramenta, após os ensaios, com o objetivo de verificar-se a possível difusão do material usinado, utilizou-se a espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X (EDX: *Energy Dispersive X-ray*), ressaltando que este procedimento foi realizado no mesmo microscópio eletrônico por varredura (citado anteriormente), o qual conta com um detector apropriado. A técnica consiste em incidir um feixe de elétrons na amostra, de modo que 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.

3.7 MONITORAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

No Brasil a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 4287/2002 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade - prevê alguns parâmetros de rugosidade, como por exemplo, os parâmetros utilizados neste trabalho que foram: Ra, Rt e Rz.

O Ra (*roughness average*) significa rugosidade média que é definida como o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil em relação a uma linha média dentro de um percurso de medição L.

O Rt é rugosidade total e é definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, em um dado percurso de medição L.

O parâmetro Rz, é a média da soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.

Os dados de rugosidade superficial (Ra, Rt, Rz) foram retirados a cada passe, juntamente com a medição de desgaste, e em três posições distintas equidistantes do corpo de prova 33 mm a partir da face inicial da usinagem, de acordo com a Figura 29. Foram realizadas uma medição e duas réplicas em cada ponto. O esquema de medição de rugosidade é mostrado na Figura 28.

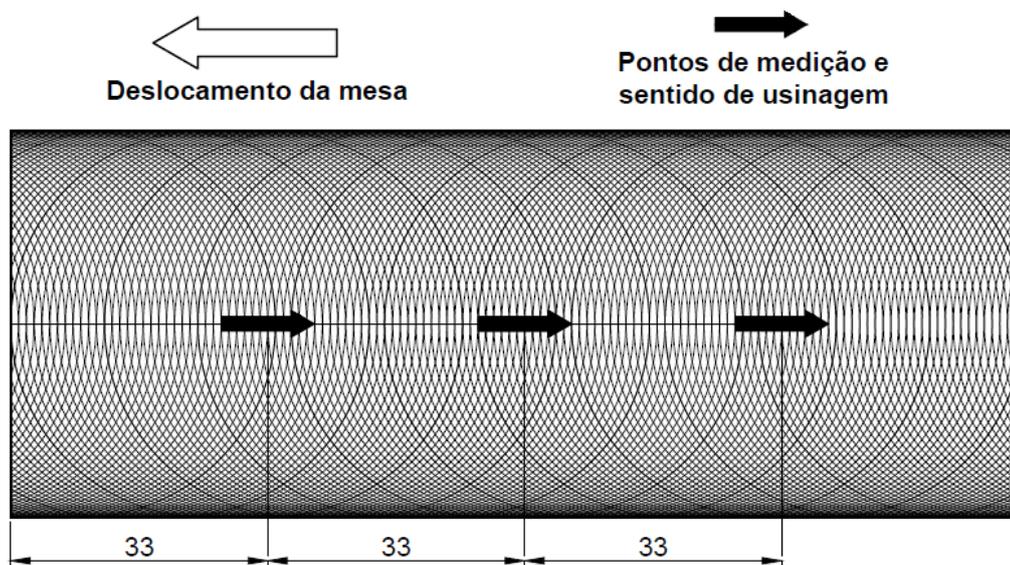


Figura 28 - Esquema da vista superior da face usinada com as indicações dos pontos e sentido de medição da rugosidade

Fonte: Autoria própria.

Para medir a rugosidade superficial da peça foi empregado um rugosímetro digital portátil da Mitutoyo, modelo SJ-201P.

Os parâmetros utilizados foram baseados na norma ISO 4287/2000, os quais são: *cutoff* (λ_c) de 0,8 mm e avanço de 0,5 mm/s, dados esses que foram coletados nos mesmos intervalos da medição do desgaste.

Na Figura 29a é mostrada a fixação do corpo de prova e na 29b, a marcação dos pontos para medição da rugosidade superficial.



Figura 29 - a) Fixação do corpo de prova – b) Pontos de medição da rugosidade superficial

Fonte: Autoria própria.

3.8 AQUISIÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA

Para a medição do consumo de potência durante os ensaios, utilizou-se um Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120 da KRON®. O medidor foi instalado na máquina-ferramenta ROMI D600 e o mesmo foi interligado a um computador, Figura 30, e por meio do software LabVIEW o qual forneceu a potência elétrica trifásica consumida pela máquina com um intervalo de 1s a cada medida. Esses dados foram captados somente durante a usinagem, ou seja, somente quando houve contato ferramenta/peça, em seguida, os resultados foram tabulados em planilhas, as quais geraram os gráficos de consumo de potência. A Tabela 11 mostra as características de medição do equipamento.

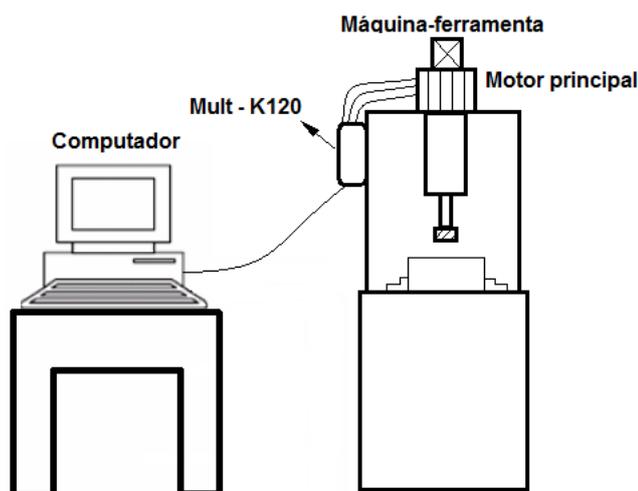


Figura 30 – Esquema da captação do consumo de potência

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Precisão do Medidor de Energia e 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.

O objetivo da coleta digital dos dados de potência consumida durante a usinagem foi de monitorar indiretamente a potência de corte para saber se o tipo da ferramenta influencia no consumo de energia e identificar o comportamento da ferramenta durante o corte caso houvesse oscilação, vibração ou mesmo deflexão da haste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os experimentos, são apresentados e discutidos os resultados de desempenho de corte obtidos durante a usinagem de fresamento do ferro fundido nodular GGG-60 com a utilização do inserto de cerâmica SPHX 1205 PCTRG PB KY3500 novo e reafiado.

4.1 DESGASTE DA FERRAMENTA

A norma ISO 3685/93 - *Tool Life Testing with Single Point Turning*, foi aplicada como referência para os experimentos realizados. O critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3$ mm.

A Tabela 12 mostra os resultados de desgaste obtidos de acordo com o planejamento experimental apresentado no apêndice A.

Tabela 12 - Desgaste da ferramenta e comprimento usinado para todos os ensaios realizados.
(continua)

Teste	Ferramenta	Parâmetros	Fluído	Desgaste (mm)	Comprimento usinado (m)
1	IN	P1	FM	0,36	1,56
2	IN	P1	FM	0,4	1,56
3	IN	P1	FM	0,38	1,56
4	IN	P2	FM	0,37	0,94
5	IN	P2	FM	0,59	0,94
6	IN	P2	FM	0,34	0,94
7	IR	P2	FM	0,51	0,94
8	IR	P2	FM	0,32	0,94
9	IR	P2	FM	0,32	0,94
10	IR	P1	FM	0,33	1,56
11	IR	P1	FM	0,32	1,56
12	IR	P1	FM	0,32	1,56
13	IN	P1	FV	0,36	1,25
14	IN	P1	FV	0,48	1,25

Tabela 12 - Desgaste da ferramenta e comprimento usinado para todos os ensaios realizados (conclusão)

Teste	Ferramenta	Parâmetros	Fluído	Desgaste (mm)	Comprimento usinado (m)
15	IN	P1	FV	0,3	0,94
16	IN	P2	FV	0,31	0,94
17	IN	P2	FV	0,53	0,94
18	IN	P2	FV	0,3	0,94
19	IR	P2	FV	0,39	0,94
20	IR	P2	FV	0,66	0,94
21	IR	P2	FV	0,41	0,94
22	IR	P1	FV	0,3	0,63
23	IR	P1	FV	0,38	1,25
24	IR	P1	FV	0,4	1,25

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 31, a média do desgaste das ferramentas nova (IN) e reafiada (IR) foram comparadas com o comprimento usinado, utilizando parâmetros de corte P1 fluido de corte mineral (FM), onde verificou-se que as duas ferramentas atingiram o seu desgaste máximo após 1,56 m de comprimento usinado. Por esse motivo, pode-se dizer que houve uma equivalência entre as duas ferramentas, após a medição, notou-se um desgaste médio para IN de 0,38 mm e para IR de 0,32 mm.

No entanto, interpolando o gráfico, observa-se que de acordo com o planejamento experimental, o qual foi definido um desgaste médio de 0,3 mm, a IR usinou um comprimento de 1,47 m, já a IN usinou um comprimento de 1,31 m, neste ponto tem-se um desempenho melhor da IR com uma diferença de 12% em relação a IN.

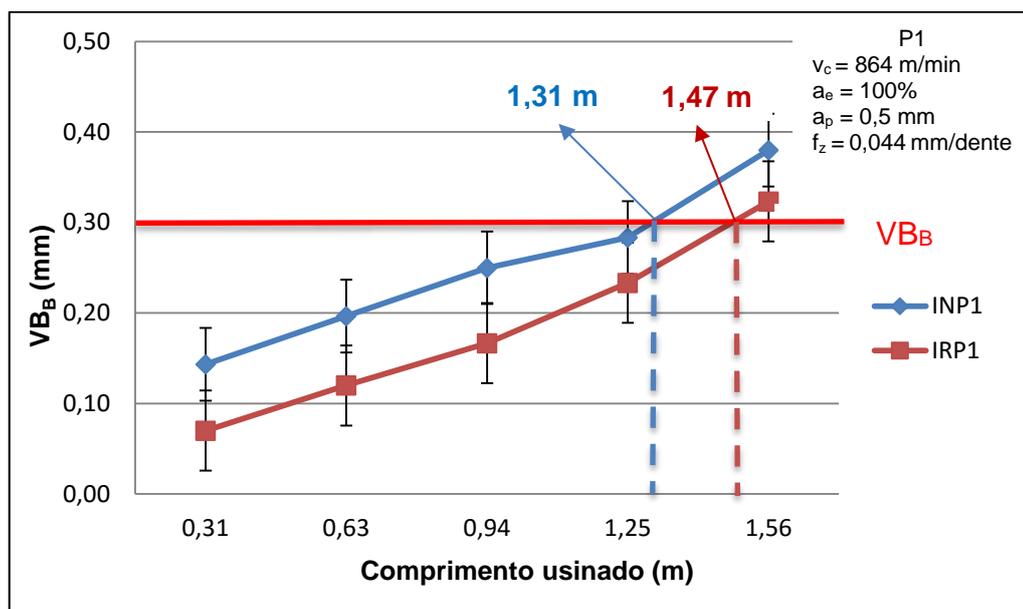


Figura 31 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P1 utilizando fluido de corte mineral (FM)

Fonte: A autoria própria.

De igual forma, os dois tipos de ferramentas foram comparados entre si com parâmetros de corte P2 também com utilização de fluido de corte mineral (FM), porém neste caso elas atingiram seu desgaste máximo após 0,94 m de material usinado como mostrado na Figura 32.

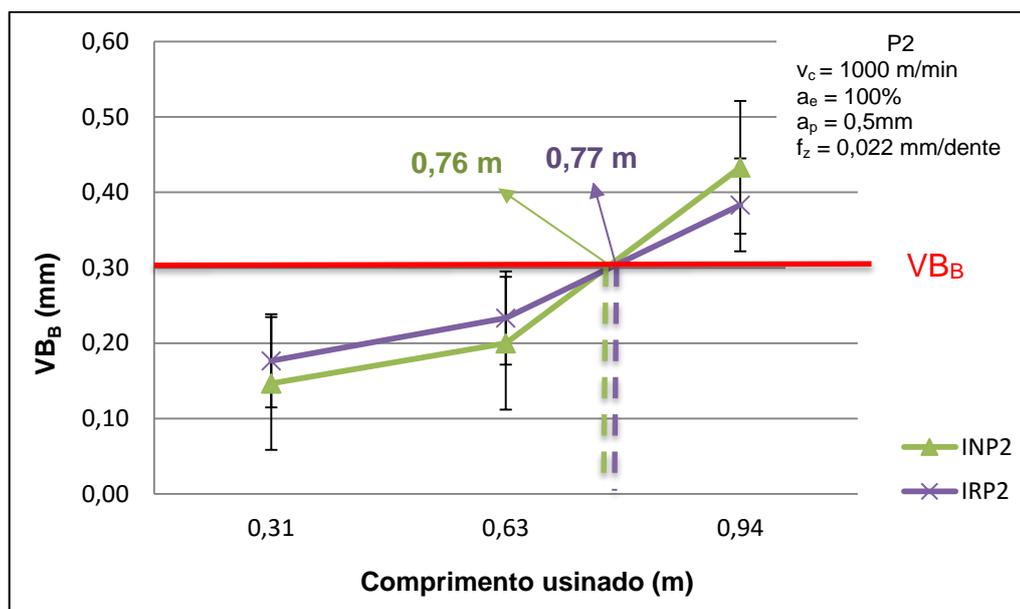


Figura 32 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P2 utilizando fluido de corte mineral (FM)
 Fonte: Autoria própria.

Com estas condições, houve também uma linearidade, porém com um desgaste ligeiramente maior da IR no início da usinagem, ou seja, 0,31 m de material usinado, com um desgaste superior em 20% em relação a IN, porquanto ao fim da vida o desgaste da IN foi maior que a IR e essa diferença foi de 12%, após a medição do desgaste com 0,94 m de material usinado, notou-se um desgaste para IN de 0,43 mm e para IR de 0,38 mm.

Quando interpolado o gráfico para verificar o comprimento usinado com o desgaste pré-definido de 0,30 mm, observa-se uma equivalência entre as duas ferramentas, mas com uma pequena vantagem para a IR que usinou 0,77 m de material contra 0,76 m da IN, o que representa uma diferença de 0,98%.

Já quando foram comparados os dois parâmetros utilizados em relação ao desgaste, foi verificada uma grande diferença, neste caso pode-se dizer que as ferramentas, tanto a IN quanto a IR tem um ganho expressivo no desempenho quando utilizados os parâmetros P1 com fluido de corte mineral (FM), já que com os parâmetros P2 as ferramentas atingiram o desgaste final após 0,94 m de material usinado e com os parâmetros P1 as ferramentas atingiram o desgaste após 1,56 m de material usinado, isso pode ser verificado na Figura 34.

Tal circunstância pode ser explicada, uma vez que a velocidade de corte para o parâmetro P1 foi diminuída em relação a P2 em 13,6%, ou seja, a velocidade de corte para P1 foi de 864 m/min, já para P2 foi de 1000 m/min, diga-se que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia negativamente na vida da ferramenta, pois com o aumento da mesma, aumenta-se o atrito entre a ferramenta e a peça elevando também a temperatura na zona de corte (DINIZ et al., 2008). Wit et al. (2014), verificaram que velocidades de cortes menores aumentaram a vida da ferramenta de corte de cerâmica Si_3N_4 no torneamento do ferro fundido nodular mostrado na Figura 33.

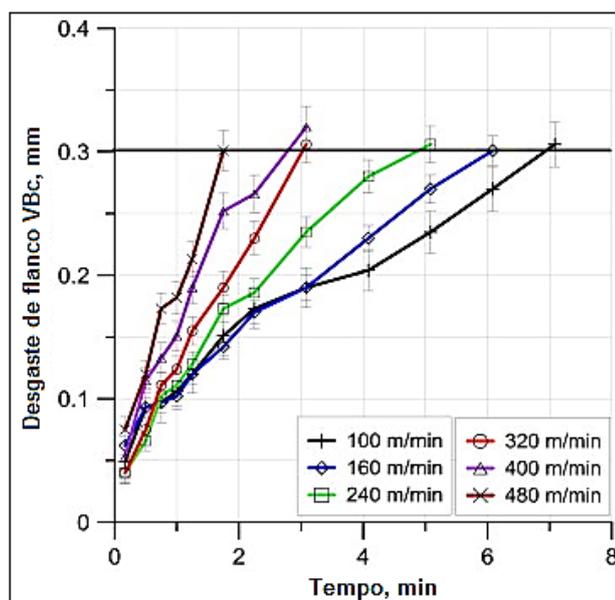


Figura 33 – Desgaste de flanco VBc vs. Tempo de corte para diferentes velocidades de corte e avanço de corte de 0,08 mm/rev

Fonte: Adaptado Wit et al. (2014).

Comparando as ferramentas entre si no momento em que elas atingiram o desgaste de 0,30 mm, com os dois parâmetros, exibido na Figura 31, obteve-se um rendimento maior para as usinagens com P1 com uma diferença de 42% entre as IN, uma vez que com os parâmetros P1 foi usinado 1,31 m e com parâmetros P2 0,76 m, todavia a diferença entre as IR é um pouco maior, 48%, sendo que com P1 foi usinado 1,47 m e com P2 usinou 0,77 m.

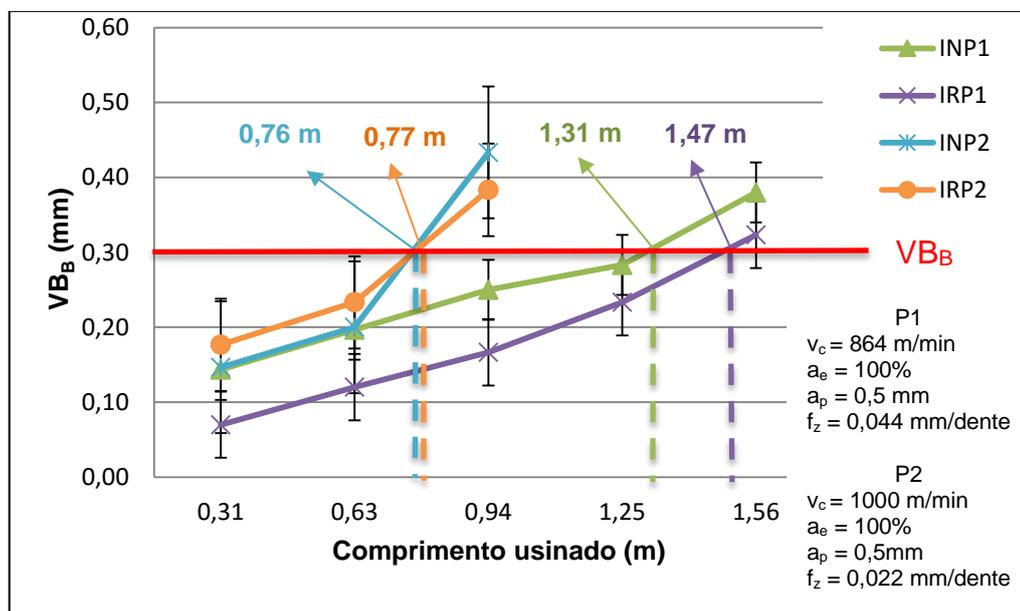


Figura 34 - Comparação do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros P1 e P2 utilizando fluido de corte mineral (FM)

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma como observado por Moura (2012) que avaliou o desempenho de ferramentas novas e reafiadas de metal duro com diferentes revestimentos no fresamento de aço para matrizes VP20ISO F, aqui também pode ser observado que há uma tendência da ferramenta reafiada apresentar menores desgastes que as ferramentas novas; entretantes isso não é confirmado pela análise estatística, com 95% de confiabilidade, colocando as duas ferramentas no mesmo patamar de desempenho.

Em outra situação, as ferramentas de corte IN e IR com parâmetros P1 e P2 são comparadas em relação ao desgaste, porém com a utilização de um fluido de corte vegetal. Bork et al. (2014) mostraram em seus estudos que a vida da ferramenta de metal duro pode ser elevada em até 30% se utilizado fluido de corte vegetal em comparação ao fluido mineral no fresamento da liga de alumínio 7050-T7451. Observa-se que neste caso, além do ganho em relação ao desgaste da ferramenta há também um ganho em relação a sustentabilidade do processo, já que o fluido vegetal é obtido de fontes renováveis e há um retardo no descarte da ferramenta.

A Figura 35 mostra a comparação de desgaste das ferramentas IN e IR em relação ao comprimento de material usinado utilizando parâmetros de corte P1 e fluido de corte vegetal (FV); aqui a IN teve o desgaste com 1,25 m de comprimento usinado, rendimento este que foi 25% maior em relação a IR que teve o desgaste atingido 0,94 m de comprimento usinado, onde notou-se uma linearidade entre as duas condições nos dois primeiros passes, com a ressalva de que foi observado ao final da vida da IN um desgaste de 0,38 mm e para o IR um desgaste de 0,32 mm.

Já na interpolação do gráfico para verificar o comprimento usinado quando as ferramentas atingiram o desgaste pré-definido de 0,30 mm a diferença de rendimento é de 21% superior para a IN, que usinou 0,97 m de material contra 0,77 m de material da IR.

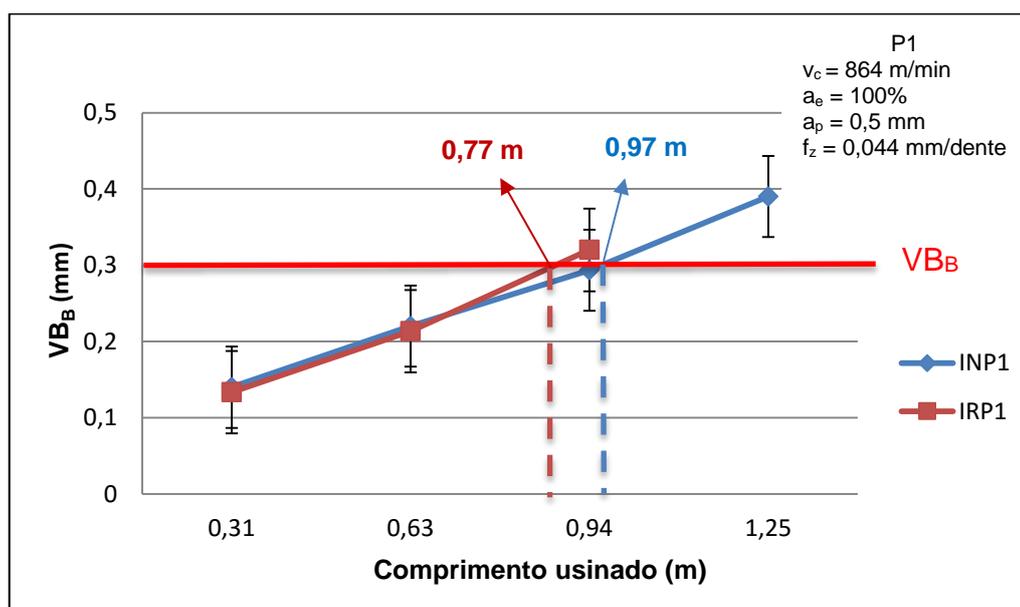


Figura 35 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P1 utilizando fluido de corte vegetal (FV)

Fonte: Autoria própria.

Quando os dois tipos de ferramentas foram comparados entre si com parâmetros de corte P2 também com utilização de fluido de corte vegetal (FV), verificou-se também uma linearidade entre as duas condições, porém com um desgaste ligeiramente maior da IR, que na primeira medição de desgaste, após 0,31 m de material usinado, representou 18,75% como mostrado na Figura 36,

concluindo-se que após o fim da vida da ferramenta com uma usinagem total de 0,94 m de material o desgaste para a IN foi de 0,38 mm e para IR de 0,49 mm.

Na comparação da interpolação do gráfico para o desgaste pré-definido de 0,30 mm, a diferença em termos de desgaste para as ferramentas em análise foi de um rendimento maior para a IN de 22%. Neste caso, a IN usinou 0,88 m de material e a IR usinou 0,69 m de material.

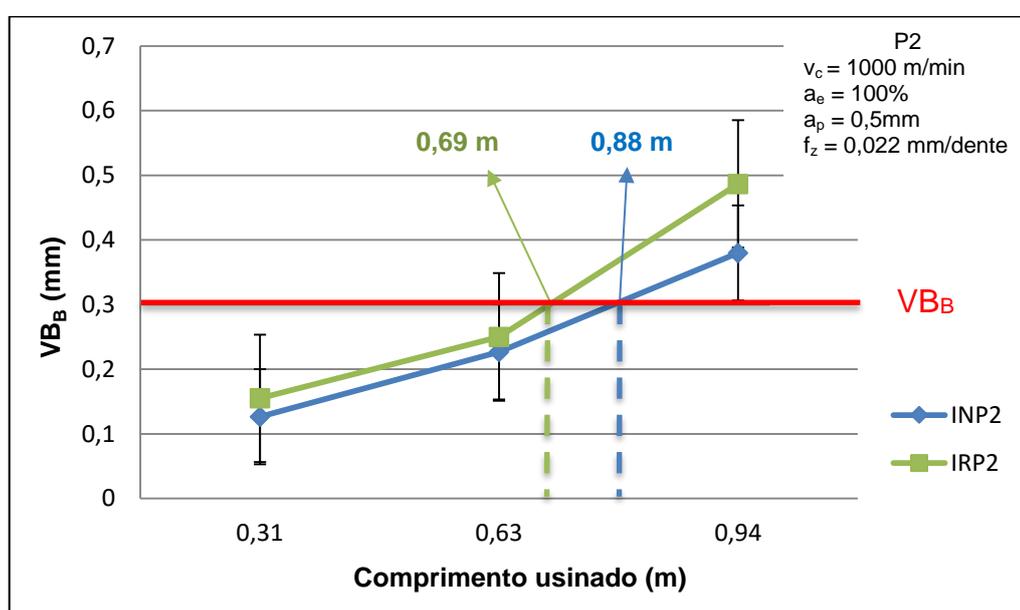


Figura 36 - Evolução do desgaste das ferramentas com parâmetros P2 utilizando fluido de corte vegetal (FV)

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, como o ocorrido nos ensaios com fluido mineral (FM), quando foram comparados os dois parâmetros utilizados em relação ao desgaste, com a utilização do fluido vegetal (FV), pode-se dizer que as ferramentas, tanto as IN quanto a IR tiveram rendimentos superiores quando utilizado os parâmetros de corte P1, com destaque para a IN que atingiu o desgaste ao final de 0,94 m de material usinado e a IR atingiu o desgaste ao final de 0,63 m de material.

Analisando a interpolação para o desgaste padrão de 0,30 mm constata-se uma pequena, mas considerável diferença entre as condições ensaiadas, sendo que a diferença de desempenho para a IN é de 15% superior para o parâmetro P1 em

comparação com P2 e já para IR essa diferença é de 11% superior para o parâmetro P1, conforme mostrado na Figura 37.

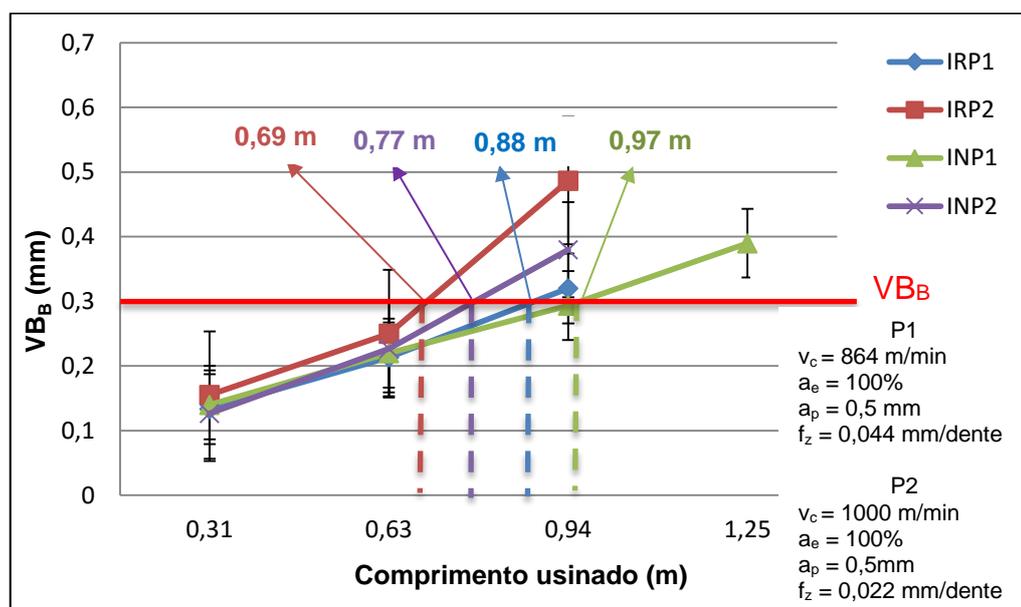


Figura 37 - Comparação do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros P1 e P2 utilizando fluido de corte vegetal (FV)

Fonte: Autoria própria.

Diferente do ocorrido com a utilização do fluido mineral (FM), verifica-se uma tendência de menor desgaste para a ferramenta nova, no entanto, mais uma vez, estes desgastes se igualam estatisticamente, com 95% de confiabilidade.

Outro ponto a se destacar é que era esperado um desempenho melhor do fluido vegetal (FV), fecho esse que Lutfi (2015) e Souza (2014) obtiveram em seus experimentos e concluíram que as cadeias carbônicas longas dos óleos vegetais e os ácidos graxos insaturados favorecem a formação de um biofilme mais estável e capaz de proteger o sistema peça-ferramenta de corte, quando comparado a um óleo mineral; essa contradição pode ser explicada pela baixa diluição do concentrado de óleo vegetal que foi de 2,5% e nos outros trabalhos pesquisados a diluição foi de 8%.

Machado (2013) utilizou diferentes concentrações de diluição de fluido de corte mineral na operação de sangramento do ferro fundido nodular GGG-50 e concluiu que quando aumentada a diluição, neste caso, em 40%, o desgaste da ferramenta aumentou na mesma proporção.

4.1.1 Mecanismos de desgaste

Conforme mostrado nas Figuras 38 e 39, as superfícies desgastadas das ferramentas de Si_3N_4 foram analisadas microscopicamente por meio de MEV e as imagens obtidas permitiram identificar o desgaste de flanco como a forma de desgaste principal.

Verificou-se também que ranhuras profundas no sentido de usinagem foram observadas e segundo Youqiang et al. (2015), essas ranhuras são indicadores típicos de desgaste abrasivo (Figura 40), que de acordo com Souza et al. (2005) esse desgaste pode ter sido gerado em decorrência ao material da peça de ferro fundido nodular possuir em sua composição o carboneto de silício, SiC , com alta dureza (2500 HV)., em complemento, segundo Hutchings (1992) e Gahr (1987), a presença de partículas duras no sistema tribológico pode promover esse desgaste.

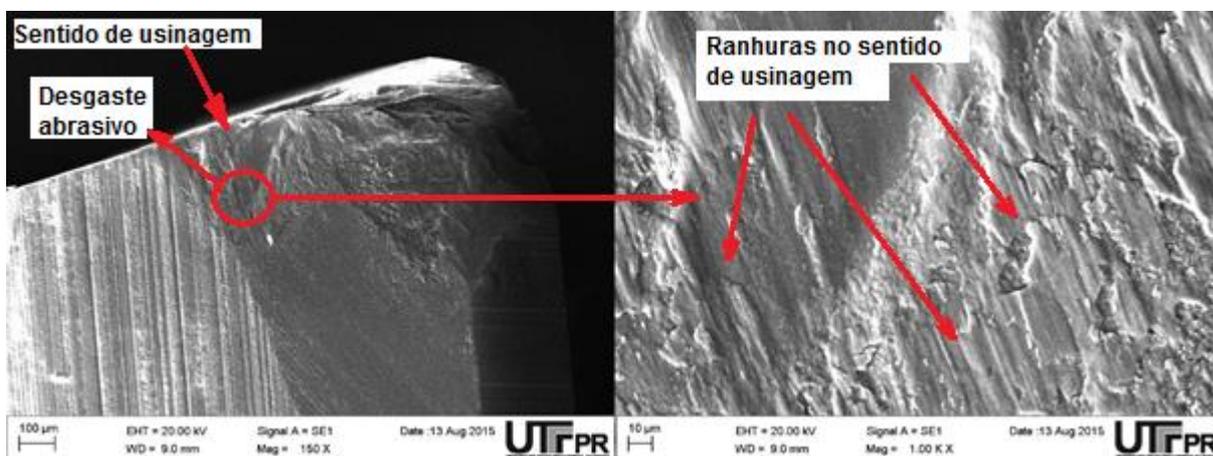


Figura 38 - Desgaste de flanco observado nas ferramentas. Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P2

Fonte: A autoria própria.

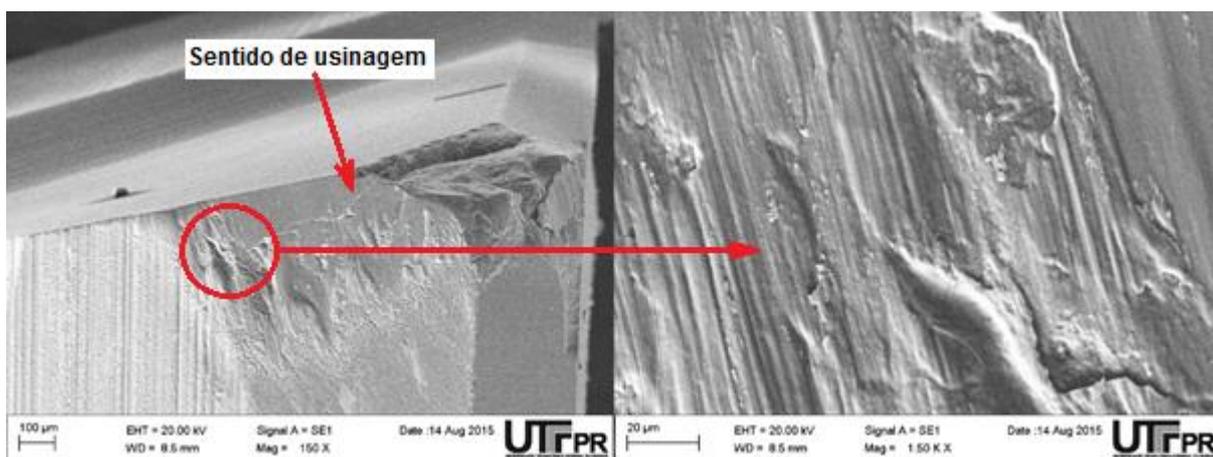


Figura 39 - Desgaste de flanco observado nas ferramentas. Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P2

Fonte: A autoria própria.

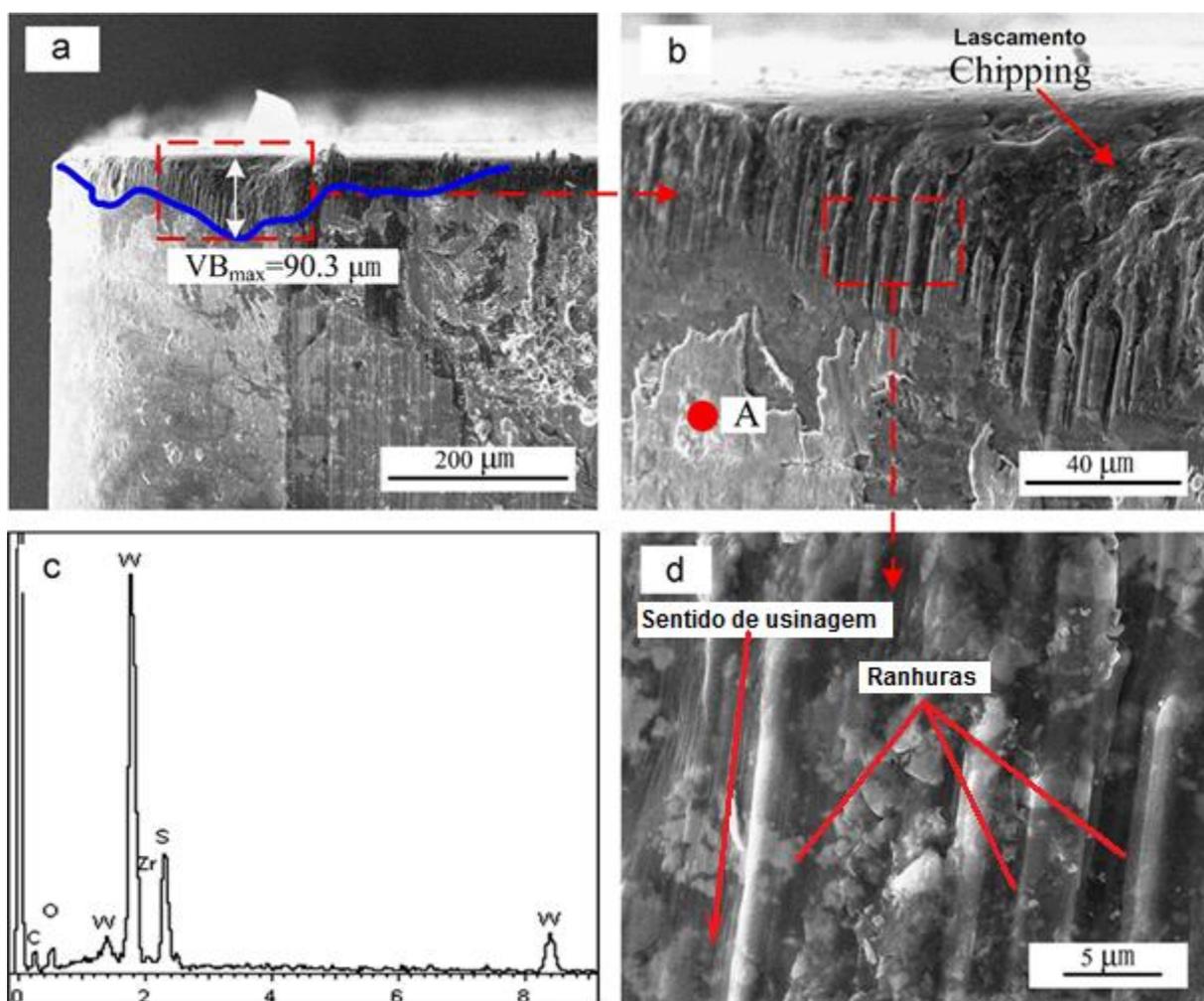


Figura 40 - Micrografias e a análise da composição EDX no ponto A na face do desgaste de flanco da ferramenta de corte revestida com WS_2/Zr após 480 m de corte a seco a uma velocidade de 160 m/min.

Fonte: Adaptado Youqiang et al. (2015)

Após análises de composição EDX nos pontos destacados conforme mostrado nas Figuras 41 e 42, constatou-se que houve adesão do material usinado na superfície da ferramenta, principalmente do elemento Fe o que confirmou também que é muito provável que a difusão de Fe a partir do material da peça de trabalho enfraqueceu o gume da ferramenta cerâmica, camada essa superficial de Fe e foi removido pelo contato com a peça de trabalho, produzindo o desgaste de flanco, revelando nas Tabelas 13 e 14 a composição química nos pontos analisados.

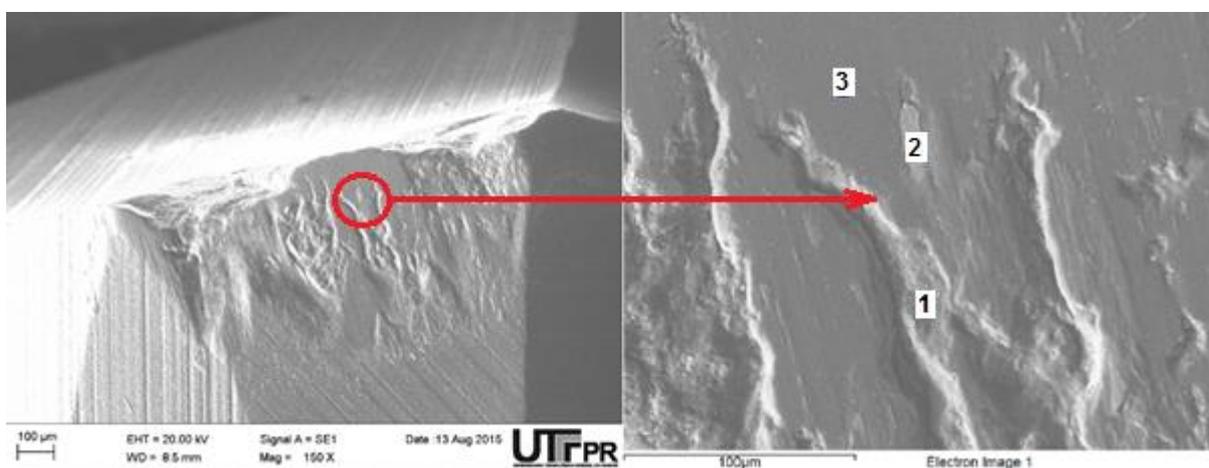


Figura 41 – Análise de composição EDX evidenciando adesão do material usinado na ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) parâmetros P2.

Tabela 13 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados

Spectro	C	N	O	Mg	Si	Fe	Total
1	26.09	15.56	24.79	0.23	32.07	1.26	100.00
2	22.50				2.45	75.05	100.00
3	24.88	29.86	1.10	0.16	43.99		100.00
Max.	26.09	29.86	24.79	0.23	43.99	75.05	
Min.	22.50	15.56	1.10	0.16	2.45	1.26	

Fonte: Autoria própria.

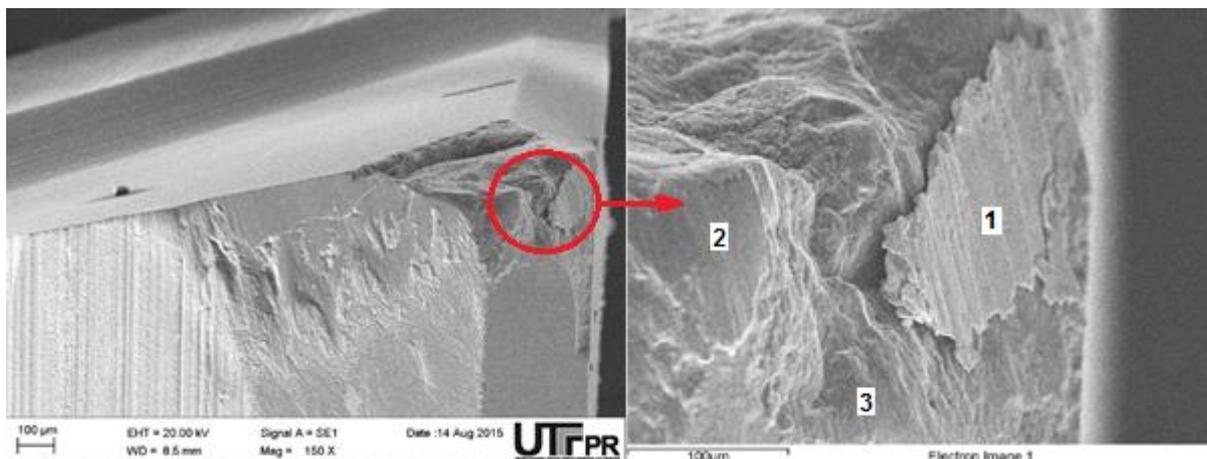


Figura 42 - Análise de composição EDX evidenciando adesão do material usinado na ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) parâmetros P2.

Tabela 14 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados

Spectro	C	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Total
1	33.06	3.60			2.55			60.79	100.00
2	27.82	35.72	3.85	0.46	19.69		2.30	10.16	100.00
3	50.14	12.29	0.43		30.67	0.58	0.61	5.27	100.00
Max.	50.14	35.72	3.85	0.46	30.67	0.58	2.30	60.79	
Min.	27.82	3.60	0.43	0.46	2.55	0.58	0.61	5.27	

Fonte: Autoria própria.

A ampliação das regiões desgastadas permitiu identificar a presença de trincas em diferentes regiões da superfície como evidenciado na Figura 43; tal fato pode ser explicado pela brusca mudança de temperatura, ou seja, quente para frio com a utilização do fluido de corte.

De acordo com Souza et al. (2005), a propagação dessas fissuras é responsável por provocar lascamentos nas ferramentas de corte durante a usinagem, assim esses lascamentos também foram observados nas ferramentas utilizadas nos experimentos e ocorreram no final da vida útil das mesmas.

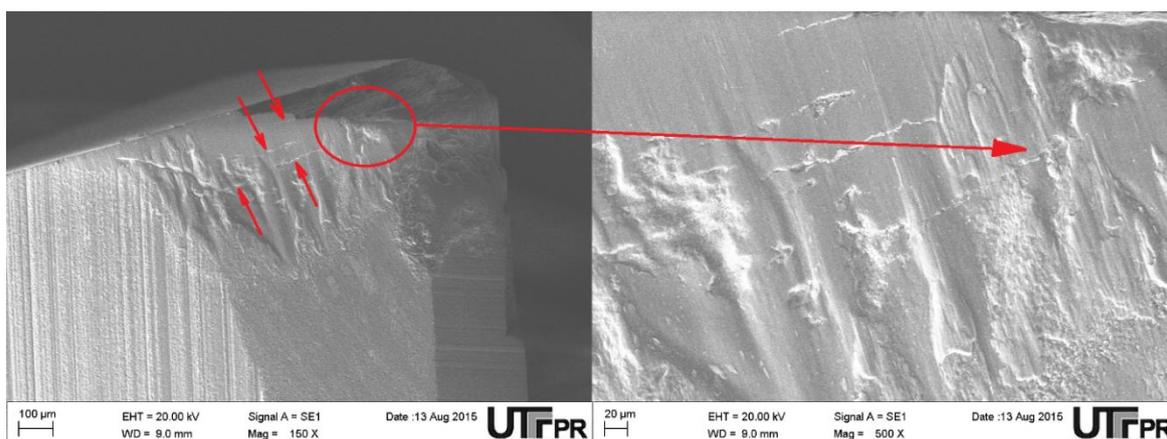


Figura 43 - Fissuras responsáveis pelo lascamento da ponta da ferramenta de corte nova (IN), parâmetros de corte P1 e fluido vegetal (FV).

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Análise estatística da influência das variáveis no desgaste da ferramenta

Neste tópico, são apresentadas e discutidas as influências das variáveis do processo de corte na evolução do desgaste das ferramentas; a Tabela 15 mostra uma ANOVA para o desgaste das ferramentas em relação a todas as variáveis utilizadas no processo, sublinha-se que ANOVA é uma coleção de modelos estatísticos no qual a variância amostral é particionada em diversos componentes devido a diferentes fatores (variáveis), que nas aplicações estão associados a um processo, que por meio desta partição, a ANOVA estuda a influência destes fatores na característica de interesse (PORTAL ACTION, 2016).

Tabela 15 - ANOVA para o desgaste da ferramenta

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Ferramenta	1	0,00015	0,00015	0,015082808	0,9037
Parâmetros	1	0,0216	0,0216	2,17192429	0,1588
Fluido	1	0,002816667	0,002816667	0,283221609	0,6015
Ferramenta/Parâmetros	1	0,006666667	0,006666667	0,670347003	0,4243
Ferramenta/Fluido	1	0,014016667	0,014016667	1,409404574	0,2515
Parâmetros/Fluido	1	6,66667E-05	6,66667E-05	0,00670347	0,9357
Resíduos	17	0,169066667	0,009945098		

Fonte: Autoria própria.

Também chamado de nível de significância, o valor de p representa a probabilidade de observar diferenças entre grupos, de um modo geral foi convencionalmente estabelecido entre a comunidade científica que o valor $p < 0,05$ é aceitável para avaliar a significância do resultado obtido, ou seja, assume-se como margem de segurança 5% de chances de erro, ou olhando por outro ângulo, 95% de chances de estar certo; portanto, quanto menor o valor de p , maior a evidência de que diferenças ocorreram.

Desse modo, estatisticamente, para valores de $p < 0,05$ os fatores têm influência no desgaste da ferramenta e se $p > 0,05$ não tem influência no desgaste, analisa-se que para o valor P de 0,05 que estes não apresentam influência estatística que pudesse ser detectada pela ANOVA, mas isto não quer dizer que as variáveis do processo não influenciam no desgaste da ferramenta. Portanto quando as variáveis são comparadas entre si pode-se constatar que o menor valor de P é o do Parâmetro (0,1588), apesar de não detectados pela ANOVA, apresentam-se com 85% de influência no desgaste.

A Figura 44, mostra as influências das interações das variáveis no desgaste da ferramenta, na Figura 44 (a) pode-se ver a interação entre a condição da ferramenta e os parâmetros de corte, neste caso, constata-se que a interação de maior desgaste se dá entre a IR e P2 e a de menor valor entre IR e P1.

No que diz respeito a Figura 44 (b) é mostrada a interação entre os tipos de ferramentas e o tipo de fluido de corte, assim nota-se que a interação de maior valor de desgaste é observada entre a IR e FV e a de menor valor entre IR e FM e, por fim, na Figura 44 (c) é observada a interação entre o tipo de fluido e os parâmetros, desta forma, vê-se que a interação de maior valor de desgaste é entre a FV e P2 e a de menor valor entre FM e P1.

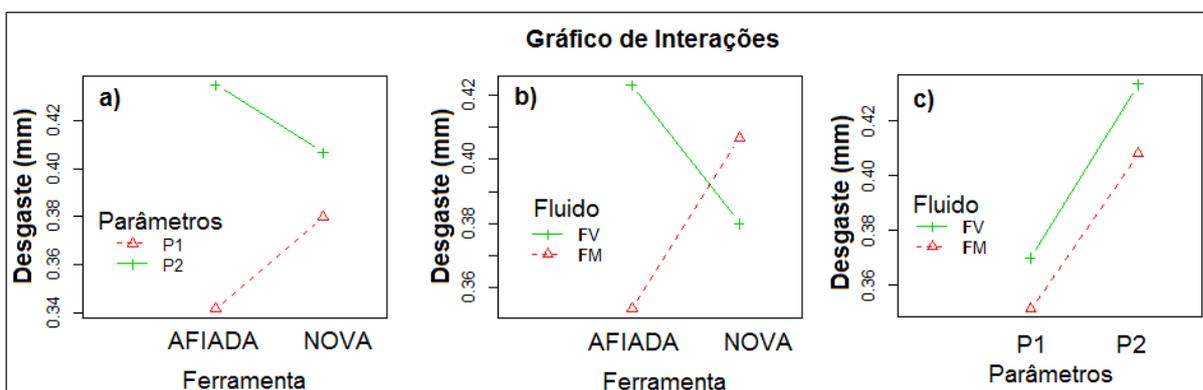


Figura 44 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências no desgaste da ferramenta. a) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e os parâmetros de corte (P1 e P2) b) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV))

Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 mostra os gráficos dos efeitos das variáveis no desgaste da ferramenta e, por eles, pode-se dizer estatisticamente que a melhor interação para o processo em termos de desgaste de ferramenta seria: Ferramenta nova (IN), parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM).

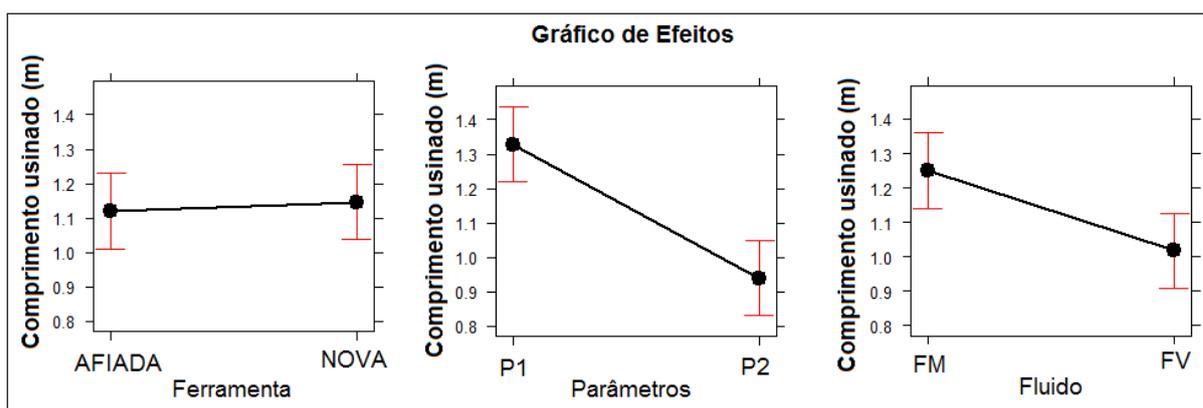


Figura 45 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo no desgaste das ferramentas

Fonte: Autoria própria.

4.2 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados referentes a rugosidade superficial da peça em relação as variáveis utilizadas nos ensaios, para tanto, como resposta de saída, foram captados três parâmetros de rugosidade, os quais são:

- R_a - rugosidade média;
- R_t - distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação;
- R_z - distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos em cada uma das 5 áreas divididas do comprimento total de amostragem.

Serão apresentados os resultados referentes ao parâmetro R_a , uma vez que todos os resultados de todos os parâmetros foram proporcionais.

A Tabela 16 mostra o resultado médio dos parâmetros de rugosidade para todos os ensaios realizados de acordo com o planejamento experimental.

Tabela 16 – Resultados dos valores médios de rugosidade R_a , R_t e R_z para cada ensaio (continua)

Teste	Ferramenta	Parâmetros	Fluído	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
1	IN	P1	FM	1,057	7,945	6,212
2	IN	P1	FM	1,085	7,929	6,168
3	IN	P1	FM	0,878	7,356	5,834
4	IN	P2	FM	0,847	6,279	4,724
5	IN	P2	FM	0,766	6,705	4,733
6	IN	P2	FM	0,841	7,640	5,609
7	IR	P2	FM	0,898	8,419	5,946
8	IR	P2	FM	1,130	9,439	6,703
9	IR	P2	FM	0,934	8,218	6,081
10	IR	P1	FM	0,924	7,139	5,438
11	IR	P1	FM	0,975	7,581	5,835
12	IR	P1	FM	1,049	7,355	5,748
13	IN	P1	FV	0,967	7,392	5,544
14	IN	P1	FV	1,058	9,375	6,613
15	IN	P1	FV	0,918	6,864	5,340
16	IN	P2	FV	0,725	6,532	4,623
17	IN	P2	FV	0,759	5,742	4,421

Tabela 16 – Resultados dos valores médios de rugosidade Ra, Rt e Rz para cada ensaio (conclusão)

Teste	Ferramenta	Parâmetros	Fluído	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
18	IN	P2	FV	0,774	7,223	5,148
19	IR	P2	FV	1,640	11,891	9,368
20	IR	P2	FV	0,808	7,521	5,293
21	IR	P2	FV	2,110	14,823	11,547
22	IR	P1	FV	0,938	7,952	5,755
23	IR	P1	FV	1,367	8,169	6,773
24	IR	P1	FV	1,359	8,194	6,978

Fonte: Aatoria própria.

4.2.1 Ferramentas novas

A geometria da ferramenta combinada, principalmente com o movimento de avanço, deixa seu perfil gravado na superfície da peça (LOPES, 2006) e a Figura 46 mostra a influência do avanço no perfil de rugosidade deixado pela ferramenta de corte na superfície de uma peça usinada (STEMMER, 2005). Observa-se de cima para baixo, que a redução do avanço (f) melhora o acabamento, pois quanto menor for o avanço, mais uniforme será a superfície.

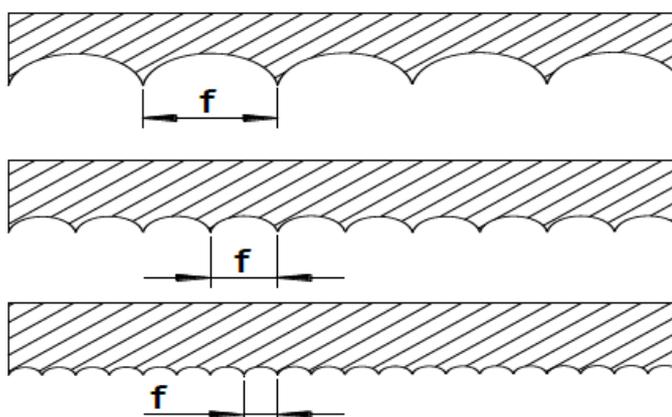


Figura 46 - Impressões na superfície da peça para diferentes avanços

Fonte: Adaptado de Stemmer (2005).

Surasit et al. (2104), afirmaram que, no fresamento da liga de alumínio AA 7075, a rugosidade superficial é influenciada pelo avanço e velocidade de corte, uma vez que a mesma é diminuída quando a velocidade de avanço é alterada, diminuindo-o de 1400 para 1000 mm/min e aumentando a rotação do eixo árvore de 2500 para 3500 rpm, ou seja, a rugosidade superficial é reduzida quando o avanço diminui e velocidade aumenta.

Analisando a Figura 47 é possível verificar que as ferramentas novas (IN), quando utilizadas os parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM), apresentaram valores de rugosidade (R_a) maiores em relação a utilização dos parâmetros de corte P2, que o valor médio de R_a anotado para P1 foi de $1,007 \mu\text{m}$ e para P2 foi de $0,818 \mu\text{m}$, uma diferença de 23,1%, fato este justificado em razão do avanço (f_z) nos parâmetros P1 ser 50% maior em relação a P2, já que em P2 foi utilizado $f_z = 0,022 \text{ mm/dente}$ e em P1 foi utilizado $f_z = 0,044 \text{ mm/dente}$ e a velocidade de corte em P2 ser 13,6% maior em relação a P1, conforme já citado anteriormente, conclusão essa em consonância com Surasit et al. (2104).

Nesta sequência, Sujjan et al. (2016) observaram que o avanço e a vazão do fluido de corte são os parâmetros de corte mais significativos que afetam a rugosidade da superfície no torneamento de um aço baixo carbono com insertos de metal duro revestido, resultados esses que revelaram que o avanço de corte, a vazão do fluido de corte, a velocidade de corte e a profundidade de corte afetam a rugosidade superficial na proporção de 34%, 33%, 18%, e 14%, respectivamente.

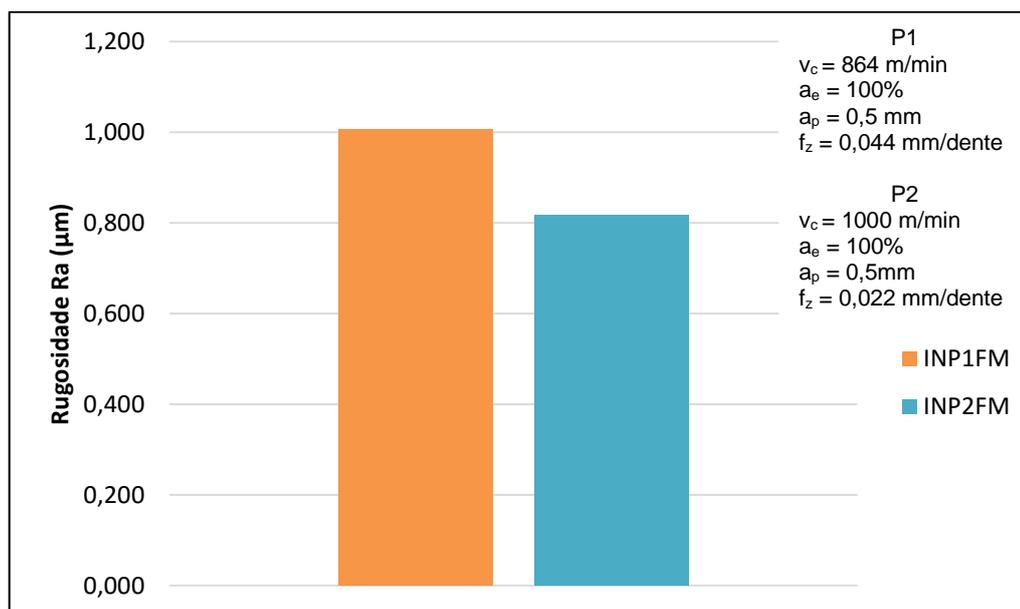


Figura 47 - Rugosidade (Ra) para ferramenta nova (IN), parâmetros (P1 e P2) e fluido mineral (FM)

Fonte: Autoria própria.

De semelhante modo ocorre quando são analisados os ensaios realizados com IN, variações dos parâmetros P1 e P2, mas com a utilização do fluido de corte vegetal (FV), conforme mostrado na Figura 48. Neste caso, o valor médio de Ra anotado para P1 foi de 0,981 μm e para P2 foi de 0,752 μm , uma diferença de 30,4%.

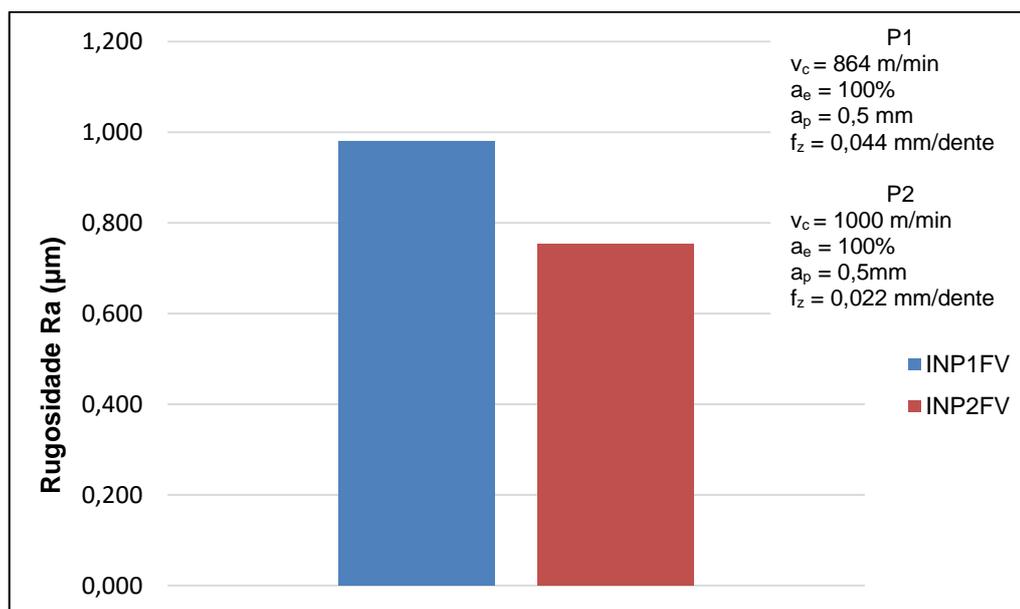


Figura 48 - Rugosidade (Ra) para ferramenta nova (IN), parâmetros (P1 e P2) e fluido vegetal (FV)

Fonte: A autoria própria.

Quando comparados entre si os parâmetros com a variação do fluido de corte, percebe-se que tanto para P1, quanto para P2, os valores da rugosidade são ligeiramente diminuídos com a utilização do FV, assim para P1 a redução é de 2,65% e para P2 de 8,7%. Esse fato pode ser explicado, pois no fluido vegetal (FV) são adicionados aditivos EP (extrema pressão) que conferem aos fluidos de corte uma lubrificidade melhorada para suportarem elevadas pressões de corte, reduzindo o contato da ferramenta com o material.

4.2.2 Ferramentas reafiadas

Como mostrado na Figura 49 observa-se que as ferramentas reafiadas (IR), quando utilizados os parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM), apresentaram valores de rugosidade Ra semelhantes em relação a utilização dos parâmetros de corte P2, porém neste caso, diferente do ocorrido com as IN o parâmetro P1 teve um valor levemente menor em relação a P2, inferindo-se que o

valor médio de Ra anotado para P1 foi de 0,983 μ m e para P2 foi de 0,987 μ m, uma diferença de 0,4%.

Este fato pode ser explicado pela reafiação e possíveis alterações na geometria, mesmo o projeto de reafiação não prevendo alterações geométricas, conforme descrito em materiais e métodos, não houve um controle dimensional das mesmas e um dos principais influenciadores no acabamento superficial da peça é a geometria da ferramenta combinada, principalmente, com o movimento de avanço.

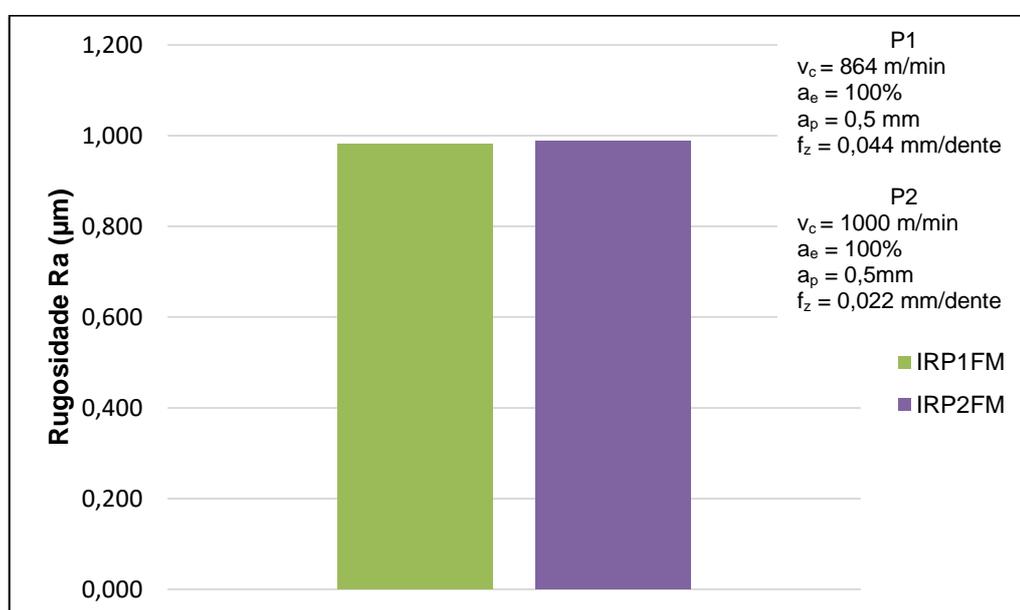


Figura 49 – Rugosidade (Ra) para ferramenta reafiada (IR), parâmetros (P1 e P2) e fluido mineral (FM)

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma do ocorrido nos ensaios realizados com IR variando os parâmetros P1 e P2 com a utilização de FM, ocorre com a utilização dos fluído de corte vegetal (FV), contudo com uma diferença maior, conforme mostrado na Figura 50, neste caso, o valor médio de Ra anotado para P1 foi de 1,221 μ m e para P2 foi de 1,520 μ m, uma diferença de 24,4%.

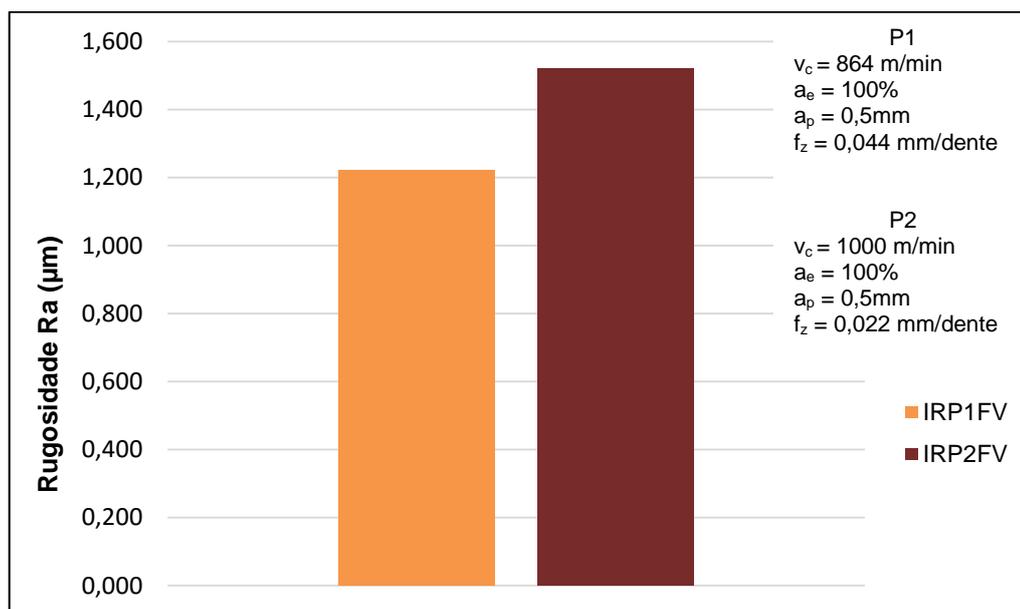


Figura 50 – Rugosidade (Ra) para ferramenta reafiada (IR), parâmetros (P1 e P2) e fluido vegetal (FV)

Fonte: Autoria própria.

Ao contrário dos resultados obtidos nos ensaios com IN, quando comparados entre si os parâmetros com a variação do fluido de corte, verifica-se que tanto para P1 quanto para P2 os valores da rugosidade são aumentados com a utilização do FV, assim para P1 o aumento foi de 24,2% e para P2 de 54,0%.

A Figura 51 mostra a comparação entre as ferramentas nova (IN) e reafiada (IR) em relação à rugosidade superficial para todas as condições ensaiadas notando-se que com exceção da 1ª condição, em que as ferramentas foram ensaiadas com parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM), as mesmas obtiveram um desempenho equivalente, porém a IR teve um desempenho melhor em 2,4%; nas outras condições a IN foi bem superior no que se diz respeito a menor rugosidade superficial, sendo que na 2ª condição a superioridade ficou em 20,66%, na 3ª com 24,46% e na 4ª condição com 102,12% de superioridade.

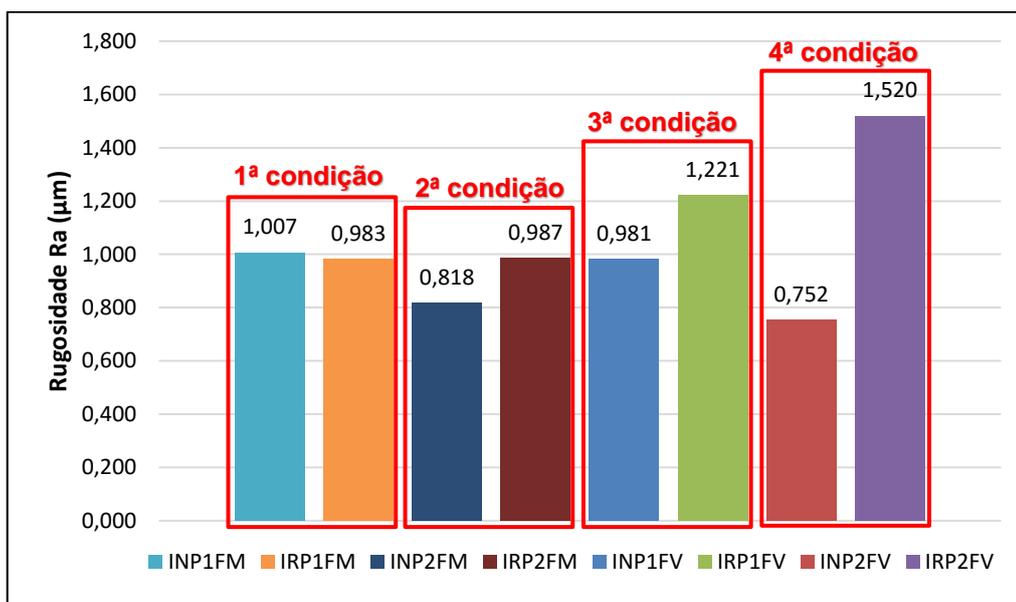


Figura 51 – Comparação entre as Ferramentas novas (IN) e reafiadas (IR) em relação à rugosidade superficial para as condições ensaiadas
 Fonte: Autoria própria.

Neste quesito, pode-se dizer que o tipo de ferramenta, no caso, a reafiada (IR) está interferindo negativamente na rugosidade superficial, como detectado na análise estatística, ressaltando que quando o assunto é rugosidade superficial, estes dados servem para uma comparação qualitativa em termos de desempenho, pois não existe uma faixa de tolerância para os valores encontrados e picos de rugosidade ocasionais causados por possíveis vibrações, podem ter sido removidos pelo gume alisador da ferramenta.

4.2.3 Análise estatística da influência das variáveis na rugosidade superficial

Neste item, são apresentadas e discutidas a influência das variáveis do processo de corte na rugosidade superficial da peça usinada e a Tabela 17 mostra uma ANOVA para a rugosidade superficial em relação a todas as variáveis utilizadas no processo.

Tabela 17 - ANOVA para a rugosidade superficial

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Ferramenta	1	0,498771015	0,498771015	7,632006508	0,0133
Parâmetros	1	0,004879809	0,004879809	0,074669002	0,7879
Fluido	1	0,173433844	0,173433844	2,653819465	0,1217
Ferramenta/Parâmetros	1	0,19457654	0,19457654	2,977337046	0,1026
Ferramenta/Fluido	1	0,278738284	0,278738284	4,2651484	0,0545
Parâmetros/Fluido	1	0,024140906	0,024140906	0,369395064	0,5514
Resíduos	17	1,11099319	0,065352541		

Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na tabela de ANOVA a única variável que teve influência na rugosidade superficial com 95% de confiança foi a ferramenta de corte, ou seja, $p < 0,05$; que todas as variáveis restantes, apesar de não terem apresentados confiabilidade de 95%, ou seja, valor de $p > 0,05$, não deixam de exercerem algum tipo de influência na rugosidade superficial, como é o caso da interação ferramenta e fluido cujo valor ficou bem próximo da confiabilidade.

Constata-se na Figura 52, as influências das interações das variáveis no acabamento superficial da peça, a Figura 52 (a) mostra a interação entre a condição da ferramenta e o de fluido de corte, neste caso tem-se que a interação de maior valor de Ra se dá entre a IR e FV e a de menor valor de Ra entre IN e FV, na Figura 52 (b) é mostrada a interação entre os parâmetros e o tipo de fluido de corte, assim nota-se que a interação de maior valor de Ra se dá entre a P2 e FV e a de menor valor de Ra entre P2 e FM, já na Figura 52 (c) é verificado a interação entre a condição da ferramenta e os parâmetros, isto posto, tem-se que a interação de maior valor de Ra se dá entre a IR e P2 e a de menor valor de Ra entre IN e P2.

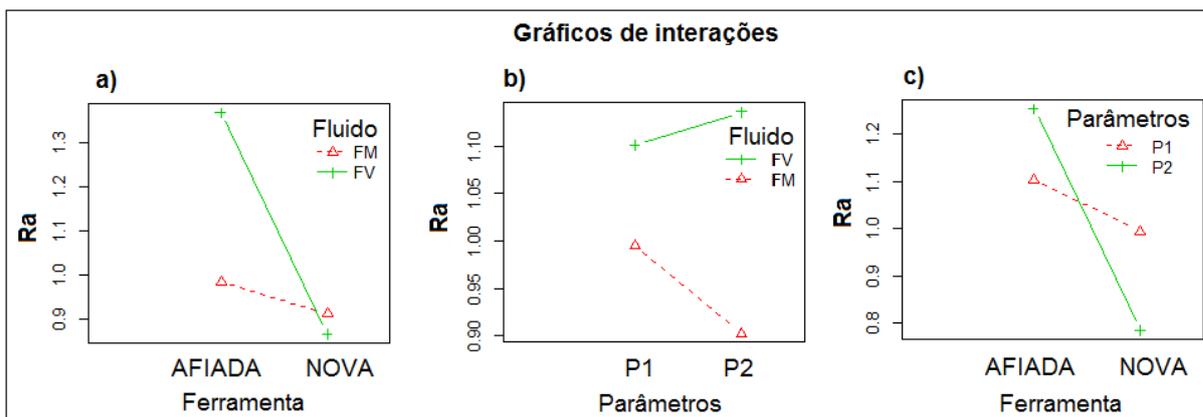


Figura 52 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências na rugosidade superficial. a) interação entre condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). b) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos de fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e as condições das ferramentas nova (IN) e reafiada (IR)

Fonte: Autoria própria.

A Figura 53 mostra os gráficos dos efeitos das variáveis na rugosidade superficial e neste quesito pode-se dizer que a melhor interação para o processo em termos de diminuição da rugosidade superficial é: Ferramenta nova (IN), parâmetros de corte P2 e fluido de corte mineral (FM).

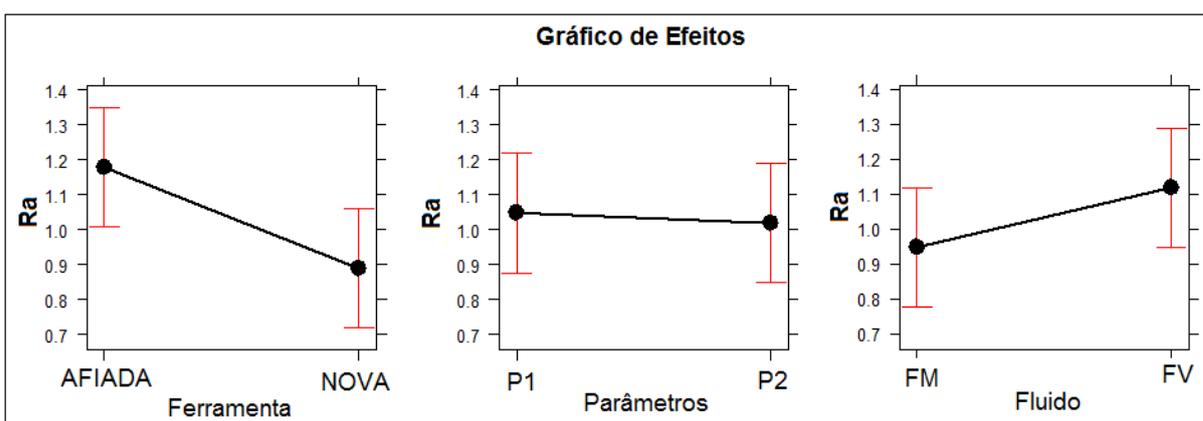


Figura 53 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo na rugosidade superficial
Fonte: Autoria própria.

4.3 POTÊNCIA CONSUMIDA

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes à potência consumida na usinagem durante os ensaios, onde desejava-se observar a influência das variáveis do processo, ou seja, ferramentas, parâmetros e fluidos, no consumo de energia em watts/hora (Wh).

De acordo com Carmita (2013), a energia total consumida é a variável que inclui todos os tipos de energia necessárias para realizar a operação de usinagem, não só a energia necessária para a remoção de material, logo BHATTACHARYYA et al. (2014) disseram que, geralmente, as análises de potências nas operações de usinagem são divididas em três etapas, as quais são:

1ª etapa: acionamento da máquina;

2ª etapa: movimentos de posicionamento das ferramentas;

3ª etapa: usinagem (contato ferramenta/peça).

Para tanto, como resposta de saída, no presente trabalho, as potências foram captadas somente durante a usinagem, ou seja, quando houve contato ferramenta/peça, desde o início até o fim da vida da ferramenta.

A Tabela 18 mostra o resultado médio das potências captadas durante os ensaios realizados de acordo com o planejamento experimental.

Tabela 18 – Resultados dos valores de potência consumida durante a usinagem (continua)

Teste	Ferramenta	Fluído	Parâmetros	Potência (Wh)
1	IN	FM	P1	64,94
2	IN	FM	P1	69,11
3	IN	FM	P1	56,66
4	IN	FM	P2	96,07
5	IN	FM	P2	91,23
6	IN	FM	P2	85,38
7	IR	FM	P2	86,35
8	IR	FM	P2	133,78
9	IR	FM	P2	105,55
10	IR	FM	P1	63,57
11	IR	FM	P1	87,81

Tabela 18 – Resultados dos valores de potência consumida durante a usinagem (conclusão)

Teste	Ferramenta	Fluído	Parâmetros	Potência (Wh)
12	IR	FM	P1	59,78
13	IN	FV	P1	97,10
14	IN	FV	P1	70,62
15	IN	FV	P1	69,23
16	IN	FV	P2	140,81
17	IN	FV	P2	109,54
18	IN	FV	P2	89,76
19	IR	FV	P2	86,72
20	IR	FV	P2	94,71
21	IR	FV	P2	93,32
22	IR	FV	P1	95,64
23	IR	FV	P1	78,50
24	IR	FV	P1	64,16

Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Ferramentas novas

A Figura 54 mostra a média do consumo de potência em Wh nas três repetições realizadas durante a usinagem com as ferramentas novas (IN) com a utilização do fluido mineral (FM), no entanto, variando os parâmetros entre P1 e P2, diante disso pode-se observar que o parâmetro P2 eleva o consumo de potência.

Destaca-se que no 1º teste a diferença é de 48%, no 2º é de 32%, já no 3º a diferença ficou em 50,6%, isto pode ser explicado porque no parâmetro P2 o avanço por dente (f_z) é reduzido em 50% em relação a P1, já a velocidade de corte é aumentada.

Segundo Carmita (2013), a energia consumida durante o processo de usinagem é menor quando os valores de profundidade do corte e a velocidade de corte são diminuídos e o avanço é aumentado, isso se explica, pois como neste caso o valor da energia consumida foi captado tendo em conta o tempo de usinagem, um valor mais elevado de avanço reduz o tempo de contato entre ferramenta/material e, em consequência, menos energia é necessária para realizar a operação.

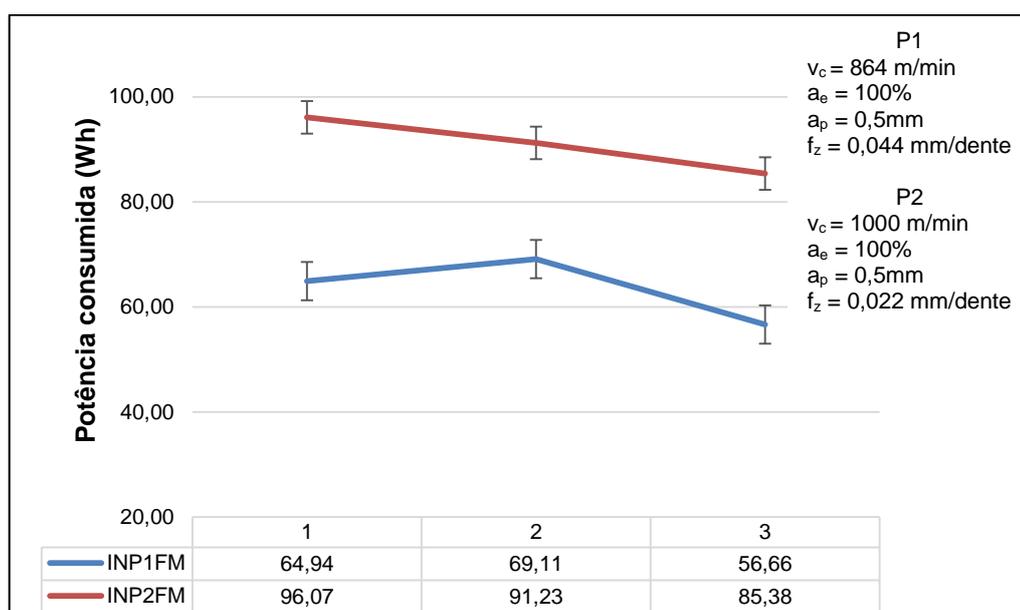


Figura 54 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas novas (IN), fluido de corte mineral (FM) e variações dos parâmetros P1 e P2
 Fonte: Autoria própria.

De forma equivalente ocorre quando são analisados os ensaios realizados com as ferramentas novas (IN), também variando os parâmetros entre P1 e P2, só que agora com a utilização do fluido vegetal (FV) que como mostrado na Figura 55, é observado, mais uma vez, que o parâmetro P2 eleva o consumo de potência. No 1º teste a diferença foi de 45%, no 2º de 55,11%, e no terceiro a diferença ficou em 29,6%.

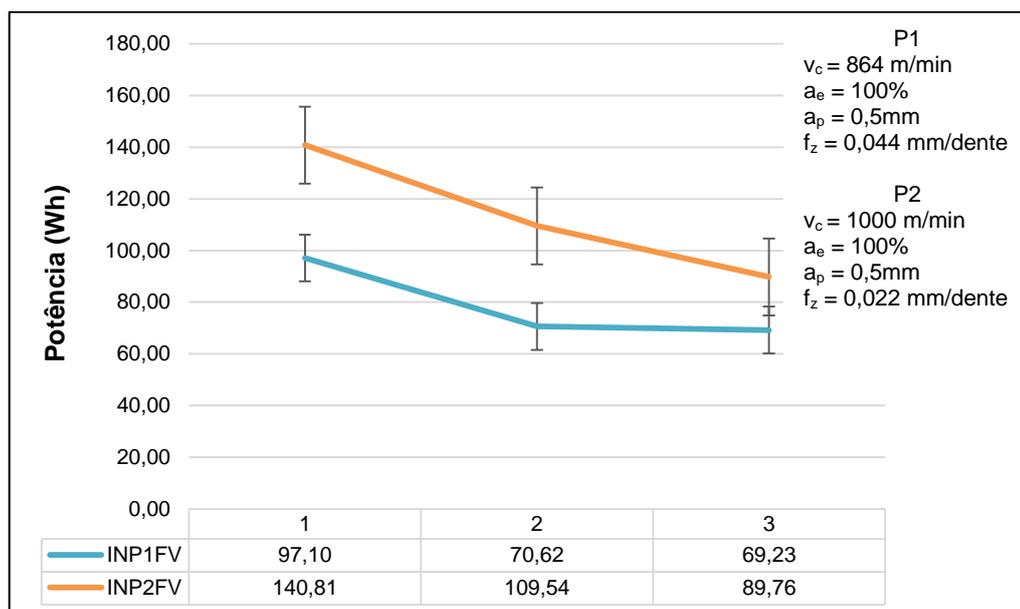


Figura 55 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas novas (IN), fluido de corte vegetal (FV) e variações dos parâmetros P1 e P2
 Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 56 (a), onde são comparados os ensaios realizados com IN, parâmetros P1 variando o fluido entre FM e FV, constata-se que nos três testes o FV eleva os valores do consumo de potência e isto também acontece quando utilizados IN, parâmetros P2 variando o fluido entre FM e FV conforme pode-se observar na Figura 56 (b).

Nestas condições, pode-se dizer que o fluido de corte tem influências sobre o consumo de potência durante a usinagem, apesar de teoricamente o fluido vegetal ter maior poder de lubrificação quando comparado com fluido de corte mineral, isso pode ser explicado pela baixa diluição do concentrado de óleo vegetal em água, ou seja, 2,5%.

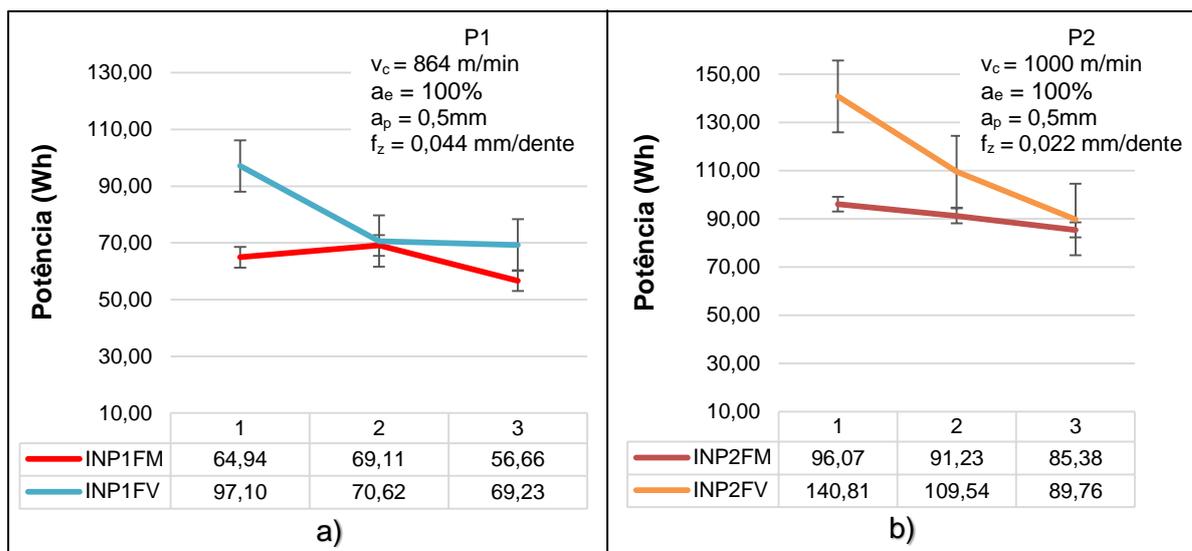


Figura 56 – Consumo de potência dos ensaios: a) Ferramentas novas (IN), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P1. b) Ferramentas novas (IN), variando o fluido de corte mineral (FM e FV) com parâmetros P2

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Ferramentas reafiadas

A Figura 57 mostra a média do consumo de potência em Wh nas três repetições realizadas durante a usinagem com as ferramentas reafiadas (IR) com a utilização do fluido mineral (FM), no entanto, variando os parâmetros entre P1 e P2. Como já observado na Figura 52, onde se utilizou ferramentas novas (IN), aqui também é observado que o parâmetro P2 eleva o consumo de potência, assim sendo no 1º teste a diferença é de 35,8%, no 2º é de 52,35%, já no terceiro a diferença ficou em 76,5%.

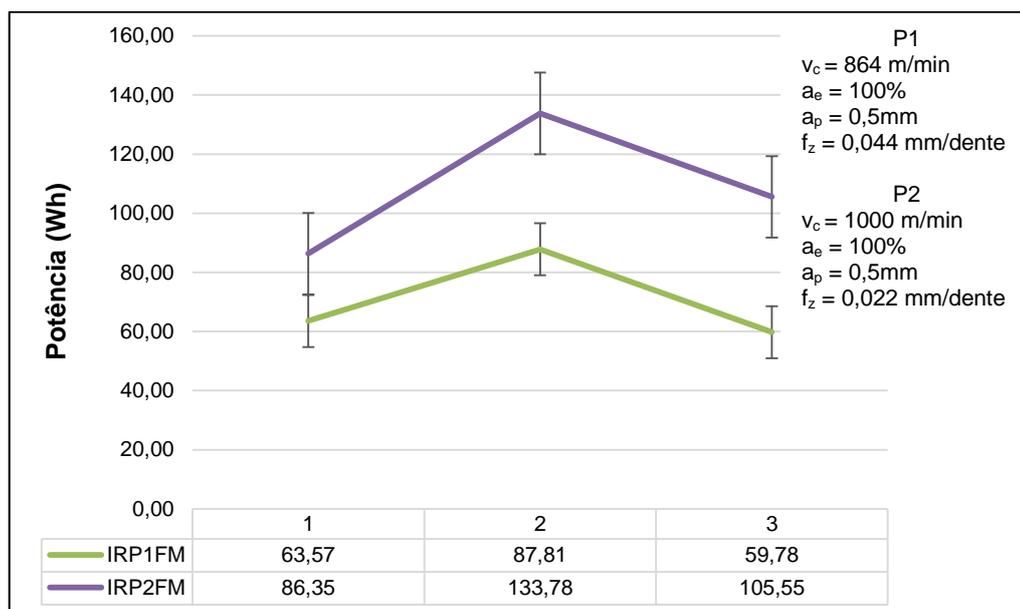


Figura 57 – Consumo de potência dos ensaios com as Ferramentas reafiadas (IR), fluido de corte mineral (FM) e variações dos parâmetros P1 e P2
 Fonte: Autoria própria.

Já, observando a Figura 58, onde os ensaios foram realizados com as ferramentas reafiadas (IR), variando-se os parâmetros entre P1 e P2, com a utilização do fluido vegetal (FV), nota-se, que diferente do ocorrido nos outros ensaios, neste caso o 1º teste o parâmetro P1 foi quem elevou o consumo de potência em 10,2%, ou seja, nos 24 testes realizados, apenas este foi divergente dos demais, ressurge-se que nos outros dois testes, foi o parâmetro P2 quem elevou o consumo de potência. No 2º teste a diferença foi de 20,6% e no terceiro a diferença ficou em 45,4%.

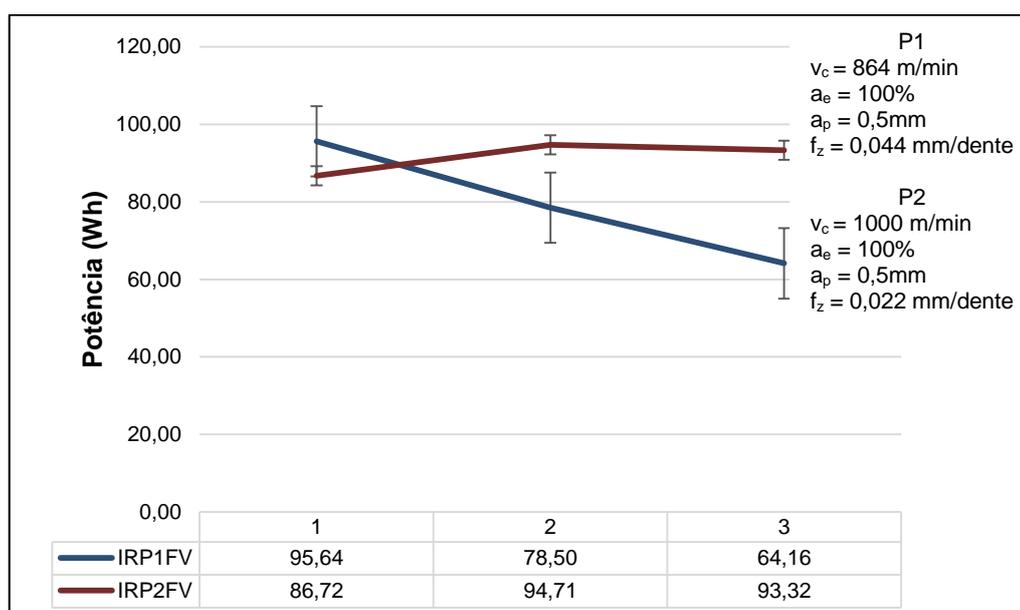


Figura 58 – Consumo de potência dos ensaios com as ferramentas reafiadas (IR), fluido de corte vegetal (FV) e variações dos parâmetros P1 e P2
 Fonte: Autoria própria.

Analisando as Figura 59 (a), onde são comparados os ensaios realizados com IR, parâmetros P1 variando o fluido entre FM e FV e a Figura 59 (b) quando utilizados IR, parâmetros P2, também variando o fluido entre FM e FV é observado que diferente do ocorrido com as ferramentas novas, não há uma influência notória do tipo de fluido em relação ao consumo de potência, uma vez que o comportamento dos testes é muito divergente neste quesito.

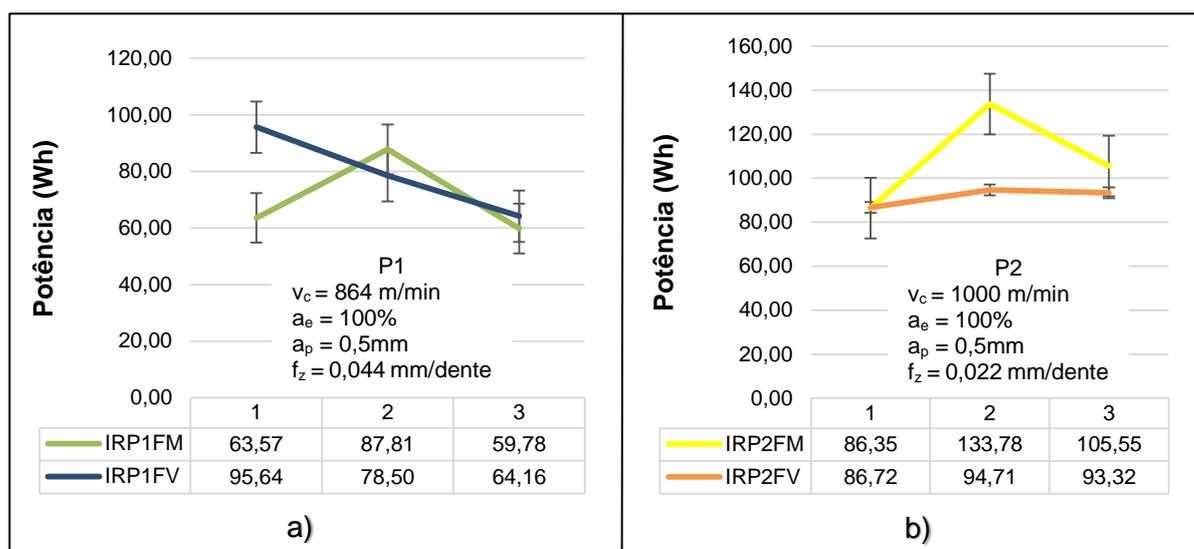


Figura 59 – Consumo de potência dos ensaios: a) Ferramentas reafiadas (IR), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P1. b) Ferramentas reafiadas (IR), variando o fluido de corte (FM e FV) com parâmetros P2

Fonte: Autoria própria.

A Figura 60 mostra a comparação entre as ferramentas nova (IN) e reafiada (IR) em relação à média do consumo de potência durante a usinagem para todas as condições ensaiadas, destarte pode ser notado que com exceção da 4ª condição, em que as ferramentas foram ensaiadas com parâmetros de corte P2 e fluido de corte vegetal (FV), onde a IN elevou o consumo de potência em 23,7%, nas outras condições foi a IR quem elevou o consumo de, sendo que na 1ª condição a superioridade foi de 10,7%, na 2ª foi de 19,43% e na 3ª foi de 0,6% de superioridade.

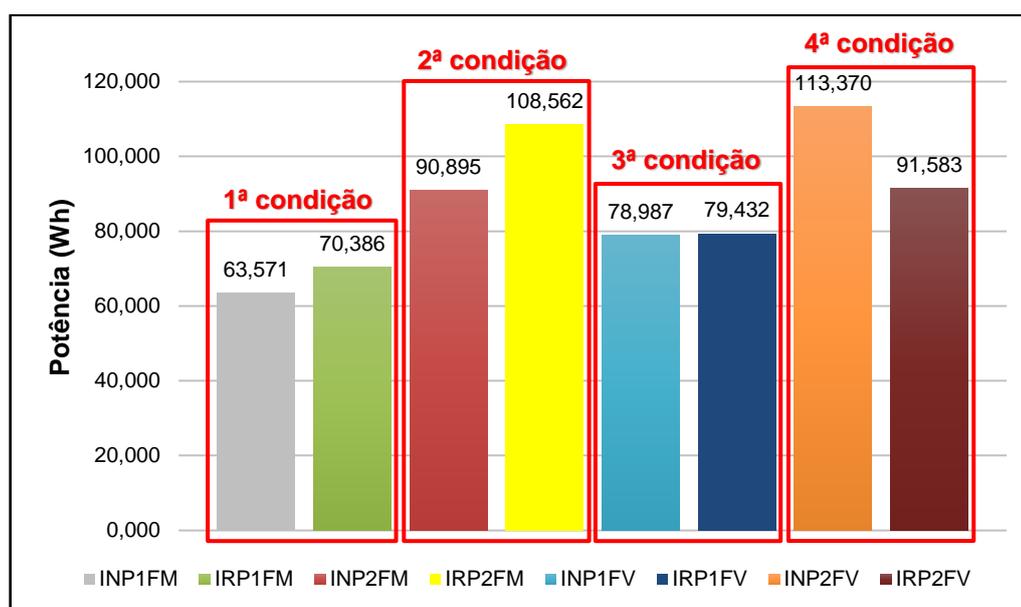


Figura 60 – Comparação entre as Ferramentas novas (IN) e reafiadas (IR) em relação ao consumo de potência para as condições ensaiadas.

Fonte: Autoria própria

A vista disso, é notado que o tipo de ferramenta não está exercendo influência significativa no consumo de potência, isso fica evidenciado na análise estatística, mas verifica-se que os parâmetros de usinagem interferem neste quesito.

4.3.3 Análise estatística da influência das variáveis no consumo de potência durante a usinagem

Neste item, são apresentadas e discutidas a influência das variáveis do processo de corte na potência consumida durante a usinagem da peça, a Tabela 19 mostra uma ANOVA para a potência consumida em relação a todas as variáveis utilizadas no processo.

Tabela 19 - ANOVA para o consumo de potência

Tabela da Anova	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Ferramenta	1	3,699134528	3,699134528	0,013970835	0,9073
Fluido	1	336,5514983	336,5514983	1,271082566	0,2752
Parâmetros	1	4706,891694	4706,891694	17,77691677	0,0006
Ferramenta/Fluido	1	787,4702362	787,4702362	2,974105578	0,1027
Ferramenta/Parâmetros	1	48,56564377	48,56564377	0,183421983	0,6738
Fluido/Parâmetros	1	134,8774849	134,8774849	0,509403228	0,4851
Resíduos	17	4501,183184	264,7754814		

Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na tabela de ANOVA a única variável que teve influência no consumo de potência com 95% de confiabilidade foi o parâmetro de corte, onde $p < 0,05$.

Observa-se na Figura 61 as influências das interações das variáveis no consumo de potência durante a usinagem, a Figura 61 (a) mostra a interação entre o tipo de ferramenta e o de fluido de corte, neste caso tem-se que a interação de maior valor no consumo de potência se dá entre a IN e FV e a de menor valor entre IN e FM. Na Figura 61 (b) é mostrada a interação entre os parâmetros e o tipo de ferramenta, assim nota-se que a interação de maior valor de consumo de potência se dá entre a P2 e IN e a de menor valor entre P1 e IN, já na Figura 61 (c) verifica-se a interação entre o tipo de fluido e os parâmetros, desta forma, vê-se que a interação de maior valor de consumo de potência se dá entre FV e P2 e a de menor valor entre FM e P1.

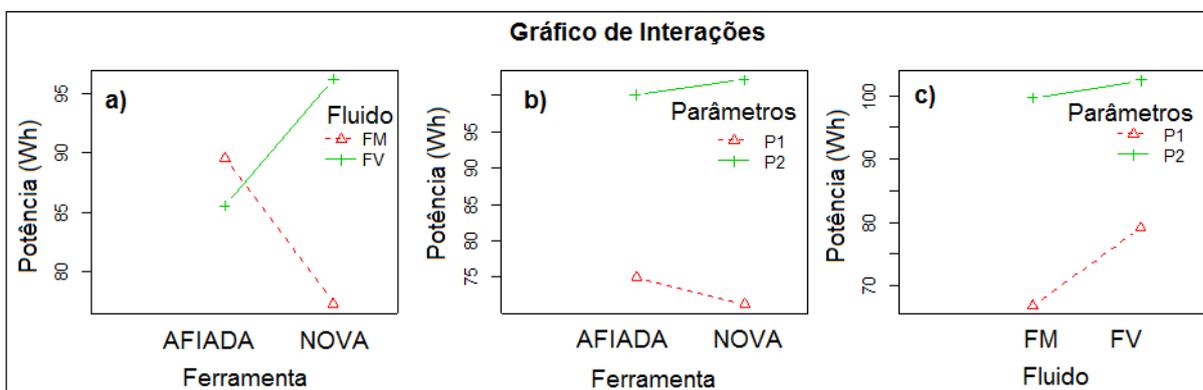


Figura 61 - Gráficos das interações entre as variáveis do processo com influências no consumo de potência. a) interação entre as condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR) e dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV)). b) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) as condições das ferramentas (nova (IN) e reafiada (IR)). c) interação entre os parâmetros de corte (P1 e P2) e os tipos dos fluidos de corte (mineral (FM) e vegetal (FV))

Fonte: Autoria própria.

A Figura 62 mostra os gráficos dos efeitos das variáveis no consumo de potência durante a usinagem e, neste caso, pode-se dizer que a melhor interação para o processo em termos de diminuição da potência consumida é: Ferramenta nova (IN), parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM).

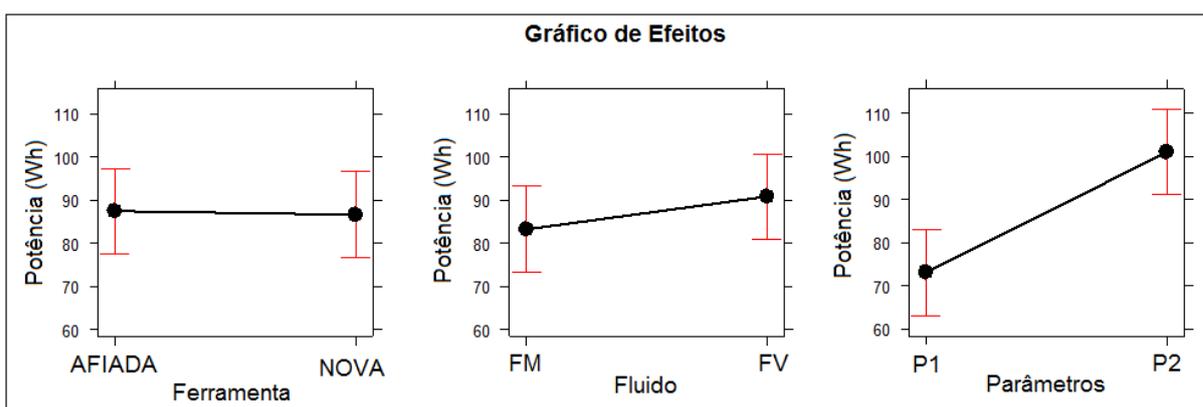


Figura 62 - Gráficos dos efeitos das variáveis do processo na potência consumida durante a usinagem

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos dentro das condições testadas, pode se concluir que:

1 – Os principais mecanismos de desgaste apresentados pela usinagem de ferro fundido nodular GGG-60, tanto na ferramenta nova quanto na ferramenta recondicionada, foram a abrasão e a adesão, gerando desgaste de flanco. A abrasão foi evidenciada pelas ranhuras presentes nas ferramentas após o fim da vida no sentido de usinagem e a adesão foi verificada nas análises de MEV e EDX, onde foram encontradas partículas de Fe na zona de corte das ferramentas cerâmicas.

2 – A maior vida da ferramenta foi conseguida com a ferramenta nova (IN), parâmetros de corte P1 ($v_c = 864$ m/min; $a_e = 100\%$, $f_z = 0,044$ mm/dente; $a_p = 0,5$ mm) e fluido mineral (FM) com 1,47 m usinados, já a menor vida foi obtida com a ferramenta reafiada (IR), parâmetros de corte P2 ($v_c = 1000$ m/min; $a_e = 100\%$, $f_z = 0,022$ mm/dente; $a_p = 0,5$ mm) e fluido de corte vegetal (FV) com 0,69 m usinados, totalizando uma diferença de 113%.

No entanto, a análise estatística determinou que o maior influenciador no desgaste da ferramenta não é o tipo de ferramenta, mas sim os parâmetros utilizados, esse fato vai de encontro com os artigos pesquisados, uma vez que a velocidade de corte é a variável que mais influencia no desgaste de ferramentas;

3 – A rugosidade superficial do corpo de prova usinado com a ferramenta reafiada (IR) se encontra em média 32,5% maior do que a usinada com a ferramenta nova (IN), esse fato explica-se por possíveis alterações involuntárias na geometria da ferramenta durante o processo de reafiação, pois estatisticamente a variável de maior influência na rugosidade superficial é o tipo de ferramenta utilizada;

4 – A ferramenta reafiada eleva o consumo de potência, no entanto, não foi detectado na análise estatística como maior influenciador e, neste caso, os maiores responsáveis, estatisticamente, são os parâmetros de corte, assim os parâmetros P2 elevaram em média o valor da potência consumida em 38,3%;

5 – A melhor interação, estatisticamente, para as variáveis do processo neste tipo de usinagem é: Ferramenta nova (IN), parâmetros de corte P1 e fluido de corte mineral (FM);

6 – A tentativa de definir um processo econômico e sustentável não é descartada, sendo que, apesar de a ferramenta reafiada (IR) elevar a rugosidade superficial e também a potência consumida, não se pode dizer que a reafiação é algo inviável no que tange à relação custo x benefício em relação ao processo, portanto um estudo de custo se faz necessário para esta definição.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos posteriores nesta mesma linha de pesquisa pode-se mencionar:

- 1 – Analisar o comportamento de outros tipos de ferramentas reafiadas e também outros tipos de materiais;
- 2 – Verificar a possibilidade de se realizar mais de uma afiação;
- 3 – Repetir os experimentos com técnicas de captação de temperatura;
- 4 – Fazer análise dimensional da ferramenta, utilizando softwares específicos e elementos finitos, de modo a verificar a influência do deslocamento do centro de massa;
- 5 – Analisar isoladamente as influências dos parâmetros de corte sobre a vida da ferramenta para se obter parâmetros mais precisos e obter ganhos com a ferramenta;
- 6 – Realizar um estudo econômico e ambiental sobre a reafiação de ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6163. **Conceitos da técnica de usinagem - geometria da cunha cortante terminologia**, 1980.

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

AGUIAR, M. M.; DINIZ A. E.; PEDERIVA. R., **Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 68, 1–10, 2013.

AMORIM, H. J., **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2003.

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

BHATTACHARYYA, S.; EZUGWU, E. O.; JAWAID, A., **The performance of ceramic tool materials for the machining of cast iron**. Wear, v. 135, p. 147-159, 1989.

BORGES, A., **Reciclar é preciso**. Usinagem Tech 1, 6-11, 2010.

BORK, C. A.; GONÇALVES J. F. DE S.; GOMES J. DE O.; GHELLER J., **Performance of the jatropha vegetable-base soluble cutting oil as a renewable source in the aluminum alloy 7050-T7451 milling**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7, 210–221, 2014.

BYRNE, G.; DORNFELD D.; DENKINA B., **Advancing cutting technology**, Annals of CIRP, 52/2, pp. 483–507, 2003.

CARMITA, C-N.; **Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA**; Journal of Cleaner Production 53, 195-203, 2013.

CARVALHO, M. V.; MONTENEGRO D. M.; GOMES J. O., **An analysis of the machinability of ASTM grades 2 and 3 austempered ductile iron**, Journal of Materials Processing Technology 213, 560–573, 2013.

CHENG, X.; SHUBING H.; WULIN S.; XUESONG X., **A comparative study on gray and nodular cast irons surface melted by plasma beam**. Vacuum 101, 177-183, 2014.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 8.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

DA MOTA, P. R. **Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte**. 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DIN 1693. **Cast iron with nodular graphite unalloyed and low alloy grades**. Deutsche, 1973.

DINIZ, A. E.; FERRER J. A. G., **A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces**. Journal of materials processing technology 206 (2008) 294–304

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

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Vol. 1, ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2003. 751p.

FISPQ, **Ficha de informações de segurança sobre produtos químicos, Óleo solúvel semissintético para corte de metais**, Rocolultracut 360°, ITW Chemical Products LTDA, 2009.

FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO. 1996. **Mecânica: processos de fabricação**. Telecurso 2000 Profissionalizante. São Paulo, Editora Globo, v. 3.

GAHR K.H. Z., **Microstructure and wear of materials**, Elsevier, Amsterdam, 1987.

GUESSER, W. L., **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo, Ed. Blucher, 1 ed, 2009.

GONÇALVES, J. F. D. S., **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. Tese de doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 223. 2013.

GRZESIK, Wit. **Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications**. New York: Elsevier, 2008.

GRZESIK, W.; RECH J.; ZAK K.; CLAUDIN C., **Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, 2009, 125–133.

GRZESIK, W.; MAŁECKA J., **Documentation of tool wear progress in the machining of nodular ductile iron with silicon nitride-based ceramic tools**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, 2011, 121 – 124.

HUTCHINGS I.M., **Tribology: friction and wear of engineering materials**, CRC Press, Boca Raton, USA, p. 273, 1992.

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.

JIE, Q.; YING L.; JUNJIE Z.; SHANGHUA W., **Continuous and varied depth-of-cut turning of gray cast iron by using uncoated and TiN/Al₂O₃ coated silicone nitride-based ceramic tools**, Ceramics International 40, 12245–12251, 2014.

JUNIOR, E.C.A., **Caracterização de ferro fundido nodular obtido por fundição contínua**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2003.

KALPAKJIAN, S., **Manufacturing engineering and technology**. 3^a ed., Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1296p, 1995.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F., **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5ª ed., Berlin: Springer, 1997. 471p.

LOPES, K. S. S., **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. Dissertação De Mestrado. Belo Horizonte: Puc Minas, 2006.

LUTIF, S. Y. S.; SOUZA, M. C.; GONÇALVES, J. F.; BORK, C. A. S.; GOMES J. O., **Avaliação econômica de diferentes bases de fluidos de corte aplicado pela técnica de mínima quantidade de lubrificantes – MQL**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B., **Teoria da usinagem dos materiais**, 3 ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, 371p, 2015.

MACHADO, M. A. G., **Reaproveitamento de bedames intercambiáveis**, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 77 p. Dissertação.

METALS HANDBOOK, vol 16 (1989), 9th Edition, **Machining**. ASM International, USA.

MOMPER, F. J., **Neue für neue werkstoffe schneidstoffe**, Werkstatt und Betrieb, 131 (5), pp. 390-394, 1998.

MONCADA, O.J.; SPICACCI, R.H.; SIKORA, J.A., **Machinability of austempered ductile iron**. AFS Transactions 106, 39–45, 98-10, 1998.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., **Applied statistics and probability for engineers**, 2002, 3ª. ed. John Wiley and Sons.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada a engenharia**, 2011, 2a. ed. Rio de Janeiro. LTC.

MOURA, R. R., **Fresamento de aço para matrizes VP20ISOF com ferramentas reafiadas**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2012 - 105 p.

MULLINS, J. D., **Ductile iron data for design engineers**, Montreal, Canadá, 2008
Disponível em: <<http://www.ductile.org/didata/Section6/6intro.htm>>. Acesso em: 15 set. 2014.

NAYYAR, V.; KAMINSKI, J.; KINNANDER, A.; NYBORG, L. **An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations**. In: 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, CIRP 1 p. 488 – 493, 2012.

OLIVEIRA, V.V.; BELTRAO, P.A. C.; PINTAUDE, G., **Effect of tool geometry on the wear of cemented carbide coated with TiAlN during drilling of compacted graphite iron**. *Wear*. v 271, p. 2561-2569, 2010.

PAIPA, S. M., **Fresamento de canais da liga de alumínio aeronáutico**, Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

PEREIRA, J. C. C., **Determinação de modelos de vida de ferramenta e rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia de superfície de resposta (DOE)**., Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2006.

PORTAL ACTION 2016. Disponível em:
<http://www.portalaction.com.br/content/anova>. Acesso em: 11 jan 2016.

KENNAMETAL 2015, disponível em:
<http://www.kennametal.com/pt/services/reconditioning-services.html>. Acesso em 12 dez. 2015.

RICHETTI, A.; MACHADO, A. R.; SILVA, M.B.; EZUGWU, E.O.; BONNEY, J.; **Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels**, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, n. 44, p. 695-700, 2004.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 2005, 249 p., Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

ROMI. **Catálogo técnico centros de usinagem vertical linha ROMI D**, 2014.

SANDVIK 2015a, disponível em:
<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/services/sustainability/pages/reconditioning.aspx>. Acesso em 12 dez. 2015.

SANDVIK 2015b, disponível em:
<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/services/publishingimages/recycling.jpg>
Acesso em 12 dez. 2015b.

SANDVIK 2015c, disponível em:
<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/services/sustainability/stories/Pages/making-money-on-used-carbide.aspx?Country=br>. Acesso em 12 dez. 2015b.

SANDVIK COROMANT, **Properties, manufacture and utilization of ceramics**, publicação interna, 1990.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. Ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 2007.

SATISH, C.; CHOUDHURY, S. K., **Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel**; Procedia Materials Science 6, 996 – 1005, 2014.

SHAW, M. C., **Metal cutting principles**. 2^o edição, New York, Oxford Press, 2005.

SECO 2015, disponível em:
<https://www.secotools.com/pt-br/global/services--support/recycling/#>. Acesso em 12 dez. 2015.

SCHULZ H.; REUTER U., **Verschleißmechanismus geklärt: GGV-Motoren reif für die Großserie' Werkstatt und Betrieb**, 134 (7–8), pp. 80–82, 2001.

SILVA, M.B.; NAVESA V.T.G.; MELOA J.D.B.; ANDRADE C.L.F.; GUESSERB W.L., **Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron**. Wear 271, 2426– 2432, 2011.

SOUZA A. M. JR.; SALES W. F.; SANTOS S. C.; MACHADO A. R., **Performance of single Si₃N₄ and mixed Si₃N₄/CPCBN wiper cutting tools applied to high speed**

face milling of cast iron, International Journal Of Machine Tools & Manufacture 45, 335–344, 2005.

SOUZA, M. C., **Avaliação das dimensões técnico/econômica, ambiental social no fresamento com aplicação de distintas técnicas de lubri-refrigeração**. 2014. 167f. Dissertação de mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SOUZA, M. C.; LUTIF, S. Y. S.; SOUZA, J. F.; CARDOSO, K. P.; GOMES, J. O., **O potencial uso do óleo de amendoim, moringa e pinhão-manso para o setor metal mecânico**. Revista Tecnológica (UEM) , v. V, p. 285-293, 2014.

SOUZA, J. A. G., **Desempenho de ferramentas reafiadas – Furação**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2011 – 147 p.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte I**. Edidora da UFSC, 6ª Ed, Florianópolis, 2005.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte II; brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, reboblos e abrasivos**. Edidora da UFSC, 2ª Ed, Florianópolis, 1995.

SUJAN, D.; MOOLA, M. R.; QUA, S. Y., **Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method**, Measurement 78, 111–119, 2006.

SURASIT, R.; JAKNARIN, C.; WORAPONG, B.; ROMADORN, B., **Influence of cutting parameters in face milling semi-solid AA 7075 using carbide tool affected the surface roughness and tool wear**, Energy Procedia 56, 448 – 457, 2014.

TELES, J. M., **“Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2007.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K., **Metal cutting**. 4 ed., Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

ULVI, S. E.; I' BRAHIM, C. I.; HASIR CIA, H., **The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron**. Elsevier Science Ltd. All rights reserved. Materials and Design v. 24, p. 47–51, 2003.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Comissão de Normalização de Trabalhos Acadêmicos. Curitiba, 2008.122 p.

WIT, G.; JOËL, R.; KRZYSZTOF, Ż.; CLAUDIN, C., **Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, 125–133, 2009.

WIT, G.; JOËL, R.; KRZYSZTOF, Ż., **Determination of friction in metal cutting with tool wear and flank face effects**, Wear 317, 8–16, 2014.

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.

YING, L.; JUNJIE, Z.; SHANGHUA, W., **Cutting performance and wear mechanism of Ti–Al–N/Al–Cr–O coated silicon nitride ceramic cutting inserts**, Ceramics International 40, 9615–9620, 2014.

YOUQIANG, X.; JIANXIN, D.; KEDONG, Z.; XINGSHENG, W.; YUNSONG, L., YONGHUI, Z., **Fabrication and dry cutting performance of Si₃N₄/TiC ceramic tools reinforced with the PVD WS₂/Zr soft-coatings**, Ceramics International 41, 10261–10271, 2015.

ZHUANG, K.; ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H., **Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer**. Wear 313, 63–74, 2014.

APÊNDICE A – Planejamento experimental

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nos processos de fabricação das indústrias vários fatores são potencialmente importantes e podem influenciar as características e qualidades dos produtos. Neste contexto, devido à necessidade de produção, torna-se difícil para empresa realizar experimentos e estudar simultaneamente o efeito desses fatores com diferentes níveis de parâmetros. Neste caso, a melhor estratégia é planejar algum tipo de experimento fatorial, que consiste em variar esses fatores conjuntamente. Desta forma, torna-se possível a obtenção de resultados mais precisos, em menor tempo e com gastos menores que os utilizados com a metodologia tradicional (MONTGOMERY, et al., 2011)

Segundo Montgomery et al. (2011), por meio do planejamento de experimentos é possível determinar quais variáveis tem maior influência no processo e os resultados podem levar a:

- Melhora no rendimento do processo;
- Redução na variabilidade do processo, gerando respostas mais próximas ao desejável;
- Redução no tempo de desenvolvimento;
- Redução de custos.

Os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são replicação, aleatoriedade e blocagem (MONTGOMERY; RUNGER, 2002).

A réplica consiste na repetição de um ensaio sob condições preestabelecidas. As réplicas são importantes, pois, permitem a obtenção de erros experimentais e também permitem uma estimativa mais precisa do fator se a média for utilizada para estimar o efeito do mesmo. Quanto maior o número de réplicas, mais o erro experimental é minimizado.

A aleatoriedade nos experimentos permite uma maior confiabilidade das respostas analisadas, já que tendências na execução dos testes podem ser refletidas na resposta obtendo-se resultados errôneos.

A técnica de blocagem permite realizar um experimento com uma maior precisão, reduzindo a influência de variáveis incontroláveis. Um bloco é uma porção

do material experimental que tem como característica o fato de ser mais homogêneo que o conjunto completo do material analisado.

Montgomery e Runger (2002) recomendam um procedimento sequencial para o planejamento e análise dos resultados: reconhecimento e definição do problema, escolha das variáveis (fatores de influência), escolha adequada da variável de resposta, delineamento dos experimentos, execução dos experimentos, análise dos resultados e elaboração das conclusões e recomendações a partir da análise dos resultados.

Tipos de planejamento

De acordo com a quantidade de variáveis, do tipo de resposta pretendido do experimento e dos custos envolvidos, existem tipos de planejamentos que se adequam às necessidades do experimento. Os métodos mais utilizados compreendem o Planejamento Fatorial Completo e o Planejamento Fatorial Fracionado (MONTGOMERY; RUNGER, 2002).

Planejamento fatorial completo

Neste tipo de planejamento, o mais utilizado dentro da indústria, estão envolvidos "k" fatores (variáveis independentes) e "n" níveis (valores das variáveis). De maneira geral, ele pode ser representado por n^k , e normalmente é recomendável quando o número de variáveis é pequeno. (MONTGOMERY, et al., 2011)

Planejamento fatorial fracionário

Conforme o aumento do número de fatores 2^k o número interações de ordem superiores também cresce. Estas interações acabam não sendo úteis para o experimento, pois são difíceis de interpretar. Desse modo as interações de baixa ordem passam a serem fundamentais, então elas deverão ser obtidas mesmo que seja realizada apenas uma fração deste experimento.

Estes tipos de experimentos denominam-se experimentos fatoriais fracionados. Na prática das indústrias, este tipo de experimento é muito utilizado, pois permite reduzir o número de corridas e conseqüentemente o custo de realização do experimento (MONTGOMERY; RUNGER, 2002).

Paipa (2008) realizou 3 etapas de experimentos utilizando planejamento fatorial fracionário. A 1ª etapa compreendeu um planejamento fracionário 2^{5-1} . Esta etapa tinha o objetivo de verificar a influência das condições de corte, do espaçamento entre os canais e das condições lubri-refrigerantes nas variáveis de saída. A Tabela 20 mostra os níveis das variáveis e a Tabela 21 mostra o planejamento fatorial fracionário 2^{5-1} .

Tabela 20 - Níveis das variáveis testadas (Etapa 1)

Níveis	-1	+1	Unidades
Velocidade de corte - v_c	115	165	(m/min)
Avanço por revolução - f	0,08	0,12	(mm/ver)
Profundidade de corte - a_p	3	5	(mm)
Espaçamento entre canais – E.E.C	1,5	2,5	(mm)
Sistema lubri-refrigerante – S.L.R	Seco	MQL	Jorro

Fonte: PAIPA (2008).

Tabela 21 - Planejamento fatorial fracionário 2^{5-1} (Etapa 1) (continua)

.	v_c (m/min)	f (mm/rev)	E.E.C. (mm)	a_p (mm)	S.L.R
1	165	0,08	1,5	3	SECO
2	115	0,12	1,5	3	SECO
3	115	0,08	2,5	3	SECO
4	165	0,12	2,5	3	SECO
5/17	115	0,08	1,5	3	MQL/Jorro
6/18	165	0,12	1,5	3	MQL/Jorro
7/19	165	0,08	2,5	3	MQL/Jorro
8/20	115	0,12	2,5	3	MQL/Jorro

Tabela 21 - Planejamento fatorial fracionário 2⁵⁻¹ (Etapa 1) (conclusão)

.	vc (m/min)	f (mm/rev)	E.E.C. (mm)	ap (mm)	S.L.R
9	115	0,08	1,5	5	SECO
10	165	0,12	1,5	5	SECO
11	165	0,08	2,5	5	SECO
12	115	0,12	2,5	5	SECO
13/21	165	0,08	1,5	5	MQL/Jorro
14/22	115	0,12	1,5	5	MQL/Jorro
15/23	115	0,08	2,5	5	MQL/Jorro
16/24	165	0,12	2,5	5	MQL/Jorro

Fonte: PAIPA (2008).

Rodrigues (2005) por sua vez utilizou em sua análise de dados o modelo de planejamento fatorial completo. Este modelo foi considerado adequado às investigações pretendidas nesta pesquisa e uma matriz de experimentos com um total de 36 combinações entre os níveis dos fatores de controle e duas réplicas pôde ser elaborada e ensaiada. A Tabela 22 representa os níveis e os controles do ensaio, já a Tabela 23 apresenta a simplificação dos níveis dos fatores e a Tabela 24 mostra a matriz de experimentos.

Tabela 22 - Fatores de controle e os níveis adotados no ensaio

Fatores de controle	Níveis	Especificações
Raio de ponta (mm)	3	0,8 1,2 1,6
Profundidade de usinagem (mm)	3	0,3 0,5 0,7
Geometria da ferramenta	2	Com quebra cavaco Sem quebra cavaco
Revestimento	2	TiN Sem revestimento

Fonte: RODRIGUES (2005).

Tabela 23 - Simplificação dos níveis dos fatores de controle

Fatores	Especificação
Raio de ponto do inserto	RP1 = 0,8 mm RP2 = 1,2 mm RP3 = 1,6 mm
Profundidade de usinagem	PU1 = 0,3 mm PU2 = 0,5 mm PU3 = 0,7 mm
Geometria do quebra cavaco	QC1 = QM 235 / H13A (com quebra cavaco) QC2 = KR 3015 / IC 20 (sem quebra cavaco)
Presença ou não de revestimento	CO1 = TiN (com revestimento) CO2 = ausente (sem revestimento)

Fonte: RODRIGUES (2005).

Tabela 24 - Matriz de experimentos

Sequência	Combinação das variáveis	Identificação dos parâmetros
1	RP1 PU1 QC1 CO1	0,8 / 0,3 / QM 235 / TiN
2	RP1 PU1 QC1 CO2	0,8 / 0,3 / QM 235 / ausente
3	RP1 PU1 QC2 CO1	0,8 / 0,3 / KR 3015 / TiN
4	RP1 PU1 QC2 CO2	0,8 / 0,3 / IC 20 / ausente
5	RP1 PU2 QC1 CO1	0,8 / 0,5 / QM 235 / TiN
6	RP1 PU2 QC1 CO2	0,8 / 0,5 / QM 235 / ausente
7	RP1 PU2 QC2 CO1	0,8 / 0,5 / KR 3015 / TiN
8	RP1 PU2 QC2 CO2	0,8 / 0,5 / IC 20 / ausente
9	RP1 PU3 QC1 CO1	0,8 / 0,7 / QM 235 / TiN
10	RP1 PU3 QC1 CO2	0,8 / 0,7 / QM 235 / ausente
11	RP1 PU3 QC2 CO1	0,8 / 0,7 / KR 3015 / TiN
12	RP1 PU3 QC2 CO2	0,8 / 0,7 / IC 20 / ausente
13	RP2 PU1 QC1 CO1	1,2 / 0,3 / QM 235 / TiN
14	RP2 PU1 QC1 CO2	1,2 / 0,3 / QM 235 / ausente
15	RP2 PU1 QC2 CO1	1,2 / 0,3 / KR 3015 / TiN
16	RP2 PU1 QC2 CO2	1,2 / 0,3 / IC 20 / ausente
17	RP2 PU2 QC1 CO1	1,2 / 0,5 / QM 235 / TiN
18	RP2 PU2 QC1 CO2	1,2 / 0,5 / QM 235 / ausente
19	RP2 PU2 QC2 CO1	1,2 / 0,5 / KR 3015 / TiN
20	RP2 PU2 QC2 CO2	1,2 / 0,5 / IC 20 / ausente
21	RP2 PU3 QC1 CO1	1,2 / 0,7 / QM 235 / TiN
22	RP2 PU3 QC1 CO2	1,2 / 0,7 / QM 235 / ausente
23	RP2 PU3 QC2 CO1	1,2 / 0,7 / KR 3015 / TiN
24	RP2 PU3 QC2 CO2	1,2 / 0,7 / IC 20 / ausente
25	RP3 PU1 QC1 CO1	1,6 / 0,3 / QM 235 / TiN
26	RP3 PU1 QC1 CO2	1,6 / 0,3 / QM 235 / ausente
27	RP3 PU1 QC2 CO1	1,6 / 0,3 / KR 3015 / TiN
28	RP3 PU1 QC2 CO2	1,6 / 0,3 / IC 20 / ausente
29	RP3 PU2 QC1 CO1	1,6 / 0,5 / QM 235 / TiN
30	RP3 PU2 QC1 CO2	1,6 / 0,5 / QM 235 / ausente
31	RP3 PU2 QC2 CO1	1,6 / 0,5 / KR 3015 / TiN
32	RP3 PU2 QC2 CO2	1,6 / 0,5 / IC 20 / ausente
33	RP3 PU3 QC1 CO1	1,6 / 0,7 / QM 235 / TiN
34	RP3 PU3 QC1 CO2	1,6 / 0,7 / QM 235 / ausente
35	RP3 PU3 QC2 CO1	1,6 / 0,7 / KR 3015 / TiN
36	RP3 PU3 QC2 CO2	1,6 / 0,7 / IC 20 / ausente

Fonte: RODRIGUES (2005).

Para o desenvolvimento correto deste trabalho um delineamento de todo o processo, que compreende, fases de planejamento e análise dos dados, foram adotados. Nesta etapa foram definidos os fatores e níveis a serem investigados e réplicas das combinações a serem realizadas. O emprego deste delineamento permite uma melhor qualidade dos ensaios e gera uma maior confiabilidade aos resultados finais. Neste trabalho, foi utilizado o Planejamento Fatorial Completo, devido a quantidade pequena de variáveis e para este delineamento o software Action 6.0 foi utilizado.

Os fatores de controle e os níveis adotados são mostrados no Quadro 4 e a matriz dos experimentos na Tabela 24.

Quadro 4 - Fatores de controle e níveis adotados no presente projeto

Fatores	Níveis		Identificação	Especificações
Fluido de corte	2	Vegetal	FV	Pinhão-manso
		Semissintético	FM	Rocol Ultracut 360°
Parâmetros de corte	2	Parâmetros 1	P1	$v_c = 864$ m/min $f_z = 1200$ mm/min $a_p = 0,5$ mm
		Parâmetros 2	P2	$v_c = 1000$ m/min $f_z = 700$ mm/min $a_p = 0,5$ mm
Ferramentas	2	Inserto novo	IN	SPHX 1205 PCTRG PB KY3500
		Inserto reafiado	IR	SPHX 1205 PCTRG PB KY3500

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 - Matriz de experimentos do presente projeto

Corridas	Ordem	Variáveis		
1	1	IN	P1	FM
2	2	IN	P1	FM
3	3	IN	P1	FM
1	4	IN	P2	FM
2	5	IN	P2	FM
3	6	IN	P2	FM
1	7	IR	P2	FM
2	8	IR	P2	FM
3	9	IR	P2	FM
1	10	IR	P1	FM
2	11	IR	P1	FM
3	12	IR	P1	FM
1	13	IN	P1	FV
2	14	IN	P1	FV
3	15	IN	P1	FV
1	16	IN	P2	FV
2	17	IN	P2	FV
3	18	IN	P2	FV
1	19	IR	P2	FV
2	20	IR	P2	FV
3	21	IR	P2	FV
1	22	IR	P1	FV
2	23	IR	P1	FV
3	24	IR	P1	FV

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado foram realizadas 3 repetições de cada tratamento com o objetivo de minimizar o erro experimental e poder comparar as médias dos resultados obtidos nas amostras.

ANEXO 1

Evolução do desgaste das ferramentas

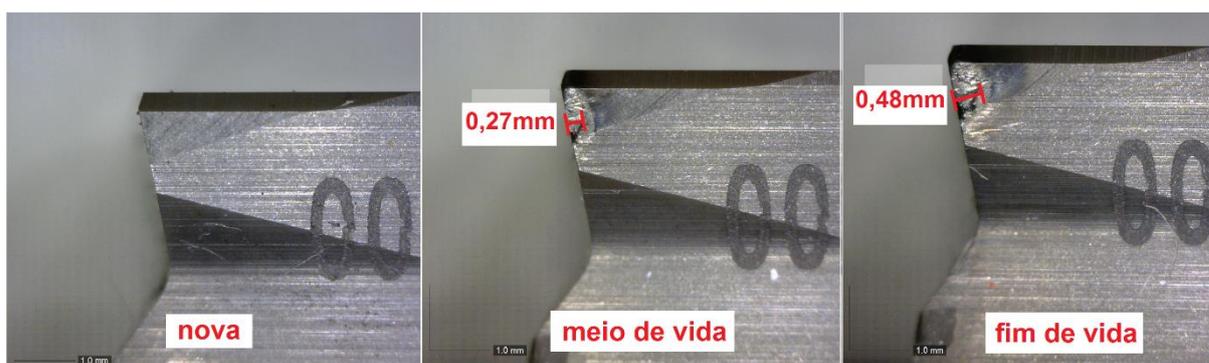


Figura 63 - Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P1
Fonte: Autoria própria.

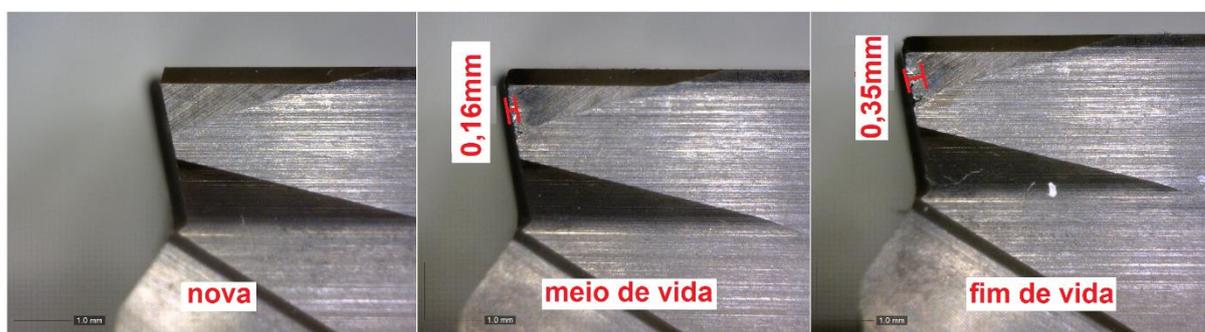


Figura 64 - Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P1
Fonte: Autoria própria.

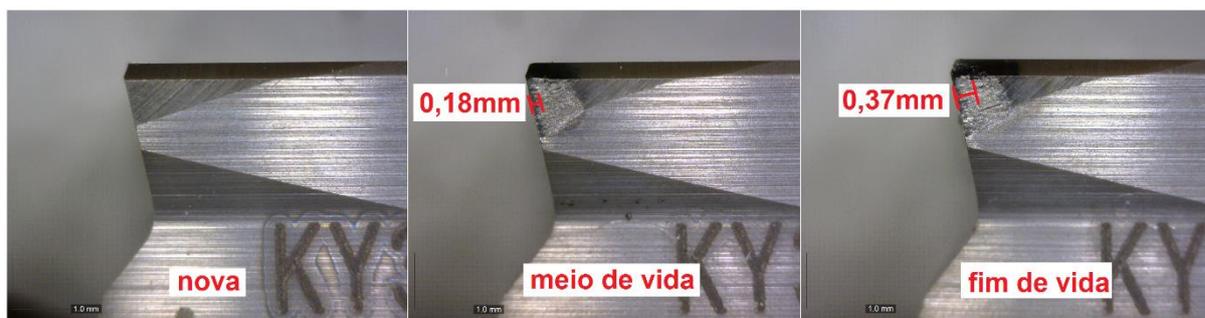


Figura 65 - Ferramenta nova (IN), fluido mineral (FM) e parâmetros P2
Fonte: Autoria própria.

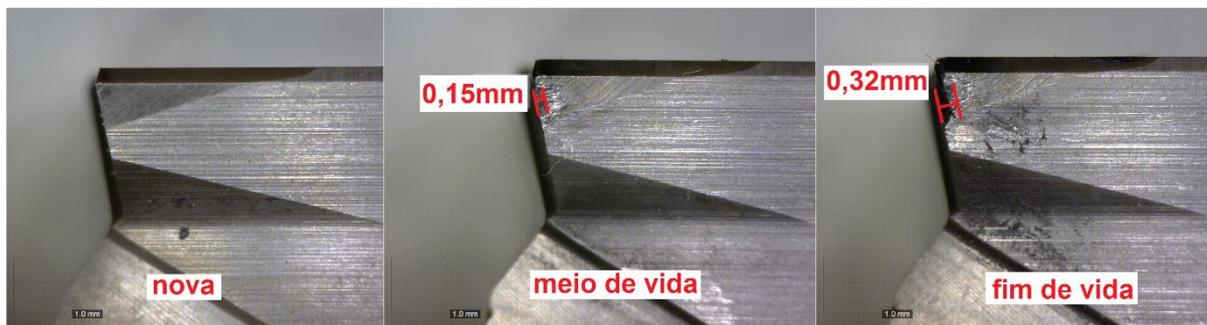


Figura 66 - Ferramenta reafiada (IR), fluido mineral (FM) e parâmetros P2
Fonte: Autoria própria.

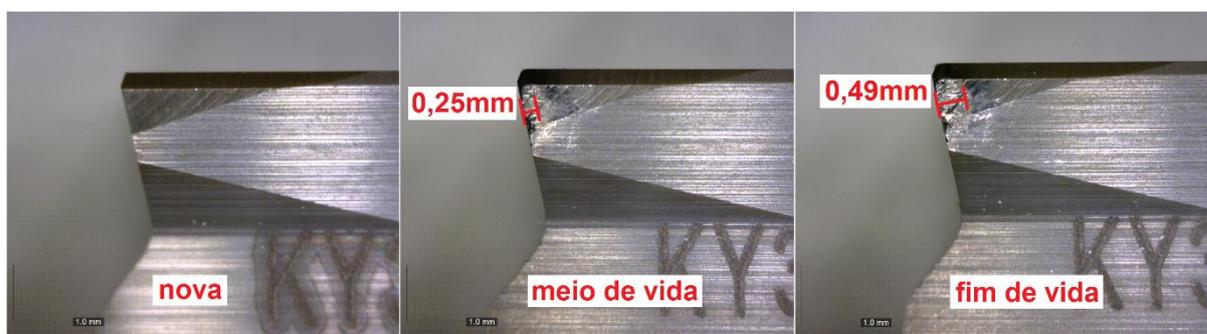


Figura 67 - Ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) e parâmetros P1
Fonte: Autoria própria.

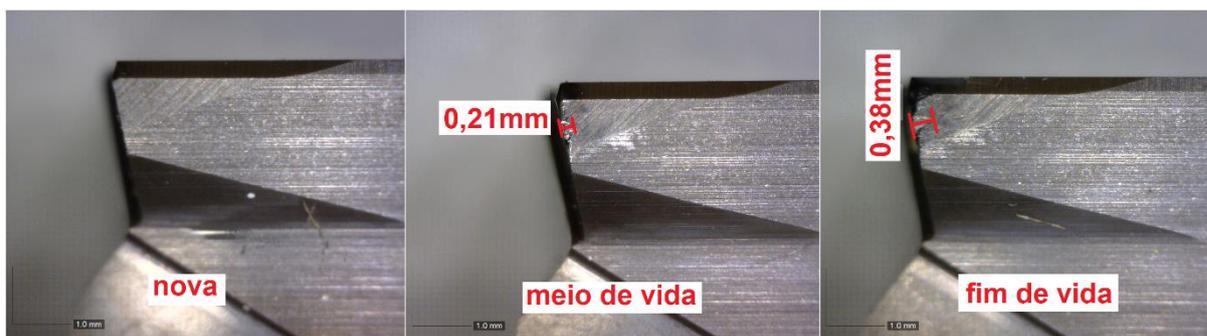


Figura 68 - Ferramenta reafiada (IR), fluido vegetal (FV) e parâmetros P1
Fonte: Autoria própria.

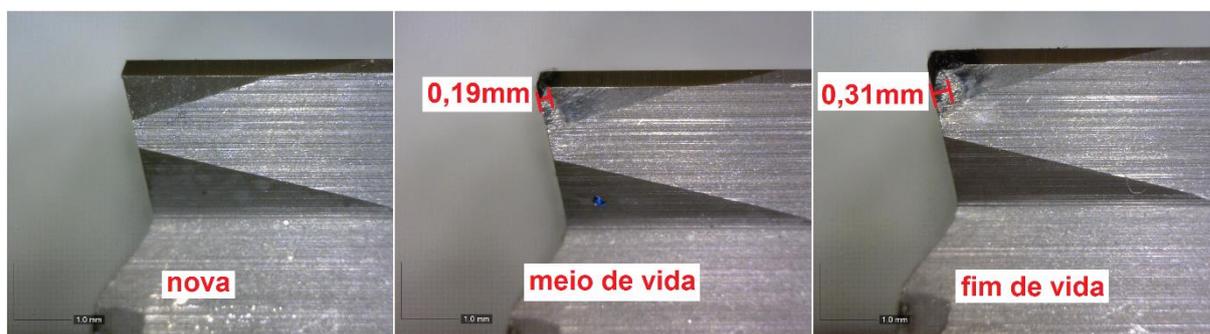


Figura 69 - Ferramenta nova (IN), fluido vegetal (FV) e parâmetros P2
Fonte: Autoria própria.

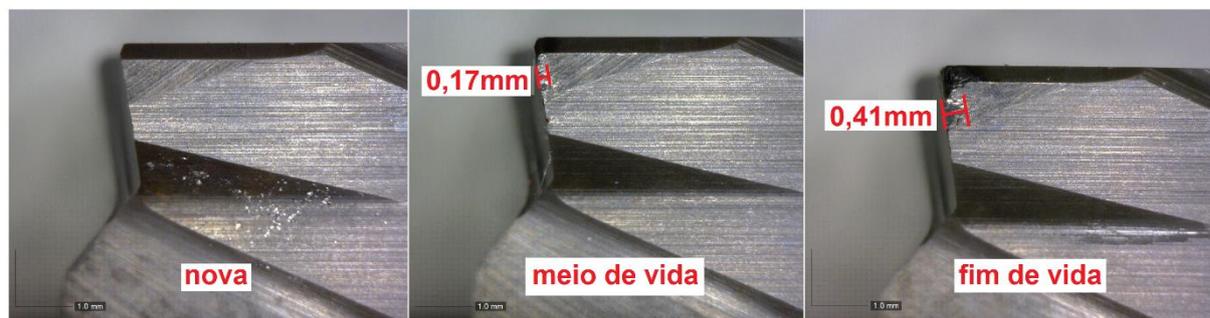
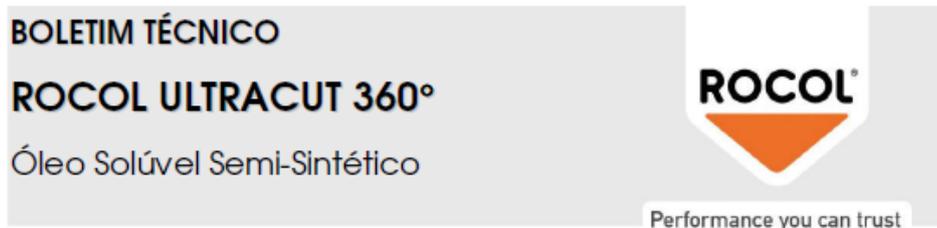


Figura 70 - Ferramenta reafiada (IR), fluido vegetal (FV) e parâmetros P2
Fonte: Autoria própria.

ANEXO 2

BOLETIM TÉCNICO ÓLEO SOLÚVEL ROCOL ULTRACUT 360°

**Descrição:**

ROCOL ULTRACUT 360° é formulado com matérias primas de última geração, possibilitando sua utilização em uma ampla gama de operações, atendendo às mais severas exigências encontradas na indústria.

ROCOL ULTRACUT 360° proporciona ótima refrigeração mantendo boas propriedades lubrificantes.

Principais vantagens:

- Alta diluição: Até 40:1 em corte e até 70:1 em retífica.
- Versatilidade: possibilidade de se utilizar um só produto para todas as operações de corte e retífica, e em diversos tipos de metais ferrosos e não ferrosos.
- Compatível com borrachas e elastômeros, não agride componentes das máquinas.
- Ótima resistência à corrosão: um exclusivo conjunto de aditivos inibidores de corrosão assegura uma excelente proteção às peças e máquinas.

Instruções para uso:

Antes da troca da emulsão, descontamine o sistema com ROCOL ULTRAGUARD SC.

Adicione 1(uma) parte de **ROCOL ULTRACUT 360°** em até 40 partes de água, dependendo da dureza da água, material da peça e severidade de operação. Para manutenção adequada da diluição utilize nosso ROCOL FLUID MIXER (misturador automático de óleo).

Dados Técnicos:

Aparência:	líquido translúcido
Estabilidade da emulsão 16 hs:	ok
pH (1:15):	8.5 – 9.5
Peso específico:	0.990 - 1.035 g/ml
Nitritos	isento
Fenol	isento

As informações contidas nesta publicação são baseadas em nossas experiências de laboratório e de campo. A utilização em condições e/ou ambientes diferentes dos conhecidos podem alterar um ou vários dos dados apresentados nesta publicação, e, nestes casos, nossa responsabilidade estará restrita às informações por nós confirmadas e/ou alteradas após a apresentação pelo(s) usuário(s) de suas condições de uso.

mso 09.2009

ITW Chemical Products Ltda.

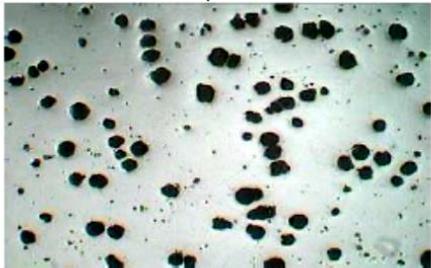
Av. Jorge Alfredo Camasmie, 670 Embu – SP- Cep: 06816-050 - Fone : (11) 4785. 2660 - Fax : (11) 4785. 2680
e-mail: tech@itwchem.com.br

ANEXO 3

RELATÓRIO DO MATERIAL DO CORPO DE PROVA



RELATÓRIO DE MATERIAL

MATERIAL:		CLIENTE	
FERRO FUNDIDO NODULAR		UTFPR	
ENSAIOS MECÂNICOS			
1.0	DUREZA EXTERNA	260 HB	Obs.:
2.0	DUREZA NUCLEO	271 HB	
3.0	RESISTÊNCIA TRAÇÃO	56,45 Kg/mm ²	
4.0	LIMITE DE ESCOAMENTO	50,84 Kg/mm ²	
5.0	ALONGAMENTO	2,50%	
COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
6.0	% C	-	Obs.: resultado de Carbono não é possível descobrir no spectromax, porque não é uma amostra coquilada
7.0	% Si	2,49	
8.0	% Mn	0,31	
9.0	% S	0,24	
10	% P	0,06	
11	% Al	0,019	
12	% Ni	0,066	
13	% Cu	0,45	
14	% Sn	0,034	
15	% Mg	0,060	
ANÁLISE METALOGRAFICA			
16	GRAFITA	ESFEROIDAL	obs.: amostra com ataque de 2% de nital
17	TIPO	VI	
18	TAMANHO	5	
19	GRAU DE NODULIZAÇÃO	95%	
20	MATRIZ	Perítica 90%	
			
Juliano Cardoso		Laboratorio Metalúrgico	DATA: 02/06/2014