unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

NILSON RODRIGUES DA SILVA

Aplicação de ferramentas cerâmicas experimentais à base de alumina no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido.

Guaratinguetá - SP
2021

Nilson Rodrigues da Silva

Aplicação de ferramentas cerâmicas experimentais à base de alumina no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido.

Tese apresenta à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. Jose Vitor C. de Souza.

Guaratinguetá - SP
2021

Silva, Nilson Rodrigues da
S586a Aplicação de ferramentas cerâmicas experimentais à base de alumina no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido / Nilson Rodrigues da Silva – Guaratinguetá, 2021
124 f .: il.
Bibliografia: f. 112-117

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

1. Usinagem. 2. Material cerâmico. 3. Ferramentas de corte. I. Título.

CDU 621.9(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária-CRB-8/3595

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

NILSON RODRIGUES DA SILVA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

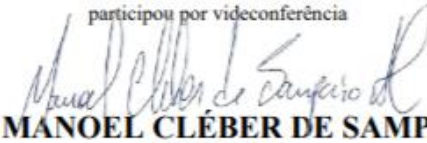
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

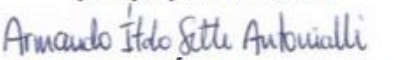
B A N C A E X A M I N A D O R A:

PROF. DR. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador / UNESP/FEG
participou por videconferência



PROF. DR. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG
participou por videconferência

PROF. DR. SÉRGIO FRANCISCO DOS SATOS
UNESP/FEG
participou por videconferência



PROF. DR. ARMANDO ÍTALO SETTE ANTONIALLI
Universidade Federal de São Carlos
participou por videconferência

PROF. DR. ROSEMAR BATISTA DA SILVA
Universidade Federal de Uberlândia
participou por videconferência

Setembro de 2021

DADOS CURRICULARES

NILSON RODRIGUES DA SILVA

NASCIMENTO	05.02.1955 – Inhambupe/BA
FILIAÇÃO	Genesio Rodrigues da Silva Bernardete Batista Rodrigues da Silva
1983/1985	Curso de Graduação Licenciatura em Física UNICEB – Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes – Santos / SP.
1986/1991	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Mecânica Engenheiro Industrial Mecânico UNICEB – Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes – Santos / SP.
2002/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Mestre em Engenharia Mecânica UNITAU – Universidade de Taubaté – Taubaté / SP.
2016/Atual	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Doutor em Engenharia Mecânica UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus Guaratinguetá /SP.

dedico este trabalho aos meus falecidos pais,
meus irmãos e irmãs, aos meus filhos
Henrique, Gustavo e Marina e em especial a
minha esposa Neusa, companheira e guerreira,
que sempre com muita paciência, dá o apoio e
incentivo para prosseguir na concretização dos
sonhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço a minha vida, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* um grande incentivador, sempre disponível e paciente. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

ao Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves, que ajudou com maestria e profissionalismo na realização dos experimentos no centro de usinagem;

ao Prof. Dr. Jose Vitor Candido de Souza, pelo desenvolvimento e disponibilização dos insertos cerâmicos, além de ter compartilhado o seu rico conhecimento que engrandeceu este trabalho.

ao técnico José Manoel Bernardes, pela contribuição na realização dos procedimentos de ensaios em usinagem e programação do centro de fresamento.

aos meus amigos que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho com discussões, auxílio e sugestões, Marcelo Antunes de Paula e Taise Azevedo de Sousa,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“A lei da mente é implacável. O que você pensa, você cria. O que você sente, você atrai. O que você acredita, torna-se realidade”.

Buddha.

RESUMO

As ferramentas cerâmicas destacam-se como uma boa solução para redução de custos nos processos de usinagem e são usadas onde se requer alta dureza e resistência ao desgaste. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de dois tipos de ferramentas de corte em material cerâmico a base de óxido de alumínio com óxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO) e a base de óxido de alumínio com óxido de zircônio (Al_2O_3 + ZrO_2), para o fresamento do aço ABNT 4340 endurecido. Utilizou-se como parâmetros (dados de entrada): três velocidades de corte (Vc) 200; 300 e 400 m/min, três avanços (f) 0,05; 0,10 e 0,15 mm/rev.) além de duas profundidades (ap) 0,10 e 0,20 mm. Os fatores de respostas (dados de saída) foram a potência consumida, a emissão acústica, a vibração, as rugosidades (Ra) e (Rt) da peça usinada, o desgaste (VB) e ensaios de vida dos insertos de cerâmica. A potência consumida é maior com o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de usinagem. O valor de potência de para o inserto de Al_2O_3 + MgO (241,4 W) foi 13,5 % inferior à do fresamento obtido com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (279,2 W). Os valores de emissão acústica diminuíram com o aumento da velocidade de corte (0,166 V; 0,151 V e 0,145 V para 200 m/min; 300 m/min e 400 m/min respectivamente). Verificou-se que aumentando a profundidade ocorre o aumento dos valores de emissão acústica, obteve-se um valor de 0,148 V para 0,1mm e de 0,160 V para 0,20 mm de profundidade. Com a aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte, os valores de vibração diminuíram obtendo-se: 4,860 mm/s para a velocidade de 200 m/min, 4,462 para 300 m/min. e 3,920 para 400 m/min. O valor de vibração com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 foi de 3,780 mm/s e com o inserto de Al_2O_3 + MgO foi mais elevado (5,047 mm/s). O valor de rugosidade (Ra) é maior com o aumento do avanço e da profundidade de corte. Com o inserto de Al_2O_3 + MgO (0,753 μm) a rugosidade (Ra) foi 21,3 % inferior a obtida com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (0,957 μm). Os valores médios da rugosidade (Rt) aumentaram com a aumento das velocidades, do avanço e da profundidade de corte. A rugosidade (Rt) com o inserto de Al_2O_3 + MgO (5,57 μm) foi 19.0 % inferior a que foi obtida com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (6,88 μm). Os resultados encontrados no fresamento sem retificação do aço ABNT 4340 endurecido, indicam que as ferramentas de corte de cerâmica tanto as de alumina com adição de oxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO) quanto com adição de óxido de zircônio (Al_2O_3 + ZrO_2), podem ser aplicadas pois a qualidade da superfície obtida com as duas ferramentas foram compatíveis com as normalmente esperadas para acabamento nas operações de fresamento e retificação.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem**.** Rugosidade. Monitoramento. Tratamento Térmico. Desgaste.

ABSTRACT

Ceramic tools stand out as a good solution for cost reduction in machining processes and are used where high hardness and wear resistance are required. The study has evaluated the performance of two types of cutting tools in ceramic material: based on aluminum oxide and magnesium oxide (Al_2O_3 + MgO) and based on aluminum oxide and zirconium oxide (Al_2O_3 + ZrO_2), for milling machining of hardened ABNT 4340 steel. The following cutting parameters (input data) has been used: three cutting speeds (Vc) 200; 300; 400 m/min, three feeds (f) 0.05; 0.10; 0.15 (mm/rev) and two cutting depths (ap) 0.10 and 0.20 mm. The response factors (output data) have been power consumed, acoustic emission, vibration, roughness (Ra) and (Rt) of the machined part, the wear (VB) and tool life tests of ceramic inserts. The power consumed is greater with increasing cutting speed, feed and depth. The power value for the Al_2O_3 + MgO insert (241.4 W) has been 13.5 % lower than for the milling obtained with Al_2O_3 + ZrO_2 insert (279.2 W). Acoustic emission values have decreased with the increase in the cutting speed (0.166 V; 0.151V and 0.145 V for 200 m/min; 300 m/min and 400 m/min respectively). It has been found that increasing the depth of cut increases the acoustic emission values, a value of 0.148 V to 0.1 mm and 0.160 V to 0.20 mm depth has been obtained. With the increase in cutting speed, feed and depth, the vibration values have decreased, obtaining: 4.859 mm/s for the speed of 200 m/min, 4.462 for 300 m/min. and 3.920 for 400 m/min. Vibration value with Al_2O_3 + ZrO_2 insert has been 3.780 mm/s and with the Al_2O_3 + MgO insert it has been higher (5.047 mm/s). Roughness value (Ra) is greater with increasing feed and depth of cut. With Al_2O_3 + MgO insert (0.753 μm), the roughness (Ra) was 21.3% lower than that obtained with the Al_2O_3 + ZrO_2 insert (0.957 μm). Average values of the roughness (Rt) have increased with the increase of the cutting speeds, the feed and the depth of cut. The roughness (Rt) with the Al_2O_3 + MgO insert (5.57 μm) was 19.0 % lower than that obtained with the Al_2O_3 + ZrO_2 insert (6.88 μm). Results found in machining by dry milling and without grinding the hardened ABNT 4340 steel, indicate that the ceramic cutting tools both those of alumina with addition of magnesium oxide (Al_2O3 + MgO) and with addition of zirconium oxide (Al_2O_3 + ZrO_2), can be applied, since the surface finish obtained with the two tools have been compatible with the one expected.

KEYWORDS: Machining. Roughness. Monitoring. Heat treatment. Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513.....27
Figura 2 – Comparação entre as propriedades da cerâmica, cermet e metal duro.....31
Figura 3 - Sequência de formas de insertos que apresentam o ângulo de ponta, ε_r, crescente, com consequente aumento da resistência mecânica.....33
Figura 4 - Relações típicas de dureza a quente para os materiais de ferramentas.....36
Figura 5 - Aumento das velocidades de corte conseguido no último século.....37
Figura 6 – Metodologia para selecionar uma ferramenta de corte.....38
Quadro 1 – Comparação entre o fresamento e outros processos de usinagem no corte de superfícies planas não de revolução.....39
Figura 7 – Rugosidade (Ra) em função do processo de fabricação utilizado..... 42
Figura 8 – Rugosidade total (Rt) em função do processo de fabricação utilizado.....43
Figura 9 – Classificação da integridade superficial de peças usinadas.....44
Quadro 2: Comprimentos de amostragem e de avaliação em função da faixa de rugosidade de uma superfície conforme a norma NBR ISO 4288 (2008).....46
Quadro 3 – Comprimentos de amostragem e de avaliação em função da faixa de rugosidade de perfis periódicos e RSm de perfis periódicos e não periódicos de uma superfície, conforme a norma ISO4288(2008) 46
Quadro 4 – Composição química do aço ABNT 4340.....48
Figura 10 – Forças de usinagem e seus componentes para o processo de torneamento e fresamento..... 50
Figura 11 – Fluxograma das etapas de trabalho 66
Figura 12– Centro de Usinagem.....67
Figura 13 – Suporte de fixação da ferramenta.....67
Figura 14 – Suporte de fixação da ferramenta – montado no centro de usinagem para fresamento..... 68
Figura 15 – Tela do programa supervisório para captação de sinais durante os ensaios de fresamento.....69
Figura 16– Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT100 B10.....69
Figura 17 – Sensor para captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION.....71
Figura 18 – Módulo de vibração modelo TV100.....71

Figura 19 – Rugosímetro portátil da marca Mahr modelo (a) MarSurf M300; (b) MarSurf RD 18.....72
Figura 20 – ângulo de engajamento para cálculo do L_{cf}.....73
Figura 21 – Microscópio óptico de medição Mahr MM200 (16.a) e Microscópio óptico Zeiss modelo Stemi 2000 (16.b) 74
Quadro 5 – Composição do aço ABNT 4340 utilizado.....74
Figura 22 – Corpo de prova na forma bruta e na forma usinada e temperado e revenido.....75
Figura 23 – Corpo de prova para usinagem 75
Figura 24 – Inserto de cerâmica de Al_2O_3 + MgO 76
Figura 25 – Procedimento experimental com os fatores de entrada e parâmetros de saída.....77
Figura 26– Fixação do corpo de prova e percurso da ferramenta (26.a) e fixação e posição dos sensores (26.b).....78
Figura 27 – Medição da rugosidade Ra e Rt na região usinada.....79
Figura 28 – Desgaste dos insertos após fresamento.....80
Figura 29 – Exemplo de gráfico de potência de um ensaio de fresamento para identificação da potência em vazio e do momento de efetiva remoção de material.....82
Figura 30 – Exemplo dos graficos criados com o software MATLAB® com o programa de tratamento de dados.....83
Figura 31 – Ensaio de vida da ferramenta.....85
Figura 32 – Medição do desgaste da ferramenta com microscópio óptico.....85
Quadro 6 – Parâmetros de fresamento para o ensaio de vida.....86
Figura 33 – Efeitos principais dos fatores na média das médias de potência de corte (ANOM).....92
Figura 34 – Efeitos principais dos fatores na média das médias de emissão acústica (ANOM).....93
Figura 35 – Efeitos principais dos fatores na média das médias da vibração (ANOM).....94
Figura 36 – Efeitos principais dos fatores na média das médias da rugosidade (Ra).....96
Figura 37 – Efeitos principais dos fatores na média das médias da rugosidade (Rt).....97
Figura 38 – Rugosidade (Ra) em função dos insertos utilizados.....97
Figura 39 – Rugosidade (Ra) em função das velocidades de corte.....98
Figura 40 – Efeitos principais dos fatores na média das médias para o desgaste VB/lc.....99
Figura 41 – Ferramentas com menores desgastes ou avarias 100
Figura 42 – Ferramentas com maiores desgastes ou avarias 100

Figura 43 – Desgaste das ferramentas no ensaio de vida 102
Figura 44 – Medição do desgaste da ferramenta com microscópio óptico.....102
Figura 45 – Distribuição da variáveis de resposta por tipo de ferramenta.....105
Figura 46 – Rugosidades da superfície (Ra e Rt) e desgaste VB/lc por tipo de ferramenta....106
Figura 47 – Correlação entre as variáveis de saída e análise do componentes principais para o inserto Al_2O_3 + MgO.....107
Figura 48 – Análise multivariada com os parâmetros de corte e variáveis de resposta para o inserto Al_2O_3 + MgO.....107
Figura 49 – Correlação entre as variáveis de saída e análise do componentes principais para o inserto Al_2O_3 + ZrO_2 108
Figura 50 – Análise multivariada com os parâmetros de corte e variáveis de resposta para o inserto Al_2O_3 + ZrO_2 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Combinações e fatores testados em cada percurso da ferramenta..... 78

Tabela 2 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração, emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 1ª. Serie - Sentido: Ida (esquerda para a direita).....87

Tabela 3 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 2ª. Serie - Sentido: Ida (esquerda para a direita).....87

Tabela 4 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 1ª. Serie - Sentido: Volta (direita para a esquerda).....88

Tabela 5 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 2ª. Serie - Sentido: Volta (direita para a esquerda).....88

Tabela 6 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 1ª. Serie - Sentido: Ida (esquerda para a direita).....89

Tabela 7 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 2ª. Serie - Sentido: Ida (esquerda para a direita).....90

Tabela 8– Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 1ª. Serie - Sentido: Volta (direita para a esquerda).....90

Tabela 9 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – 2ª. Serie - Sentido: Volta (direita para a esquerda).....91

Tabela 10 – Ensaios de vida das ferramentas, vc = 400m/min, f = 0,05 mm/rev, ap = 0,10 mm.....101
Tabela 11 – Melhor condição de fresamento.....104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	*Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização).
NBR	Norma Brasileira Registrada

LISTA DE SÍMBOLOS

f_c avanço de corte [mm]

φ ângulo da direção do avanço

vc velocidade de corte [m/min]

d diâmetro da ferramenta [mm]

n rotação da ferramenta [rpm]

f_z avanço [mm/volta]

v_f velocidade de avanço [mm/min]

Ra desvio aritmético médio do perfil avaliado

Rt altura total do perfil

f_z avanço por dente

R raio da fresa

F_u força de usinagem [N]

F_c força de corte [N]

F_f força de avanço[N]

F_p forca passiva ou força de profundidade [N]

F_{TR} força ativa [N]

Fn força de compressão [N]

k_s pressão específica de corte [N/mm^2]

A área da seção de corte [mm^2]

y_t valor instantâneo do deslocamento no instante t;

y_0 amplitude de deslocamento;

ω frequência angular

θ fase.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVO GERAL 18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 18
2 REVISÃO DA LITERATURA 20
2.1 USINAGEM DOS METAIS 20
2.1.1 Processo de usinagem 20
2.1.2 Ferramentas de usinagem 22
2.1.3 Materiais para ferramentas de corte 23
2.1.3.1 Aços rápidos 24
2.1.3.2 Aços rápidos com cobertura 25
2.1.3.3 Metal duro 26
2.1.3.4 Metal duro com cobertura 28
2.1.3.5 Material cerâmico 29
2.1.3.6 Materiais ultraduros para ferramentas 34
2.1.3.7 Metodologia para selecionar a ferramenta de corte 35
2.2 FRESAMENTO 38
2.3 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE E RUGOSIDADE 41
2.4 AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO 47
2.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM 48
2.5.1 Potência 49
2.5.2 Emissão acústica 53
2.5.3 Vibração 54
2.5.4 Projeto e análise de experimentos 55
2.6 ESTUDOS SOBRE USINAGEM DE AÇOS ENDURECIDOS COM FERRAMENTAS DE CERAMICA E AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO 58
3 MATERIAIS E MÉTODOS 66
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 66
3.1.1 Centro de usinagem 66
3.1.2 Sistema de aquisição de sinais 68
3.1.3 Medição da rugosidade da peça usinada 72
3.1.4 Medições de desgaste dos insertos e captura de imagens 72
3.1.5 Preparação do corpo de prova 74

3.1.6 Materiais dos insertos cerâmicos 76
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 77
3.2.1 Medição da rugosidade 79
3.2.2 Imagens e medidas de desgaste dos insertos 80
3.2.3 Tratamento dos dados 80
3.2.4 Ensaio de vida das ferramentas 84
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 87
4.1 RESULTADOS OBTIDOS COM O INSERTO DE Al_2O_3 + MgO 87
4.2 RESULTADOS OBTIDOS COM O INSERTO Al_2O_3 + ZrO_2 89
4.3 EFEITOS PRINCIPAIS DAS COMBINAÇÕES TESTADAS COM OS INSERTOS DE Al_2O_3 + MgO E Al_2O_3 + ZrO_2 91
4.3.1 Potência de Usinagem 91
4.3.2 Emissão Acústica 93
4.3.3 Vibração 94
4.3.4 Qualidade da superfície – rugosidades (Ra e Rt) 95
4.3.5 Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (VB/lc) 98
4.3.6 Imagens dos desgastes e avarias das ferramentas Al_2O_3 + MgO e Al_2O_3 + ZrO_2 99
4.3.7 Ensaios de vida dos insertos cerâmicos 100
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA OS DOIS TIPOS DE INSERTOS 103
4.4.1 Parâmetros adequados para a condição “menor melhor” 103
4.4.2 Distribuição das variáveis de resposta 104
5 CONCLUSÃO 109
6 INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 111
REFERÊNCIAS 112

INTRODUÇÃO

Segundo vários autores e normas sobre o tema, os processos de usinagem são definidos como aqueles em que a remoção de material ocorre através da entrada de uma ferramenta em uma peça para conferir às peças a forma, dimensões e o acabamento superficial necessário, ou a combinação de mais de um deles por meio de geração de cavaco. A ferramenta deve ser constituída de um material de dureza e resistência muito superior àquela do material da peça. A usinagem compreende o processo de desbaste mecânico que visa dar forma a uma peça, normalmente metálica e que compõe a matéria-prima, significa o ato ou efeito de usinar (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008; FERRARESI, 2013).

A maior parte dos produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção passa por algum processo de usinagem e pode-se considerar que a usinagem é uma técnica muito utilizada para a fabricação de peças em geral, estando presente em vários segmentos industriais para obtenção de furos na indústria metal-mecânica, nos processos de melhoria da qualidade superficial das peças, na fabricação de engrenagens para transmissão de potência, na confecção da maior parte dos componentes da indústria aeroespacial, na fabricação de pinos médico odontológicos e lentes de contatos intraoculares. As operações de usinagem podem ser aplicadas em diversos tipos de materiais além dos materiais metálicos, tais como polímeros, madeiras, cerâmicos e compósitos.

A usinagem começou em tempos remotos com processos manuais e tiveram um progresso significativo ao longo dos anos, proporcionado pela otimização de técnicas, desenvolvimento de máquinas-ferramenta mais precisas, com maior potência e versatilidade, a aplicação de novas técnicas de usinagem em que se busca alta produtividade e diminuição do seu custo, bem como a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para fabricação de ferramentas.

Existem vários processos de usinagem e estes podem ser identificados como convencionais ou não convencionais. Os convencionais são torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, retificação, entre outros. Os não convencionais são aqueles que realizam a remoção de material por processos químicos, térmicos, mecânicos, tais como jato d'água, jato abrasivo, fluxo abrasivo, ultrasom, eletroquímico, feixe de elétrons, laser, plasma, fotoquímico entre outros.

O estudo da usinagem baseia-se na mecânica (cinemática, atrito e deformação), na termodinâmica (geração e propagação de calor) e nas propriedades dos materiais (MACHADO et al., 2015).

A procura pelas melhores condições de usinagem passa por uma série de considerações a respeito da ferramenta, peça, equipamentos, ambiente, condições de corte e, finalmente, por testes de usinabilidade. O processo de usinagem mais adequado, depende do conhecimento das características do material da peça a ser processada, e da escolha da ferramenta de corte com a geometria e a resistência mecânica que atendam os parâmetros de usinagem necessários. As evoluções tecnológicas tanto das máquinas-ferramenta quanto dos diferentes tipos de materiais a usinar têm contribuído para o surgimento de uma grande diversidade de ferramentas de corte e novos materiais para ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

A relevância dos processos de usinagem no meio industrial, proporciona um vasto campo de pesquisas, para atender o mercado que está constantemente desenvolvendo novos produtos e processos inovadores com aplicação de novos materiais e funcionalidades.

Dentre os processos utilizados, destaca-se o processo de fresamento, podendo-se dizer que é um dos mais universais e conhecidos para obtenção de peças com dimensões, geometria e superfícies de boa qualidade (LIMA, 2002 e KRATOCHVIL, 2004).

Na usinagem dos materiais metálicos, um dos grandes desafios tem sido a usinagem dos materiais endurecidos e/ou pouco convencionais, sendo que uma das opções é a utilização de ferramentas de metal duro classe H (ABNT ISO 513) que é indicado para usinagem de aços e ferros fundidos endurecidos. As ferramentas de materiais cerâmicos tem contribuído para e melhoria dos processos de usinagem deste tipo de material.

Define-se aço no estado endurecido como sendo todo aço cuja dureza seja superior a 45 HRC (ELBESTAWI et al., 1996), sendo que no caso do aço essa dureza é obtida geralmente com tratamentos térmicos objetivando obter alterações das características mecânicas dos materiais devido às finalidades pré especificadas.

Segundo Souza et al. (2003), o aço ABNT 4340 é denominado aço de alta resistência e foi desenvolvido para estruturas de grande porte, não apresentando aumento de peso nas construções, quando comparado com outros aços de menor resistência.

Os aços endurecidos apresentam algumas propriedades como alta dureza, alta abrasividade e baixa ductilidade. Essas propriedades conferem ao aço um comportamento diferenciado durante o processo de usinagem. O cavaco formado durante o processo é um cavaco curto, de seção em forma de “dente de serra” (MATSUMOTO, 1998). O aço ABNT 4340 é um dos aços com a mais alta temperabilidade entre os de construção mecânica, sendo de difícil usinabilidade e soldabilidade apresentando boa forjabilidade. É utilizado na fabricação de componentes muito solicitados e com boas propriedades mecânicas, tais como virabrequins, eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, bielas, colunas, mangas e cilindros

para aviões, tratores e veículos em geral. O aço ABNT 4340 é utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção. Essas propriedades são obtidas por beneficiamento por meio de têmpera e revenimento. Porém, na fabricação de peças precisas, após a peça ser temperada, é necessário o desenvolvimento de processos de usinagens com parâmetros mais eficientes e desenvolvimento de ferramentas com uma boa relação de custo-benefício.

Estudos para desenvolvimento de ferramentas produzidas de cerâmicas de corte avançadas ainda é incipiente e há muito a ser explorado, embora existam expectativas de ganhos na forma de redução significativa de tempos de usinagem e aumento da eficiência econômica (GARCIA, 2015). A aplicação de materiais cerâmicos para fabricação de ferramentas é em função da sua elevada dureza, resistência a altas temperaturas, alta resistência à formação de cratera e baixa condutividade térmica, apresentando como desvantagem a sua excessiva fragilidade e baixa tenacidade, propriedades estas que podem ser melhoradas em determinados compostos cerâmicos. Graças a estas propriedades as ferramentas cerâmicas destacam-se as como sendo uma solução promissora e um grupo competitivo, principalmente nos processos de usinagem de materiais endurecidos e superligas, para redução dos custos, principalmente nas indústrias aeronáuticas, aeroespaciais, petroquímica, automobilísticas e outras (MACHADO et al., 2015; COELHO E SILVA, 2018).

A usinagem de materiais frágeis ou em operações de cortes interrompidos (como no caso de fresamento, por exemplo) requer materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportar os choques e os impactos inerentes. Como, em geral, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (normalmente alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os seus fabricantes.

Os departamentos de pesquisa de algumas universidades tem contribuído no desenvolvimento experimental de ferramentas de corte com materiais de diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere um grau de pureza e qualidade compatíveis para conciliar, a alta dureza, resistência ao desgaste com a tenacidade, entre outras propriedades (COELHO E SILVA, 2018).

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de dois tipos de ferramentas produzidas em material cerâmico a base do óxido de alumínio escala não industrial, estabelecendo diferentes parâmetros de velocidade de corte, avanço, profundidade, que prolonguem a vida da ferramenta, para fresamento de corpos de prova de aço ABNT 4340 endurecidos pelo tratamento

térmico, em condições de acabamento superficial sem retificação, de geometria e custo – benefício mais próximas ou superiores àquelas obtidos atualmente.

As ferramentas utilizadas possuem dois tipos de dopantes, sendo uma delas à base de óxido de alumínio com óxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO), e a outra à base do óxido de alumínio com óxido de zircônio (Al_2O_3 + ZrO_2), produzidas pelo grupo de pesquisa em Usinagem da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em Guaratinguetá.

Os parâmetros de saída utilizados para avaliar o desempenho das ferramentas de corte foram rugosidade superficial (Ra e Rt), potência consumida, vibração, emissão acústica e desgaste (VB) de aresta de corte.

Para atingir os resultados almejados, informações que melhorem o desempenho de usinagem com o uso de ferramentas cerâmicas para fresamento de materiais de difícil usinagem (aços endurecidos) devem ser oferecidas. Assim sendo, estabelece-se como meta prolongar a vida de ferramentas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3) utilizadas para fresamento do aço ABNT 4340 endurecido e definiu-se como objetivos geral e específicos:

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de duas ferramentas experimentais de material cerâmico com composições químicas à base de óxido de alumínio com óxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO) e a base de óxido de alumínio com óxido de zircônio (Al_2O_3 + ZrO_2) , analisando e comparando o comportamento destas no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido por tratamento térmico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Analisar a influência dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) sobre as respostas de potência de usinagem (P_U), desgaste da ferramenta, emissão acústica (EA) e desgaste da ferramenta (VB).

1.2.2 Analisar o fresamento do aço ABNT 4340 endurecido com diferentes ferramentas de corte experimental, uma composta por óxido de alumínio com óxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO) e óxido de alumínio com óxido de zircônio, (Al_2O_3 + ZrO_2) , verificando o desempenho e a vida das ferramentas.

1.2.3 Verificar a performance e a vida das ferramentas: comparando as respostas para os parâmetros de rugosidade (Ra e Rt), comprimento de corte, potência consumida, vibração e desgastes das ferramentas.

1.2.4 Analisar o desgaste das ferramentas para os ensaios com maiores e menores valores de desgaste das ferramentas, em função do comprimento de corte para cada nova aresta de corte.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizada uma revisão com abordagem sobre o processo de usinagem dos metais, os aspectos relativos ao processo e parâmetros de corte e de monitoramento no fresamento dos materiais, ferramentas de corte com ênfase na aplicação de cerâmicas para fabricação das ferramentas e da qualidade superficial obtida com a usinagem dos metais, .

Serão apresentados aspectos sobre as características, propriedades mecânicas e aplicação do aço ABNT 4340 temperado e revenido e ainda abordar-se-á os tópicos de planejamento de experimentos.

2.1 USINAGEM DOS METAIS

2.1.1 Processo de usinagem

Dentre os processos de fabricação a usinagem é amplamente utilizada para obtenção de peças e componentes com elevada qualidade e/ou grande precisão, sendo que se entende por operação de usinagem a atividade para conferir a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda a combinação dos três itens, com remoção de material na forma de cavaco por uma determinada ferramenta e que é definido como sendo a porção de material da peça, retirada pela ferramenta (FERRARESI, 2013 e MACHADO et al.,2015).

Embora o processo de usinagem seja considerado um dos processos de fabricação mais popular do mundo que segundo Machado et al. (2015), a usinagem transforma em cavaco algo em torno de 10 % da produção de metais e emprega milhões de pessoas, é difícil prever o que ocorre durante as operações de usinagem devido ao grande número de variáveis nelas envolvidas, o que nos leva continuamente a realizar estudos sobre os materiais empregados para fabricação das ferramentas de corte, buscando o prolongamento da sua vida, bem como as forças de corte, potência consumida e superfície final obtida para a sua melhoria econômica (SANTOS, 2010 e MACHADO et al.,2015).

O estudo da usinagem de materiais é baseado nas propriedades mecânicas (atrito, deformação), na termodinâmica (calor) e nas características físicas, químicas e mecânicas dos materiais envolvidos e os parâmetros de usinagem são estabelecidos para cada tipo de material e ferramenta. As operações de usinagem são agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada, sendo estas subdivididas em desbaste e acabamento, no desbaste a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção do material e no acabamento a prioridade é a qualidade final do componente (MACHADO et al., 2015).

Segundo Machado et al. (2015) as condições ideais de corte são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível.

Dentre os processos de usinagem convencionais, os mais utilizados são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento e retificação, tendo como finalidade produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível. De acordo com Machado et al. (2015), os principais processos de usinagem não convencionais são remoção de material por jato d'água, jato abrasivo, fluxo abrasivo, ultrassom, eletroquímica, eletroerosão, feixe de elétrons, laser, plasma, química, fotoquímica, entre outros.

Segundo Vivancos et al. (2004) para se obter condições de usinagem satisfatórias, é necessário que se tenha um bom conhecimento da microestrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados.

Os parâmetros de usinagem de um material são aqueles que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços e a temperatura de corte, produtividade e características do cavaco (VIGNEAU, 1997, DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008, KONDO, 2019).

De acordo com Pivetta (2005) os fatores a serem considerados para melhoria do desempenho econômico das operações de usinagem são vida da ferramenta, parâmetros de corte, tais como velocidade, avanço, profundidade, potência consumida e superfície final da peça, entre outros.

Conhecer o processo e entender os mecanismos de desgaste das ferramentas é fundamental para que se chegue a uma ótima escolha, que poderá representar economia, ou seja, a escolha mais apropriada só aparecerá da pesquisa. É como disse oportunamente o Dr. SHAW no prefácio de seu livro *"Metal Cutting Principies":* "devido à complexidade do processo de usinagem é impossível uma teoria preditiva. Deve-se adotar uma solução prática fundamentada em muitas experiências, ao invés de se procurar o impossível" (MACHADO e SILVA, 2004).

Segundo Machado et al. (2015) a usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático que envolve um grande número de variáveis, e novamente citando Shaw "é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais", e que para chegar mais próximo a previsibilidade do que pode ocorrer, é fundamental que cada ponto seja detalhadamente estudado e propriamente interpretado.

2.1.2 Ferramentas de usinagem

Segundo a norma ABNT NBR 6175 (2015), a ferramenta de usinagem mecânica é constituída de arestas cortantes, destinada a remoção de cavaco e quando possui uma única superfície de saída é denominada de ferramenta monocortante e ferramenta multicortante, quando possuir mais de uma superfície de saída. As variáveis relativas à forma na zona de deformação da peça, a distribuição de tensão, a temperatura e os esforços de corte, são influenciados pela geometria da ferramenta de corte. Segundo Rodrigues (2005), o desempenho das ferramentas de corte nas operações de usinagem é importante, sendo que a avaliação e melhoria da sua eficiência pode ser obtida por meio de modificações do material construtivo.

Independentemente do material para uma ferramenta de corte, todos deveriam possuir propriedades que proporcionem alta dureza em elevadas temperaturas, alta resistência mecânica e ao desgaste, tenacidade suficiente para evitar falhas por fadiga ou fratura, alta resistência ao choque térmico, à compressão e ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto, elevada estabilidade química e ser inerte quimicamente (MATSUMOTO e DINIZ, 2000, COELHO E SILVA, 2018).

Essas propriedades não necessariamente se reúnem em um só material, mas dependendo da aplicação, priorizam-se algumas delas, possíveis de serem reunidas. Desde as primeiras aplicações de processos de usinagem surgiram diversos materiais aplicados em ferramentas de corte. Para cada aplicação existe um tipo adequado de ferramenta de corte, sendo que os fabricantes procuram reunir algumas características no seu processo de fabricação, considerando-se que todas as características não se encontram reunidas em um único material (MACHADO et al., 2015, COELHO e SILVA, 2018).

O resultado das operações de usinagem também pode ser melhorado com modificações da geometria da parte de corte da ferramenta que segundo a ABNT NBR ISO 3002-1 (2013), é a parte funcional de cada elemento da ferramenta que produz cavacos e é constituída pelas arestas de corte, onde se encontram as arestas principal e secundária de corte, a superfície de saída que é caracterizada pela região por onde desliza o cavaco e a superfície de folga, que é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem(MACHADO et al., 2015).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), as forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta e a força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante este processo, é chamada de força de usinagem. Estimar esta força torna-se

cada vez mais necessário, pois os processos de usinagem estão se tornando mais automatizados e para garantir a qualidade superficial da peça usinada, bem como a conformidade do processo e obter menores custos e tempos de manufatura, recomenda-se um estudo de previsibilidade tanto do desgaste e avarias da ferramenta, quanto das variações dos esforços de corte (PIVETA, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Para definição da máquina-ferramenta, tolerâncias da peça a ser usinada, temperaturas de corte e a expectativa da vida da ferramenta, é importante conhecer a força de usinagem, pois ela está diretamente relacionada com o material da peça e com os ângulos de posição e de saída da ferramenta e ainda com os limites do operação da máquina-ferramenta. A ordem de grandeza e o comportamento dos esforços de corte nos processos de usinagem, afetam a potência necessária para o corte e, portanto, são considerados para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Segundo Souza (2008), as operações de usinagem contribuem com uma boa parcela no custo final dos produtos, por isso é importante o desenvolvimento de tecnologias que promovam avanços na obtenção de propriedades da ferramenta a ser desenvolvida, proporcionando melhorias da resistência mecânica, confiabilidade e redução de custo.

2.1.3 Materiais para ferramentas de corte

De acordo com (FERRARESI, 2013) a seleção adequada do material para a ferramenta de corte influi na eficiência do processo de usinagem, e o tipo de material a ser utilizado, depende de alguns fatores tais como: a natureza da operação de usinagem; o material a ser usinado; a forma e dimensões da própria ferramenta; a condição da máquina ferramenta; o custo do material para ferramenta; entre outros. Dos materiais utilizados para a fabricação de ferramentas de corte, muitas vezes, o que se sobressai em uma determinada propriedade é inferior nas outras, o que torna necessário buscar um equilíbrio entre elas. As características da ferramenta escolhida influenciam na quantidade de trocas de ferramentas, escolha das máquinas, tempos de fabricação, custo da mão de obra, entre outros fatores (XAVIER, 2003).

Segundo (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2008) não há uma classificação geral dos materiais para ferramentas, mas elas podem ser agrupadas de acordo com as suas características químicas e por ordem crescente em função da dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão. As ferramentas podem ser classificadas de acordo com o material utilizado na sua fabricação sendo: aços-rápidos (HSS), aços-rápidos com cobertura, metal-duro, metal-duro com cobertura, cermet, cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante (PCD).

2.1.3.1 Aços rápidos

O primeiro impacto significativo causado nos materiais para ferramentas aconteceu na virada do século XIX, quando Taylor e White desenvolveram em 1905, o primeiro aço-rápido, contendo 0,67% C, 18,91% W, 5,47% Cr, 0,11% Mn, 0,29% V e o tratamento térmico apropriado. É um aço ferramenta de alta liga constituído por tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio, assim designado pois era o material de ferramenta que suportava maiores velocidades de corte *(HSS – High Speed Steel).* Esta descoberta revolucionou a prática de usinagem na época, resultando em um grande aumento de produtividade. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em cerca de 20 vezes, passando de 3 a 5 m/min com as ferramentas de aço carbono para 30 a 35 m/min com as de aço-rápido. Exatamente por isso, estes aços receberam o nome de "rápidos". Hoje, comparando com os materiais das ferramentas atuais, estes valores são relativamente baixos. Atualmente este grupo de materiais ainda resiste, pois mais de um século depois de descobertos, ainda são largamente empregados (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008, COELHO e SILVA, 2018).

Apresentam elevada dureza a quente, podendo ser utilizados até temperaturas de corte da ordem de 600 ºC, sua tenacidade depende dos elementos de liga e do grau de solubilidade dos elementos que estão na sua composição (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). As principais aplicações dos aços rápidos são em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas, e até ferramentas de barras para aplicações em torneamentos de peças de diâmetros reduzidos, cuja velocidade de corte conseguida é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais mais resistentes (COELHO e SILVA, 2018).

As ferramentas de aço rápido são divididas em dois grandes grupos:

- Aços ao Tungstênio (W), identificados pela letra "T";
- Aços ao Molibdênio (Mo), identificados pela letra "M".

Os principais elementos de ligas dos aços-rápidos são o Carbono (0.7 e 1.6 %), o Tungstênio (até 20%), o Molibdênio, o Vanádio (1 a 5 %), o Cromo, (até 4%), o Cobalto, além de outro como enxofre (0.05% a 0.2%) e o Titânio pode substituir parte ou completamente o vanádio. Os aços-rápidos apresentam uma elevação de dureza quando revenidos em temperaturas na faixa de 480°C a 565°C, dependendo da composição química. Para processos em que é necessária alta dureza a elevadas temperaturas, o principal elemento de liga do aço rápido deve ser o tungstênio. O segundo mais importante é o molibdênio, o terceiro o Co, e assim por diante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008, COELHO e SILVA, 2018) .

Os aços-rápidos com teores de Co, que variam até um valor máximo de aproximadamente 12%, são normalmente os mais requisitados, justamente por permitirem velocidades de corte da ordem de 25% a 30% maiores que seus similares sem este elemento. Se a resistência ao desgaste abrasivo for a principal exigência do processo, o principal elemento de liga do aço rápido deve ser o vanádio, depois o tungstênio, o molibdênio, pois o carboneto de vanádio tem dureza superior à do carboneto de tungstênio e do carboneto de molibdênio (COELHO e SILVA, 2018).

2.1.3.2 Aços rápidos com cobertura

Os aços rápidos começaram a receber coberturas para melhorias das condições do próprio aço rápido e para sua utilização em operações que requeiram maior resistência ao desgaste, aplica-se uma camada de cobertura com espessura entre 1 e 4 μm de um material mais resistente ao desgaste como por exemplo, o nitreto de titânio (mais utilizado) ou o carbonitreto de titânio, produzindo uma ferramenta com características tenazes no núcleo e duras, com elevada resistência ao desgaste e quimicamente inertes na superfície. Estas camadas possuem alta dureza, da ordem de 2300 HV, elevada ductilidade e baixo coeficiente de atrito, além de serem quimicamente inertes e possuírem ótima aparência (MACHADO e SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O método de deposição utilizado para aços rápidos, denominado PVD (phisical vapour deposition, ou deposição física de vapor), usa temperaturas de tratamento inferiores a 500°C e pode ser subdividido em três configurações básicas: evaporação a vácuo e a arco (*vaccum or arc evaporation)*, ejeção (*sputtering*) e implantação iônica (*ion implantation*). Hoje a aplicação de ferramentas de aço-rápido revestida aumenta o tempo de vida das ferramentas e permite o uso de velocidades de corte superiores àquelas possíveis em ferramentas sem o revestimento. As ferramentas de aço rápido são normalmente reafiadas após o desgaste atingir determinados níveis, o que implica na necessidade de novo recobrimento, uma vez que a reafiação é feita pela retificação da zona desgastada. No caso das brocas e fresas, as ferramentas são normalmente reafiadas pela retificação da superfície de folga, ficando a superfície de saída sempre com a camada revestida. No caso de fresas caracol, a ferramenta é reafiada pela retificação da superfície de saída, neste caso quem fica sempre com o revestimento são as superfícies de folgas. (COELHO e SILVA, 2018).

2.1.3.3 Metal-duro

Com o metal duro, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes (de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 - 300 m/min). A descoberta desta classe aconteceu por volta de 1920, na Alemanha, quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio, WC, em pó pela primeira vez. Quando foram verificadas as excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste desse material, foi chamado de "widia" (da língua alemã, de *wie diamant* = como o diamante), fazendo referência à semelhança das propriedades desse material com as do diamante o metal duro possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade (COELHO e SILVA, 2018).

O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras com um ou mais metais do grupo do ferro, níquel ou cobalto, finamente divididas e na forma de carbetos, com tamanho que varia de 1 a 10 μm, ocupando de 60 a 90 % do volume do material, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão e com bom compromisso entre dureza em altas temperaturas e a tenacidade. Usualmente são partículas de carbeto de tungstênio em combinação com outros tipos de carbetos, tais como os de titânio, tântalo e nióbio. O material aglomerante é na maioria das vezes, o cobalto e normalmente são utilizadas na forma de pastilhas fixadas mecanicamente (intercambiáveis) sobre um porta-ferramenta de aço-ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O material originalmente desenvolvido na Alemanha, continha WC + Co e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços (craterização). Para superar esta deficiência, pesquisas logo se iniciaram, pois, os aços sempre foram os mais importantes materiais de uso geral em engenharia. Adicionou-se, então TiC, TaC e/ou NbC aos WC + Co verificando-se significativa redução no problema de craterização durante a usinagem dos aços (COELHO e SILVA, 2018).

De acordo com a norma ISO 513, a classificação é composta por seis classes (P, M, K, N, H, S) e estas se subdividem em números, sendo que a classe P varia de P01 até P50; a classe M varia de M01 até M40; a classe K varia de K01 até K40. Quanto maior o número da classificação, maior é a tenacidade e menor é a dureza e a resistência ao desgaste. O grupo P é o que apresenta na sua composição química, maior teor de carbetos de titânio e de tântalo (TiC, TaC), proporcionando alta dureza e resistência ao desgaste abrasivo. O M é um grupo intermediário no teor de carbetos entre os grupos P e K. O grupo K possui carbeto de tungstênio

como constituinte de elevada dureza, proporcionando uma boa tenacidade a este grupo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Mais recentemente, entretanto, a Norma ISO 513 (2004), apresenta uma nova classificação de grupos de ferramentas, que não é exclusividade dos metais duros, abrangendo, também, as cerâmicas e os ultraduros. A classe N, para os metais e ligas não ferrosas (principalmente, cobre e alumínio), cuja coloração padrão é o verde, a classe S, para as superligas ou ligas resistentes ao calor (ferro, titânio, níquel e cobalto), cuja coloração padrão é o marrom, e a classe H, para os aços endurecidos (aços fundidos e aços e ferros fundidos temperados), tendo o cinza como coloração padrão. Esta nova classificação retirou da classe K o antigo rótulo de classe dos não-ferrosos (COELHO e SILVA, 2018).

São comuns tabelas detalhadas, indicando o campo de aplicação de cada grupo e subgrupo, na literatura e nos catálogos dos fabricantes de ferramentas de metal duro. A Figura 1 esta apresentada a designação que é recomendada pela norma ABNT NBRISO 513 (2015).

Figura 1 - Classificação dos metais duros segundo a norma ABNT NBR ISO 513

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	**Cor de identificação**	**Materiais a serem usinados**	**Metais duros**			
P	Azul	**Aços:** Todos os tipos de aços e aços fundidos, excetos aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	**Aço Inoxidável:** aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	**Ferro Fundido:** Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	**Metais não-ferrosos:** Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marron	**Superligas e titânio:** Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	**Materiais duros:** Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓

a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta

Fonte: Adaptado de COELHO e SILVA, 2018.

2.1.3.4 Metal-duro com cobertura

O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma importância muito grande por garantir um desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos. Dentre todo o metal duro utilizado na indústria, os revestidos representam mais de 95% no presente, com tendência ao crescimento contínuo. Outro fator que contribui muito para o crescimento da aplicação de metal duro revestido é o maior domínio das técnicas de revestimento assim como um custo mais acessível. Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes de metal duro (COELHO e SILVA, 2018).

Para aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, utiliza-se pastilhas de metal duro com cobertura de carbeto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. As pastilhas de metal duro com cobertura, permanecem com tenacidade no núcleo, resultando uma diminuição nos esforços de corte e aumento da vida da ferramenta, sendo assim a cobertura permite conciliar as propriedades de tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Estas ferramentas podem ter uma única camada de cobertura ou mais, geralmente a primeira camada, logo acima do núcleo é o carboneto de titânio ou carbonitreto de titânio, que algumas vezes é a única camada de cobertura. As pastilhas com duas camadas de cobertura tem em geral, uma camada de óxido de alumínio ou de nitreto de titânio por cima da camada de TiC. As pastilhas com três camadas, em geral, possuem uma comada de TiN recobrindo uma camada intermediária de Al_2O_3, que por sua vez recobre uma camada de TiC que esta por cima do núcleo de metal duro. As camadas são geralmente aplicadas pelo processo CVD (deposição química a vapor). Segundo os fabricantes, cada camada tem a sua função específica e a associação de camadas permite oferecer um produto com todas as vantagens possíveis de se obter com a técnica.

O carboneto de titânio (TiC) possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, promove a adesão das comadas de cobertura com o metal duro do núcleo, já que o óxido de alumínio, que normalmente está por cima do TiC. Ele não possui alta afinidade físico-química com o metal duro para conseguir uma forte adesão com o núcleo. O carbonitreto de titânio (TiCN), também usado como cobertura do metal duro, tem propriedades similares ao TiC, a menos que o seu coeficiente de atrito é mais baixo que o do TiC.

O óxido de alumínio, garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas, possui alta resistência a ataques químicos e à oxidação. É responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto.

O nitreto de titânio, reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência à difusão com aços. A espessura de camada é entre 5 a 7 μm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Testes de fresamento em alta velocidade foram realizados por Xiaobin e Zhao (2014) com o aço AISI D3 endurecido, para avaliar o desempenho de corte das ferramentas de cerâmica Al_2O_3/TiB_2 com diferentes porcentagens de TiB_2 produzidas por prensagem a quente. Foram verificados o desgaste das ferramentas, a temperatura de corte, as forças de corte e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco. Foi demonstrado que as taxas de desgaste e o coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco das ferramentas de corte de cerâmica Al_2O_3/TiB_2 no fresamento a seco e com alta velocidade de corte de aço temperado foram reduzidos em comparação com a usinagem a baixa velocidade.

Camuşcu e Aslan (2007) realizaram o fresamento de alta velocidade do aço-ferramenta AISI D3 endurecido a 35 HRC usando ferramentas de corte à base de carbeto revestido, cermet revestido, alumina (Al_2O_3) na forma de cerâmica mista e de nitreto cúbico de boro (CBN). Os desempenhos das ferramentas de corte foram comparados em relação à vida da ferramenta e ao acabamento superficial da peça. Os resultados também foram discutidos em termos de custo da ferramenta. O melhor desempenho de corte foi obtido com a ferramenta de CBN. A ferramenta cerâmica Al_2O_3 mista (TiCN) também se mostrou adequada para fresamento frontal de alta velocidade do aço AISI D3 com 35 HRC.

2.1.3.5 Material cerâmico

Segundo Diniz, Machado, Coppini (2008), as primeiras ferramentas de material cerâmico são da década de 50, mas sua utilização se intensificou na década de 80, em decorrência do desenvolvimento de novos compostos cerâmicos, trazendo melhorias nas propriedades da cerâmica, que promoveu o desenvolvimento e fabricação de ferramentas com melhores propriedades em relação às anteriores (com maior tenacidade à fratura e menos frágeis) e mantendo sua boa resistência aos choques térmicos.

As cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não metálicos, geralmente, na forma de óxidos, carbetos ou nitretos e a maioria tem estrutura cristalina, e em contraste com os metais, as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes. Em geral, as cerâmicas são

caracterizadas e identificadas por algumas propriedades: são materiais refratários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder resistência mecânica, possuem alta resistência ao desgaste em operações de usinagem, são materiais frágeis, têm baixa condutividade térmica, apresentam boa estabilidade química e térmica, possuem boa resistência à fluência, apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência à tração. A grande desvantagem do material cerâmico é sua excessiva fragilidade.

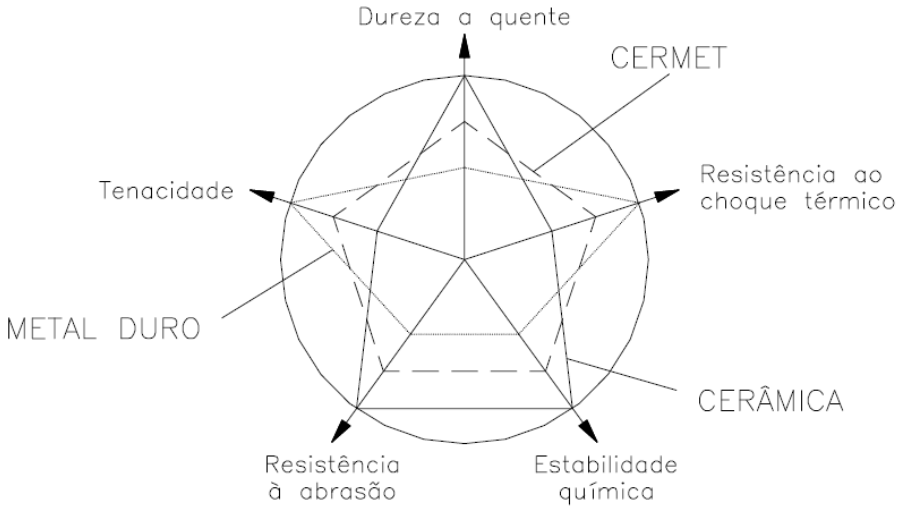
Graças estas propriedades as ferramentas cerâmicas destacam-se as como sendo uma solução promissora para redução dos custos nos processos de usinagem, principalmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, automobilística e outras (MACHADO et al., 2015).

Normalmente, as cerâmicas são usadas onde se requer alta dureza e resistência ao desgaste. As cerâmicas a base de alumina, apresentam excelente inércia química usinando materiais ferrosos. Entretanto, por não apresentarem tenacidades suficientes, os quebra-cavacos integrais ficam proibitivos, o que prejudicam sua aplicação nos aços comum ao carbono e de baixa liga. Por outro lado, quando se tratar de aços de alta dureza, acima de 45 HRC, as cerâmicas são sempre empregadas, principalmente no corte contínuo. No corte interrompido ainda existem grandes limitações, exceto no fresamento de ferro fundido cinzento, onde as cerâmicas a base de nitreto de silício têm sido eficientes (COELHO E SILVA, 2018).

No passado o que limitava a aplicação das cerâmicas era a fragilidade que elas apresentavam. Com a introdução no mercado das cerâmicas mistas, cerâmicas reforçadas com SiC (whiskers) e cerâmicas a base de nitreto de silício, elas podem ter aplicações até nos cortes interrompidos, como por exemplo, no fresamento dos ferros fundidos cinzentos à altíssimas velocidades de corte e com altos valores de avanço. Isto é possível porque o grau de tenacidade conseguido nestas pastilhas é significativo, em relação aos materiais puros. É com o aparecimento de tais materiais, juntamente com os metais duros revestidos e os materiais de ferramentas ultraduros (PCD e PcBN), que os anos 80 podem ser considerados a época do terceiro grande impulso das ferramentas de corte (após os aços rápidos com o primeiro, e os metais duros com o segundo. As cerâmicas, de um modo geral, possuem algumas propriedades melhores e outras piores que os cermets e os metais duros. Na Figura 2, esta apresentada esquematicamente a comparação das propriedade dessas ferramentas de corte. Verifica-se que as cerâmicas possuem a maior dureza a quente, a maior resistência à oxidação e menor afinidade química com o material da peça, enquanto o metal duro possui maior tenacidade e maior resistência ao choque térmico entre eles. O cermet sempre ocupa uma posição intermediária,

entre o metal duro e a cerâmica, considerando qualquer uma dessas propriedades (COELHO e SILVA, 2018).

Figura 2 – Comparação entre as propriedades da cerâmica, cermet e metal duro



Fonte: SMITH, 1989

Cerâmica à base de Al_2O_3

Entre as ferramentas de cerâmicas tem-se as constituídas basicamente de finos grãos de alumina pura ou óxido de alumínio (Al_2O_3) obtidos por sinterização e com adição de outros materiais, denominados como aditivos que são adicionados em quantidades pequenas, para aumentar a resistência mecânica e melhorar outras propriedades da cerâmica de alumina pura (Al_2O_3). As primeiras ferramentas com adições apareceram nos anos 1970 e possuíam altos porcentuais, podendo chegar a 30% de $Zr0_2$ e/ou TiC principalmente e ainda podendo conter TiN, TiO_2 e WC. Essas adições também conferem à matriz de Al_2O_3 uma maior tenacidade e, às vezes, melhores propriedades térmicas para suportar maiores impactos mecânicos e choques térmicos, situações inerentes a situações inerentes a certos processos de corte. Essas ferramentas possuem elevada dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química e baixa tenacidade. Quando usadas na usinagem são, geralmente, no acabamento de materiais fundidos e em aços tratados superficialmente ou totalmente temperados em certos processos de corte. Exigem geralmente máquinas com alta rigidez, isentas de vibrações (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2008; COELHO e SILVA, 2018).

O óxido de magnésio (MgO) é um dos mais eficientes aditivos encontrados para sinterização da alumina, pois este previne o crescimento descontínuo dos grãos e permite que o Al_2O_3 seja sintetizado até próximo de sua densidade teórica. A adição de MgO em pequenos teores, aumenta a taxa de sinterização devido a formação de solução sólida pelo aumento da concentração dos defeitos puntuais. A densificação também é favorecida já que os coeficientes de autodifusão são proporcionais à concentração e a mobilidade dos defeitos e ocorrem também tanto a diminuição da mobilidade dos contornos de grãos quanto do tamanho dos grãos de alumina sintetizada, mas é importante salientar, não inibe o crescimento normal dos grãos, ele inibe o crescimento descontínuo dos grãos (ZAWATI et al.,2012 ; ALVES, 2018). Os mecanismos de atuação do MgO ocorrem em solução sólida, sendo que o óxido de magnésio (MgO) concentra-se nos contornos do grão reduzindo sua mobilidade, aumentando a taxa de densificação em relação a taxa de crescimento de grão, facilitando o transporte de oxigênio ao longo dos contornos de grão (SOUSA, 2020).

No sistema alumina-zircônia (ZrO_2), a alumina é a matriz e a zircônia é a fase precipitada que promove o aumento da resistência à fratura, da tenacidade à fratura e da dureza da cerâmica (INACIO, 2010).

A adição de zircônia (ZrO_2) no compósito de alumina, permite o aumento da tenacidade à fratura e consequentemente contribui para a aplicação do composto de alumina com adição de zircônia na utilização de ferramentas de corte em usinagens de materiais de usinabilidade baixa. Quando misturado com ZrO_2, estas partículas podem se infiltrar entre as estruturas de Al_2O_3 para inibir o crescimento do grão, reforçando assim a integridade da matriz circundante e produzindo uma resistência à fratura muito alta, contribuindo para que a ferramenta de corte produzida com este composto, possua as características exigidas no processo de usinagem, que é a resistência ao desgaste e alta dureza (NORFAUZI et al., 2019).

Cerâmica à base de Si_3N_4

Esse grupo foi disponibilizado comercialmente na década de 1980. As cerâmicas à base de nitreto de silício, que são sinterizados na presença do composto contendo óxido de alumínio, óxido de ítrio e óxido de magnésio (AI_20_3 Y_2O_3 MgO) e outros e possuem em sua composição cristais de Si_3N_4 (nitreto de silício) com uma fase intergranular de SiO_2 (cristais de vidro). Elas possuem boa resistência ao desgaste, com tenacidade superior às das cerâmicas à base de Al_2O_3. Segundo MACHADO et al. (2015) tem-se conseguido excelentes resultados na usinagem de

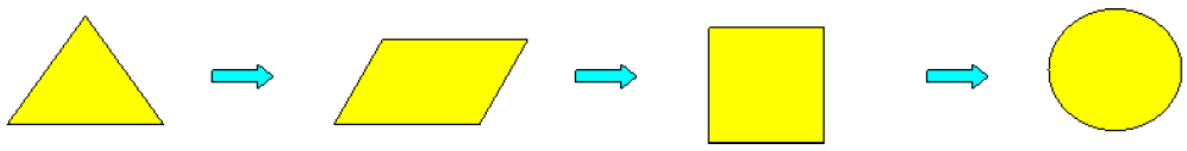
ligas de níquel e ferros fundidos e pouco sucesso na usinagem dos aços, devido à grande interação química com o ferro a elevadas temperaturas.

Um produto que é comercializado com marca registrada SIALON, cujo nome tem origem no símbolo dos elementos que ele contém: Si, Al, O e N, tem mostrado bons resultados na usinagem de aço e excelentes aplicações nas superligas de níquel. A adição de Al e O às ferramentas desse grupo diminui as interações com o ferro e permite aplicações em aços. O baixo coeficiente de dilatação também diminui a possibilidade de trinca térmica durante a usinagem. Um outro grupo de material, posicionado entre os materiais cerâmicos e o metal duro, que apresenta uma fase cerâmica e outra metálica, é denominado "cermet", possuindo como componentes principais os constituintes TiC, TiN e o Mo_2C, além do elemento de ligação Ni. São mais resistentes ao desgaste se comparados aos metais duro, dando bons resultados no acabamento de aços moles, onde as velocidades de corte são bem altas, porém, para usinagem de aço endurecido, sua dureza a quente não é suficiente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Na usinagem dos aços, a grande parte das aplicações fica por conta das cerâmicas mistas e oxidas (normalmente com adição de ZrO_2), com pouca aplicação de SIALON. A usinagem de superligas e de aços endurecidos é dividida entre a cerâmica mista, o SIALON e o PcBN, mas apenas no torneamento. A aplicação de ferramentas cerâmicas exige alguns cuidados especiais, como: Uso de chanfros e evitar corte interrompido antes de iniciar a operação; o uso do fluido de corte deve ser evitado, se requerido, entretanto, usar o fluido em abundância; na aresta de corte; não usar aresta cortante afiada, sem chanfro ou arredondamento (*honing*); usar arestas com raio de ponta; preferir os maiores valores de vc e de f possíveis; usar um rígido sistema de fixação do inserto e bom assentamento da pastilha no suporte; usar em máquinas-ferramentas rígidas, livre de vibrações (COELHO e SILVA, 2018).

A resistência mecânica de um inserto para operações de usinagem depende fortemente do ângulo de ponta e o seu aumento seguindo a ordem apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Sequência de formas de insertos que apresentam o ângulo de ponta, ε_r, crescente, com consequente aumento da resistência mecânica.



Fonte: Coelho e Silva, 2018

Este conceito deve ser aplicado quando da seleção da forma para os insertos em geral, mas principalmente se o material da ferramenta for cerâmica (COELHO e SILVA, 2018).

2.1.3.6 Materiais ultraduros para ferramentas

São materiais com dureza superior a 3.000 HV. Fazem parte deste grupo os diamantes naturais momo e policristalino, diamante sintético monocristalinos, diamante sintético policristalino (PCD), nitreto cúbico de boro (cBN) e nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN).

O diamante é o material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza e as ferramentas de corte de diamante natural são usadas principalmente quando se requer super acabamentos nos componentes usinados, mas devido ao seu alto custo tem aplicação limitada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). São usados principalmente quando se deseja alta precisão de medidas e acabamento brilhante como no caso de usinagem de espelhos e lentes (MACHADO et al., 2015). Entretanto, devido à sua fragilidade e risco de falha sob impacto e também seu alto custo, tem sua aplicação limitada como ferramentas de corte, principalmente após o surgimento dos diamantes e CBN sintéticos, que podem substituí-lo com bastante eficiência (COELHO e SILVA, 2018)

O diamante sintético policristalino (PCD) pertence à classe de materiais denominada de ultraduros e é constituído de pequenas e finas partículas de diamante de graduação definida, obtendo-se o máximo de homogeneidade e densidade. A aplicação de diamante sintético na usinagem dos aços ou qualquer material ferroso, tem limitação, pois está sujeito a voltar ao estado de grafite em temperaturas superiores a 700 ºC na presença do oxigênio.

O PCD é produzido pela sinterização de partículas do diamante com cobalto, utilizando alta pressão (6000 a 7000 MPa) e elevada temperatura (1400 ºC e 2000 ºC), sendo que uma camada de aproximadamente 0,5 mm de espessura ou é aplicada diretamente sobre uma pastilha de metal duro ou então é ligada ao metal duro através de brasagem. O PCD possui alta condutividade térmica (1 a 5 vezes o valor do metal duro), dificultando a formação de pontos quentes na ferramenta, alta dureza (cerca de 4 vezes a do metal duro classe K e 3 vezes a da alumina, resultando numa alta resistência ao desgaste por abrasão maior que a das cerâmicas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). Além da alta dureza, que não sofre alteração mesmo em altas temperaturas, e da razoável tenacidade, é importante a resistência ao choque, pois possibilita a utilização em processos de usinagem de corte interrompido. O PCD é de grande relevância para usinagem de aços endurecidos pois se mantém estável até 1300 ºC, com

dificuldade de reagir quimicamente e de grande resistência a abrasão (TREVELIN, 2011; OKADA et al., 2011).

Ferramentas à base de cBN são aplicadas a usinagem de materiais ferrosos de elevada dureza. Sua tenacidade é bem próxima a do metal duro e melhor que a de algumas cerâmicas, sua utilização não pode ser economicamente viável devido ao seu elevado custo (MACHADO et al., 2015). O nitreto cúbico de boro tem sido também empregado na fabricação de ferramentas de corte voltada para a usinagem de aços endurecidos, tais como os aços para moldes, rolamentos, ferramentas de altas velocidades, além do ferro fundido branco e ferro fundido ligado (AOUICI et al., 2012).

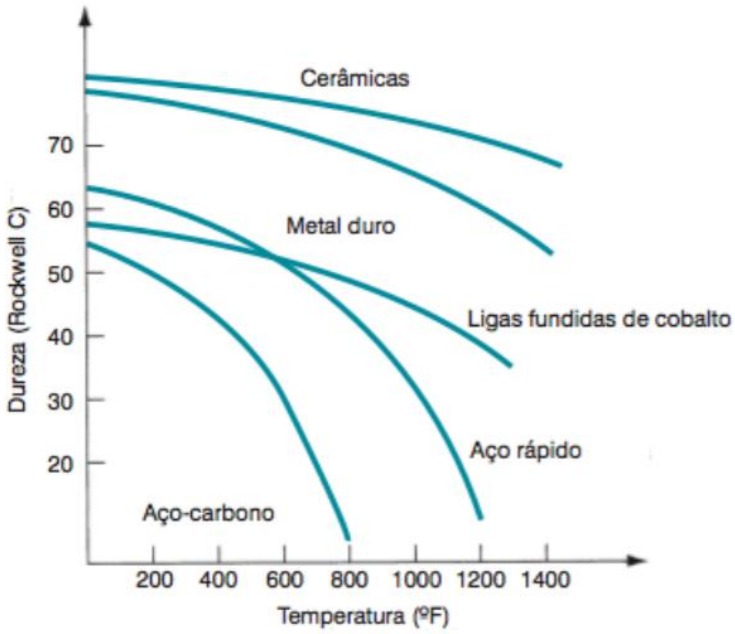
O PcBN é quimicamente mais estável que o diamante, podendo ser utilizado na usinagem de ligas ferrosas sem que ocorra grande desgaste por difusão. Sua tenacidade é similar ao material cerâmico baseado em nitretos e cerca de duas vezes a da alumina. Sua dureza só é superada pelo diamante, sendo quase duas vezes a dureza da alumina. Existem diversos tipos de PcBN no mercado. Cada fabricante usa diferentes materiais e quantidades de aglomerantes e diferentes tamanhos e distribuição de partículas. As ferramentas de PcBN, de maneira geral são utilizadas para usinagem em desbaste com ap entre 0,5 e 8 mm e para usinagem em acabamento ap menor que 0,5 mm (MATSUMOTO e DINIZ,2002).

Os PcBNs para desbaste possuem maior concentração de nitreto de boro cúbico (90% em volume). Além disto, devido ao alto teor de cBN, estes materiais são os que apresentam maior dureza dentre os PcBNs. Devido a estas propriedades, estes cBNs são muito eficientes quando o mecanismo predominante de desgaste é a abrasão e/ou onde estão presentes forças de corte muito altas ou corte interrompido, como no torneamento e no fresamento em desbaste de aços endurecidos e ferro fundido cinzento onde as durezas envolvidas estão entre 45 e 65 HRC (MATSUMOTO e DINIZ, 2002).

2.1.3.7 Metodologia para selecionar a ferramenta de corte

Sendo a dureza a primeira propriedade importante para uma ferramenta de corte, na Figura 4 esta apresentada a dureza dos principais grupos de materiais em função da temperatura. Nota-se que até mesmo o metal duro e as cerâmicas têm suas propriedades reduzidas com a temperatura, mas acima daquela apresentada pelos aços rápidos, por exemplo. Isto garante a aplicação destas ferramentas em condições de corte bem mais severas que aquelas a que podem se submeter os aços-rápidos (COELHO e SILVA,2018).

Figura 4 - Relações típicas de dureza a quente para os materiais de ferramentas

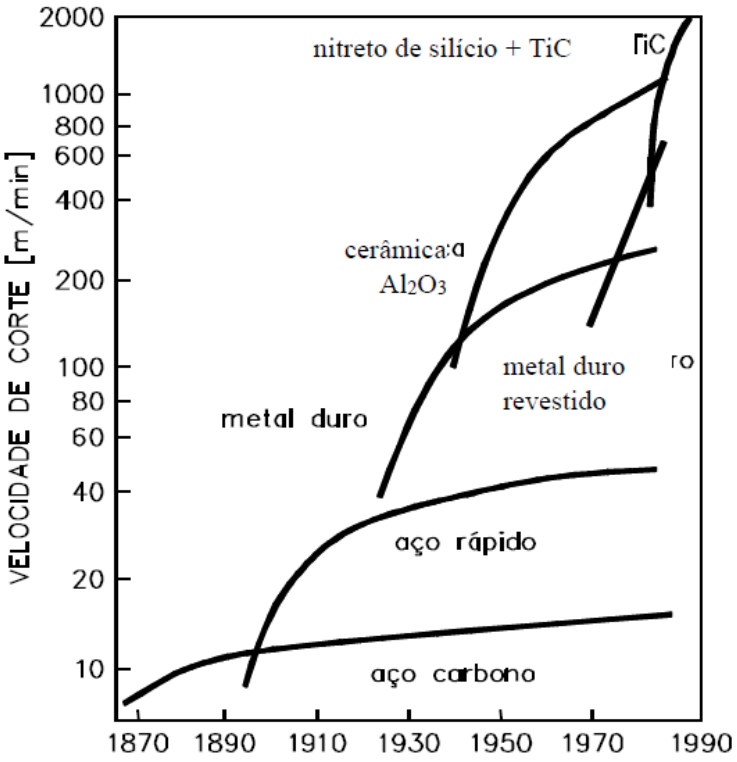


Fonte: Citado por Prof. Anselmo Diniz – UNICAMP
(Crédito: Fundamentals of Modem Manufacturing, 4ª Edição por MiKel P. Groover, 2010).

As propriedades de dureza e resistência ao desgaste estão, também, diretamente relacionadas com a capacidade de imprimir altas velocidades aos processos, já que esse parâmetro é o principal responsável pelo aumento de temperatura. Esta relação é ilustrada na Figura 5, onde se observa a evolução das velocidades de corte ao longo dos anos, relacionada com o aparecimento dos diversos grupos de ferramentas de corte. Apesar de não estarem indicados, os materiais ultraduros, surgidos na década de 80, podem apresentar velocidades ainda superiores àquelas indicadas no diagrama, em algumas aplicações (COELHO e SILVA, 2018).

Machado et al. (2015), propõem uma metodologia para selecionar uma ferramenta de corte, para definir a sua geometria e as condições de corte para uma determinada aplicação. O número de fatores é grande e, portanto, a decisão final está relacionada com a ferramenta e a condição de corte que apresentar o melhor desempenho, que são confirmadas mediante testes experimentais realizados em laboratórios de pesquisas.

Figura 5 - Aumento das velocidades de corte conseguido no último século



Fonte: Pastor (1987) citado por Coelho e Silva, 2018.

De acordo com Coelho e Silva (2018), o material de ferramenta ideal deveria ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço rápido e a inércia química da alumina, porém ainda não existe. Nem sempre o melhor material é aquele que garante uma maior vida à ferramenta de corte. Às vezes, confiabilidade e previsibilidade de desempenho são mais importantes, e isto é tanto mais relevante quanto maior for o custo do material da peça

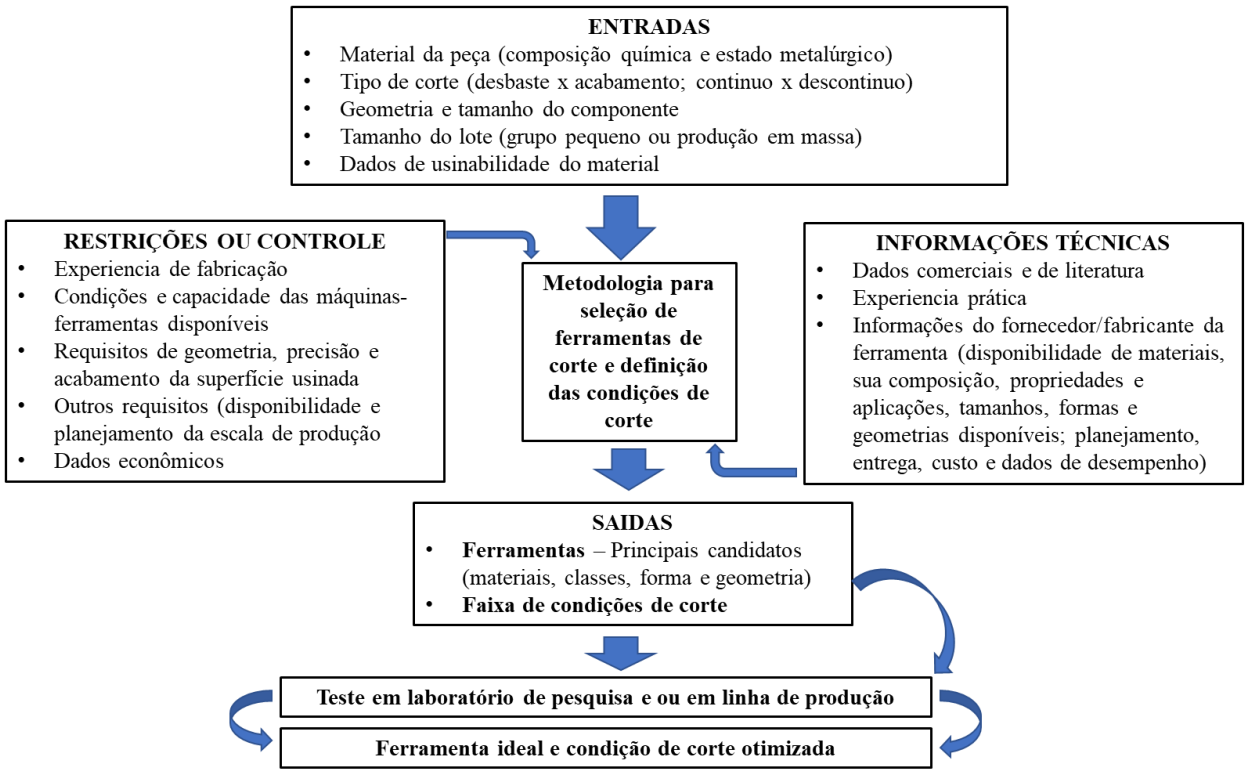
No processo de seleção é importante entender qual o tipo de dano que a ferramenta sofrerá (avaria, deformação plástica ou desgaste) e os mecanismos envolvidos, para ser capaz de recomendar a ferramenta de corte mais apropriada para cada situação. É importante analisar estas propriedades e interpretar corretamente os requisitos dos materiais para ferramentas de corte para cada aplicação individual, para então poder selecionar a ferramenta corretamente.

Na Figura 6, encontram-se os aspectos a serem considerados para a seleção da ferramenta de corte, considerando os dados de entrada, restrições, controles necessários e informações técnicas disponíveis.

A dureza está ligada à resistência ao desgaste abrasivo, enquanto a tenacidade significa a capacidade do material absorver energia antes de se romper, ou seja, resistência ao impacto. O coeficiente de dilatação térmica e a condutividade térmica indicam a resistência ao choque

térmico. Quanto menor o coeficiente de dilatação e maior a condutividade térmica, maior a resistência ao choque térmico.

Figura 6 - – Metodologia para selecionar uma ferramenta de corte



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

2.2 FRESAMENTO

O fresamento é o processo mecânico de usinagem caracterizado pela utilização da ferramenta denominada fresa, composta de arestas cortantes cujo movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo. A fresa pode se apresentar sob as mais variadas formas, tanto ela quanto a peça podem se deslocar segundo uma trajetória qualquer, permitindo uma variedade de cortes e proporcionando uma versatilidade de utilização do fresamento para obtenção de peças com várias geometrias e poder substituir outros processos de usinagem, como indicado no Quadro 1 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008; FERRARESI, 2013).

Para Ferraresi (2013), o processo de fresamento se divide basicamente em fresamento cilíndrico tangencial e fresamento frontal. De acordo com Diniz, Coppini e Marcondes (2008) o tipo de fresamento pode ser classificado conforme a posição do eixo-arvore da máquina-

ferramenta em horizontal, vertical e inclinado, de acordo com o movimento relativo peça-ferramenta, em relação ao sentido de corte e avanço como discordante onde o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa e concordante , quando o sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento rotatório da fresa.

Segundo Diniz et al. (2008), o fresamento tangencial é a operação em que os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. As fresas são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais. No fresamento frontal, as fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo, os dentes ativos estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

Quadro 1: Comparação entre o fresamento e outros processos de usinagem no corte de superfícies planas não de revolução.

Fresamento	**Aplainamento**
Operação mais rápida	Máquina e manutenção mais baratos Menor tempo de afiação de ferramenta
Fresamento	**Brochamento Externo**
Quando a superfície a ser usinada intersecciona qualquer outra existente, o brochamento é impossível	É mais econômico a partir de um determinado número de peças no lote.
Fresamento	**Retificação**
Maior capacidade de remoção de cavaco	Melhor acabamento superficial da peça e melhores tolerâncias (muitas vezes, a retificação é uma operação posterior ao fresamento)

Fonte: adaptado de DINIZ, MARCONDES E COPPINI (2008).

Para iniciar o processo de usinagem, alguns parâmetros de corte devem ser determinados, sendo estes as direção de avanço e de corte; as velocidades de corte (V_c) e de avanço (V_f); o avanço de corte (f_c); a profundidade e a largura de usinagem (a_p); a penetração de trabalho, entre outros fatores. (MACHADO et al. 2015). No fresamento os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente. A velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. Neste processo a velocidade de corte tem maior influência no desgaste da ferramenta e sobre a temperatura de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Segundo Ferraresi (2013) os movimentos dos processos de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante e são referidos à peça, considerada parada. Os

movimentos que causam diretamente a saída do cavaco que é denominado movimento efetivo de corte, é resultante do movimento de corte e do movimento de avanço. O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que com o movimento de corte, origina o levantamento do cavaco.

De acordo com Machado et al. (2015), os movimentos que não causam a formação do cavado são: o movimento de aproximação, que aproxima a peça da aresta de corte antes da usinagem, o movimento de ajuste para determinar a espessura do material a ser retirado, o movimento de correção realizado para compensar o desgaste da ferramenta ou outras variações e o movimento de recuo para afastar a peça da ferramenta

As grandezas de penetração são as que descrevem geometricamente a relação de penetração entre a ferramenta e a peça, e indicam a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça e são medidas perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento cilíndrico tangencial é denominada largura de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

O avanço (*f*) é o percurso de avanço em cada volta ou cada curso da ferramenta, o avanço por dente (f_z) é o percurso de avanço por dente ou aresta, correspondendo à distância entre duas superfícies e é medido na direção do avanço e resulta do movimento de avanço . O avanço por dente pode ser calculado com a Equação 1, já o avanço de corte *(f_c)* é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte, este parâmetro pode ser obtido pela Equação 2 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

$$f_z = \frac{f}{z} \tag{1}$$

Onde: z = número de dentes da ferramenta.

f_z = avanço por dente

$$f_c = f_z sen\varphi \tag{2}$$

Em que:

φ = ângulo da direção do avanço, ou seja, entre a direção de corte e a de avanço.

De acordo com Ferraresi (2013) a velocidade do corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante e, segundo a direção e sentido de corte. Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2008) para as operações de torneamento, fresamento ou furação, é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, onde o movimento de corte e o de avanço ocorrem concomitantemente. A velocidade de corte pode ser calculada com a Equação 3.

$$v_c = \frac{\pi dn}{1000} \quad (3)$$

Em que:
v_c = velocidade de corte [m/min]
d = diâmetro da ferramenta (mm)
n = rotação da ferramenta (rpm)

A velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea doa ferramenta segundo a direção e sentido de avanço e é pode ser calculada com a Equação 4. A velocidade efetiva de corte (vc) e a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte (DINIZ; MARCONDES ; COPPINI, 2008).

$$v_f = f_z.n = \frac{1000.v_c}{\pi d} f_z \quad (4)$$

Em que:
f_z= avanço [mm/volta]
v_f = velocidade de avanço [mm/min]

2.3 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE E RUGOSIDADE

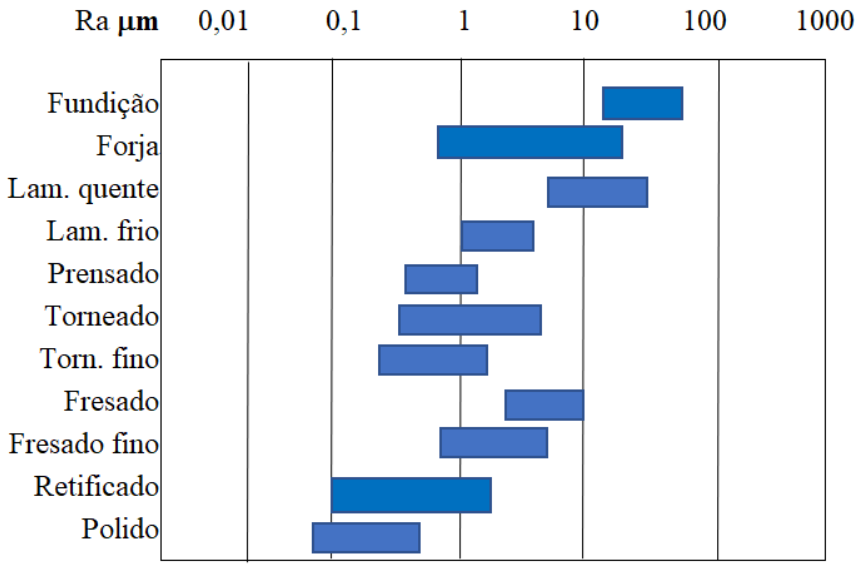
Nos processos de fabricação de conjuntos mecânicos nos quais suas peças são fabricadas por processos de usinagem, a qualidade do acabamento da superfície é afetada pelo tipo de usinagem utilizado para remoção do material, e a condição da superfície influi no desempenho dos componentes. A qualidade da superfície das peças, depende do acabamento obtido na usinagem e das propriedades mecânicas da superfície do metal que podem ser modificadas durante a usinagem devido à ação de fatores, relativos à pressão da ferramenta, atrito da

superfície de folga da ferramenta com a peça, calor gerado pelo processo de corte, fenômenos ligados ao processo de formação de cavaco, vibração da ferramenta e da máquina entre outros (FERRARESI, 2013). As falhas graves observadas em componentes dinâmicos, produzidas por fadiga, corrosão, quase sempre começam ou se nucleiam na superfície das peças e suas origens dependem geralmente da qualidade da superfície (PINHEIRO, 2018).

Segundo Ferraresi (2013) as mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e a mesma máquina-ferramenta, apresentam valores de rugosidades diferentes e este parâmetro (qualidade de superfície) é uma grandeza importante na avaliação da usinabilidade dos metais.

A qualidade do acabamento da superfície de uma peça tem relação com a sua rugosidade que depende do processo utilizado na sua fabricação. Nas Figuras 7 e 8, são indicadas as faixas de rugosidade aproximadas das superfícies obtidas por alguns processos de produção. Uma peça retificada tem um valor de rugosidade entre 0,1 e 1,0 µm e se esta peça for obtida pelo processo de torneamento fino ou fresamento sua rugosidade será superior a 1 µm.

Figura 7: Rugosidade (Ra) em função do processo de fabricação utilizado



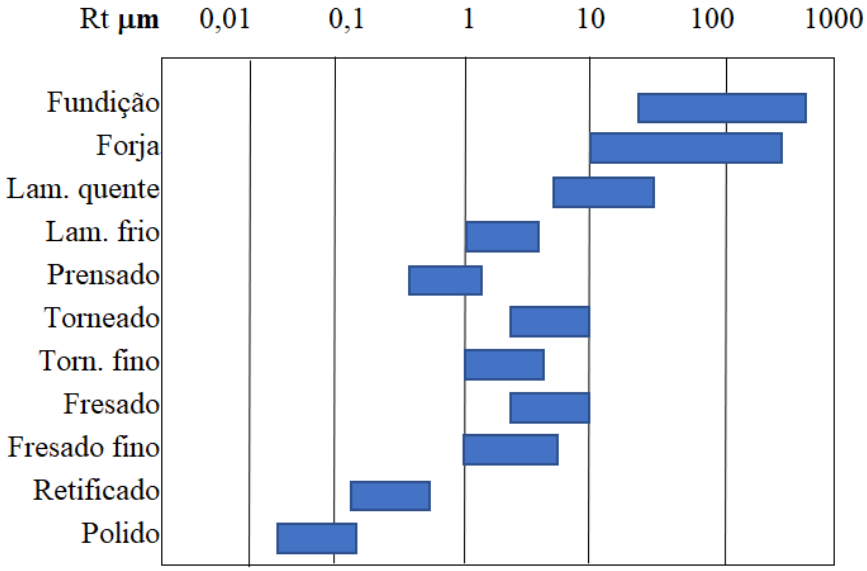
Fonte: Soares (2018).

As alterações na superfície das peças causadas pela ação natural do processo de fabricação foram definidas em 1964 pelos pesquisadores Field e Kahles, como integridade superficial, que pode ser decisiva desempenho de componentes utilizados nas indústrias automotiva e aeronáutica (RODRIGUES, 2005).

As deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e até reações químicas, são fatores que podem gerar efeitos distintos na

superfície usinada influenciando na condição final da superfície da peça (MACHADO et al., 2015).

Figura 8: Rugosidade total (Rt) em função do processo de fabricação utilizado



Fonte: Soares (2018).

A integridade superficial não pode ser definida apenas pela textura de uma superfície e/ou sua forma geométrica e sim pelas possíveis alterações que podem ocorrer na superfície (acabamento) e modificações em camadas internas da peça usinada, sendo classificadas como indicado na Figura 9 (MACHADO et al., 2015; PINHEIRO, 2018).

Para caracterização da integridade superficial deve-se considerar um conjunto de informações, tais como textura, macro micro estrutura e micro dureza e outros dados obtidos como por exemplo no ensaio de tração (tensão de ruptura e fluência), além do comportamento da peça usinada nos ensaios de resistência a fadiga, à corrosão e à tensão residual (RODRIGUES, 2005).

De acordo com MACHADO et al. (2015), o resultado do acabamento de uma superfície usinada depende da combinação das variáveis referentes a rugosidade, ondulações e falhas, as ondulações são irregularidades superficiais ou erros geométricos com espaçamentos maiores que as irregularidades consideradas rugosidades.

As superfícies podem ser classificadas em alterações na superfície (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais).

Figura 9 – Classificação da integridade superficial de peças usinadas

Integridade Superficial	Acabamento	Ondulações Falhas Rugosidade	
	Alterações Subsuperficiais	Fatores Mecânicos	Deformação Plástica Rebarbas Alteração de micro dureza Micro ou macro trincas Tensões Residuais
		Fatores Metalúrgicos	Recristalização Transformações Metalúrgicas

Fonte: adaptado de Machado et al. (2015).

Segundo Ferraresi (2013) as ondulações referem-se às series de desvios regularmente repetidos com comprimento de onda aproximadamente constante. Elas provêm de deflexões da peça ou da máquina operatriz durante a usinagem, excentricidades da peça (caso de torneamento) e ou da ferramenta (caso fresamento), operações de desbaste com grande avanço entre outros. As falhas são resultado de inclusões, trincas, bolhas, originando interrupções na topografia de uma superfície. A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes do processo de corte (marcas de avanço, desgaste da ferrramenta, entre outros), que podem ser medidos por vários parâmetros (PINHEIRO, 2018).

A rugosidade da superfície é constituída por desvios micro geométricos, ou micro irregularidades que são originados do processo de usinagem durante a formação do cavaco para remoção do material, vibrações da ferramenta, aresta postiça de corte, marca do avanço da ferramenta nas operações de acabamento, atrito na superfície de folga da ferramenta com a peça (FERRARESI, 2013 e MACHADO et al., 2015).

A rugosidade pode ser avaliada sobre dois aspectos: quantitativo e qualitativo. Dessa forma, utilizam-se instrumentos de contato (quantitativo) ou ópticos (qualitativos). Os instrumentos de contato são apalpadores (ou agulhas) com raio de ponta extremamente pequenos, que percorrem a superfície da peça acompanhando a topografia da região. Esses deslocamentos verticais registrados pelo aparelho são ampliados para determinar o perfil da superfície (BECKER; SANTOS; SALES, 2005).

Para determinar a rugosidade de modo quantitativo, ou seja, transformar em números o aspecto da textura superficial, geralmente se utiliza três grupos de parâmetros que são divididos de acordo com o perfil de rugosidade. Segundo Becker, Santos e Sales (2005), estes grupos seriam: parâmetros de amplitude que são determinados por alturas dos picos e profundidade

dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície; parâmetros de espaço que são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície e parâmetros híbridos 1u3 são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço (MACHADO et al., 2015 e RODRIGUES, 2018).

Conforme a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) podem ser utilizados os parâmetros Ra e Rt para avaliar a rugosidade de uma peça usinada, sendo:

- Ra: conhecido como o desvio aritmético médio do perfil avaliado que é determinado pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento da amostragem.

- Rt: é a altura total do perfil que é obtido pela soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales, no comprimento de avaliação. Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m).

Para medição da rugosidade apenas o parâmetro Ra não é suficiente porque pode-se não identificar características significativas da superfície, pois consiste na média aritmética dos perfis e é pouco sensível à detecção de defeitos, e ainda, superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores de Ra muito próximos (KONDO, 2019 e RODRIGUES, 2018). Recomenda-se utilizar também o parâmetro Rt ou Rz para possibilitar a medição da altura máxima da rugosidade, que permite verificar qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO et al., 2015).

Outro fator que deve ser considerado na medição da rugosidade é o comprimento de amostragem (*lr*), ou em inglês *cut-off,* os valores de comprimento de amostragem e de avaliação (5 x *ln*) dependem da faixa da rugosidade Ra avaliada e da distância entre os sulcos deixados pelo avanço (*f*). A escolha do *cut-off,* os critérios, orientações devem estar conforme a norma NBR ISO 4288 (2008). Os valores de limites de cut-off padronizados podem ser encontrados no Quadro 2 para perfil aperiódico e no Quadro 3, perfil periódico.

Quadro 2: Comprimentos de amostragem e de avaliação em função da faixa de rugosidade de uma superfície conforme a norma NBR ISO 4288 (2008).

Faixa Ra (μm)	Comprimento de amostragem *lr(cut-off)* [mm]	Comprimento de avaliação *ln* [mm]
(0,006) < $R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
0,02 < $R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
0,1 < $R_a \leq 2$	0,8	4
2 < $R_a \leq 10$	2,5	12,5
10 < $R_a \leq 80$	8	40

Fonte: adaptado NBR ISO 4288 (2008).

Quadro 3: Comprimentos de amostragem e de avaliação em função da faixa de rugosidade de perfis periódicos e RSm de perfis periódicos e não periódicos de uma superfície, conforme a norma ISO 4288 (2008).

Faixa RSm (μm)	Comprimento de amostragem *lr(cut-off)* [mm]	Comprimento de avaliação *ln* [mm]
(0,013) < $R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4
0,04 < $R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25
0,13 < $R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4
0,4 < $R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5
1,3 < $R_{Sm} \leq 4$	8	40

Fonte: adaptado NBR ISO 4288 (2008).

Como exemplo, para um avanço entre 0,13 até 0,4 mm/rev o comprimento de amostragem de rugosidade (lr) ou *cut-off* deve ser de 0,8 mm.

Pode-se obter valores indicativos dos parametros R_a e R_t mediante cálculos teóricos utilizando as Equações (5) e (6), respetivamente, para as operações de fresamento tangencial (MACHADO et al., 2015).

$$Ra = \frac{f_z^2}{18\sqrt{3R}} \quad (5)$$

$$Rt = \frac{f_z^2}{8R} \quad (6)$$

Em que:

f_z = avanço por dente

R = raio da fresa

Segundo Diniz et al. (2008), para medição da rugosidades utiliza-se o rugosimetro a e a medição pode ser feita com ou sem contato do apalpador e a peça, sendo devido a simplicidade, versatilidade e baixo custo utiliza-se com mais frequencia o com o metodo de contato. A

medição é realizada numa distancia previamente estabelecida onde o apalpador de diamente se descola verticalmente e a distancia percorrida é convertida em sinal elétrico e então amplificado. O resultado da superfície analisada é apresentado na forma númerica e pelo gráfico de perfil, podendo se utilizar filtros para eliminar a influencia de ondulações.

O acabamento final é melhor para valores de rugosidade menor e as condições de corte tem grande efeito, sendo o avanço um parâmetro influente com indicado na equação (1), baixas velocidades de corte associadas ao aumento do avanço, podem apresentar acabamento inferior devido a formação da aresta postiça de corte (APC) e o acabamento melhora aumentando a velocidade de corte devido ao desaparecimento da APC (MACHADO et al.,2015).

De acordo com Machado et al. (2015), obtém-se menores rugosidade proporcionado um melhor acabamento quando:

- As flexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- As pontas da ferramenta possuem raio de arredondamento;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas (evitando desvios);
- O material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- O eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e a as guias de corte estão sem desgastes;
- A aresta de corte está sem desgastes ou quebras;
- O corte ocorre sem aresta postiça de corte.

2.4 AÇO ABNT 4340 ENDURECIDO

Desde o princípio da fabricação, em especial na usinagem dos materiais, um dos grandes desafios tem sido a usinagem dos materiais endurecidos e/ou pouco convencionais e as ferramentas de materiais cerâmicos tem contribuído para e melhoria dos processos de usinagem deste tipo de material. Define-se aço no estado endurecido como sendo todo aço cuja dureza seja superior a 45 HRC, sendo que no caso do aço essa dureza é obtida geralmente com tratamentos térmicos objetivando obter alterações de características mecânicas dos materiais

devido a finalidades pré especificadas. Tem comportamento diferenciado no processo de usinagem com difícil usinabilidade (ELBESTAWI et al., 1996).

Segundo Anazawa et al. (2012), o aço ABNT 4340 é denominado aço elevada temperabilidade, alta resistência e tenacidade. Foi desenvolvido para estruturas de grande porte e componentes que exigem uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade e não apresenta aumento de peso nas construções, quando comparado com outros aços de menor resistência.

Essas propriedades são obtidas através do beneficiamento através de têmpera e revenimento. Porém, na fabricação de peças precisas, após a peça ser temperada, é necessário o desenvolvimento de processos de usinagens com parâmetros mais eficientes e desenvolvimento de ferramentas com uma boa relação de custo-benefício

Ele é utilizado nas indústrias automobilística, aeronáutica para a fabricação de componentes com elevada solicitação, tais como, engrenagens de transmissão, eixos, acoplamentos, trens de pouso, e eixos virabrequins de automóveis, caminhões tratores, dentre outros (ANAZAWA et al., 2012).

No Quadro 4 encontra-se a composição química deste aço, de acordo com a norma ABNT NBR NM 87:

Quadro 4 – Composição química do aço ABNT 4340

ABNT	**C**	**Mn**	**Si**	**Ni**	**Cr**	**Mo**
4340	0,38 – 0,43	0,60 - 0,80	0,15 – 0,35	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996).

2.5 MONITORAMENTO NO PROCESSO DE USINAGEM

Sistemas de monitoramento são utilizados para otimização dos processos de usinagem tanto na indústria quanto na academia e são aplicados para verificar e monitorar o desempenho das máquinas, condições das ferramentas de corte, qualidade da peça (dimensão, rugosidade, entre outros) e o desempenho do processo mediante o mecanismo de formação de cavacos, medição das temperaturas, consumo de energia, entre outros, bem como o nível crítico e de alerta para interromper a operação em decorrência de falhas ou degradações (HASSUI, 1997; KONDO, 2019).

Para monitorar o processo de usinagem utilizam-se sensores para converter em sinal mensurável uma forma de energia a outra e conceitualmente podem ser radiação, mecânico, térmico, elétrico, magnético e químico. Aplicam-se também processadores do sinal para amplificação, transformação matemática e conversão do sinal de analógico para digital e modelos, tais como a metodologia Taguchi, para interpretação e comparação dos resultados, a relação e coerência entre os dados de entradas e saídas (KONDO, 2019).

Segundo Machado et al. (2015) para estimar a potência necessária para o corte, as forças atuantes nos elementos máquina-ferramenta-peça e a relação com o desgaste das ferramentas de corte, é importante conhecer as forças de usinagem que agem sobre a cunha cortante.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008) o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte, é importante pois afetam a potência necessária para o corte (utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta) e são úteis para verificar a capacidade de obter tolerâncias apertadas e o desgaste da ferramenta.

O estudo dos esforços de corte, pode ser realizado com uma abordagem teórica, partindo da fenomenologia de formação do cavaco e através de algumas simplificações com a suposição de que o corte é ortogonal (corte com componentes de força em somente duas direções), computam-se os diversos esforços que ocorrem em torno do plano de cisalhamento do cavaco e da superfície de saída da ferramenta ou de forma empírica, onde os esforções de corte são equacionados utilizando coeficientes retirados de procedimentos experimentais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

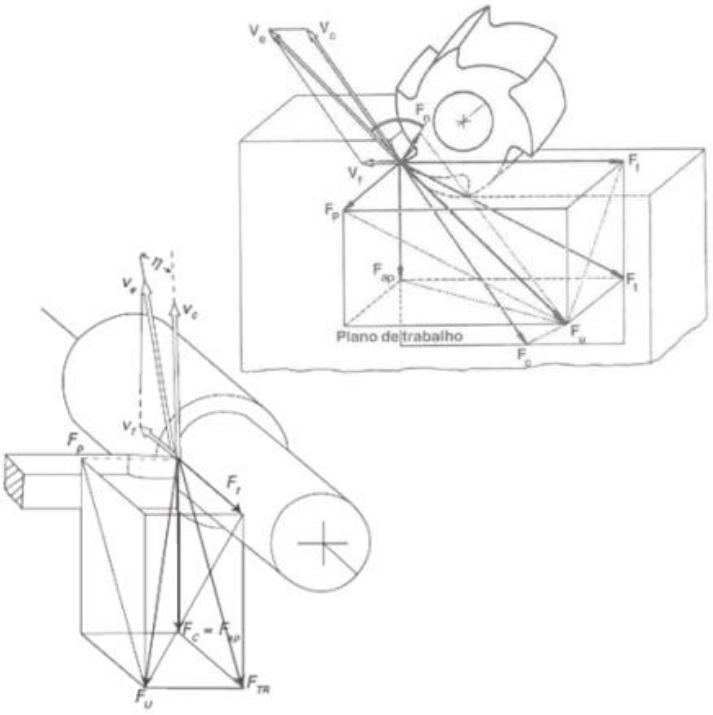
2.5.1 Potência

Consideram-se como forças de usinagem uma ação da peça sobre a ferramenta e a ação da cunha cortante durante a usinagem é chamada de força de usinagem que não são conhecidas nem a direção e o sentido e para medi-las trabalha-se com seus componentes segundo diversas direções conhecidas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

As forças de usinagem são importantes para planejar a potência necessária para os elementos da máquina ferramenta, evitar vibrações e assegurar a rigidez das fixações e do porta-ferramenta. Elas variam de acordo com os ângulos das ferramentas e sua medição precisa, contribui na otimização das geometrias da ferramenta (KONDO, 2019).

Segundo Machado et al. (2015), a força de usinagem (F_u) possui três componentes básicos por estar no espaço tridimensional, como observado na Figura 10, que agem diretamente na cunha cortante e, por conseguinte, na estrutura da máquina-ferramenta.

Figura 10 - – Forças de usinagem e seus componentes para o processo de torneamento e fresamento



Fonte: DINIZ, MARCONDES E COPPINI (2008).

As componentes básicas da força de usinagem (Fu) são decompostas em:

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.

- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.

- Forca passiva ou força de profundidade (F_p): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Além dos componentes básicos também pode-se identificar outras três componentes importantes:

- Força ativa (F_{TR}): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.

- Força de compressão (Fn): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.

- Força de apoio (F_n): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

O cálculo da força de usinagem quando decomposta pode ser realizado segundo a Equação 7 que considera a relação das três principais componentes:

$$Fu = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (7)$$

Em que:

F_u = força de usinagem (N).

F_{ap} = é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho (N).

F_f = é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço (N).

F_p= é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho (N).

Pode-se prever a potência de corte ou esforços na estrutura e elementos da máquina-ferramenta, com a projeção da força de usinagem (F_u), que pode ser determinada com o ângulo do plano de cisalhamento, podendo ser determinado de forma teórica ou experimental. No início do século XX, diversos pesquisadores constataram, experimentalmente, que os componentes da força de usinagem variam com a seção do cavaco, em uma relação quase linear em especial a força de corte (F_c), que é a principal componente da potência de usinagem para dimensionamento do principal motor na seleção ou projeto de máquinas – ferramentas. Da relação linear entre a força de corte e a área da seção de corte foi proposta a Equação 8, para determinação teórica da força de corte (MACHADO et al., 2015).

$$Fc = k_s.A \quad (8)$$

Em que:

Fc = Força de corte (N).

k_s = pressão específica de corte (N/mm^2).

A = área da seção de corte (mm^2).

Segundo a definição de Newton, potência é o produto entre uma força e velocidade e segundo Machado et al. (2015), a potência de corte pode ser calculada com a Equação 9.

$$P_c = F_c.v_c \quad (9)$$

Em que:
Pc = Potência de corte (N.m/min).
F_c = Força de corte (N).
v_c = Velocidade de corte (m/min).

Os esforços de corte são provenientes da deformação plástica nas zonas primárias e secundária de cisalhamento, dos atritos entre a ferramenta e a peça, entre o cavaco e a peça também, podendo ser medidos direta, utilizando dinamômetro piezelétrico ou indiretamente medindo o deslocamento e extensão de partes da máquina para obter a força, o consumo de corrente do motor principal ou de acionamento do eixo de avanço e o consumo de potência do eixo principal ou do acionamento do eixo de avanço (HASSUI, 2002 e KONDO, 2019).

Segundo Machado et al. (2015) pode-se obter a diferença de potência utilizando-se voltímetro ou amperímetros ligados em série dentro do circuito, para obtenção da corrente. Este tipo de medição pode causar problema de intrusão nas máquinas-ferramenta, nestes casos utilizam-se os dispositivos de Efeito Hall, que é uma característica do material utilizado, onde estes sensores são instalados externamente aos cabos elétricos sem que precisem ser interrompidos, realizando medições indiretas (PINHEIRO, 2018).

As medições indiretas têm com vantagem o posicionamento do sensor num ambiente menos agressivo que a região de corte, favorecendo e seu funcionamento e ainda tem um custo menor. E como desvantagem, os resultados destas medições podem estarem afetados por ruídos presentes entre a região de corte o e local onde está o sensor (HASSUI, 2002).

Para medir a potência consumida pelo motor durante o processo de usinagem, pode-se utilizar um sensor de efeito Hall, que tem como base a produção de um campo magnético que é produzido quando a corrente flui através de cabo pelo motor da máquina e se este passa em um sensor de efeito Hall gerando uma tensão, conhecida como tensão Hall, que permite quantificar a potência consumida pelo motor (NAKAI, 2012; KONDO, 2019).

Medindo-se a corrente do motor, pode-se obter os valores de potência multiplicando a corrente pela tensão de alimentação do motor. Segundo Lançoni (2008) é possível substituir o dinamômetro por um sistema de medição da potência elétrica do motor com sensor de efeito Hall, embora a relação entre as medidas não seja linear, mas a correspondência pode ser realizada com equações de 4ª. ordem (KONDO, 2019).

2.5.2 Emissão acústica

A emissão acústica (EA) são as ondas geradas em materiais em estado de deformação ou fratura, devido ao rearranjo da estrutura dos materiais cristalográficos. Elas são ondas transientes de tensão, provenientes da distribuição de tensão em redor da aspereza na superfície e que são atribuídas a várias fontes, tais como deformações plásticas e elástica, que ocorrem tanto na peça quanto na ferramenta de corte, ou ainda atrito, fratura da peça, desgastes e quebra da ferramenta (HARA, 1999).

Segundo Pinheiro (2018) durante a formação de cavaco, o atrito entre a ferramenta e a peça ou mesmo o contato faz com que ocorram a deformação e a reordenação da estrutura cristalina do material, liberando uma quantidade de energia suficiente para produzir ondas de tensão que provocam mais deslocamento sobre a superfície do material, que atenuam exponencialmente à medida que se afastam da superfície.

De acordo com Hassui (2002), são os limites de frequência que determinam o fenômeno, tornando a emissão acústica interessante no monitoramento da usinagem. As frequências altas tornam o sinal insensível aos ruídos presentes durante a operação de usinagem que podem ser provenientes dos rolamentos, ou vibrações tensões de rede que alimenta o centro de usinagem e embora não haja consenso na literatura a faixa trabalhada está entre 15 kHz e 1200 kHz (PINHEIRO, 2018 e KONDO, 2019).

Euzébio (2012) expõe a emissão acústica como ondas de tensão elástica provenientes da rápida liberação de energia na deformação de um material sujeito a um esforço externo. Esses sinais podem ser detectados por um sensor piezelétrico, que transforma deslocamento em sinais elétricos, que podem ser contínuos ou de pico que ocorrem devido a quebra, trincas, impactos e são identificados pela elevação repentina na intensidade do sinal.

O valor quadrático médio RMS (*root mean square*), também conhecido como valor eficaz, e refere-se a uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável de sinal de emissão acústica calculada pela média aritmética do quadrado dos valores puros de emissão acústica, conforme Equação 10 (EUZEBIO, 2012)

$$EA_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} EA^2(t)dt} \quad (10)$$

Em que EA_{RMS} é o valor médio quadrático de emissão acústica Δt é o tempo de integração em EA é o sinal puro de emissão acústica.

2.5.3 Vibração

Vibrações sempre ocorrem sob condições indesejáveis de usinagem e ocorrem pela interação entre o sistema máquina-ferramenta-peça. Em todos os tipos de processos de usinagem pode-se verificar três classes de vibrações mecânicas que podem ser identificadas como: livres (naturais), forçadas e auto excitados (PINHEIRO, 2018).

As vibrações em usinagem ocorrem devido à dinâmica do processo de corte estar em ressonância à estrutura ao seu redor, tais como da peça, do porta ferramentas e da máquina. Se o amortecimento é insuficiente pode apresentar resultados inesperados, como defeitos na superfície da peça ou aumento de desgaste da ferramenta de corte (STÅHL, 2012).

De acordo com Souza (2004) as oscilações da força de corte produzem vibrações e com o decorrer do tempo de corte e consequente desgaste da ferramenta, o sinal de vibrações apresenta alterações de frequência e intensidade. As vibrações podem ser quantificadas em termos de movimento ondulatório (deslocamento, velocidade, aceleração); forma da onda

(senoidal, randômica, de impulso): valor instantâneo; valor de pico (ou pico-a-pico). A oscilação senoidal pode ser expressa conforme a Equação 11.

$$y_t = y_0.sen(\omega t + \theta) \quad (11)$$

Em que y_t – valor instantâneo do deslocamento no instante t; y_0 – amplitude de deslocamento; ω - frequência angular; θ - fase.

O comportamento das vibrações muda com o desgaste da ferramenta e podem sem medidas utilizando-se transdutores piezelétricos do tipo acelerômetro (saída em volts), principalmente na aquisição de sinais com frequências entre 1 e 20 kHz. Os sinais de vibração variam com o desgaste, com os parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta (SOUZA, 2004; PINHEIRO, 2018).

Diniz e Hara (1999)[1] apud Souza (2004) concluíram que a vibração aumenta com o aumento da velocidade de corte, maior raio de ponta da ferramenta e aumento da profundidade de corte e que a influência do avanço e praticamente desprezível.

Segundo Bonifácio (1993) as forças de usinagem aumentam com o desgaste da ferramenta de corte, causando maior vibração da ferramenta e o monitoramento do desgaste da ferramenta pode ser mascarado pela vibração.

Segundo Arshinov e Alekseev (1970)[2] apud Bonifácio (1993) o efeito da vibração pode ser melhorado, com o aumento da dureza e do limite de resistência do material, melhores operações de acabamento dependem de menores vibrações aumentando a velocidade de corte e ferramentas com chanfros nas arestas tendem a diminuir vibrações do sistema.

2.5.4 Projeto e análise de experimentos

Segundo Montgomery (2013), Pinheiro (2018) e KONDO (2019) para tirar conclusões objetivas significativas dos dados obtidos em um experimento, é recomendável que se realize um planejamento do experimento, aplicando métodos estatísticos para coleta e análise dos dados.

O método de análise depende diretamente do projeto empregado e nos estudos de usinagem dos materiais tem-se aplicado a metodologia Taguchi, que foi desenvolvida nas décadas de 1950 e 1960 por Genichi Taguchi, que contribuiu para o crescimento das indústrias japonesas pós-período da segunda guerra mundial para otimização dos processos e melhoria da qualidade dos produtos.

O método Taguchi tem sua estratégia baseada nos arranjos ortogonais e fatoriais fracionados, onde nem todas as combinações de parâmetros são testadas para obter a estimativa dos efeitos principais dos fatores do processo e encontrar a configuração otimizada e robusta do processo em estudo (KONDO, 2019).

De acordo com Kondo (2019) com o método Taguchi obtém-se com menor quantidade de experimentos o maior número possível de informações e os arranjos ortogonais da matriz possibilita o uso misto de níveis. Pode ser utilizado para qualquer processo nos experimentos laboratoriais, permitindo que se obtenha uma condição ótima e ganho de produtividade na área de desenvolvimento, pesquisa e inovação de produtos e processos.

---

[1]DINIZ, A. E.; HARA, C.M. Using neural network to establish the end turning tool life based on tool vibration signals. Revista Ciência e Tecnologia. Universidade Metodista de Piracicaba, v.7, n 14, p.67-74, 1999

[2]Arshinov, V.: Alekseev, V.: Metal cutting theory and cutting tool design, Mir Publishers Moscow (1970)

Segundo Pinheiro (2018) a matriz ortogonal desenvolvida é um meio eficiente para indicar o menor número de tentativas necessárias para realizar o experimento.

A razão *S/N* (*Signal Noise* – sinal ruído) de Taguchi é utilizada com a característica de escolha de qualidade e para otimização do processo aplicam-se três características de proporção: ¨menor é melhor, ¨maior é melhor¨ e ¨nominal é melhor¨.

As etapas do método Taguchi são segundo Kondo (2019):

I. selecionar as respostas, parâmetros de saída do processo, que serão otimizadas;

II. identificar os parâmetros de entrada que afetam as variáveis de saída e escolha dos níveis desses fatores;

III. selecionar o arranjo ortogonal apropriado indicados na literatura;

IV. atribuir fatores e interações as colunas da matriz do arranjo ortogonal;

V. realizar os experimentos, aleatorizando a ordem para minimização dos erros sistemáticos;

VI. analisar os resultados utilizando a verificação da razão sinal-ruído (S/N) e análise da variância (ANOVA);

VII. determinar os parâmetros ótimos do processo;

VIII. realizar os experimentos de verificação, se necessários.

Pinheiro (2014) recomenda que para estabelecer os fatores principais de entrada e seus níveis, pode-se utilizar como base a experiência adquirida anteriormente e com pesquisa de estudos da literatura relacionada. Para escolher a matriz ortogonal adequada para os fatores selecionados, utiliza-se uma lista de matrizes disponíveis e conforme a necessidade pode-se ao mesmo tempo, determinar um conjunto de fatores de ruídos que são aquelas variáveis incontroláveis presentes na matriz externa e que provocam variação funcional.

Para estudo e otimização da usinagem dos materiais, tem-se aplicado o método Taguchi e de acordo com Escalona, Nayarit e Cassier (2011) com a ideia de envolver uma variedade maior de parâmetros de corte e otimizar o número de experimentos a serem realizados alguns pesquisadores aplicaram o método Taguchi em seus estudos de desgaste de ferramentas e relatam que Golpalsamy et al. (2009) aplicaram a metodologia Taguchi no estudo para a previsão de desgaste da ferramenta em um processo de fresamento para usinagem de aço AISI 1045 endurecido. Os autores aplicaram equações baseadas em uma análise de regressão múltipla e realizaram um projeto de experimentos segundo a metodologia Taguchi para estudar o desempenho da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na superfície usinada e na vida da ferramenta de corte (DAVIM e FIGUEIRA, 2006).

Davim e Figueira (2006) investigaram os efeitos dos parâmetros de corte no torneamento de aço endurecido utilizando ferramentas com inserto de cerâmica no acabamento da superfície. Eles aplicaram uma matriz (L27) usando o método Taguchi. Yang e Tarng (1998) utilizaram o método Taguchi para obter os parâmetros de corte ótimos para torneamento de aço-carbono com pastilhas de metal duro.

Pinheiro (2018) aplicou a metodologia Taguchi para encontrar as melhores condições para torneamento da liga Iconel 718 , utilizou projeto de experimento com base na matriz ortogonal para avaliar a usinagem com diferentes ferramentas e parâmetros, sendo que para dois tipos de ferramentas de metal duro revestidas com (TiAl)N + TiN pelo processo de recobrimento CVD. Empregou uma matriz L16 (4^2 x 2^2 = dois fatores com quatro níveis e dois fatores com dois níveis) em que foram selecionados os seguintes fatores de entrada: avanço (mm/rev) em quatro níveis, velocidade (mm/min) em quatro, tipo de ferramenta em dois níveis e tipo de lubrificação em também em dois níveis. A profundidade de usinagem foi fixada em 0,50 mm. Os fatores de saída considerados foram as rugosidades (Ra e Rt em μm), potência consumida (W), emissão acústica (RMS em V), vibração (mm/s) e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (mm).

Pinheiro (2018) prosseguiu o estudo para torneamento da liga Iconel 718, utilizando de ferramentas de cerâmica a base Al_2O_3 + MgO. cerâmica e aplicou uma matriz L9 (3^3= três fatores com três níveis), e foram selecionados os seguintes fatores de entrada: avanço (mm/rev) , velocidade (mm/min) e profundidade (mm), aplicados em três níveis. Os fatores de saída considerados foram as rugosidades (Ra e Rt em μm), potência consumida (W), emissão acústica (RMS em V), vibração (mm/s) e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (mm).

Kondo (2019) utilizou o método de Taguchi para torneamento da liga VAT 32 ® com quatro tipos de ferramentas de corte, sendo elas de metal duro com diferentes revestimentos (Ti(C,N) + Al_2O_3 pelo processo de deposição química de vapor *(chemical vapor deposition – CVD*), e revestimento de Ti-Al-Si-N pelo processo de deposição física de vapor (*physical vapor deposition – PVD*), pastilhas de nitreto cúbico de boro (cBN) e pastilhas experimentais de Al_2O_3 + MgO. O método de Taguchi permitiu avaliar as combinações e os efeitos principais dos parâmetros de velocidade de corte, avanço da ferramenta, profundidade de usinagem e tipo de lubrificação (a seco ou em abundancia) para otimizar as variáveis das respostas, sendo elas potência de usinagem, desgastes das ferramentas, qualidade superficial das peças usinadas, e o os sinais de emissão acústica e vibração do processo.

2.6 ESTUDOS SOBRE USINAGEM DE AÇOS ENDURECIDOS COM FERRAMENTAS DE CERÂMICA

Silva et al. (2004) estudaram os mecanismos de desgaste de diversas geometrias de ferramentas cerâmicas (Al_2O_3 + SiC_w e Al_2O_3 + TiC) e ferramentas de PcBN para torneamento com alta velocidade de corte em uma superliga à base de níquel (Waspaloy) com dureza de aproximadamente 40 HRC sob condição de corte a seco. Os resultados mostraram que o material da ferramenta e a geometria influenciaram o comportamento dos mecanismos de desgaste. De uma maneira geral, o tipo de desgaste dominante foi o de entalhe e os mecanismos foram abrasão, attrition (aderência com arrastamento) e provável difusão na maioria das ferramentas utilizadas.

Aslan (2005) estudou o desempenho e o comportamento de desgaste de diferentes ferramentas de corte no fresamento frontal do aço-ferramenta $X_2$10 Cr_{12} endurecido para 62 HRC. Ele utilizou ferramentas de carbeto de tungstênio revestida de TiCN, carbeto de tungstênio revestido de TiCN + TiAlN, cermet revestido de TiAlN, cerâmica mista Al_2O_3 + TiCN e nitreto de boro cúbico (CBN). A avaliação do desempenho das ferramentas foi baseada no acabamento da superfície e no desgaste do flanco da ferramenta. O desgaste do flanco da ferramenta foi estudado cuidadosamente através do microscópio eletrônico de varredura JSM 5600 (30 kW). Os valores de rugosidade da superfície foram medidos pelo equipamento Mitutoyo Metusurf 310. A ferramenta de CBN exibiu o melhor desempenho de corte em termos de desgaste do flanco e acabamento da superfície. O maior volume de remoção de metal foi obtido também com a ferramenta de CBN.

Sales e Ferreira (2005) fizeram um estudo comparativo entre os resultados obtidos no torneamento de aço endurecido ASTM 300M com ferrramenta de cerâmica mista (Al_2O_3 + TiC) e outra de PcBN (CBN + TiN) com geometria convencional e geometria alisadora, onde foram comparados o acabamentos superficial, desgastes e avarias nas ferramentas, tempo total de usinagem, custo e vida das ferramentas. Após todos os ensaios, na análise quantitativa de custo x benefício as ferramentas de cerâmica de geometria alisadora usando condições de corte (Vc = 150 m/min e f = 0,20 e 0,30 mm/v) proporcionaram os menores custos de usinagem e apresentaram maiores vidas para a aresta de corte e um dos menores tempos de usinagem e maior vida por aresta. A diferença entre os custos de usinagem com ferramentas cerâmicas e de PCBN foram altas, em decorrência do elevado custo de aquisição das ferramentas de PCBN, tempo total de usinagem e em menor intensidade pela maior vida das ferramentas cerâmicas.

Deng, Tongkun e Liu (2005) utilizaram as ferramentas de corte de cerâmica Al_2O_3 / TiB_2 com diferentes conteúdos de TiB_2 produzidas por prensagem a quente. As propriedades fundamentais dessas ferramentas de corte de cerâmica foram examinadas, realizando testes de usinagem a alta velocidade a seco foram realizados em aço $45^{\#}$ (similar ao ABNT 1045) endurecido com uma dureza de HRC 45-50 na forma de barra redonda com um diâmetro de 150 mm. O desgaste da ferramenta, a temperatura de corte, as forças de corte e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco foram medidos. Os autores constataram que as taxas de desgaste e o coeficiente de atrito na interface ferramenta com a peça, com as ferramentas de corte de cerâmica Al_2O_3 / TiB_2 na usinagem a alta velocidade a seco do aço $45^{\#}$, foram reduzidos em comparação com a usinagem a baixa velocidade. Foram analisados os mecanismos responsáveis para a formação de um filme de óxido auto lubrificante na interface ferramenta com a peça, proveniente da reação tribológica química devido a temperatura elevada de corte. Verificou-se que a composição do filme auto lubrificante é o produto de oxidação dos grãos de TiB_2, que serve como aditivo lubrificante na faixa de desgaste da superfície de saída da ferramenta. O aparecimento deste filme de óxido auto lubrificante contribuiu para a melhoria da resistência ao desgaste e a diminuição do coeficiente de atrito. Essa ação foi ainda mais eficaz com um maior teor de TiB_2. Verificou-se que a velocidade de corte tem um efeito profundo no comportamento auto lubrificante. Na usinagem a seco de baixa velocidade de aço temperado, as ferramentas Al_2O_3 / TiB_2 mostraram principalmente desgaste adesivo e abrasivo. Enquanto na usinagem a alta velocidade a seco, o desgaste por oxidação das ferramentas de cerâmica foi o mecanismo dominante devido à temperatura de corte muito alta.

Kumar, Durai e Sornakumar (2006) avaliaram o desempenho da ferramenta de cerâmica à base de alumina no torneamento de um aço inoxidável martensítico temperado (60 HRC).

Desenvolveram modelos matemáticos para avaliar o desgaste das ferramentas usando análise de regressão múltipla (MRA). Foram observados desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe nas ferramentas com velocidades de corte acima de 220 m / min. O desgaste da cratera e desgaste de entalhe desempenha um papel significativo na determinação da vida útil da ferramenta de a ferramenta de corte de cerâmica à base de alumina, especialmente em alta velocidade na usinagem de aço SS 410 (HRC 60).

Camuşcu e Aslan (2007) investigaram o fresamento de alta velocidade do aço-ferramenta AISI D3 endurecido a 35 HRC usando ferramentas de corte à base de carbeto revestido, cermet revestido, alumina (Al_2O_3) na forma de cerâmica mista e de nitreto cúbico de boro (CBN). Os desempenhos das ferramentas de corte foram comparados em relação à vida da ferramenta e ao acabamento superficial da peça. Os resultados também foram discutidos em termos de custo da ferramenta. O melhor desempenho de corte foi obtido com a ferramenta de CBN. A ferramenta cerâmica Al_2O_3 mista (TiCN) também se mostrou adequada para fresamento frontal de alta velocidade do aço AISI D3 com 35 HRC. As ferramentas de metal duro e cermet revestido, por outro lado, não apresentaram bom desempenho em operações de corte de alta velocidade. Eles devem ser usados em velocidades de corte baixas ou moderadas.

Aslan, Camuşcu e Birgören (2007) realizaram estudo experimental com ferramentas de corte de cerâmica à base de Al_2O_3 para o torneamento do aos AISI 4140 endurecido para 63HRC. Analisaram os efeitos combinados de três parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte em duas medidas de desempenho, desgaste de flanco (VB) e rugosidade da superfície (Ra), foram investigados empregando uma matriz ortogonal e a análise de variância (ANOVA). Parâmetros ideais de corte para cada medida de desempenho foram obtidos; também a relação entre os parâmetros e as medidas de desempenho foi determinada usando regressão linear múltipla.

Fnides et al. (2009) realizaram estudo experimental para determinar modelos estatísticos de critérios de rugosidade da superfície em torneamento duro de aço de alta liga $X38CrMoV_5$-1, endurecido para 50 HRC, usinado por uma ferramenta de cerâmica mista inserto CC650 de composição química (70% Al_2O_3 + 30% TiC), insensível a mudanças de temperatura e com alta resistência ao desgaste com a geometria da face de corte com os ângulos $\chi = 75^o \alpha = 6^o$ $\gamma = -6^o$. Com base no planejamento fatorial completo de 3^3, foram realizados 27 testes: velocidade de corte (Vc): 90, 120 e 180 m/min; avanço (f): 0,08; 0,12 e 0,16 mm/rev e profundidade (ap): 0,15; 0,30 e 0,45 mm. O intervalo de cada parâmetro foi definido em três níveis diferentes, baixo, médio e alto. Os modelos matemáticos foram tratados pelo *software* Minitab (método de regressão múltipla) para expressar o grau de influência de cada elemento

do regime de corte na rugosidade da superfície e na seleção de variáveis de corte para os critérios de rugosidade da superfície necessários. Os resultados indicam que a taxa de avanço é o fator dominante que afeta a rugosidade da superfície, seguido pela velocidade de corte. Quanto à profundidade de corte, seu efeito não é muito importante.

Amin et al. (2009) realizaram estudo para avaliar o desempenho da pastilha TiAlN 1030 revestido com PVD no fresamento de topo de aço temperado AISI H13, realizado em um centro de usinagem vertical (VMC) aquecendo as peças e usando como variáveis de usinagem a velocidade do fuso, o avanço e a profundidade de corte. Um modelo estatístico foi desenvolvido usando os recursos da Metodologia da superfície de resposta (MSR) para prever a vida da ferramenta. Um número suficiente de experimentos foi realizado com base no conceito de MSR de pequeno projeto composto central (CCD) para gerar dados de vida da ferramenta para as variáveis de usinagem selecionadas. A adequação do modelo foi testada com intervalo de confiança de 95%. Eles ainda observaram uma tendência temporal nos valores residuais entre as previsões do modelo e os dados experimentais, refletindo pequenos desvios na previsão da vida da ferramenta. Foi alcançado um desempenho muito bom do modelo MSR, em termos de concordância com dados experimentais. O modelo pode ser usado para a análise e previsão da complexa relação entre as condições de corte e a vida da ferramenta na fresagem plana de materiais endurecidos.

Santos (2010) utilizou ferramenta de cerâmica para torneamento cilíndrico externo da liga a base níquel Inconel 718 utilizado ferramenta de cerâmica à base de Nitreto de Silício (Si_3N_4) para otimização da usinagem desta liga e buscando proporcionar aumentos reais de produtividade. Os ensaios foram realizados em um torno CNC com parâmetros de usinagem: velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanços próprios de acabamento. Após cada etapa do torneamento foram realizadas as medições do comprimento de corte, do desgaste da ferramenta e a rugosidade das peças. Nos ensaios com ensaios com baixas velocidades de corte (entre 60 m/min até 85 m/min), houve baixo desempenho da vida da ferramenta de corte, pois conforme o autor, existe uma maior tendência à formação de aderência devido ao maior tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta, que pode em alguns casos levar ao aparecimento de aresta postiça de corte (APC). Em velocidades intermediárias (entre 110 m/min até 200 m/min) ocorreu uma diminuição drástica destes fenômenos, que se refletiu na melhoria da vida da ferramenta. Nos ensaios com velocidade de corte 300 m/min ocorreu uma maior influência da temperatura gerada pelo atrito da ferramenta com o cavaco e com a peça devido à alta velocidade o que acelera de maneira intensa os processos de desgaste da aresta de corte. Houve pouco um nenhum desgaste de cratera nas ferramentas, devido à boa resistência ao desgaste

químico, principalmente por difusão apresentado pelo nitreto de silício (Si_3N_4) na usinagem da liga em estudo. Em termos de acabamento superficial existe uma tendência da diminuição dos níveis de rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Para velocidades elevadas, acima de 300 m/min houve desgaste prematuro da ferramenta não permitindo uma usinagem eficiente e a melhor condição de trabalho em termos de vida da ferramenta foi a 200-05-05, com resultados significativos de rugosidade.

Sá (2010) estudou o fresamento do aço ABNT 4140 temperado e revenido com ferramentas de corte de metal duro WC-Co P-35 revestida com TiN, em máquina CNC utilizando velocidade de corte de 120 m/min, e avanços de 0,1; 0,15 e 0,2mm/rev. Foram utilizadas fresas com diâmetros de 20 e 40 mm, com um canal interno para aplicação do fluido de corte, com tempo limite pré-determinado de até 50 minutos o que propiciou desgaste, avarias e fratura das pastilhas. Verificou-se também a rugosidade da peça para esse tempo de fresamento. Durante o fresamento a fresa de diâmetro de 20mm influenciada pelos seus parâmetros de usinagem retira mais material do que a fresa de diâmetro de 40 mm. Segundo o autor, o desgaste da ferramenta de diâmetro de 40mm é maior para todos os avanços trabalhados. Com menor retirada de material durante a usinagem os valores de desgaste foram menores para os avanços de 0,10mm/rev, tanto para a fresa de diâmetro de 20mm quanto para a fresa de diâmetro de 40mm. Os valores de Ra foram maiores para avanço de 0,20mm/rev., que justifica os maiores valores de desgaste para o referido avanço. O esforço de corte e os parâmetros utilizados durante a usinagem, com os dados dos gráficos de batimento, foi constatado que a fresa de 40mm apresentou maior deslocamento das pastilhas.

Xiaobin e Zhao (2014) estudaram o fresamento em várias velocidades do aço AISI D3 endurecido na condição a seco para comparar o desempenho de corte das ferramentas de cerâmica Al_2O_3 / TiB_2 com diferentes conteúdos de TiB_2 produzidas por prensagem a quente. As propriedades fundamentais dessas ferramentas de corte de cerâmica foram examinadas. O desgaste da ferramenta, a temperatura de corte, as forças de corte e o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco foram medidos. Com os resultados, os autores constataram que as taxas de desgaste e o coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco das ferramentas de corte de cerâmica Al_2O_3 / TiB_2 foram reduzidos em comparação com a usinagem a baixa velocidade. Os mecanismos responsáveis foram determinados como a formação de um filme de óxido auto lubrificante na interface ferramenta- cavaco devido à reação tribológica-química pela temperatura elevada de corte. Verificou-se que a composição do filme auto lubrificante é o produto de oxidação dos grãos de TiB_2, que serve como aditivo lubrificante na faixa de desgaste da face de corte da ferramenta. A formação deste filme de óxido auto lubrificante contribuiu

para a melhoria da resistência ao desgaste e a diminuição do coeficiente de atrito. Essa ação foi ainda mais eficaz com um maior teor de TiB_2. Verificou-se que a velocidade de corte tem um efeito profundo no comportamento auto lubrificante. Na usinagem a seco de baixa velocidade de aço temperado, as ferramentas Al_2O_3 / TiB_2 mostraram principalmente desgaste adesivo e abrasivo. Enquanto na usinagem a alta velocidade a seco, o desgaste por oxidação das ferramentas de cerâmica foi o mecanismo dominante devido à temperatura de corte muito alta. Nenhum filme de óxido foi formado na interface ferramenta-chip durante a usinagem em atmosfera de nitrogênio, e a resistência ao desgaste da ferramenta foi correspondentemente diminuída.

Sergey et al. (2015) realizaram estudo com modelos matemáticos no fresamento de acabamento de aços endurecidos para avaliar o desgaste do inserto de cerâmica de óxido CC6 (Al_2O_3-TiC) produzido por Deposição Física por Vapor de Nitreto (VPD) pela Universidade Estatal de Tecnologia de Moscou "STANKIN". Os experimentos mostraram que os revestimentos fornecem pelo menos 10% de redução das forças de corte e percebeu-se que o desgaste das pastilhas influencia os parâmetros de força, principalmente na direção axial do eixo (Px), que possibilita a utilização desses parâmetros como indicadores de diagnóstico. Para velocidades de corte superiores a 220 $m.min^{-1}$, segundo o autor ocorre uma diminuição da força de corte.

Silva (2015) estudou o torneamento do ferro fundido vermicular da classe 450 com dois tipos de ferramentas cerâmicas: uma cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4) e outra uma a base de alumina (Al_2O_3). As variáveis utilizadas foram 3 velocidades de corte (Vc) de 300, 400 e 500 m/min; avanço (f) de 0,2 mm/rev e profundidade de corte (ap) de 0,5 mm. Os resultados demonstraram que a ferramenta de Al_2O_3 apresentou melhor desempenho na Vc de 500 m/min, enquanto a ferramenta de Si_3N4 obteve um melhor resultado na Vc de 300 m/min. Isso pode ser explicado em função da ferramenta a base de Si_3N_4 possui fase intergranular macia, denominada amorfa, e a alumina possui maior resistência a abrasão devido a sua alta refratariedade. Os resultados deixam claro que as ferramentas apresentam importante potencial para usinagem do ferro fundido vermicular, sendo necessário um controle rigoroso dos parâmetros de corte utilizados.

Pinheiro (2018) estudou o torneamento da liga Inconel 718 com ferramentas de metal duro, ferramenta experimental de cerâmica – Al_2O_3 + MgO (perfil S). Para a ferramenta cerâmica, a usinagem ocorreu a seco e nas seguintes condições: avanços de 0,10; 0,20 e 0,30 mm/rev.; velocidades de corte de 300; 400 e 500 m/min; profundidades de usinagem de 0,20; 0,35 e 0,50 mm. A ferramenta de metal duro revestido (perfil C) foi utilizada em profundidade

fixa de 0,5 mm, nas seguintes condições experimentais: avanços de 0,10; 0,15; 0,20 e 0,25 mm/rev.; velocidades de corte de 55; 70; 85 e 100 m/min; dois tipos de ferramentas; dois tipos de lubrificação/refrigeração. Com a metodologia de Taguchi foram planejadas duas matrizes experimentais e a melhor condição experimental, em ambos os planejamentos, foi definida a partir das seguintes variáveis reposta: Ra, Rt, potência consumida, emissão acústica, vibração, desgaste da ferramenta e cavacos. Para a ferramenta cerâmica, a condição que apresentou os melhores resultados foram: avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 400 m/min e profundidade de 0,50 mm. Nesta condição, o comprimento de corte foi de 326,77 m e os valores de rugosidades, iniciais e finais, foram de: Ra = 0,798 e 2,075 μm e Rt = 6,227 e 13,88 μm, respectivamente. Para a ferramenta de metal duro revestido, a condição que apresentou os melhores resultados foi: avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 70 m/min, ferramenta CNMG120408–M1– TS2500 e lubrificação/refrigeração com mínima quantidade de fluído. O comprimento de corte, nesta condição, foi de 511,20 m, cujos valores de rugosidades, iniciais e finais, foram de: Ra = 0,637 e 0,857 μm e Rt = 3,316 e 4,687 μm, respectivamente. A usinagem com a ferramenta de metal duro obteve um comprimento de corte 36 % maior que a ferramenta cerâmica, além de manter as rugosidades Ra e Rt dentro dos limites aceitos pelas indústrias aeroespaciais. Entretanto, a utilização da ferramenta cerâmica, usinando com velocidade de corte seis vezes maior que a ferramenta de metal duro, pareceu ser promissora, pois obteve valores semelhantes de: rugosidades Ra e Rt , até um comprimento de corte de 170 m; desgastes de flancos médios semelhantes, até um comprimento de corte de aproximadamente 250 m; valores inferiores de potência consumida; valores semelhantes de vibração; gerou cavacos curtos. Possivelmente, o emprego de ferramenta cerâmica redonda, com maior raio de ponta, possa gerar resultados melhores que aquelas de formato quadrado. Além do mais, o emprego desta ferramenta pode ser mais adequado em operações de desbaste com maiores profundidades de usinagem

Zheng et al. (2019) estudaram o fresamento a seco de alta velocidade do aço AISI 4340 com uma ferramenta de metal duro revestida por CVD. As relações entre força de corte, rugosidade da superfície e parâmetro de corte foram conduzidas e a influência do desgaste da ferramenta na força de corte e na rugosidade da superfície também foi investigada. O mecanismo de desgaste da ferramenta revestida foi revelado por MEV e análise EDS. Devido à menor taxa de desgaste da ferramenta, o aumento das forças de corte e da rugosidade da superfície Ra foi menor no estágio de desgaste inicial e no estágio de desgaste constante, enquanto o aumento das forças de corte foi aprimorado repentinamente quando o desgaste do flanco era superior a 0,25 mm. Além disso, o desgaste da ferramenta revestida foi causado

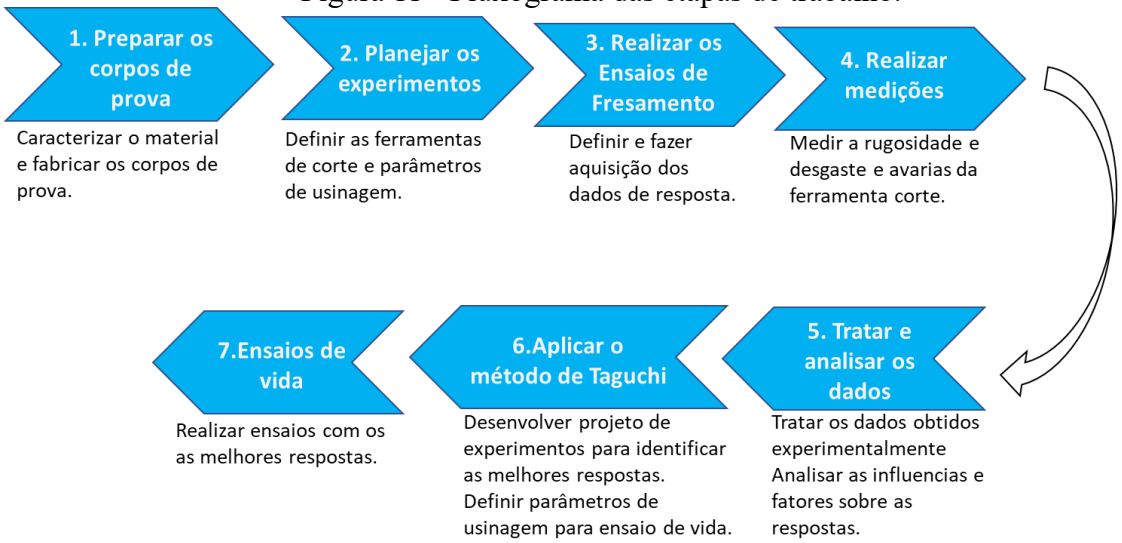
principalmente por aderência, abrasão, oxidação e difusão, acompanhado de um pouco de descascamento e lascamento.

Kondo (2019) estudou o torneamento da liga VAT 32® com quatro tipos de ferramentas de corte. São elas insertos de metal duro com diferentes revestimentos, Ti(C,N) + Al_2O_3 pelo processo de deposição química de vapor (chemical vapor deposition – CVD), e revestimento de Ti-Al-Si-N pelo processo de deposição física de vapor (physical vapor deposition – PVD), pastilhas de nitreto cúbico de boro (cBN) e pastilhas experimentais de Al_2O_3 + MgO. Através do método de Taguchi de planejamento experimental, foram obtidas as combinações e os efeitos principais dos parâmetros velocidade de corte, avanço da ferramenta, profundidade de usinagem e tipo de lubrificação (seco ou em abundância) para otimizar cada uma das variáveis respostas, sendo elas potência de usinagem, desgaste das ferramentas, qualidade superficial das peças usinadas, e os sinais de emissão acústica e vibração do processo. Foram obtidos também, através da análise da razão sinal ruído (S/N) de Taguchi, a composição dos parâmetros de corte em que o processo apresentou menor variabilidade das características de qualidade, o chamado processo robusto. Com a utilização da análise relacional cinza (GRA), método de otimização multiobjetivo, selecionou-se uma condição para os ensaios de vida das diferentes ferramentas estudadas. O autor relatou que nos ensaios de vida, onde cada um dos tipos de ferramenta trabalhou na sua condição otimizada, o melhor desempenho em relação ao comprimento usinado total até o fim de vida foi da ferramenta de metal duro CVD. Porém, quando analisada a rugosidade das peças usinada, o destaque é dado a ferramenta de PVD, pois seu comprimento total de usinagem é pouco inferior aos obtidos pela ferramenta CVD, mas os valores de rugosidade obtidos são muito inferiores, cerca de pelo menos 3 vezes menor. Para a de cerâmica as condições otimizadas, dentre as testadas nos experimentos, foram de vc = 500 m/min, f = 0,10 mm/rev e ap = 0,25 mm. Com relação ao desempenho da ferramenta de cerâmica experimental, a análise dos desgastes mostrou que a aresta de corte da ferramenta de formato quadrado sofreu uma degradação muito alta, o que pode indicar que a geometria desta ferramenta, chanfro de 20° e inserto tipo S, para a usinagem de superligas pode não ser a adequada. O baixo desempenho na análise de vida da ferramenta cerâmica pode ser um indicativo de que, apesar do método de Grey-Taguchi encontrar a solução otimizada dos parâmetros de corte para o processo, os parâmetros testados podem não ser os adequados para o material e geometria da ferramenta proposta. Recomenda-se então mais estudos com o uso desta ferramenta experimental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os métodos, materiais da peça e das ferramentas, planejamento experimental, condições de corte, variáveis de saída e como foram medidas, bem como equipamentos utilizados. Esta seção foi dividida abordando o maquinário utilizado para usinagem, os equipamentos para obtenção dos sinais durante o processo de corte (sistema de aquisição de dados), equipamentos para medição da rugosidade, medição e análise do desgaste das ferramentas de corte, o tratamento dos dados de saída (potência, vibração e emissão acústica). Os dados levantados foram organizados com o auxílio do *software* Excel 2016, exceto os de potência, vibração e emissão acústica que foram tratados pelo *software* MATLAB 7.8 (R2009a). O planejamento e análise dos experimentos foram efetuados com o auxílio do *software* Minitab17. Na Figura 11 é apresentado o fluxograma das atividades desenvolvidas durante este trabalho.

Figura 11 - Fluxograma das etapas de trabalho.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos utilizados pertencem ao Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, UNESP.

3.1.1 Centro de usinagem

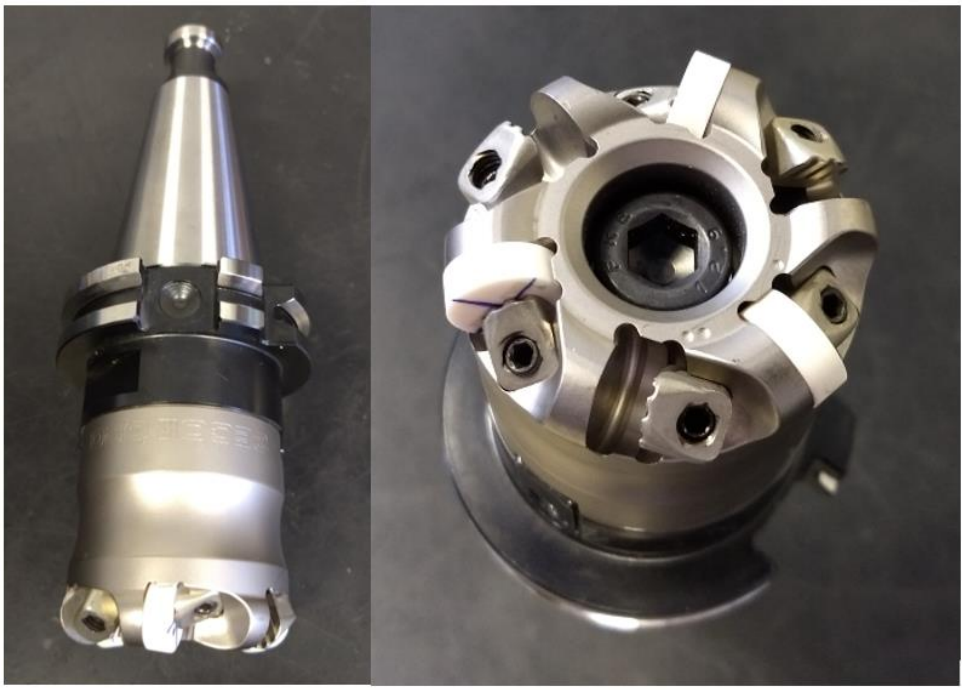
Os ensaios de usinagem foram realizados, em um centro de usinagem do fabricante DMG modelo DMU50ECO, série DMG Ecoline, possui rotação máxima do fuso de 8000 rpm e potência de 17 kW (Figura 12). A ele está acoplado sistema de aquisição de dados de potência, emissão acústica e vibração.

Figura 12: Centro de Usinagem

Fonte: Autoria própria (2020).

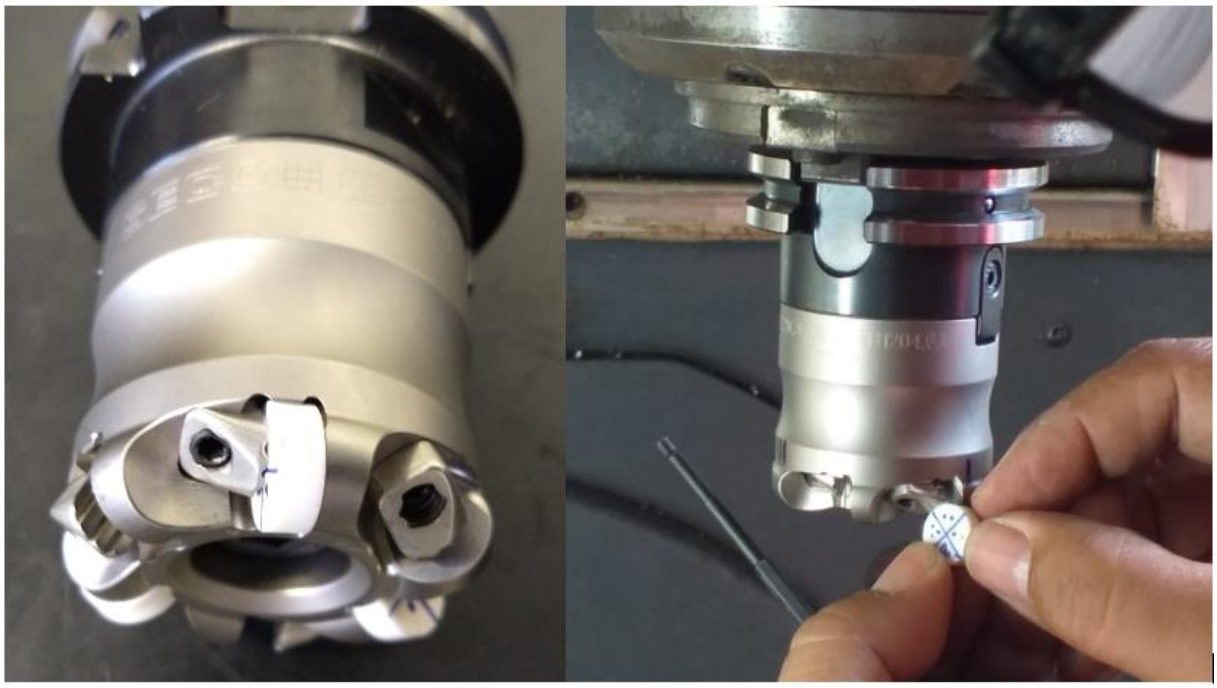
Para fixação das ferramentas de corte, foi utilizado suporte porta fresa SECO R217.29-1632 RE 063A. Diâmetro 50 mm, como ilustrado na Figuras 13, com a vista lateral e vista de topo e na Figura 14 onde pode-se observar a alojamento de fixação dos insertos.

Figura 13: Suporte de fixação da ferramenta



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 14: Suporte de fixação da ferramenta – montado no centro de usinagem para fresamento



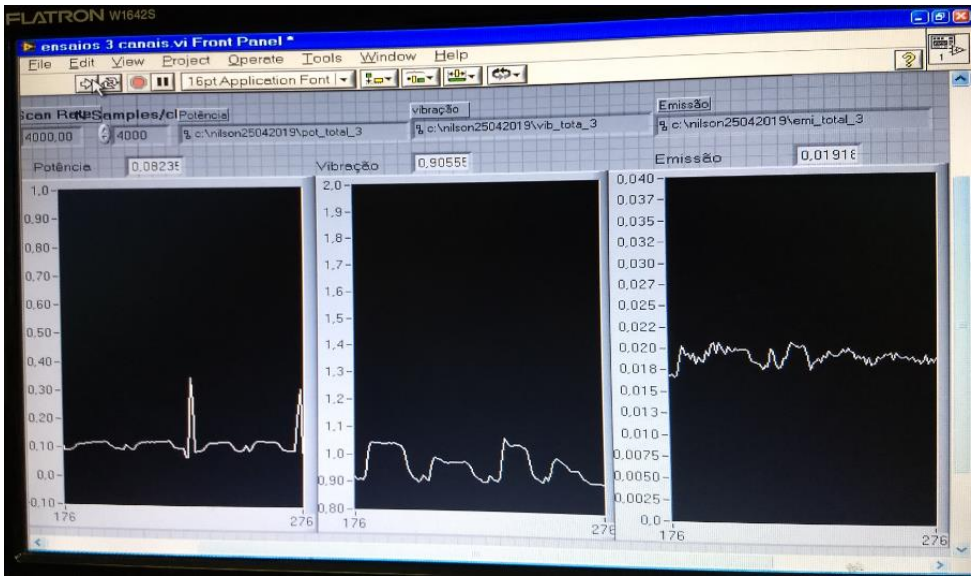
Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.2 Sistema de aquisição de sinais

Juntamente ao centro de usinagem instalou-se um sistema de aquisição para captar os sinais de potência de corte, emissão acústica e vibração durante os processos de fresamento. O sistema é composto de um módulo de canais acoplado a uma placa de aquisição de dados, modelo NI PCI 62220, que tem como função receber os sinais analógicos e transformá-los em sinais digitais, ambos da marca *National Instruments*, ligada a um computador. Com o auxílio do *software* LABVIEW® 7.1 da National Instruments montou-se um programa supervisório, para adquirir, verificar os dados e gravar no formato de arquivo de extensão ".txt". A entrada de dados dos sensores foi feita em unidades de tensão. Na Figura 15, tem-se a tela do programa supervisório utilizado, onde pode ser visto como foram supervisionadas a captação dos sinais de potência, vibração e emissão acústica.

Para capturar os dados de potência consumida, foi utilizado um sensor da marca LEM modelo AT 100, ligado em uma das fases de entrada do motor do centro de usinagem responsável pelo movimento de rotação do mandril e da peça, como é ilustrado na Figura 15. Este sensor envia um sinal de tensão proporcional à corrente elétrica da entrada do motor para o módulo de canais, sendo esta uma medida indireta da potência consumida para usinagem.

Figura 15 - Tela do programa supervisório para captação de sinais durante os ensaios de fresamento.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram utilizados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 16).

Figura 16: Sensor de efeito Hall marca LEM modelo AT100 B10.

Fonte: SOARES (2017).

O sinal do sensor (Potência) é captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. Este sinal é transformado, através da Equação 8, na unidade de potência (Watts).

$$P_c = U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (8)$$

Em que:

P_c= potência consumida, em Watts;

I= corrente alternada, em Ampères;

U_f= Tensão de uma das fases, em Volts;

F_p = Fator de potência.

O sensor em função da corrente elétrica utilizada no motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts (Vcc), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampères para que se possa aplicar esse valor na Equação 10. O fabricante do sensor fornece a Equação 9 para a transformação do dado adquirido em volts para ampères.

$$I = Vcc * 10 \quad (9)$$

Em que:

I = corrente de uma das fases (A)s;

V_{cc} = tensão de corrente contínua (V).

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na equação 10, tem-se o valor da potência consumida em Watts como indicado na equação 10.

$$P_c = V_{cc} \times 10 \times 0{,}92 \times 220 \times \sqrt{3} \quad (10)$$

Para captar o sinal de emissão acústica utilizou-se o sensor modelo R15A e o amplificador de sinal modelo 1272-1000 com saída retificada em RMS (valor quadrático médio) do fabricante PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (Figura 17). O sinal elétrico retificado corresponde à unidade Vcc (volts corrente contínua) e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades.

Figura 17: Sensor para captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION

Fonte: SOARES (2017).

Para a captação da vibração foi usado um módulo de vibração composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBRO CONTROL, modelo TV100 (Figura 18).

Figura 18: Módulo de vibração modelo TV100

Fonte: SOARES (2017).

Os valores obtidos em Vcc podem ser convertidos em valores de velocidade em mm/s de acordo com a Equação 11.

$$v = \frac{25 \times V_{cc}}{8} \quad (11)$$

3.1.3 Medição da rugosidade da peça usinada

As medições de rugosidade foram feitas com um rugosímetro portátil da marca Mahr modelo MarSurf M300 (Figura 19 (a) e MarSurf RD 18 (Figura 19 b). Ele foi inicialmente aferido e calibrado antes do início das medições. Foram selecionados o comprimento de amostragem (*cut-off*) era ajustado conforme o avanço utilizado no ensaio, seguindo as orientações da norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) e norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Figura 19 – Rugosímetro portátil da marca Mahr modelo (a) MarSurf M300; (b) MarSurf RD 18.

Fonte: PINHEIRO (2018).

3.1.4 Medições de desgaste dos insertos e captura de imagens

Para calcular o comprimento de corte (L_c), foi utilizado as equações propostas por Garcia (2015). No qual, o valor de L_c é encontrado com base no comprimento do arco a cada giro da fresa (L_{cf}), no comprimento da amostra (L_n) e na taxa de avanço (*f*), conforme demonstrado na

Equação 13. O L_{cf}, por sua vez, é determinado de acordo com o ângulo de engajamento (αe) e com o diâmetro da fresa (D), como pode ser visto na Equação 12. Na Figura 20 está ilustrado ângulo de engajamento e o número de passadas.

$$L_{cf} = \frac{\alpha_e . \pi . D}{360^0} f \tag{12}$$

$$L_c = \frac{L_{cf} . N . L_n}{f} \tag{13}$$

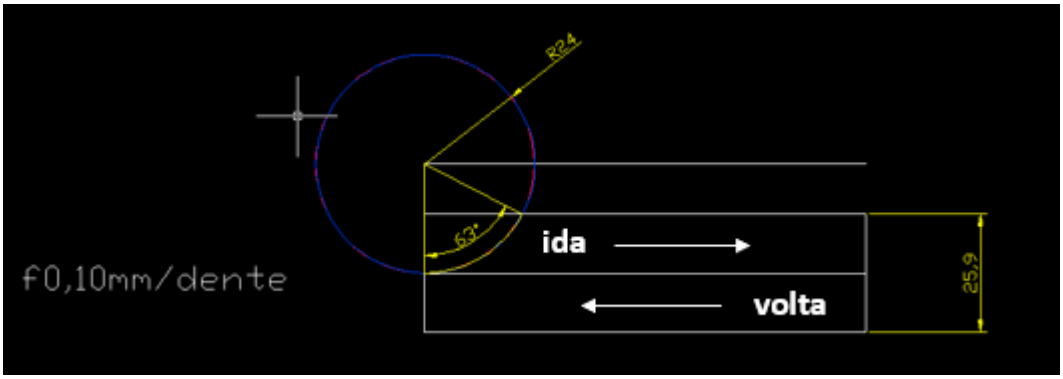
Em que:

$\propto_e$ = 63º .

D = 48 mm.

N = número de passadas (N = 2 ida e volta).

Figura 20 – ângulo de engajamento para cálculo do L_{cf}



Fonte: Autoria própria (2020).

Para avaliação e medição do desgaste das ferramentas foi utilizado um microscópio óptico de medição da Mahr modelo MarVision MM200, com deslocamento micrométrico (Figura 21). A captura de imagens e a verificação do tipo de desgaste ocorrido na ferramenta de corte, foram realizados utilizado um microscópio óptico da Zeiss modelo Stemi 2000, com sistema de captura de imagem e *software* de tratamento de imagem Image J (Figura 16). As imagens das superfícies de corte e de saída foram fotografadas e armazenadas.

Figura 21– Microscópio óptico de medição Mahr MM200 (16.a) e Microscópio óptico Zeiss modelo Stemi 2000 (16.b)

Figura 21.a– Microscópio óptico de medição (Mahr MM200	Figura 21.b – Microscópio óptico Zeiss modelo Stemi 2000

Fonte: SOARES (2017).

3.1.5 Preparação do corpo de prova

O material utilizado para estudo nesta pesquisa foi o aço ABNT 4340 que foi adquirido na forma bruta, proveniente de 03 lotes diferentes, com certificado de qualidade recebido do fabricante. Dureza variando de 201 a 227 HB e a composição química deste aço está apresentada no Quadro 5.

Quadro 5: Composição do aço ABNT 4340 utilizado.

Lote 1

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Cu	Al
0,400	0,650	0,260	0,016	0,005	0,720	1,750	0,220	0,180	0,032

Lote 2

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Cu	Al
0,400	0,630	0,220	0,015	0,014	0,730	1,660	0,220	0,150	0,037

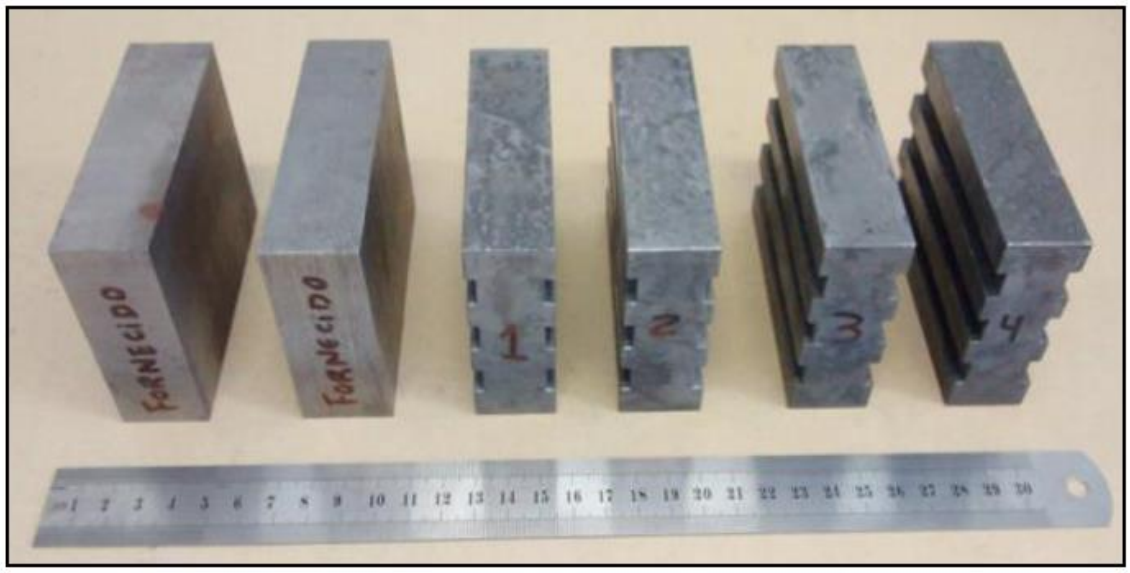
Lote 3

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mn	Cu	Al
0,400	0,650	0,240	0,019	0,012	0,750	1,680	0,240	0,190	0,033

Fonte: Autoria própria (2020).

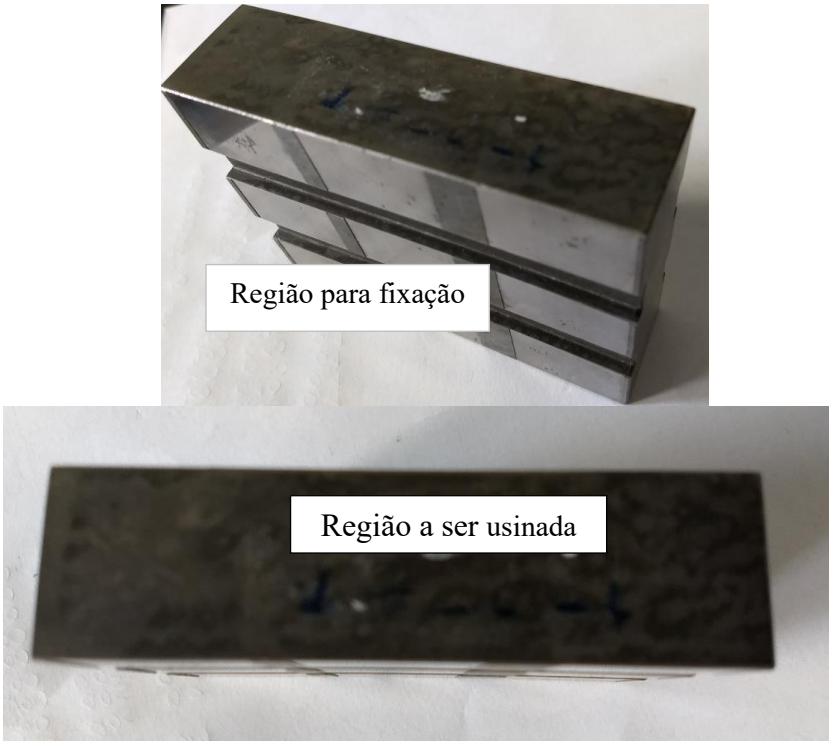
Para obtenção dos corpos de provas o material foi fresado para se obter as dimensões nominais de 25 mm x 70 mm x 100 mm (Figura 22) e em seguida foi temperado e revenido, com dureza pré-estabelecida de 56 HRC (615 HV). Na Figura 23 são ilustradas as regiões de usinagem e de fixação do corpo de prova para usinagem.

Figura 22 – Corpo de prova na forma bruta e na forma usinada, temperada e revenida.



Fonte: SOARES (2017)

Figura 23 – Corpo de prova para usinagem



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.6 Materiais dos insertos cerâmicos

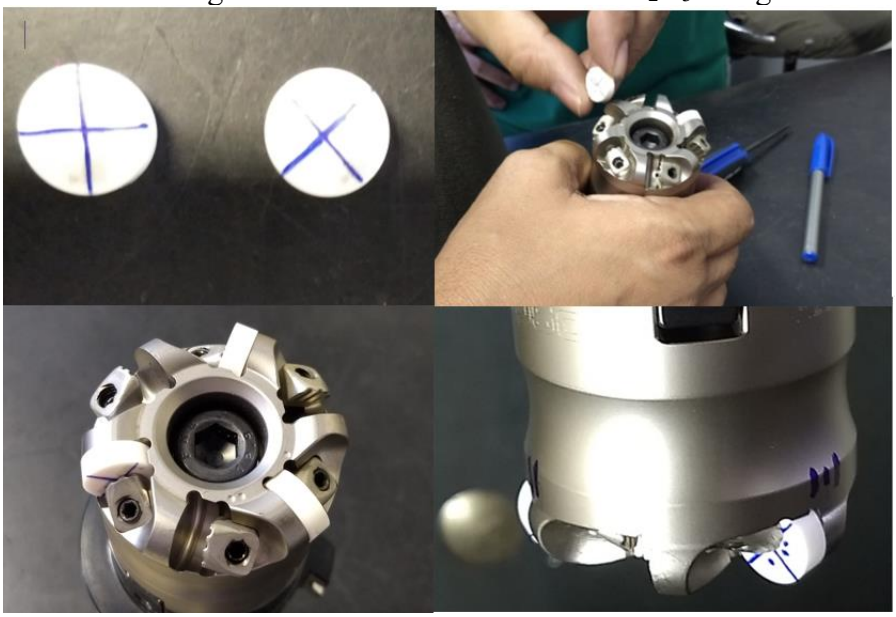
Para os ensaios de fresamento foram utilizados dois tipos de insertos de cerâmica experimentais à base de oxido de alumínio (Al_2O_3), que foram desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP a saber:

- Al_2O_3 + MgO – com composição de 99,75% em peso de Al_2O_3, a partir de um pó de alumina α, e 0,25% em peso de óxido de magnésio (MgO) com partículas cujas dimensões que variam entre 0,40-0,60 µm. A densidade relativa destas pastilhas é de 98,50 % (3,9242 g/cm^3), resistência de 19,28 GPa, dureza de 1928,367 Vickers e K_{ic} = 3,65 ± 0,14 % MPa.m$^{1/2}$, retração linear de 20,41 ± 0,16 %.

- Al_2O_3 + ZrO_2 – com composição de 99,00 % em peso de Al_2O_3, a partir de um pó de alumina α, e 1,00 % em peso de óxido de zircônio (ZrO_2) com partículas cujas dimensões variam entre 0,40-0,60 µm. A densidade destas pastilhas é de 3,9488 g/cm^3, resistência de 16,75 GPa, dureza de 1675,03 Vickers e K_{ic} = 4,20 ± 0,08 % MPa.m$^{1/2}$, retração linear de 21,4 ± 0,10 %.

A geometria de ambas as ferramentas têm codificação RNMN120400 T02020. Na Figura 24 é ilustrado o inserto de cerâmica de Al_2O_3 + MgO e a sua fixação no suporte da ferramenta.

Figura 24: Inserto de cerâmica de Al_2O_3 + MgO



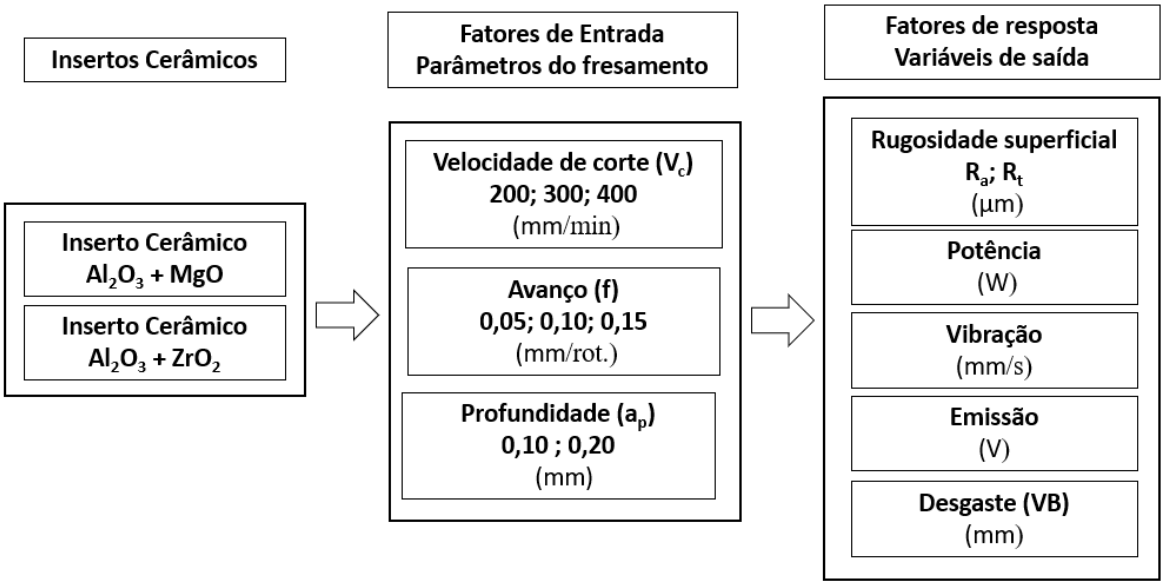
Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental adotado foi o arranjo ortogonal completo com quatro parâmetros (fatores de entrada) e 10 níveis. Foram testados o comportamento de dois tipos de insertos experimentais de cerâmica de óxido de alumínio com adição de óxido de magnésio (Al_2O_3 + MgO) e óxido de alumínio com adição de óxido de zircônio (Al_2O_3 + ZrO_2), em três velocidades de corte (200; 300; 400 m/min), três avanços (0,05; 0,10; 0,15 mm/rev), e dois valores de profundidades de corte (0,10 e 0,20 mm) e usinagem a seco que é recomendado para fresamento com ferramentas de cerâmica. No fluxograma da Figura 25 é ilustrado o procedimento aplicado, indicando os parâmetros do fresamento utilizado como fatores de entrada e os parâmetros de monitorados e medidos.

O procedimento experimental adotado resultou em 36 ensaios e 72 medições em duas séries, sendo que uma delas foi considerada de confirmação onde utilizou-se os mesmos parâmetros da primeira série. Para cada tipo de inserto foram realizados por série, 18 ensaios e 36 monitoramentos e medições nas duas trajetórias do percurso da ferramenta, 18 na ida (da esquerda para a direita) e 18 na volta (da direita para a esquerda). O fresamento foi no sentido concordante, tanto no percurso de ida quanto no retorno da ferramenta. Nas duas séries de ensaios foram realizados 144 monitoramentos e medições.

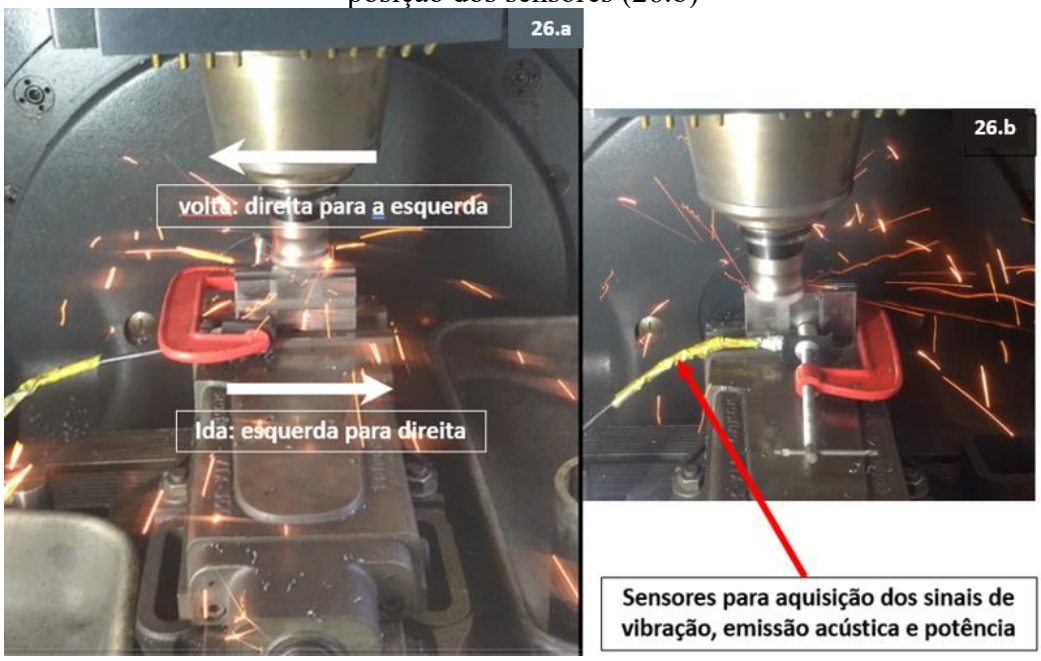
Figura 25: Procedimento experimental com os fatores de entrada e parâmetros de saída



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 26 estão indicados os percursos da ferramenta de corte e a fixação do corpo de prova (26.a) e a fixação e posição dos sensores para aquisição dos sinais de emissão acústica e potência (26.b). As combinações dos fatores testados para cada série, podem ser vistos na Tabela 1, com os quais busca-se obter um acabamento característico utilizado para aços endurecidos.

Figura 26 – Fixação do corpo de prova e percurso da ferramenta (26.a e fixação e posição dos sensores (26.b)



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 1 – Combinações e fatores testados em cada percurso da ferramenta

Inserto	v_c mm/min	Avanço mm/rot	Profundidade ap(mm)	Inserto	v_c mm/min	Avanço mm/rot	Profundidade ap(mm)
$Al_2O_3 + MgO$	200	0,05	0,10	$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10
			0,20				0,20
		0,10	0,10			0,10	0,10
			0,20				0,20
		0,15	0,10			0,15	0,10
			0,20				0,20
	300	0,05	0,10		300	0,05	0,10
			0,20				0,20
		0,10	0,10			0,10	0,10
			0,20				0,20
		0,15	0,10			0,15	0,10
			0,20				0,20
	400	0,05	0,10		400	0,05	0,10
			0,20				0,20
		0,10	0,10			0,10	0,10
			0,20				0,20
		0,15	0,10			0,15	0,10
			0,20				0,20

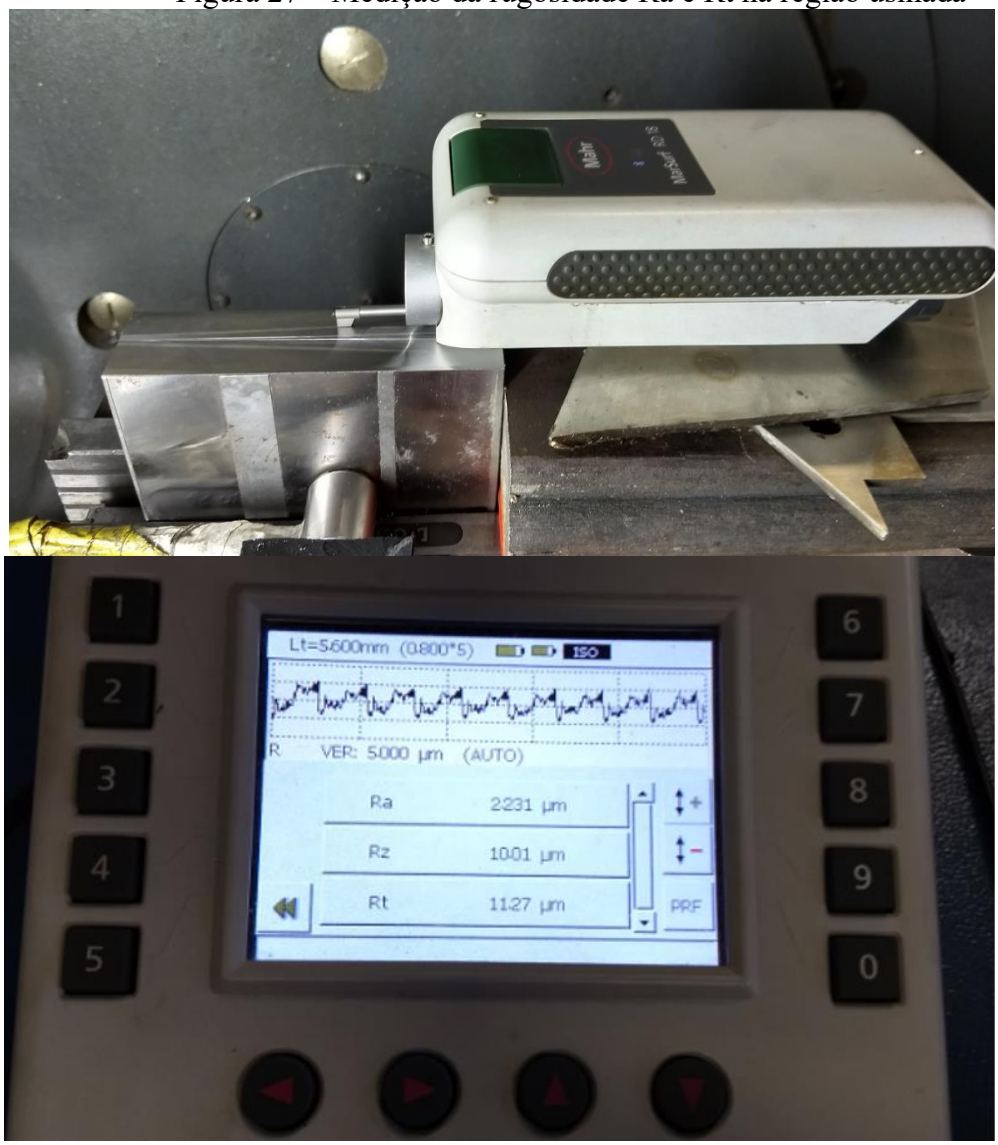
Fonte: Autoria própria (2020).

3.2.1 Medição da rugosidade

Depois de cada ensaio foi medida a qualidade superficial ao longo do comprimento da região fresada, tanto no percurso de ida quanto no percurso de volta da ferramenta de corte, no comprimento por meio da rugosidade R_a e R_t. O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 0,250 mm e o percurso de avaliação (*ln*) de 1,25 mm. Na Figura 27 é ilustrada a medição da rugosidade realizada.

O comprimento de amostragem (*cut–off*) era ajustado conforme o avanço utilizado no ensaio, seguindo as orientações da norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) e norma ABNT NBR ISO 4288 (2008), conforme os Quadros 2 e 3.

Figura 27 – Medição da rugosidade Ra e Rt na região usinada

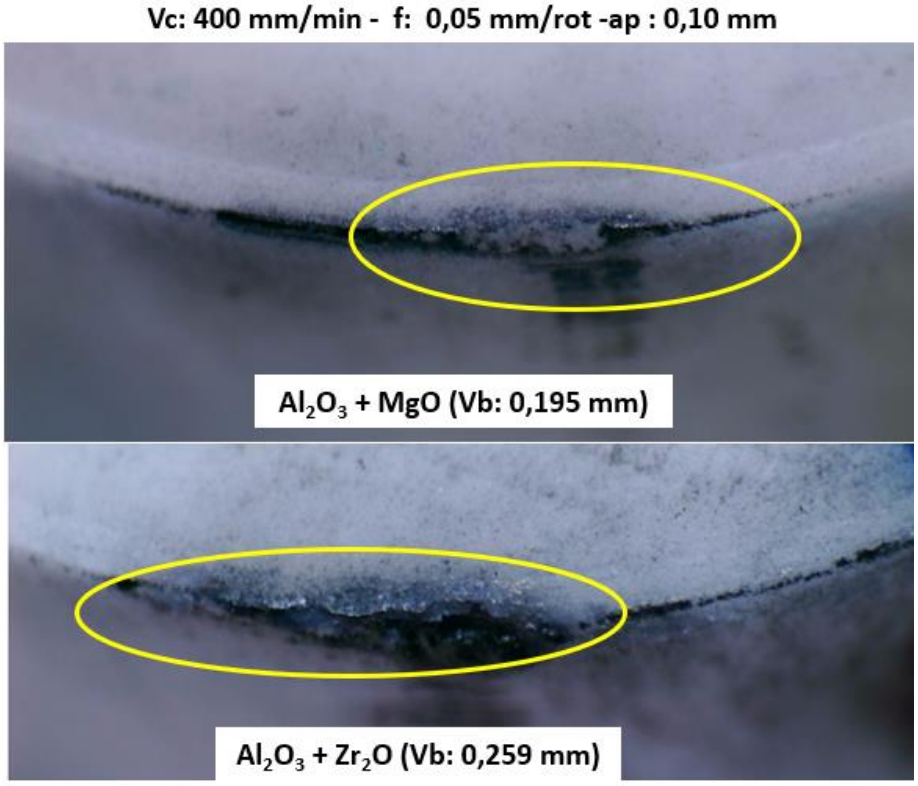


Fonte: Autoria própria (2020).

3.2.2 Imagens e medidas de desgaste dos insertos

A medição dos desgastes de flanco das ferramentas foi realizada após cada ensaio de usinagem com auxílio do microscópio da MAHR modelo MarVision MM200, com deslocamento micrométrico (Figura 19). Verificou-se por medição direta o desgaste de flanco máximo (VB máx.). Com o uso de um microscópio modelo Stemi 2000 da marca Zeiss (Figura 21.b), que possui um sistema de captura de imagens e *software* do equipamento, possibilitando o registro do aspecto do desgaste e a realização de medidas e verificação de diversos pontos da superfície da ferramenta, foram realizadas capturas de imagens dos desgastes que auxiliarão na avaliação dos mecanismos de desgastes presentes em cada tipo de ferramenta testada. Na Figura 28 estão ilustrados o desgaste medido e as imagens que podem ser registradas dos insertos.

Figura 28 – Desgaste dos insertos após fresamento



Fonte: Autoria própria (2020).

3.2.3 Tratamento dos dados

Os dados obtidos e armazenados durante os ensaios, com o auxílio do *software* LABVIEW®, foram tratados no *software* MATLAB® R2015b *student* e com programas desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento

de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia da UNESP do Campus de Guaratinguetá - SP.

As etapas de tratamento consistem em:

- Converter o separador de números decimais, foi o primeiro programa elaborado para substituir as vírgulas para pontos na separação das casas decimais dos sinais nos programas textos gerados pelo software LABVIEW, pois é o padrão usado pelo programa de tratamento dos dados MATLAB®;

- Converter a matriz de dados em uma coluna de dados: utilizado para facilitar a programação e operações com os números contendo as informações dos sinais, converte-se a matriz de dados proveniente do LABVIEW®, onde cada linha é a captação durante um segundo, com 4000 colunas, pois a taxa de aquisição era de 4000 pontos por segundo, para uma única coluna;

- Transformar os sinais nas grandezas requeridas: Os sinais de tensão Ucc correspondentes à potência, à emissão acústica e à vibração são convertidos aplicando as Equações 11, 12 e 13, respectivamente, obtendo-se os sinais nas unidades Watts (potência), V RMS (emissão acústica) e mm/s (vibração). As equações foram fornecidas pelos fabricantes dos sensores.

Os valores obtidos em UCC (volts) foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s conforme a Equação 20,

$$P_u = U_{cc} \times 10 \times 220 \times 0{,}79 \times \sqrt{3} \tag{11}$$

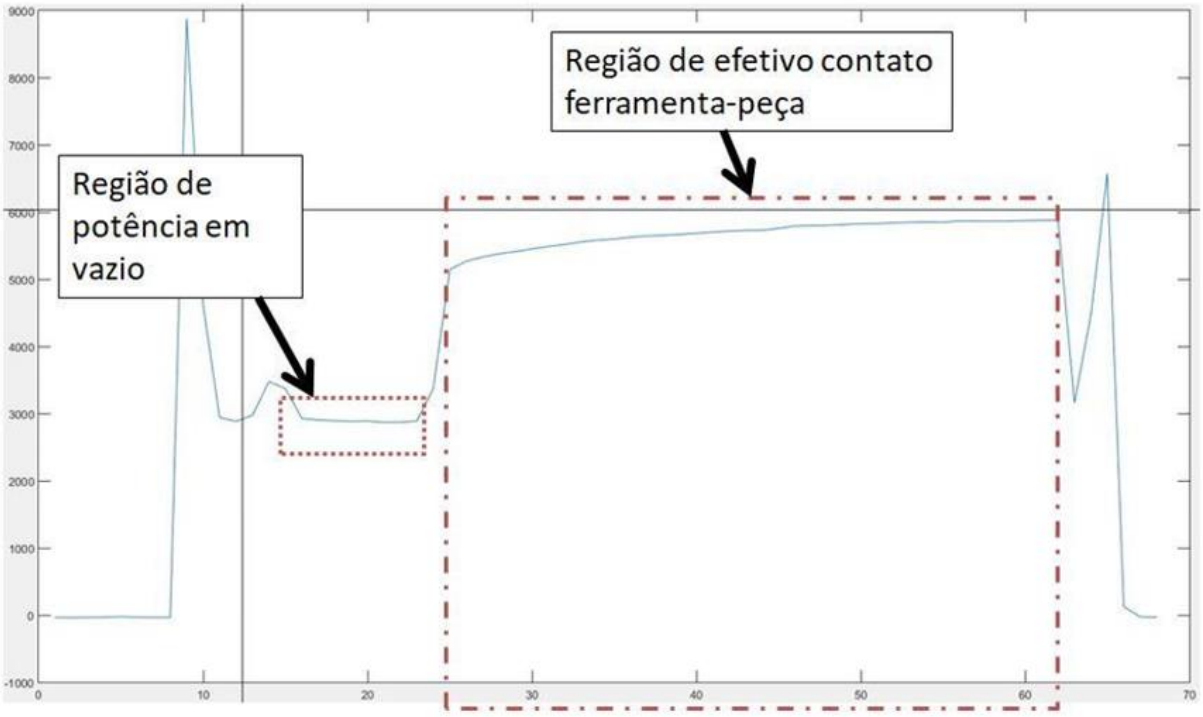
$$EA_{RMS} = U_{cc} \tag{12}$$

$$Vib = \frac{U_{cc} \times 25}{8} \tag{13}$$

- Obter a potência em vazio e os valores correspondentes do ensaio: Plotagem dos gráficos com os valores de potência de cada ensaio realizado verificando-se o valor em vazio da

potência, correspondente à potência consumida para a movimentação dos mecanismos do CNC, atritos e outras perdas, e identificação e separação da potência onde efetivamente havia o contato ferramenta-peça. O valor em vazio foi descontado dos valores médios de potência para ter-se a potência efetivamente utilizada na remoção de material, a potência consumida de usinagem P_U. Aproveitou-se a separação dos momentos de efetiva remoção de material para a coleta dos valores de emissão acústica e vibração. Na Figura 29 encontra-se um exemplo de obtenção dos valores de potência em vazio e dos momentos de contato efetivo entre a ferramenta de corte e a peça;

Figura 29: Exemplo de gráfico de potência de um ensaio de fresamento para identificação da potência em vazio e do momento de efetiva remoção de material



Fonte: KONDO (2019).

O eixo horizontal da Figura 29 representa os valores do tempo durante o ensaio, em segundos, enquanto no eixo vertical encontram-se os valores da potência, em Watts.

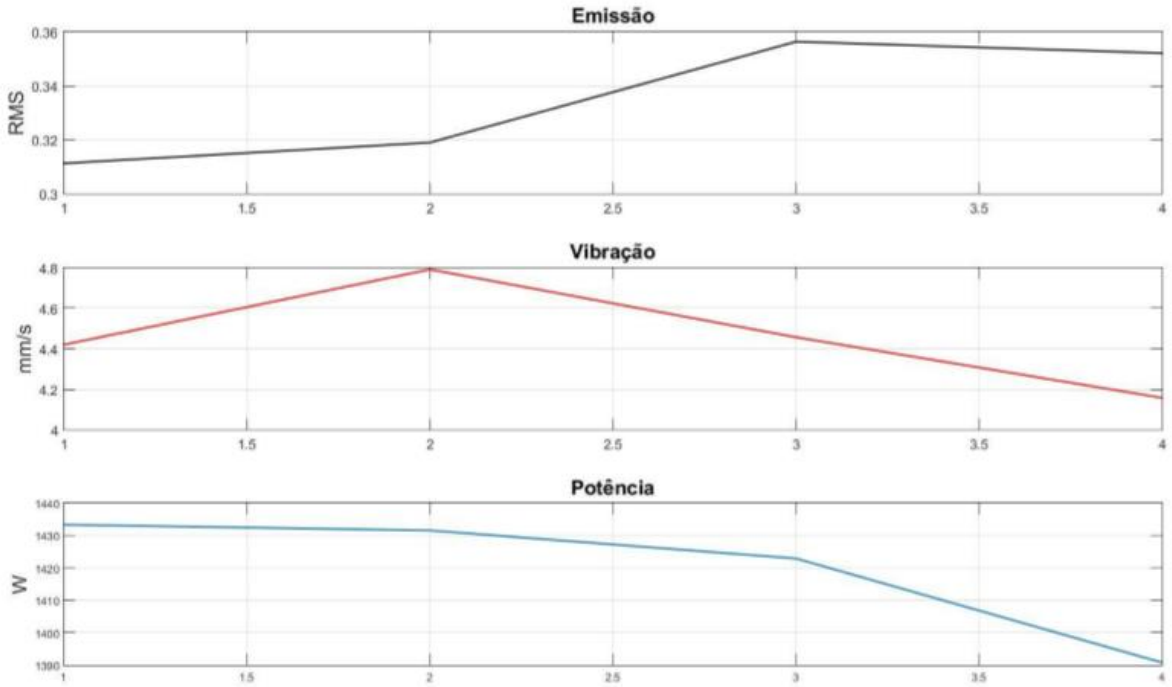
- Obtenção dos valores médios: Com a separação dos momentos de efetiva remoção de material, plotou-se os gráficos de potência, emissão acústica e vibração, como mostrado na Figura 24. Por meio do programa de tratamento dos dados desenvolvido com o MATLAB®, foram obtidos os valores médios e máximos da potência de corte, da emissão acústica e da vibração nos momentos em que há efetivo contato ferramenta-peça para

cada ensaio que foi realizado. Esses valores foram então utilizados na análise da influência dos parâmetros de corte nas respectivas respostas.

Depois de identificada a parte do ensaio em que houve efetivo contato entre ferramenta e peça, separou-se o gráfico gerado, presente na Figura 30, em três partes iguais com tempos iguais. Se o ensaio total durasse 42 s, cada parte do ensaio seria de 14 s. Em cada uma destas partes obteve-se os valores máximos de emissão acústica e vibração. Os fatores que foram analisados são a média da potência de usinagem durante todo o tempo de corte, a média dos máximos de cada uma das três partes do valor de emissão acústica e a média dos máximos dos sinais de vibração.

Para minimizar os efeitos de defeitos na peça, como pequenas elevações ou depressões que influenciariam nos valores de potência, calculou-se a média dos máximos, separando o gráfico em três partes, e também foi aplicado na vibração e emissão acústica. Esses defeitos influenciariam o valor máximo correspondente ao ensaio o que poderia ser enganoso, não caracterizando a real situação durante o tempo de corte.

Figura 30: Exemplo dos graficos criados com o software MATLAB® com o programa de tratamento de dados.



Fonte: KONDO (2019) .

A opção de utilizar a média dos máximos de emissão acústica e vibração se deu por estas serem mais representativas do processo, ao invés da simples média dos sinais durante o

fresamento. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas, através do *software* estatístico MINITAB 17 com aplicação da análise de variância (ANOVA), de acordo com o planejamento experimental adotado para cada ferramenta testada.

Para a análise e comparação dos dados obtidos para os dois tipos de insertos, utilizou-se o gráfico Box plot, sendo possível verificar a dispersão é representada pela amplitude do gráfico, que pode ser calculada como máximo valor – mínimo valor. Quanto maior for a amplitude, maior a variação nos dados. O retângulo mostrado contém 50% dos valores do conjunto de dados. A posição da linha mediana no retângulo informa sobre a assimetria da distribuição.

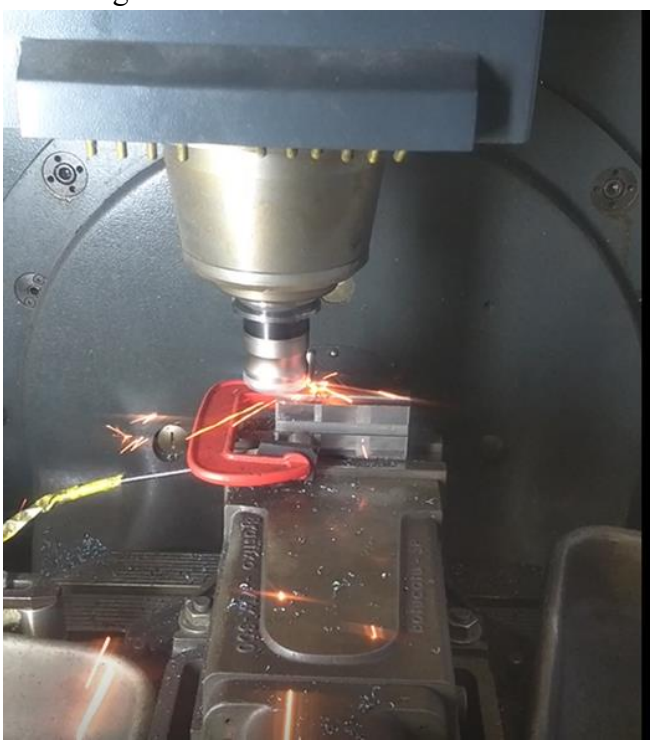
Em seguida foi realizada análise multivariada com o *software* RS Studio, que transforma linearmente um conjunto original de variáveis em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais, que são correlacionados entre si, com o objetivo principal de explicar a estrutura da variância e covariância de um vetor aleatório, composto de p-variáveis aleatórias, por meio de combinações lineares das variáveis originais. (SANDANIELO, 2008).

3.2.4 Ensaio de vida das ferramentas

Foram realizados ensaios o os ensaios de vida para o cálculo do comprimento total usinado e o tempo de vida para cada uma das ferramentas testadas, e como elas estavam trabalhando na melhor condição possível, comparou-se o desempenho de usinagem de cada uma no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido. O ensaio de vida consistiu em usinar pequenas regiões da peça, retirar a ferramenta do centro de usinagem, levá-los até o microscópio e realizar a medição dos desgastes de flanco $V_{bmáx}$. A condição limite de vida das ferramentas foi o valor de $VB_{máx}$ = 0,300 mm, conforme critério estabelecido na norma ABNT ISO 3685 (2016). Também foram investigadas as progressões das variáveis potência consumida, vibração e emissão acústica, coletados instantaneamente pelo sistema de aquisição de dados e rugosidades Ra e Rt com o aumento do desgaste das pastilhas.

Nas Figuras 31 e 32 estão ilustrados o ensaio de vida da ferramenta e a medição do desgaste no microscópio, respectivamente. Os parâmetros de fresamento para o ensaio de vida estão indicados no Quadro 6 e foram aplicados tanto para o inserto de Al_2O_3 + MgO quanto para o inserto de Al_2O_3 + Zr_2O.

Figura 31: Ensaio de vida da ferramenta



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 32: Medição do desgaste da ferramenta com microscópio óptico

Fonte: Autoria própria (2020).

Quadro 6: Parâmetros de fresamento para o ensaio de vida

Velocidade de Corte Vc (m/min)	Avanço f(mm/rev)	Profundidade ap (mm)
400	0,05	0,10

Fonte: Autoria própria (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos na usinagem por fresamento do aço ABNT 4340 endurecido utilizando insertos experimentais de Al_2O_3 + MgO e de Al_2O_3 + ZrO_2.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS COM O INSERTO DE Al_2O_3 + MgO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos na 1ª Série e na Tabela 3 os resultados da 2ª Série de ensaios realizados com o percurso da ferramenta no sentido **ida** (da esquerda para a direita) no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido utilizando o inserto cerâmico de Al_2O_3 + MgO.

Tabela 2 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração, emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **1ª. Serie** - **Sentido: Ida** (esquerda para a direita)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
Al_2O_3 + MgO	200	0,05	0,10	185,8335	8,881	0,142	0,437	2,460	0,373	33,97	0,010970464	1
	200	0,05	0,20	343,2249	6,119	0,122	0,463	2,197	0,212	33,97	0,006250613	10
	200	0,10	0,10	168,669	3,616	0,132	0,696	4,456	0,196	17,02	0,011515864	4
	200	0,10	0,20	221,4194	3,859	0,122	0,749	7,361	0,149	17,02	0,008754407	13
	200	0,15	0,10	206,603	7,781	0,156	1,022	6,610	0,164	11,37	0,014423923	7
	200	0,15	0,20	308,7635	4,256	0,127	0,515	3,888	0,206	11,37	0,018117854	16
	300	0,05	0,10	273,5414	8,653	0,137	0,458	3,339	0,198	33,97	0,005828672	3
	300	0,05	0,20	189,3392	3,541	0,122	0,363	2,979	0,167	33,97	0,004916102	11
	300	0,10	0,10	171,8439	3,478	0,122	0,666	3,769	0,182	17,02	0,010693302	5
	300	0,10	0,20	307,4406	3,722	0,122	0,407	2,814	0,200	17,02	0,011750881	14
	300	0,15	0,10	185,7674	3,647	0,122	1,259	6,305	0,161	11,37	0,01416007	8
	300	0,15	0,20	361,6792	3,906	0,122	1,069	6,207	0,223	11,37	0,019613017	17
	400	0,05	0,10	154,3487	3,478	0,127	0,432	3,137	0,195	33,97	0,005740359	3
	400	0,05	0,20	220,6587	3,25	0,122	0,920	6,749	0,172	33,97	0,005063291	12
	400	0,10	0,10	207,3967	3,769	0,122	0,815	5,335	0,16	17,02	0,009400705	6
	400	0,10	0,20	326,821	3,709,	0,117	0,677	7,514	0,188	17,02	0,011045828	15
	400	0,15	0,10	274,1367	3,450	0,122	0,555	3,418	0,143	11,37	0,012576957	9
	400	0,15	0,20	397,7281	4,197	0,127	0,676	5,408	0,303	11,37	0,026649077	18

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **2ª. Serie** - **Sentido: Ida** (esquerda para a direita)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
Al_2O_3 + MgO	200	0,05	0,10	202,8989	7,875	0,161	0,254	1,886	0,156	33,97	0,004592287	1
	200	0,05	0,20	189,3723	3,969	0,176	0,967	13,73	0,219	33,97	0,006446865	10
	200	0,10	0,10	171,9101	7,781	0,156	0,324	3,095	0,144	17,02	0,008460635	4
	200	0,10	0,20	224,6605	4,350	0,161	0,478	3,156	0,274	17,02	0,016098707	13
	200	0,15	0,10	206,603	7,781	0,156	0,543	3,839	0,223	11,37	0,019613017	7
	200	0,15	0,20	426,4349	4,975	0,146	0,867	3,839	0,354	11,37	0,031134565	16
	300	0,05	0,10	224,462	7,875	0,156	0,767	5,805	0,114	33,97	0,003355902	3
	300	0,05	0,20	119,2589	3,662	0,161	0,532	5,427	0,154	33,97	0,004533412	11
	300	0,10	0,10	259,7833	7,737	0,151	0,694	5,921	0,157	17,02	0,009224442	5
	300	0,10	0,20	374,5774	8,103	0,156	0,777	4,712	0,155	17,02	0,009106933	14
	300	0,15	0,10	343,1587	4,075	0,181	0,687	4,535	0,157	11,37	0,013808267	8
	300	0,15	0,20	462,616	4,394	0,146	0,930	6,482	0,243	11,37	0,021372032	17
	400	0,05	0,10	239,4438	7,950	0,156	0,526	3,168	0,214	33,97	0,006299676	3
	400	0,05	0,20	207,3306	3,478	0,161	0,411	3,241	0,187	33,97	0,005504857	12
	400	0,10	0,10	277,0471	7,737	0,151	0,459	3,198	0,142	17,02	0,008343126	6
	400	0,10	0,20	458,5481	4,091	0,151	0,965	6,848	0,309	17,02	0,018155112	15
	400	0,15	0,10	375,5035	3,494	0,166	1,077	9,687	0,213	11,37	0,018733509	9
	400	0,15	0,20	547,4136	3,722	0,181	1,192	10,61	0,229	11,37	0,020140721	18

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos na 1ª Série e na Tabela 5 os resultados da 2ª Série de ensaios realizados com o percurso da ferramenta no sentido **retorno** (da direita para a esquerda no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido utilizando o inserto cerâmico de Al_2O_3 + MgO.

Tabela 4 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **1ª. Serie - Sentido: Retorno** (direita para a esquerda)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
Al_2O_3 + MgO	200	0,05	0,10	154,8117	8,637	0,146	0,407	2,38	0,373	33,97	0,010970464	1
	200	0,05	0,20	66,6739	6,119	0,122	0,489	3,888	0,212	33,97	0,006250613	10
	200	0,10	0,10	137,0353	3,662	0,132	1,962	5,945	0,196	17,02	0,011515864	4
	200	0,10	0,20	189,5376	3,784	0,122	0,968	5,322	0,149	17,02	0,008754407	13
	200	0,15	0,10	136,7376	3,784	0,122	0,718	4,181	0,164	11,37	0,014423923	7
	200	0,15	0,20	223,7675	3,937	0,122	0,796	10,23	0,206	11,37	0,018117854	16
	300	0,05	0,10	189,703	8,653	0,137	0,507	3,742	0,198	33,97	0,005828672	3
	300	0,05	0,20	189,8022	3,297	0,122	0,687	5,493	0,167	33,97	0,004916102	11
	300	0,10	0,10	172,5715	3,341	0,132	0,619	4,322	0,182	17,02	0,010693302	5
	300	0,10	0,20	238,5839	3,387	0,122	0,526	2,893	0,200	17,02	0,011750881	14
	300	0,15	0,10	168,3383	3,494	0,122	1,261	11,49	0,161	11,37	0,01416007	8
	300	0,15	0,20	309,0942	3,647	0,122	0,755	6,5	0,223	11,37	0,019613017	17
	400	0,05	0,10	154,3487	3,266	0,127	0,797	4,779	0,195	33,97	0,005740359	3
	400	0,05	0,20	239,1131	3,234	0,122	0,832	10,11	0,172	33,97	0,005063291	12
	400	0,10	0,10	172,2408	3,509	0,117	1,443	11,6	0,16	17,02	0,009400705	6
	400	0,10	0,20	291,5658	3,647	0,122	1,304	10,88	0,188	17,02	0,011045828	15
	400	0,15	0,10	548,1411	3,419	0,117	0,709	3,681	0,143	11,37	0,012576957	9
	400	0,15	0,20	393,2964	3,937	0,127	1,032	7,068	0,303	11,37	0,026649077	18

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **2ª. Serie - Sentido: Retorno** (direita para a esquerda)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
$Al_2O_3 + MgO$	200	0,05	0,10	105,1205	7,950	0,161	0,399	3,461	0,156	33,97	0,004592287	1
	200	0,05	0,20	171,4471	7,691	0,176	0,676	3,113	0,219	33,97	0,006446865	10
	200	0,10	0,10	137,0353	7,616	0,181	0,447	4,962	0,144	17,02	0,008460635	4
	200	0,10	0,20	207,1321	7,844	0,947	0,800	5,121	0,274	17,02	0,016098707	13
	200	0,15	0,10	220,0634	5,631	0,161	1,242	7,630	0,223	11,37	0,019613017	7
	200	0,15	0,20	224,8258	4,822	0,146	1,257	11,37	0,354	11,37	0,031134565	16
	300	0,05	0,10	119,4077	7,859	0,156	0,748	3,76	0,114	33,97	0,003355902	3
	300	0,05	0,20	101,8794	3,753	0,166	0,409	3,052	0,154	33,97	0,004533412	11
	300	0,10	0,10	171,4471	7,644	0,181	0,939	6,153	0,157	17,02	0,009224442	5
	300	0,10	0,20	238,5839	7,859	0,117	0,67	4,212	0,155	17,02	0,009106933	14
	300	0,15	0,10	220,0634	5,631	0,161	0,862	5,036	0,157	11,37	0,013808267	8
	300	0,15	0,20	308,4327	4,912	0,435	0,985	12,74	0,243	11,37	0,021372032	17
	400	0,05	0,10	154,6794	7,675	0,161	0,598	3,815	0,214	33,97	0,006299676	3
	400	0,05	0,20	136,6715	3,450	0,161	0,477	3,589	0,187	33,97	0,005504857	12
	400	0,10	0,10	171,7778	7,691	0,161	0,67	4,279	0,142	17,02	0,008343126	6
	400	0,10	0,20	292,2604	3,981	0,146	0,735	6,452	0,309	17,02	0,018155112	15
	400	0,15	0,10	238,1209	3,462	0,166	0,876	7,245	0,213	11,37	0,018733509	9
	400	0,15	0,20	374,1144	3,694	0,181	1,01	7,343	0,229	11,37	0,020140721	18

Fonte: Autoria própria (2020).

4.2 RESULTADOS OBTIDOS COM O INSERTO DE $Al_2O_3 + ZrO_2$

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos na 1ª Série e na Tabela 7 os resultados da 2ª Série de ensaios realizados com o percurso da ferramenta no sentido **ida** (da esquerda para a direita) no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido utilizando o inserto cerâmico de $Al_2O_3 + ZrO_2$.

Tabela 6 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **1ª. Serie - Sentido: Ida** (esquerda para a direita)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10	167,313	3,678	0,127	0,349	2,808	0,216	33,97	0,006358552	19
	200	0,05	0,20	255,054	3,981	0,132	0,506	4,553	0,376	33,97	0,01106859	28
	200	0,10	0,10	154,1502	3,769	0,122	0,401	3,496	0,159	17,02	0,009341951	22
	200	0,10	0,20	360,0918	4,303	0,132	1,153	6,995	0,412	17,02	0,024206816	31
	200	0,15	0,10	221,4194	3,694	0,137	0,734	4,913	0,26	11,37	0,022867194	25
	200	0,15	0,20	394,0901	4,775	0,132	0,664	5,029	0,45	11,37	0,039577836	34
	300	0,05	0,10	171,4471	3,462	0,122	0,392	3,156	0,176	33,97	0,005181042	20
	300	0,05	0,20	255,6823	3,631	0,132	0,522	5,86	0,243	33,97	0,007153371	29
	300	0,10	0,10	224,9251	3,450	0,122	0,488	3,241	0,119	17,02	0,006991774	23
	300	0,10	0,20	345,0108	3,769	0,132	0,653	5,115	0,208	17,02	0,012220917	32
	300	0,15	0,10	307,4406	3,906	0,137	0,690	4,968	0,247	11,37	0,021723835	26
	300	0,15	0,20	427,4932	4,150	0,132	0,722	5,640	0,430	11,37	0,037818821	35
	400	0,05	0,10	224,462	3,403	0,122	0,414	3,021	0,259	33,97	0,007624374	21
	400	0,05	0,20	258,5927	3,556	0,132	0,279	2,332	0,275	33,97	0,008095378	30
	400	0,10	0,10	254,5248	3,372	0,117	0,804	6,787	0,283	17,02	0,016627497	24
	400	0,10	0,20	378,48	3,525	0,127	1,024	5,536	0,192	17,02	0,011280846	33
	400	0,15	0,10	291,5658	3,572	0,132	0,984	5,744	0,203	11,37	0,017854002	27
	400	0,15	0,20	429,3453	3,662	0,127	0,585	5,652	0,315	11,37	0,027704485	36

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 7 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **2ª. Serie - Sentido: Ida** (esquerda para a direita)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10	256,2776	3,800	0,186	0,349	2,545	0,171	33,97	0,005033853	19
	200	0,05	0,20	307,1099	4,319	0,171	1,180	7,892	0,481	33,97	0,014159553	28
	200	0,10	0,10	254,5248	3,906	0,186	0,671	4,328	0,167	17,02	0,009811986	22
	200	0,10	0,20	410,7586	4,791	0,176	0,673	5,914	0,485	17,02	0,028495887	31
	200	0,15	0,10	290,9044	3,922	0,166	0,463	3,809	0,154	11,37	0,013544415	25
	200	0,15	0,20	461,69	5,128	0,176	1,529	8,588	0,405	11,37	0,035620053	34
	300	0,05	0,10	255,0209	3,584	0,181	0,307	2,612	0,216	33,97	0,006358552	20
	300	0,05	0,20	357,9751	3,678	0,171	0,918	6,8	0,316	33,97	0,009302326	29
	300	0,10	0,10	290,4414	3,678	0,166	0,741	5,713	0,183	17,02	0,010752056	23
	300	0,10	0,20	410,5602	3,953	0,171	1,475	15,16	0,299	17,02	0,017567568	32
	300	0,15	0,10	322,8523	3,647	0,161	0,627	4,285	0,209	11,37	0,018381706	26
	300	0,15	0,20	460,5325	4,119	0,171	0,685	5,847	0,329	11,37	0,028935796	35
	400	0,05	0,10	273,7398	3,450	0,181	0,889	7,616	0,168	33,97	0,00494554	21
	400	0,05	0,20	357,8428	3,600	0,171	0,492	4,553	0,340	33,97	0,010008831	30
	400	0,10	0,10	322,8523	3,584	0,166	1,149	16,38	0,163	17,02	0,009576968	24
	400	0,10	0,20	445,5176	3,678	0,176	1,402	8,838	0,291	17,02	0,017097532	33
	400	0,15	0,10	409,7003	3,647	0,171	0,782	5,799	0,187	11,37	0,01644679	27
	400	0,15	0,20	528,6946	3,953	0,151	1,120	9,088	0,279	11,37	0,024538259	36

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos na 1ª Série e na Tabela 9 os resultados da 2ª Série de ensaios realizados com o percurso da ferramenta no sentido **retorno** (da direita para a esquerda) no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido utilizando o inserto cerâmico de $Al_2O_3 + ZrO_2$.

Tabela 8– Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **1ª. Serie - Sentido: Retorno** (direita para a esquerda)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10	154,8117	3,753	0,127	0,769	5,322	0,216	33,97	0,006358552	19
	200	0,05	0,20	242,8172	3,969	0,132	2,12	8,887	0,376	33,97	0,01106859	28
	200	0,10	0,10	154,481	3,753	0,117	0,676	5,054	0,159	17,02	0,009341951	22
	200	0,10	0,20	274,8974	4,075	0,137	1,29	7,288	0,412	17,02	0,024206816	31
	200	0,15	0,10	154,481	3,694	0,137	0,845	6,11	0,26	11,37	0,022867194	25
	200	0,15	0,20	307,5729	4,488	0,142	2,118	13,21	0,45	11,37	0,039577836	34
	300	0,05	0,10	154,3487	3,372	0,122	0,485	3,217	0,176	33,97	0,005181042	20
	300	0,05	0,20	356,6522	3,403	0,132	1,865	11,6	0,243	33,97	0,007153371	29
	300	0,10	0,10	172,1747	3,341	0,122	0,981	7,538	0,119	17,02	0,006991774	23
	300	0,10	0,20	308,4327	3,509	0,127	0,91	6,183	0,208	17,02	0,012220917	32
	300	0,15	0,10	273,5414	3,631	0,137	1,179	6,684	0,247	11,37	0,021723835	26
	300	0,15	0,20	375,0405	3,800	0,132	1,929	8,557	0,430	11,37	0,037818821	35
	400	0,05	0,10	154,6794	3,372	0,117	0,721	4,407	0,259	33,97	0,007624374	21
	400	0,05	0,20	224,0982	3,450	0,127	1,344	9,613	0,275	33,97	0,008095378	30
	400	0,10	0,10	238,0548	3,325	0,122	1,109	6,067	0,283	17,02	0,016627497	24
	400	0,10	0,20	344,1509	3,419	0,137	1,663	12,37	0,192	17,02	0,011280846	33
	400	0,15	0,10	273,806	3,419	0,127	1,194	8,960	0,203	11,37	0,017854002	27
	400	0,15	0,20	392,5027	3,494	0,132	1,139	7,617	0,315	11,37	0,027704485	36

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 9 – Resultados para as variáveis de resposta: potência consumida, vibração emissão acústica, rugosidades Ra, Rt, desgaste (VB), comprimento do corte e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte – **2ª. Serie - Sentido: Retorno** (direita para a esquerda)

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f mm/rot	ap (mm)	Potência (w)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	Vb (mm)	lc (m)	Vb/lc (mm/m)	Ensaio
$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10	105,5835	3,8156	0,181	0,517	5,304	0,171	33,97	0,005033853	19
	200	0,05	0,20	189,3723	4,3187	0,176	2,198	11,92	0,481	33,97	0,014159553	28
	200	0,10	0,10	136,7376	3,9531	0,186	0,348	2,832	0,167	17,02	0,009811986	22
	200	0,10	0,20	260,3455	4,5469	0,171	1,539	10,41	0,485	17,02	0,028495887	31
	200	0,15	0,10	136,7376	4,0281	0,166	0,617	4,889	0,154	11,37	0,013544415	25
	200	0,15	0,20	291,4005	4,9594	0,171	2,231	11,27	0,405	11,37	0,035620053	34
	300	0,05	0,10	119,5235	3,4781	0,181	0,35	2,997	0,216	33,97	0,006358552	20
	300	0,05	0,20	221,1217	3,6469	0,171	1,531	9,113	0,316	33,97	0,009302326	29
	300	0,10	0,10	171,4471	3,5562	0,161	0,345	9,021	0,183	17,02	0,010752056	23
	300	0,10	0,20	256,2776	3,8000	0,171	1,682	13,07	0,299	17,02	0,017567568	32
	300	0,15	0,10	188,8762	3,6156	0,166	0,897	6,989	0,209	11,37	0,018381706	26
	300	0,15	0,20	273,2107	3,7375	0,166	0,97	10,24	0,329	11,37	0,028935796	35
	400	0,05	0,10	154,3487	3,4344	0,186	0,448	2,673	0,168	33,97	0,00494554	21
	400	0,05	0,20	189,3061	3,3719	0,166	0,575	4,724	0,340	33,97	0,010008831	30
	400	0,10	0,10	206,9337	3,5094	0,161	1,197	12,13	0,163	17,02	0,009576968	24
	400	0,10	0,20	289,8792	3,6000	0,171	1,031	8,551	0,291	17,02	0,017097532	33
	400	0,15	0,10	272,9461	3,5094	0,166	2,203	9,931	0,187	11,37	0,01644679	27
	400	0,15	0,20	546,5537	3,9531	0,151	1,064	10,01	0,279	11,37	0,024538259	36

Fonte: Autoria própria (2020).

4.3 EFEITOS PRINCIPAIS DAS COMBINAÇÕES TESTADAS PARA OS INSERTOS DE $Al_2O_3 + MgO$ E DE $Al_2O_3 + ZrO_2$

O arranjo ortogonal aplicado é constituído por uma regressão de fatorial completo (2 x 3 x 2 x 3) com 4 fatores e com 10 níveis, que combinados resultaram em 36 ensaios, que foram realizados em duas series, totalizando 72 ensaios:

- Ferramentas: $Al_2O_3 + MgO$ e de $Al_2O_3 + ZrO_2$: 2
- Velocidade de Corte (v_c): 200; 300; 400m/min: 3
- Avanço (f_z): 0,05; 0,10; 0,15mm/rev: 3
- Profundidade (a_p): 0,10; 0,20mm 2
- Combinações (18 por ferramenta): 36
- Series de ensaios (36 por série): 2

4.3.1 Potência de usinagem

Os valores com nível de significância de 5% (P – valor, menor que 0,05) foram considerados estatisticamente significativos. Para a potência de usinagem, os níveis de

significância para o tipo de ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade foram significativos.

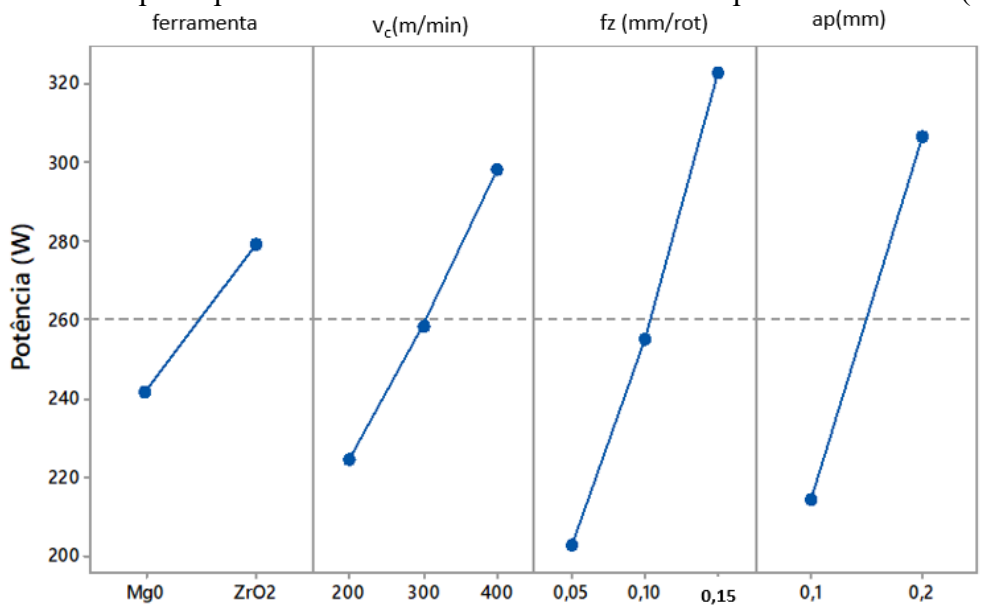
O valor de potência de para o inserto de Al_2O_3 + MgO (241,4 W) foi 13,5 % inferior à do fresamento obtido com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (279,2 W).

A potência consumida é maior com o aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade. Para a velocidade de corte de 200 m/min a potência consumida foi de 224,4W, para 300m/min foi de 258,4 m/min e para 400 m/min foi de 298,2 W. Para o avanço de 0,05 mm/dente foi de 202,9W , para 0,10mm/dente foi de 258,4 W e para 0,20mm/dente foi de 322,8W. Para a profundidade de corte de 0,10mm a potência consumida foi de 214,13W e para a profundidade de 0,20mm a potência consumida foi de 306,6W. Na Figura 33 estão ilustradas as médias das médias dos valores de potência de acordo com os parâmetros de corte utilizados.

A combinação adequada para o menor consumo de potência no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

- Ferramenta: Al_2O_3 + MgO: 241,4 W.
- Velocidade de Corte (v_c): 200m/min: 224,4 W.
- Avanço (f_z): 0,05 mm/rev: 202,9 W.
- Profundidade (a_p): 0,10 mm: 214,1 W.

Figura 33- Efeitos principais dos fatores na média das médias de potência de corte (ANOM).



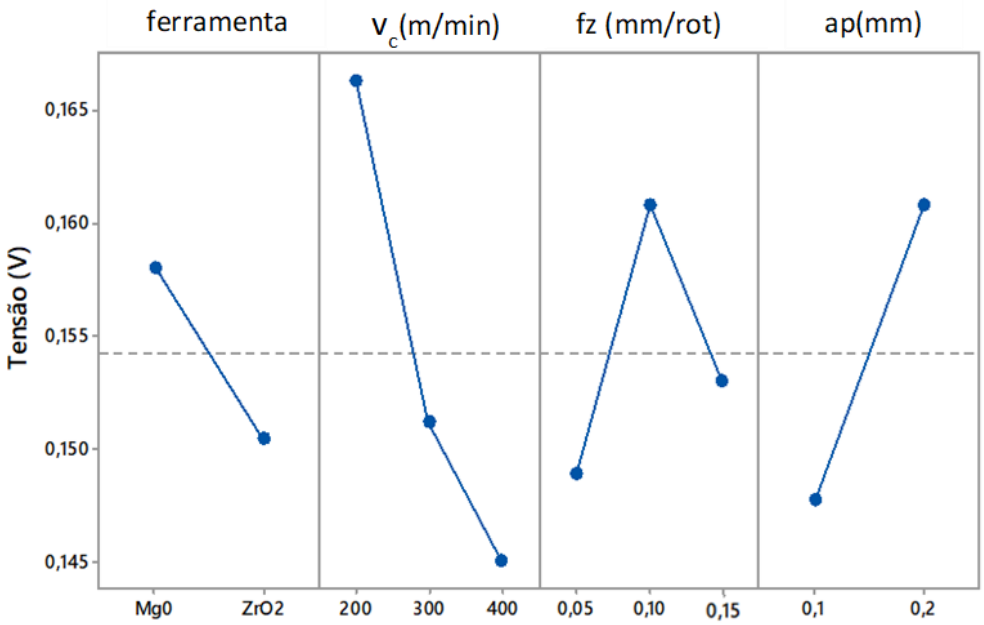
Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.2 Emissão Acústica (V)

Os valores médios obtidos para a resposta emissão acústica, durante o fresamento com os insertos cerâmicos, estão presentes na Figura 34. O nível de significância foi inferior a 5% apenas para a variável tipo de ferramenta.

O valor de emissão acústica para o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 foi de 0,150V e inferior ao valor de 0,156 V para o inserto de Al_2O_3 + MgO. Os valores de emissão acústica diminuíram com o aumento da velocidade de corte, obtendo-se 0,166 V para a velocidade de corte de 200 m/min, 0,151V para 300m/min e 0,145 V para a velocidade de corte de 400 m/min. Quanto ao avanço, o menor valor de emissão acústica foi para o avanço de 0,05 mm/rev com 0,149 V e o maior valor de emissão acústica foi para o avanço de 0,10 mm/rev com 0,161 V e de 0,153 V para o avanço de 0,15 mm/rev. Verificou-se que aumentando a profundidade de corte ocorre o aumento dos valores de emissão, obteve-se um valor de 0,148 V para a profundidade de 0,1 mm e de 0,160 mm para a profundidade de 0,20 mm.

Figura 34 - Efeitos principais dos fatores na média das médias de emissão acústica (ANOM).



Fonte: Autoria própria (2020).

A combinação adequada para os menores valores de emissão acústica no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

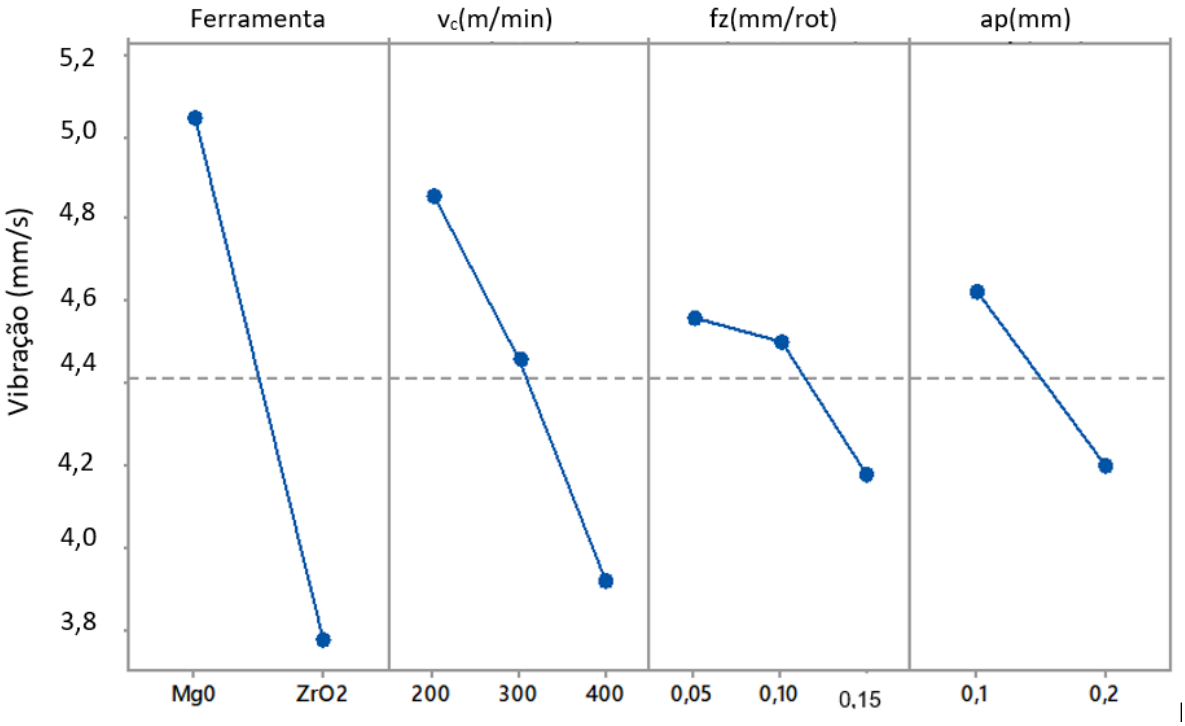
- Ferramenta: $Al_2O_3 + ZrO_2$: 0,150 V.
- Velocidade de Corte (vc): 400m/min: 0,145 V.
- Avanço (fz): 0,05mm/rev: 0,149 V.
- Profundidade (ap): 0,10mm: 0,148 V.

4.3.3 Vibração (mm/s)

O nível de significância foi inferior a 5% apenas para as variáveis tipo de ferramenta, avanço e profundidade de corte. No fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, o valor de vibração com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ foi de 3,780 mm/s e com o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ foi mais elevado com 5,047 mm/s. Com a aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade, os valores de vibração diminuíram obtendo-se 4,860 mm/s para a velocidade de corte de 200 m/min, 4,462 para a velocidade de corte de 300 m/min. e 3,920 mm/s para a velocidade de corte de 400 m/min.

Para o avanço de 0,05 mm/rev. obteve-se a vibração de 4,561 mm/s, com 0,10 mm/rev a vibração foi de 4,502 mm/s e de 4,178 mm/s para o avanço de 0,15 mm/rev. Com a profundidade de corte de 0,10 mm a vibração foi de 4,463 mm/s e de 4,200 mm/s para a profundidade 0,20 mm. Os valores médios obtidos estão presentes na Figura 35.

Figura 35 - Efeitos principais dos fatores na média das médias da vibração (ANOM).



Fonte: Autoria própria (2020).

A combinação adequada para os menores valores de vibração no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

- Ferramenta: $Al_2O_3 + ZrO_2$: 3,780 mm/s.
- Velocidade de Corte (vc): 400 m/min: 3,919 mm/s.
- Avanço (fz): 0,15 mm/rev: 4,178 mm/s.
- Profundidade (ap): 0,20 mm: 4,200 mm/s.

4.3.4 Qualidade da superfície - rugosidade (Ra e Rt)

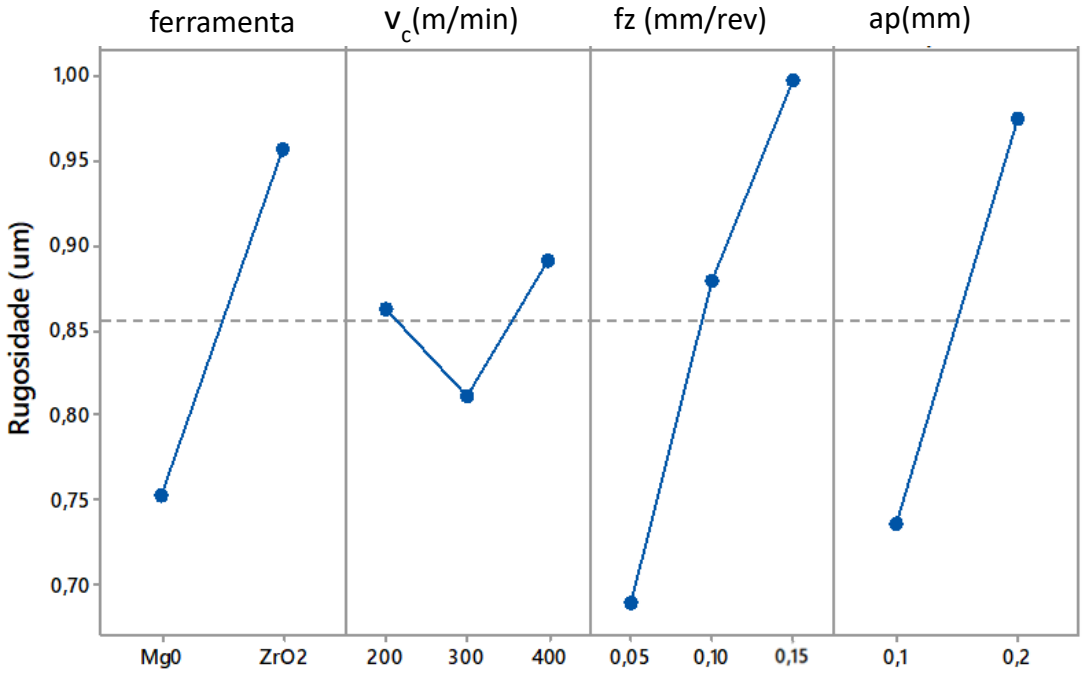
O nível de significância foi inferior a 5% apenas para as variáveis avanço e profundidade de corte tanto para os valores médios de rugosidade (Ra) quanto para os valores médios da rugosidade (Rt). Os valores da rugosidade aumentaram com o aumento do avanço (fz) e profundidade de corte (ap).

A rugosidade (Ra) com o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ foi de 0,753 μm e 21% inferior ao de 0,957 μm obtido com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ para o fresamento do aço ABNT 4340 endurecido. Para a velocidade de corte de 300 m/min obteve-se o menor valor de rugosidade (Ra) que foi de 0,811 μm, para a velocidade do corte de 200 m/min o valor da rugosidade (Ra) foi de 0,863 μm e para a velocidade de corte de 400 m/min o valor médio da rugosidade (Ra) foi de 0,892 μm.

Para o avanço de 0,05 mm/rev obteve-se um valor médio de rugosidade (Ra) de 0,689 μm, com o avanço de 0,10 mm/rev o valor médio da rugosidade (Ra) foi de 0,879 μm e com o avanço de 0,15 mm/rev. o valor médio de rugosidade (Ra) foi de 0,997 μm. Com a profundidade de 0,10 mm o valor médio de rugosidade (Ra) foi de 0,737 μm e com a profundidade de 0,20 mm o valor médio de rugosidade (Ra) foi de 0,974 μm. Os valores médios obtidos estão presentes na Figura 36.

A rugosidade (Rt) com o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ foi de 5,57 μm e também 19 % inferior ao de 6,88 μm, obtido com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ para o fresamento do aço ABNT 4340 endurecido. Os valores medios da rugosidade (Rt) aumentaram com a aumento das velocidades de corte, do avanço e da profundidade de corte. O valor médio da rugosidade (Rt) para a velocidade de corte de 200 m/min. foi de 5,78 μm , de 6,06 μm para a velocidade de corte de 300 m/min. e de 6,82 μm para a velocidade de corte de 400 m/min.

Figura 36 - Efeitos principais dos fatores na média das médias da rugosidade (Ra).



Fonte: Autoria própria (2020).

Para o avanço de 0,05 mm/rev obteve-se um valor médio de rugosidade (Rt) de 4,975 µm, com o avanço de 0,10 mm/rev o valor médio da rugosidade (Rt) foi de 6,630 µm e com o avanço de 0,15 mm/rev. o valor médio de rugosidade (Rt) foi de 7,066 µm. Com a profundidade de 0,10 mm o valor médio de rugosidade (Rt) foi de 5,270 µm e com a profundidade de 0,20 mm o valor médio de rugosidade (Rt) foi de 7,170 µm. Os valores médios obtidos estão presentes na Figura 37.

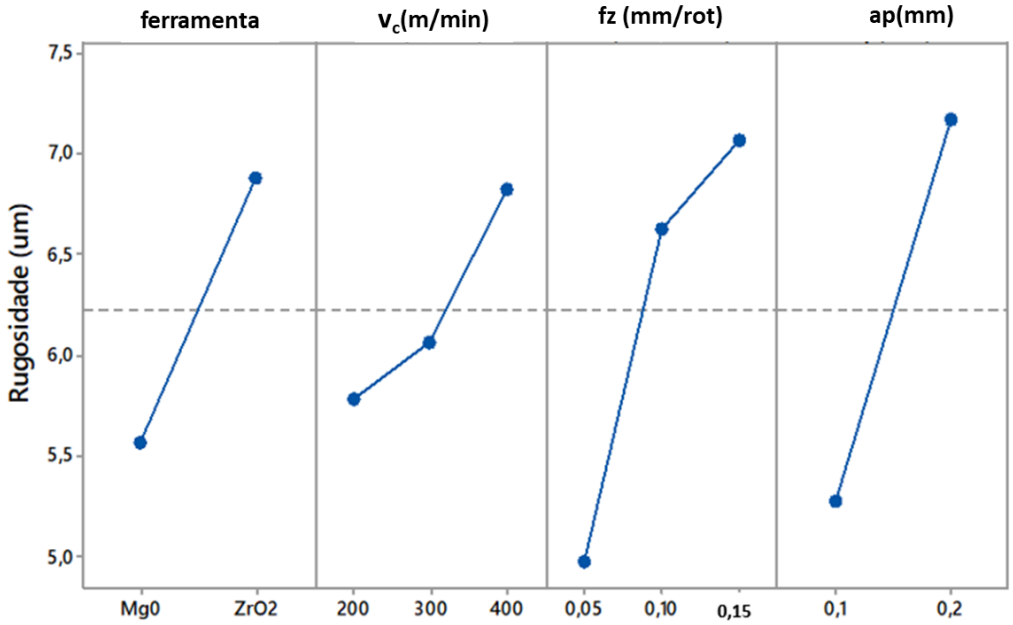
A combinação adequada para os menores valores de rugosidade (Ra) no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

- Ferramenta: Al_2O_3 + MgO: Ra: 0,753 µm e Rt: 5,570 µm.
- Velocidade de Corte (v_c): 200 e 300 m/min: Ra: 0,811 µm e Rt: 5,780 µm.
- Avanço (f_z): 0,05 mm/rev: Ra: 0,689 µm e Rt: 4,975 µm.
- Profundidade (a_p): 0,10 mm: Ra: 0,736 µm e Rt: 5,270 µm.

Os valores médios tanto da rugosidade Ra quanto a rugosidade Rt estão compatíveis com os indicados no Quadro 1, que são obtidos em operações de fresamento e de retificação, tendo com referências: Ra menores que 1,5 µm para operações de fresamento e entre 0,12 e 1,0 µm

para operações de retificação e Rt entre 1,5 e 10 µm para operações de fresamento e entre 0,2 e 1,0 µm para operações de retificação.

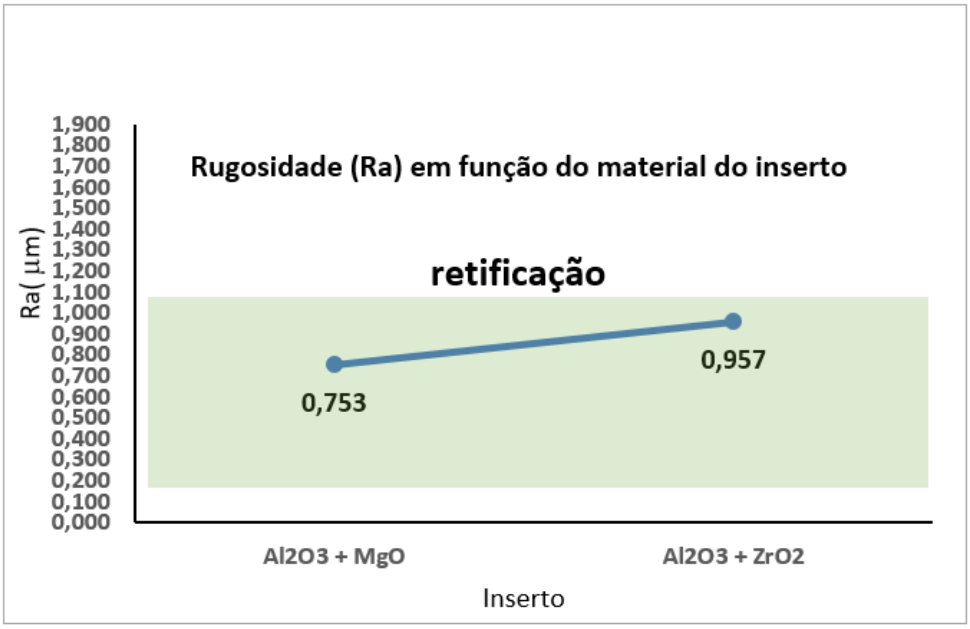
Figura 37 - Efeitos principais dos fatores na média das médias da rugosidade (Rt).



Fonte: Autoria própria (2020).

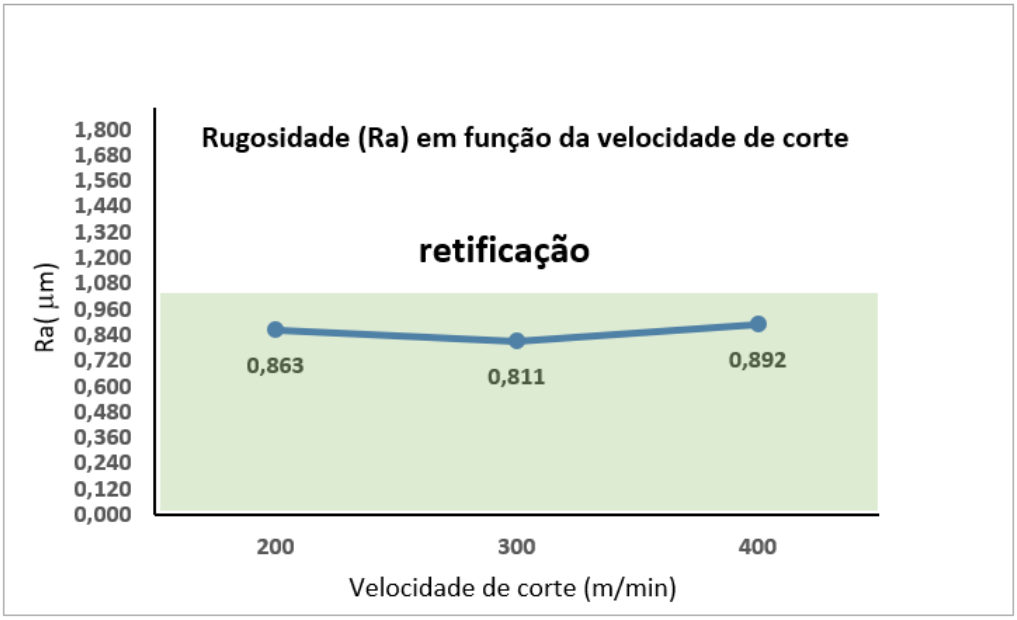
Nas Figuras 38 e 39 pode-se verificar que os valores médios de rugosidade (Ra) obtidos com dois tipos de insertos (Figura 38) e com as velocidades de corte utilizadas (Figura 39), estão compativeis com o campo de aplicação usual que é na faixa entre 0,12 e 1,0 µm e que são obtidos com as operações de retificação.

Figura 38 – Rugosidade (Ra) em função dos insertos utilizados



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 39 – Rugosidade (Ra) em função das velocidades de corte



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.5 Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (VB/lc)

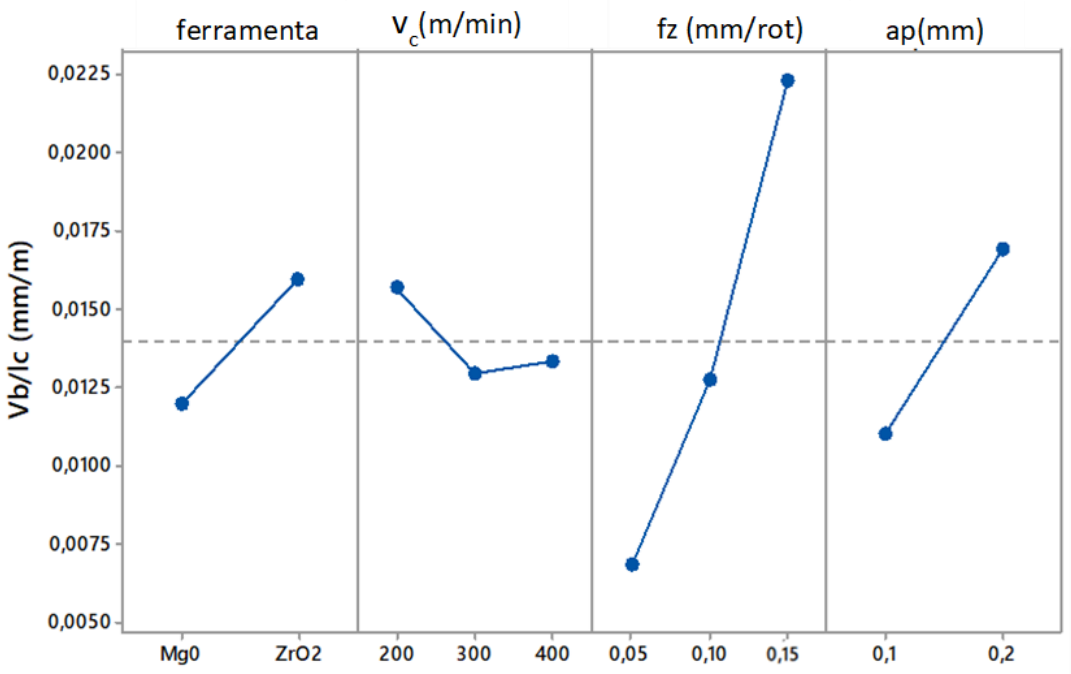
O nível de significância foi inferior a 5% para todas as variáveis de entrada tipo de ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Na Figura 40 estão os valores obtidos. O inserto de Al_2O_3 + MgO apresentou desgaste de 0,012 mm/m e inferior a 0,016 mm/m obtido com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$. Os valores médios de desgastes aumentaram com a elevação da velocidade de corte, do avanço e da profunidade de corte. Verificou-se que para as velocidades de corte de 300 m/min e 400 m/mm , os mesmos valores médios de desgates (0,013 mm/m) e para a velocidade de 200m/min o valor médio de desgaste foi de 0,016 mm/m.

Com o avanço de 0,05 mm/rev o valor de desgaste médio foi de 0,007 mm/m, aumentando para 0,013 e para 0,020 mm/m para as profundidades de 0,10 e 0,20 mm/rev respectivamente. Para a profundidade de 0,10 mm o valor médio de desgaste foi de 0,011 mm/m e com a profundidade de 0.20 mm o valor médio de desgaste foi de 0,017 mm/m.

A combinação adequada para os menores valores de desgaste da ferramenta no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, ocorre quando se tem:

- Ferramenta: Al_2O_3 + MgO: VB/lc: 0,012 mm/m.
- Velocidade de Corte (v_c): 300 ou 400 m/min: VB/lc: 0,013 mm/m.
- Avanço (f_z): 0,05 mm/rev: VB/lc: 0,007 mm/m.
- Profundidade (a_p): 0,10 mm: VB/lc: 0,011 mm/m.

Figura 40 - Efeitos principais dos fatores na média das médias para o desgaste VB/lc.

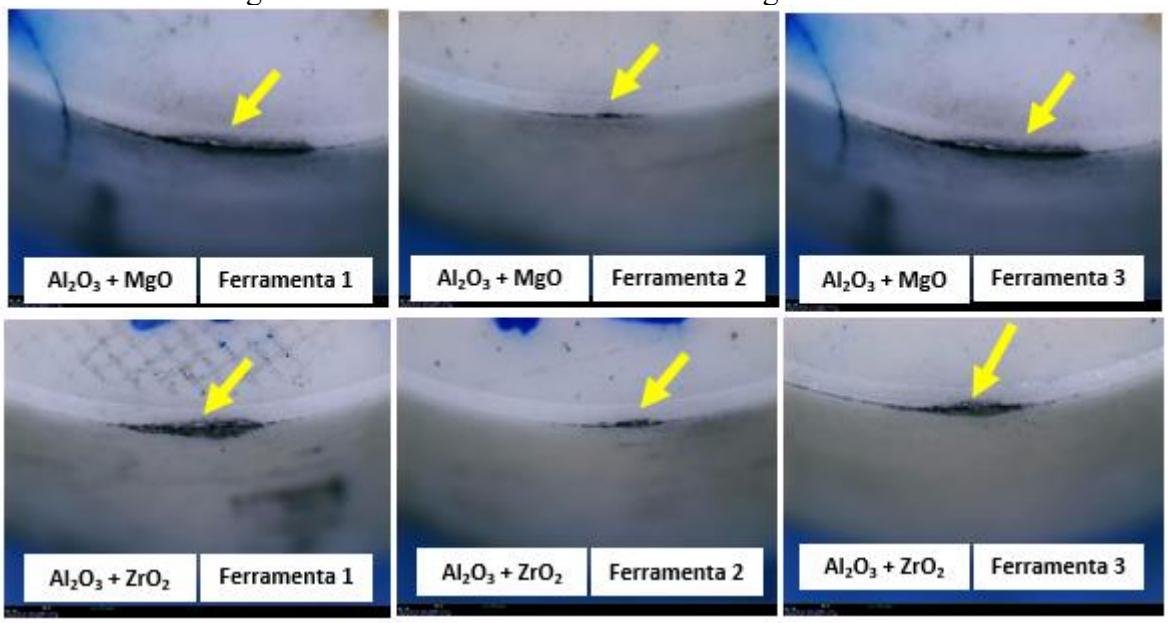


Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.6 Imagens dos desgastes e avarias das ferramentas Al_2O_3 + MgO e Al_2O_3 + ZrO_2

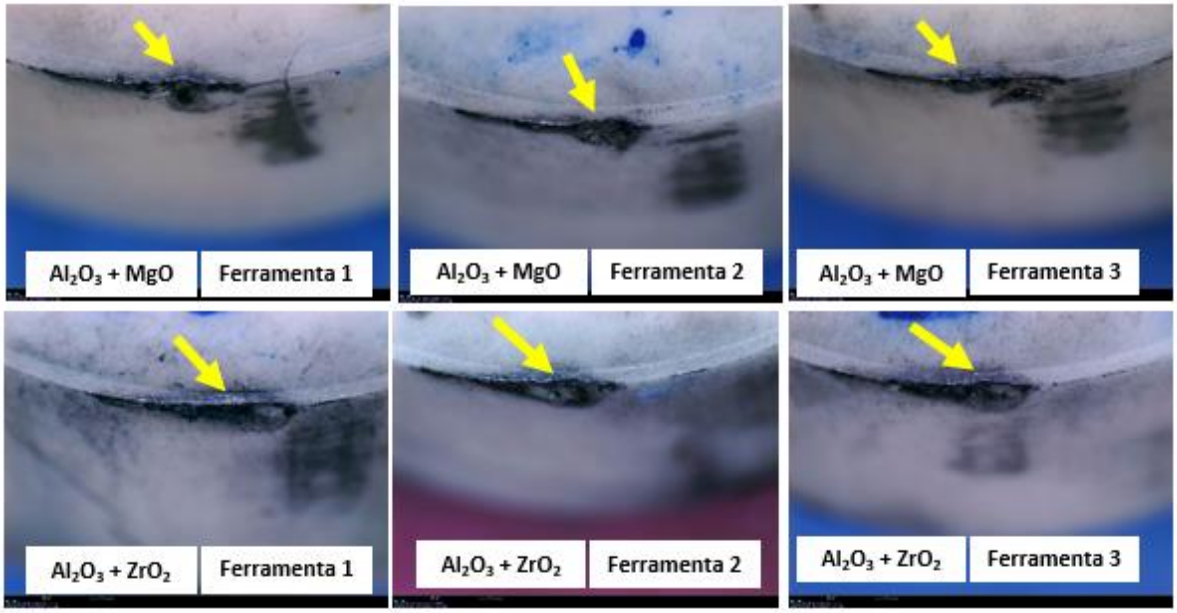
As características dos desgastes e avarias são semelhantes, tanto para os insertos de Al_2O_3 + MgO quanto para dos insertos de Al_2O_3 + ZrO_2, sendo nas ferramentas com menores danos observa-se desgastes na aresta de corte, como apresentado na Figura 41 e nas ferramentas com maiores danos verifica-se quebras na aresta de corte com lascamento e remoção de material formando pequenas crateras, como pode ser observado na Figura 42.

Figura 41 – Ferramentas com menores desgastes ou avarias



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 42 – Ferramentas com maiores desgastes ou avarias



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.7 Ensaios de vida dos insertos cerâmicos

Os parâmetros selecionados para a realização dos ensaios de vida dos insertos cerâmicos, foram velocidade de corte de 400 m/min, avanço de 0,05 mm/rev. e profundidade de usinagem de 0,10 mm. Como critério de fim de vida da ferramenta foi utilizado o valor de desgaste (VB) de 0,300 mm.

Assim como nos ensaios anteriores, foram também verificados e registrados os valores dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt, de potência consumida, vibração e emissão acústica, a fim de verificar seus comportamentos e ajustar correlações para possíveis previsões que sejam úteis na identificação do fim de vida da ferramenta.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 10, com as progressões das variáveis registradas (potência, vibração, emissão acústica), as medições dos desgastes das ferramentas e das rugosidades (Ra e Rt) a cada ensaio do comprimento usinado, tanto para **ida** (percurso da esquerda para direita) quanto no **retorno** (percurso da direita para a esquerda).

Para atingir valores de desgastes próximos ao critério de 0,300 mm pré-estabelecido, foram necessários 03 ensaios nos percursos de ida e retorno para os dois tipos de insertos.

Tabela 10 – Ensaios de vida das ferramentas, vc = 400 m/min, f = 0,05 mm/rev, ap = 0,10 mm

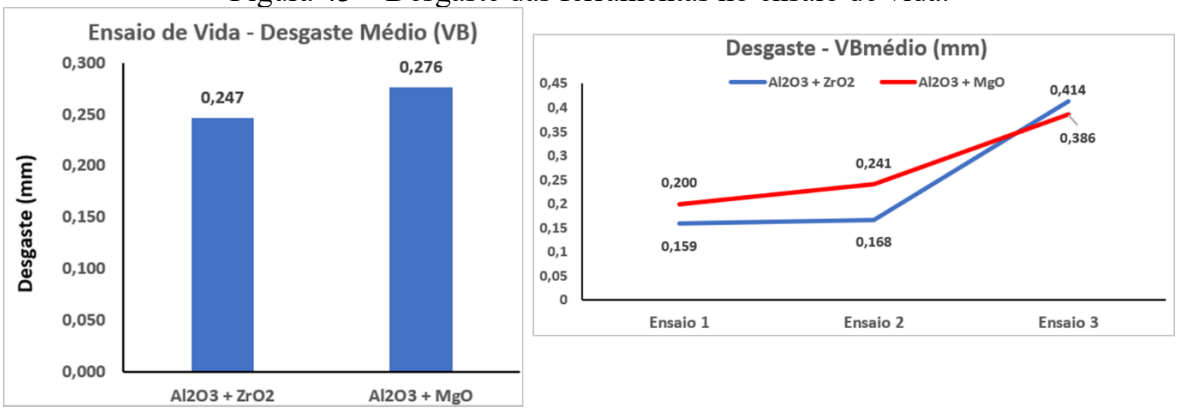
Inserto	Ensaio	Potência (W)		Vibração (mm/s)		Emissão (V)		Ra (µm)		Rt (µm)		Vbmedio (mm)
		ida	volta	ida	volta	ida	volta	Ida	volta	ida	volta	ida/volta
$Al_2O_3 + ZrO_2$	**1**	173,715	118,434	3,747	3,722	0,100	0,112	0,510	0.551	3,358	4,157	0,159
	2	222,251	153,317	3,600	3,266	0,122	0,117	0,715	0,827	4,251	5,087	0,168
	3	237,012	291,801	3,297	3,341	0,122	0,122	1,372	1,016	7,754	7,846	0,414
	Media	**210,993**	**187,851**	**3,55**	**3,44**	**0,115**	**0,117**	**0,866**	**0,922**	**5,121**	**5,697**	**0,247**
	Desvio padrão	29,62	82,02	0,21	0,22	0,01	0,004	0,403	0,109	2,078	1,716	0,130
$Al_2O_3 + MgO$	**1**	136,398	66,321	3,403	3,281	0,122	0,171	0,515	0,488	3,289	3,407	0,200
	2	136,860	154,260	3,478	3,297	0,122	0,122	0,560	0,605	2,871	3,626	0,241
	3	155,285	120,074	3,388	3,250	0,117	0,122	1,125	1,146	7,807	7,837	0,386
	Media	**142,847**	**113,552**	**3,423**	**3,276**	**0,120**	**0,138**	**0,733**	**0,746**	**4,656**	**4,957**	**0,276**
	Desvio padrão	9,64	39,65	0,04	0,02	0,00	0,03	0,30	0,31	2,45	2,23	0,09

Fonte: Autoria própria (2020).

O desgaste da ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$ foi inferior ao da ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ e no último ensaio foi de 0,414 mm, como pode ser observado na Figura 43, evolução de desgaste VB para as diferentes ferramentas de corte nos ensaios realizados e com valor médio para os 3 ensaios de 0,247 mm. A ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$, apresentou um valor de desgaste no terceiro ensaio de 0,386 mm, inferior ao da ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$ e com valor médio para os 3 ensaios de 0,276 mm.

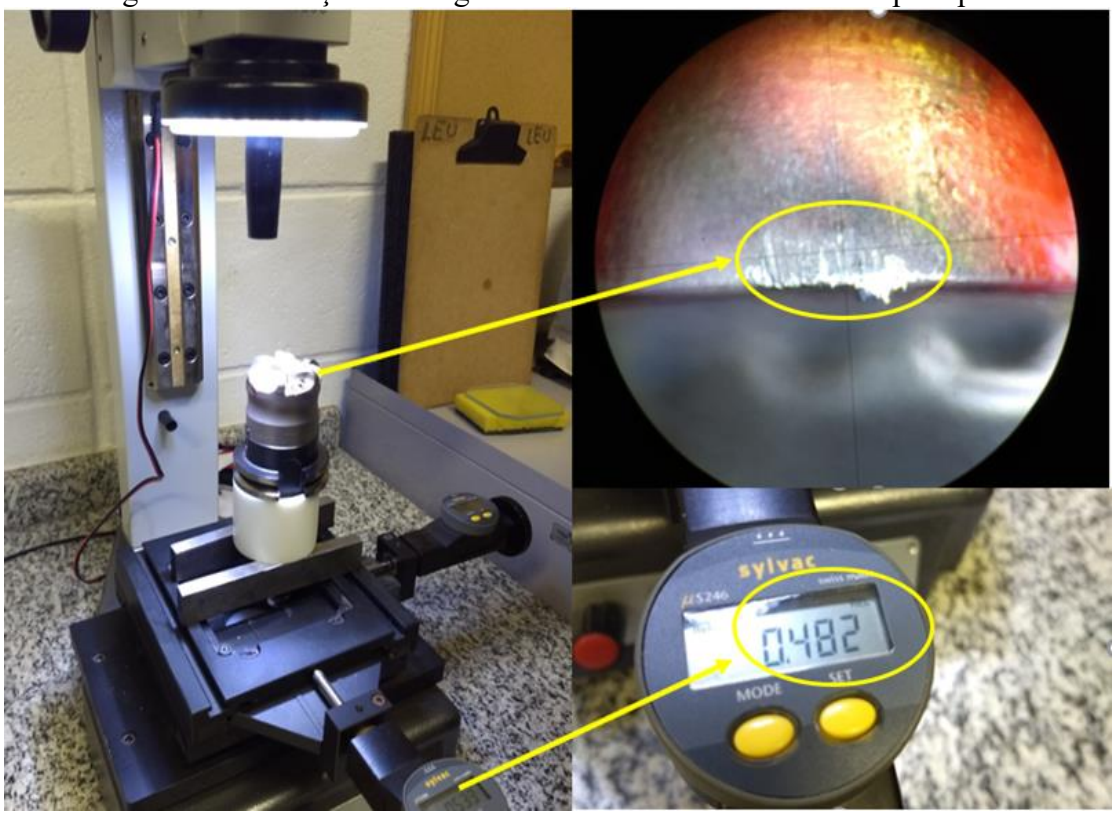
Na Figura 44 está apresentada a imagem do desgaste de flanco de uma das ferramentas.

Figura 43 – Desgaste das ferramentas no ensaio de vida.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 44 – Medição do desgaste da ferramenta com microscópio óptico



Fonte: Autoria própria (2020).

A potência média consumida no fresamento com a ferramenta Al_2O_3 + ZrO_2 foi de 210,993 W no percurso de ida e 187,851 W no percurso de retorno e para a ferramenta de Al_2O_3 + MgO foi de 142,847 W no percurso de ida e de 113,552 W no percurso de retorno, portanto inferiores aos valores de potência obtidos no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido com insertos de Al_2O_3 + ZrO_2.

A vibração média no percurso de ida foi de 3,550 mm/s e no percurso de retorno foi de 3,440 mm/s no fresamento com a ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$ e para a ferramenta de $Al_2O_3 +$ MgO no percurso de ida foi de 3,423 mm/s e no percurso de retorno foi de 3,276 mm/s, portanto inferiores aos valores de vibração apresentados no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido com a ferramenta $Al_2O_3 + ZrO_2$.

A emissão acústica média no percurso de ida com a ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$ foi de 0,115 V e no percurso de retorno foi de 0,117 V. Os valores médios de emissão acústica com a ferramenta de $Al_2O_3 +$ MgO no percurso de ida foi de 0,120 V e no percurso de retorno de 0,138 V, portanto superiores aos valores médios apresentados com a ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$.

A rugosidade (Ra) foi de 0,866 µm no percurso de ida e de 0,922 µm no percurso de retorno e a rugosidade (Rt) foi de 5,121 µm no percurso de ida e de 5,627 µm no percurso de retorno com a ferramenta de $Al_2O_3 + ZrO_2$. Com a ferramenta de $Al_2O_3 +$ MgO, a rugosidade (Ra) foi de 0,733 µm no percurso de ida e de 0,746 µm no percurso de retorno e a rugosidade (Rt) foi de 5,656 µm e de 4,957 µm no percurso de retorno.

Os valores de rugosidades (Ra) e (Rt) para o fresamento com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ estão próximos aos valores observados no fresamento com o inserto de $Al_2O_3 +$ MgO.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA OS DOIS TIPOS DE INSERTOS

Os resultados do projeto de experimento foram separados e analisados para cada tipo de ferramenta, buscando a condição “menor melhor” para cada variável resposta, com prioridade nas variáveis de rugosidade e desgaste de flanco de cada ferramenta.

4.4.1 Parâmetros adequados para a condição “menor melhor”

O fresamento com o inserto de $Al_2O_3 +$ MgO, apresentou a melhor desempenho no que se refere ao menor consumo de potência, melhor qualidade da superfície (menores valores de Ra e Rt) e menor desgaste VB/lc utilizando-se velocidade de corte entre 200 e 400 mm/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade (ap) de 0,10 mm, como apresentado na Tabela 11. O inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$, apresentou a melhor condição para obter os menores níveis de emissão acústica e vibração, utilizando-se velocidade de corte de 400 mm/min, avanço de 0,05 mm/rev para emissão acústica e 0,15 mm/rev para vibração e profundidade de 0,10 mm para emissão acústica e 0,20 mm para vibração, como indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Melhor condição de fresamento

Variáveis de resposta	Ferramenta	Velocidade de corte (vc) m/min	Avanço(f) mm/rot	Profundidade (ap) mm
Potência(W)	Al_2O_3 + MgO	200	0,05	0,10
Emissão(V)	Al_2O_3 + ZrO_2	400	0,05	0,10
Vibração(mm/s)	Al_2O_3 + ZrO_2	400	0,15	0,20
Ra(μm)	Al_2O_3 + MgO	300	0,05	0,10
Rt(μm)	Al_2O3 + MgO	200	0,05	0,10
Desgaste :VB/lc (mm/m)	Al_2O_3 + MgO	300 ou 400	0,05	0,10

Fonte: Autoria própria (2021).

4.4.2 Distribuição das variáveis de resposta

Na Figura 45 está apresentado com o gráfico *Box plot,* os resultados por variável de resposta, onde a dispersão é representada pela amplitude do gráfico, que pode ser calculada como máximo valor – mínimo valor, sendo que quanto maior for a amplitude, maior a variação nos dados. O retângulo contém 50% dos valores de cada variável. A posição da linha mediana no retângulo informa sobre a assimetria da distribuição. Uma distribuição simétrica teria a mediana no centro do retângulo.

Comparando os resultados obtidos com os dois tipos de ferramentas (Figura 45) verifica-se que a potência e o desgaste VB/lc para o inserto de Al_2O_3 + MgO foram inferiores aos do inserto de Al_2O_3 + ZrO_2, com faixa de amplitudes similares para a potência e maior no desgaste para o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2. As rugosidades Ra e Rt (qualidade da superfície) são similares na faixa de amplitude e ligeiramente menores para o inserto de Al_2O_3 +MgO. Na Figura 38 esta apresentada a distribuição das variáveis de resposta segundo o diagrama de caixas com as faixas de amplitude e os valores mínimo e máximo por variável de resposta.

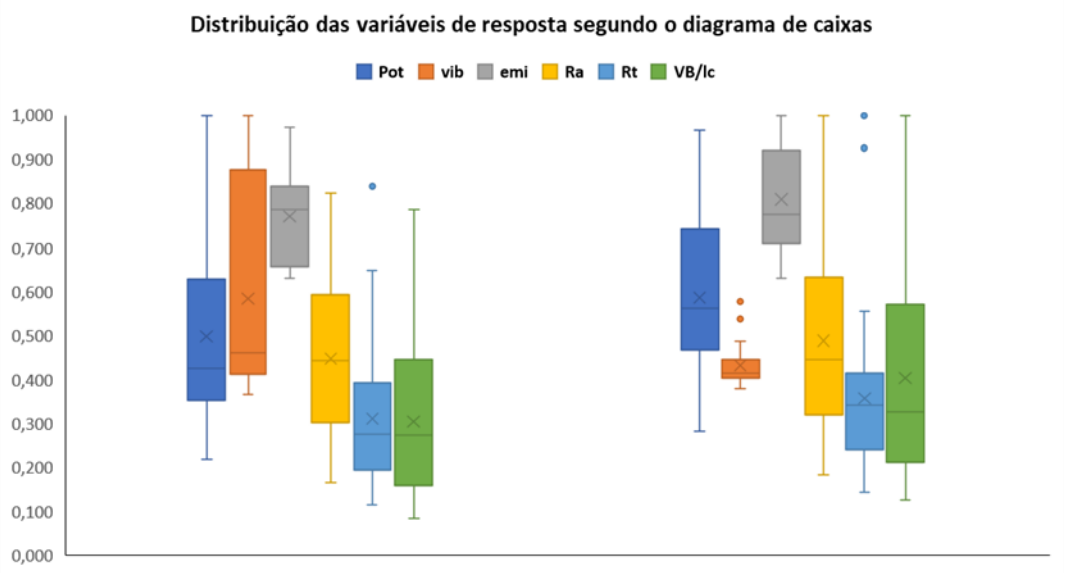
Para a vibração, o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 apresentou menores valores e amplitudes (valor mínimo: 3,584 mm/s e valor máximo: 3,952 mm/s), quando comparados com os apresentados pelo inserto de Al_2O_3 + MgO (valor mínimo: 3,651 mm/s e valor máximo: 7,769 mm/s). A diferença observada pode ser atribuída à dureza e a resistência mecânica do inserto Al_2O_3 + MgO, que são superiores às do inserto de Al_2O_3 +ZrO_2, que porém apresenta uma melhor tenacidade. Este fato possivelmente pode proporcionar um certo amortecimento das vibrações durante a operação.

Os melhores resultados de desgaste VB/lc obtidos com o inserto de Al_2O_3 +MgO indicam que a adição de óxido de magnésio não contribuíram para a diminuição da resistência ao

desgaste, resultado que pode ser atribuído aos seus maiores valores de dureza Vickers de 1928,37 HV e de resistência de 19,28 GPa são superiores em relação aquelas do inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ com 1675,03 HV e 16,75 GPa.

Os valores de emissão acústica tem faixas de amplitudes similares para os dois tipos de insertos, estando inferiores para o inserto de $Al_2O_3 + MgO$. O inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ apresentou uma faixa de amplitude com baixa dispersão (menor variação entre o valor máximo e mínimo) e valores inferiores aos observados no fresamento com o inserto de $Al_2O_3 + MgO$.

Figura 45 – Distribuição da variáveis de resposta por tipo de ferramenta



	Potência (W)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	VB/lc mm/m	Potência (W)	Vibração (mm/s)	Emissão (V)	Ra (µm)	Rt (µm)	VB/lc mm/m
mínimo	192,74	3,651	0,125	0,460	3,176	0,0063	255,04	3,584	0,135	0,489	3,928	0,0085
máximo	343,23	7,769	0,159	0,907	6,437	0,0178	405,80	3,952	0,175	0,968	6,796	0,0228

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 46 verifica-se que o desgaste VB/lc foi maior para o inserto $Al_2O_3 + ZrO_2$ em quase todos os parâmetros de corte utilizados (velocidade de corte, avanço e profundidade), obtendo-se rugosidades com valores similares (qualidade da superfície) indicando que o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ é mais adequado para o fresamento do aço ABNT 4340 endurecido quando busca-se maior resistência ao desgaste da ferramenta de corte.

Nas Figuras 47, 48 estão apresentadas a análise multivariada realizada com o software RS Studio com a transformação realizada com o conjunto de parâmetros de corte utilizados e as variáveis de resposta obtidas para verificar a correlação entre elas para o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ e nas Figuras 49 e 50 estão apresentadas a mesma análise realizada para o inserto $Al_2O_3 + ZrO_2$.

Para o desgaste (VB/lc) tem uma correlação positiva, com o avanço (f) , profundidade (ap) e a potência pois este aumenta com estas variáveis. As rugosidades Ra e Rt aumenta com a potência de corte. A emissão acústica tem uma correlação fraca do avanço (f), uma correlação negativa com a velocidade de corte (v_c). A vibração tem uma correlação negativa a velocidade de corte (v_c), o avanço e profundidade (ap), diminuindo com o aumento destas variáveis.

Figura 46 – Rugosidades da superfície (Ra e Rt) e desgaste VB/lc por tipo de ferramenta

Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Ra (µm)	Rt (µm)	VB/lc (mm/m)
$Al_2O_3 + MgO$	200	0,05	0,10	0,437	2,460	0,01097
	200	0,05	0,20	0,463	2,197	0,00625
	200	0,10	0,10	0,696	4,456	0,01152
	200	0,10	0,20	0,749	7,361	0,00875
	200	0,15	0,10	1,022	6,610	0,01442
	200	0,15	0,20	0,515	3,888	0,01812
	300	0,05	0,10	0,458	3,339	0,00583
	300	0,05	0,20	0,363	2,979	0,00492
	300	0,10	0,10	0,666	3,769	0,01069
	300	0,10	0,20	0,407	2,814	0,01175
	300	0,15	0,10	1,259	6,305	0,01416
	300	0,15	0,20	1,069	6,207	0,01961
	400	0,05	0,10	0,432	3,137	0,00574
	400	0,05	0,20	0,920	6,749	0,00506
	400	0,10	0,10	0,815	5,335	0,00940
	400	0,10	0,20	0,677	7,514	0,01105
	400	0,15	0,10	0,555	3,418	0,01258
	400	0,15	0,20	0,676	5,408	0,02665
	200	0,05	0,10	0,254	1,886	0,00459
	200	0,05	0,20	0,967	13,73	0,00645
	200	0,10	0,10	0,324	3,095	0,00846
	200	0,10	0,20	0,478	3,156	0,01610
	200	0,15	0,10	0,543	3,839	0,01961
	200	0,15	0,20	0,867	3,839	0,03113
	300	0,05	0,10	0,767	5,805	0,00336
	300	0,05	0,20	0,532	5,427	0,00453
	300	0,10	0,10	0,694	5,921	0,00922
	300	0,10	0,20	0,777	4,712	0,00911
	300	0,15	0,10	0,687	4,535	0,01381
	300	0,15	0,20	0,930	6,482	0,02137
	400	0,05	0,10	0,526	3,168	0,00630
	400	0,05	0,20	0,411	3,241	0,00550
	400	0,10	0,10	0,459	3,198	0,00834
	400	0,10	0,20	0,965	6,848	0,01816
	400	0,15	0,10	1,077	9,687	0,01873
	400	0,15	0,20	1,192	10,610	0,02014

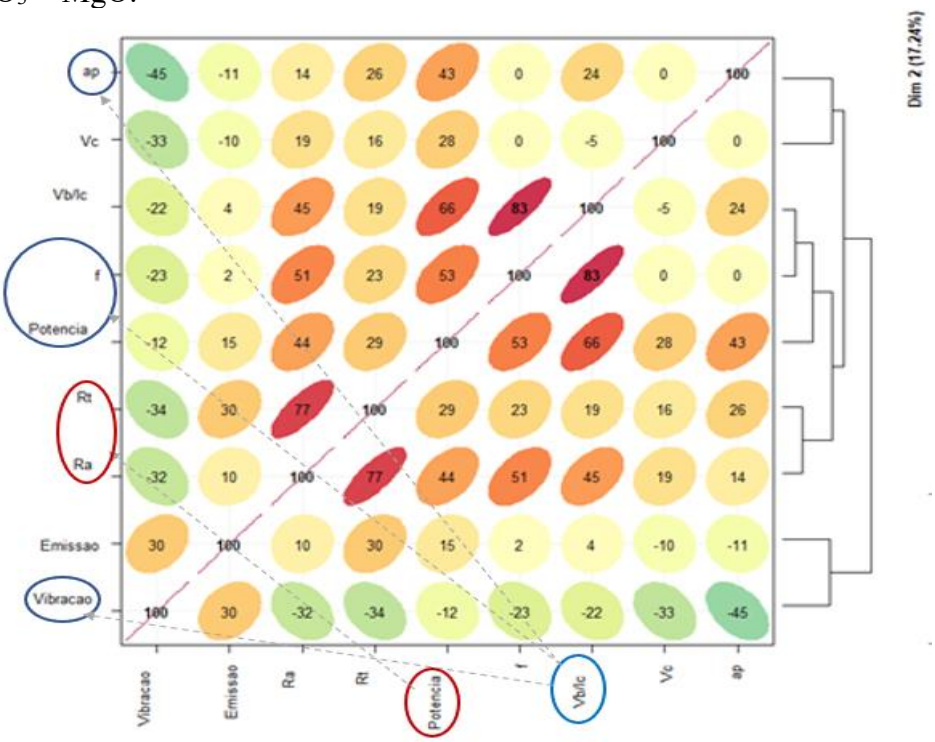
Tipo de Ferram.	Vc (mm/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Ra (µm)	Rt (µm)	VB/lc (mm/m)
$Al_2O_3 + ZrO_2$	200	0,05	0,10	0,349	2,808	0,00636
	200	0,05	0,20	0,506	4,553	0,01107
	200	0,10	0,10	0,401	3,496	0,00934
	200	0,10	0,20	1,153	6,995	0,02421
	200	0,15	0,10	0,734	4,913	0,02287
	200	0,15	0,20	0,664	5,029	0,03958
	300	0,05	0,10	0,392	3,156	0,00518
	300	0,05	0,20	0,522	5,86	0,00715
	300	0,10	0,10	0,488	3,241	0,00699
	300	0,10	0,20	0,653	5,115	0,01222
	300	0,15	0,10	0,690	4,968	0,02172
	300	0,15	0,20	0,722	5,640	0,03782
	400	0,05	0,10	0,414	3,021	0,00762
	400	0,05	0,20	0,279	2,332	0,00810
	400	0,10	0,10	0,804	6,787	0,01663
	400	0,10	0,20	1,024	5,536	0,01128
	400	0,15	0,10	0,984	5,744	0,01785
	400	0,15	0,20	0,585	5,652	0,02770
	200	0,05	0,10	0,349	2,545	0,00503
	200	0,05	0,20	1,180	7,892	0,01416
	200	0,10	0,10	0,671	4,328	0,00981
	200	0,10	0,20	0,673	5,914	0,02850
	200	0,15	0,10	0,463	3,809	0,01354
	200	0,15	0,20	1,529	8,588	0,03562
	300	0,05	0,10	0,307	2,612	0,00636
	300	0,05	0,20	0,918	6,800	0,00930
	300	0,10	0,10	0,741	5,713	0,01075
	300	0,10	0,20	1,475	15,16	0,01757
	300	0,15	0,10	0,627	4,285	0,01838
	300	0,15	0,20	0,685	5,847	0,02894
	400	0,05	0,10	0,889	7,616	0,00495
	400	0,05	0,20	0,492	4,553	0,01001
	400	0,1	0,10	1,149	16,38	0,00958
	400	0,1	0,20	1,402	8,838	0,01710
	400	0,15	0,10	0,782	5,799	0,01645
	400	0,15	0,20	1,120	9,088	0,02454

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ (Figuras 44 e 45), o desgaste (VB/lc) tem uma correlação positiva para o avanço (f), a profundidade (ap) e a potência pois este aumenta com estas variáveis. Efeito da profundidade no desgaste (VB/lc) é maior para inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$, se comparada a do inserto de $Al_2O_3 + MgO$ (fator de correlação 45 contra 24).

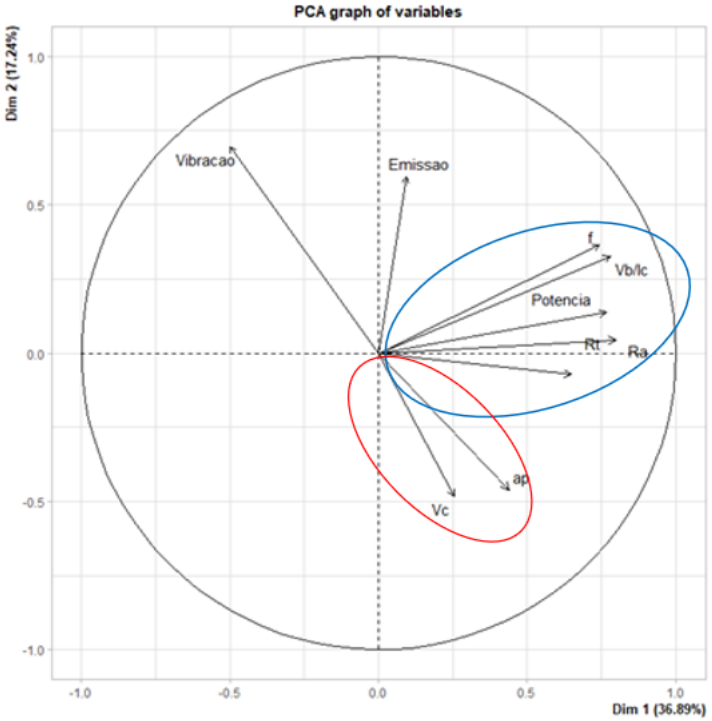
A emissão acústica tem uma correlação fraca do avanço (f), uma correlação negativa com a velocidade de corte (v_c) e profundidade (ap), diminuindo com o aumento destas variáveis. A vibração tem uma correlação negativa a velocidade de corte (v_c), o avanço e profundidade (ap), diminuindo com o aumento destas variáveis.

Figura 47 – Correlação entre as variáveis de saída e análise do componentes principais para o inserto Al_2O_3 + MgO.



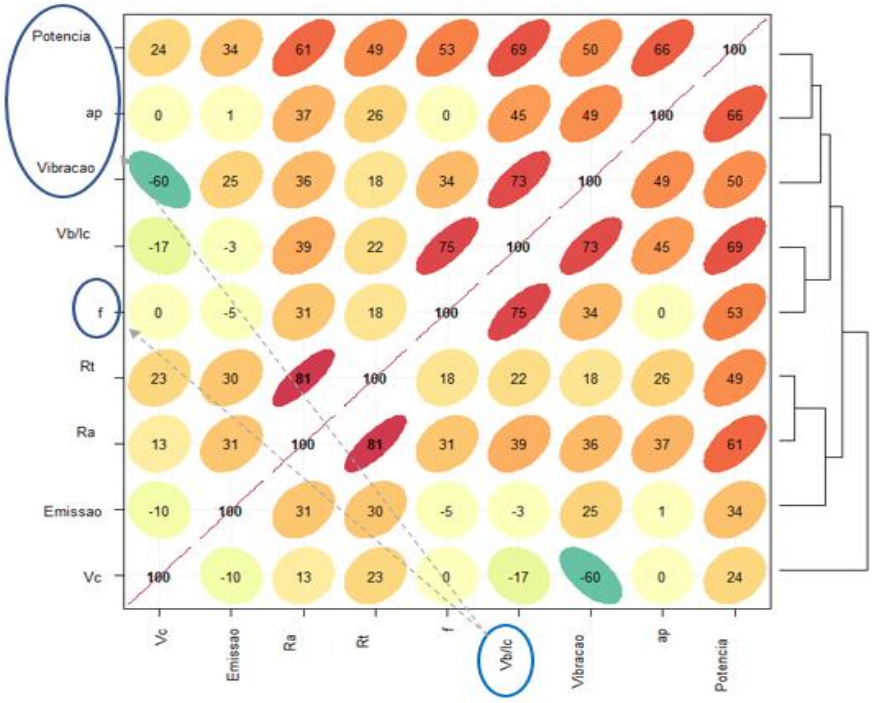
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 48 – Análise multivariada com os parâmetros de corte e variáveis de resposta para o inserto Al_2O_3 + MgO.



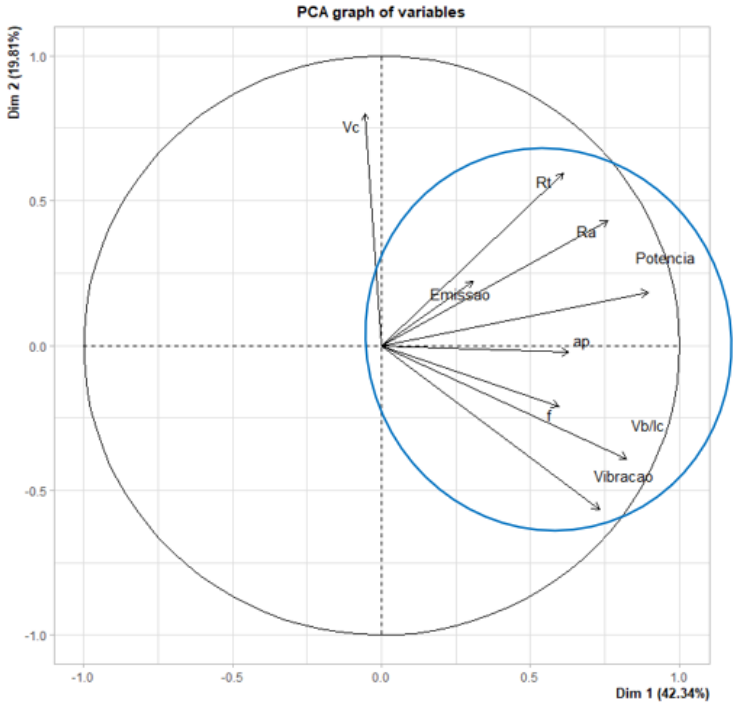
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 49 – Correlação entre as variáveis de saída e análise do componentes principais para o inserto $Al_2O_3 + ZrO_2$.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 50 – Análise multivariada com os parâmetros de corte e variáveis de resposta para o inserto $Al_2O_3 + ZrO_2$



Fonte: Autoria própria (2021).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado o estudo da usinagem por fresamento do aço ABNT 4340 endurecido por tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento com dureza Rockwell de 56 HRc, verificando-se o comportamento de dois tipos de insertos experimentais de cerâmica (Al_2O_3 + MgO) e (Al_2O_3 + ZrO_2).

As análises realizadas, indicam que tanto a ferramenta a base de alumina com adição de 0,25% em peso, com tamanho de partículas entre 0,40 e 0,60 μm de óxido de magnésio (MgO) como aditivo de sinterização, quanto a ferramenta a base do oxido de alumina com adição de 1% em peso, com tamanho de partículas entre 0,40 e 0,60 μm de oxido de zircônio (ZrO_2), podem ser utilizadas no fresamento do aço ABNT 4340 endurecido, pois as rugosidades (Ra e Rt) obtidas estão compatíveis com as normalmente esperadas para acabamento nas operações de fresamento e retificação (operações de retificação: Ra: entre 0,12 e 1,0 μm; Rt: entre 0,2 e 1,0 e fresamento: Ra: menores que 1,5 μm e Rt: entre 1,5 e 10 μm). Com o inserto de Al_2O_3 + MgO (0,753 μm) a rugosidade (Ra) foi 21,3 % inferior a obtida com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (0,957 μm). A rugosidade (Rt) com o inserto de Al_2O_3 + MgO (5,57 μm) foi 19.0 % inferior a que foi obtida com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (6,88 μm)

Os menores valores de rugosidade foram obtidos com as velocidades de corte de 300 m/min para Ra e de 200 m/min para Rt com 0,05 mm/rev de avanço e de 0,10 mm de profundidade. Pode-se atribuir este resultado a menor condutividade térmica dos materiais cerâmicos que contribui para que a temperatura na interface ferramenta/cavaco seja maior reduzindo a possibilidade de aparecimento de aresta postiça de corte e/ou a boa resistência ao desgaste que permite aplicar velocidades de corte mais altas, eliminando a aresta postiça de corte.

O valor de potência de para o inserto de Al_2O_3 + MgO (241,4 W) foi 13,5 % inferior à do fresamento obtido com o inserto de Al_2O_3 + ZrO_2 (279,2 W). O fresamento com o inserto de Al_2O_3 + MgO, apresentou menor consumo de potência com a velocidade de corte de 200 m/min; avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de 0,10 mm. A potência consumida é maior com o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte.

Os menores valores de desgaste em relação ao comprimento de corte foram encontrados no fresamento com o inserto de Al_2O_3 + MgO, com a velocidade de 300 ou 400 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de corte de 0,10 mm. No ensaio de vida dos insertos, o desgaste médio (Vb) da ferramenta de Al_2O_3 + MgO, após 3 ensaios, foi inferior ao da ferramenta Al_2O_3 + ZrO_2. Os melhores resultados de desgaste VB/lc obtidos com o inserto de Al_2O_3 +MgO

indicam que a adição de óxido de magnésio contribuiu para o aumento da resistência ao desgaste que pode ser atribuído a sua dureza Vickers de 1928,37 HV e resistência de 19,28 GPa são superiores aos do inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ com 1675,03 HV e 16,75 GPa.

As características dos desgastes e avarias são semelhantes, tanto para os insertos de $Al_2O_3 + MgO$ quanto para dos insertos de $Al_2O_3 + ZrO_2$.

Os valores de emissão acústica diminuíram com o aumento da velocidade de corte e se elevaram com a aumento da profundidade de corte. Os valores de vibração diminuíram com o aumento da velocidade, o avanço e da profundidade de corte.

Os valores de emissão acústica e de vibração para o fresamento do aço endurecido, foram menores com o inserto de $Al_2O_3 + ZrO_2$ e as condições em que se obteve os melhores resultados (valores mais baixos) foi com a velocidade de corte de 400 m/min, tanto para emissão quanto vibração, avanço de 0,05 mm/rev para emissão e de 0,20 mm/rev para vibração e profundidade de 0,10 mm para emissão e de 0,20 mm para vibração.

Para emissão acústica o fator de correlação do avanço foi fraco e negativo (-6) para o inserto Al_2O_3+ZrO_2, indicando que tem baixa correlação e que a emissão acústica diminui com o aumento do avanço. Para o inserto $Al_2O_3 + MgO$, o fator de correlação foi também fraco e positivo (2), indicando que a emissão acústica pode aumentar com o avanço.

Para a vibração os fatores de correlação do avanço (34) e da profundidade de corte (49) foram positivos para o inserto $Al_2O_3 + ZrO_2$, indicando que a vibração aumenta com o avanço e a profundidade de corte. Para o inserto de $Al_2O_3 + MgO$ os fatores de correlação do avanço (-23) e da profundidade (- 45) foram negativos indicando que a vibração diminui com a aumento do avanço e da profundidade de corte.

6 INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, propõe-se

- Avaliar os dois tipos de ferramentas variando os teores de óxido de magnésio e óxido de zircônio, para verificar a influência da composição em relação a usinabilidade de aços endurecidos.

- Comparar as ferramentas de cerâmica estudas (desenvolvidas em escala laboratorial) com ferramentas comerciais a base de nitreto cúbico de boro (cBN e PcBN).

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. S. **Análise do processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido através de ferramentas cerâmicas de aAl2O3+mgo experimentais.** 125 f. Tese (Livre-Docente em Usinagem dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

AMIN, N.A.K.M.; HAFIZ, A.M.K; LAJIS, M. A.; PATWARI, A. U. Prediction of Tool Life and Experimental Investigation during Hot Milling of AISI H13 Tool Steel. **Advanced Materials Research Advances in Materials and Processing Technologies** (Volumes 83-86), 2009.

ANAZAWA, M. R.; ABDALLA, J. A.; HASHIMOTO T.; PEREIRA, M. S. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. Artigo Doi: 10.17563/rbav. v31i1-2.918. **Revista Brasileira de Aplicações Vácuo**, v.31 n.1-2, 20122011 32-37, 2012.

ASLAN E. **Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC).** Department of Mechanical Engineering, Kirikkale University, 2005.

ASLAN E.; CAMUŞCU N.; BIRGÖREN B. Optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC). **Al Materials & Design. Volume 28, Issue 5**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO513**. Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO3002-1**. Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO3685**. Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO4287**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO4288**. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6175 PTB 83**. Processos Mecânicos de Usinagem - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

AOUICI, H.; YALLESE, M. A.; CHAOUI, K.; MABROUKI, T.; RIGAL, J., Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. **Journal of the International Measurement Confederation**, v.45, p.344 – 353, 2012.

BECKER, M.; SANTOS, S. C.; SALES, W. F. Integridade superficial em usinagem. In: LEPIKSON, H. A. **Tecnologias Avançadas de Manufatura. 1.ed**. Jaboticabal-SP, Brasil: Cubo Multimídia. Cap. 6, p. 105-123, 2005.

BONIFACIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração.** 1993. 109 f. Dissertação (Mestrado) Disponível em: http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264220. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1993.

CAMUŞCU, A; ASLAN E. Comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**. Volume 170, Pages 121-126, 2005.

COELHO, T. R.; SILVA, J. E. **Materiais para ferramenta de corte em usinagem** (apostila) – Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. NUMA- Núcleo de Manufatura Avançada, 2018

DAVIM, J.P e FIGUEIRA, L. Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. **Journal of Material Design**, Vol. 28, 1186-1191, 2006.

DEMIRCI, T. M., ASILTÜRK, I. , CANLI, E. Surface roughness optimisation of milling process of AISI 1045 steel with Taguchi Technique**. Journal od Selçuk University Natural and Applied Science.** Online ISSN: 2147 – 3781, 2016.

DENG J.; TONGKUN C.; LIU L. Self-lubricating behaviors of Al_2O_3/TiB_2 ceramic tools in dry high-speed machining of hardened steel. **Journal of the European Ceramic Society**. Volume 25. Pages 1073-1079, 2005.

DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. E MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6º edição Editora M.M, São Paulo, 262f, 2008.

ELBESTAWI, M. A., GAO D., WARDANY TI EI. Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. **International Journal of Machine Tools**. https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00058-5, 1996.

ESCALONA, M. P., NAYARIT, D. CASSIER, Z. Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Stell. **JMEPEG (2012**) 21.797-808 DOI 10.1007/sl1665-011-9964-6, 2011.

EUZÉBIO, C. D. G. **Uma contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana.** 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96495/euzebio_csg_me_bauru.pdf?sequence =1&isAllowed=y, 2012.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 16ª reimpressão, p. 751, 2013.

FNIDES, B.; YALLESE, M. A. ; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F**. Surface roughness model in turning hardened hot work steel using mixed ceramic tool** . ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. Nr.3(77) Mechanics and Structures Laboratory (LMS), Department of Mechanical Engineering., Guelma-Algeria, 2009.

GARCIA, U. **Estudo da aplicação de mínima quantidade de fluido no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V**. 2015. 178 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Área de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

HASSUI, A. **Comparação sobre a utilização de diferentes sensores no monitoramento do processo de retificação.** 1997. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho.** 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HONGYU, K. , SANDANIELO, V. M., JUNIOR, G.J.O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S – Engineering and Science.** ISSN:2358-5390DOI: 10.18607/es20164053. Vol. I, Edição 5, 2016.

INÁCIO, M. A. **Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de Al2O3 e ZrO2 para confecção de ferramentas de corte para torneamento –** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais – INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.

KONDO, Y. M. **Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32 com ferramentas de corte experimentais e comerciais.** 203f. Tese (doutorado) Universidade Estadual Paulista – Engenharia de Guaratinguetá, 2019.

KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial.** 119f. Dissertação (Mestrado)- Engenharia Mecânica. Centro Tecnológico de Santa Catarina- Florianópolis, 2004.

KUMARA A.S.; DURAIB A. R.; SORNAKUMARC, T. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology.** Volume 173, Issue 2, Pages 151-156, 2006.

LIMA, F. E.; CORRÊA, M**.** Usinagem de materiais endurecidos. **Revista tecnologia**, Fortaleza-CE, v.23, n.1, p.38-44, 2002.

MACHADO A. R., SILVA B. M. **Usinagem dos Metais**, 8ª. versão, Publicação interna Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica. LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, 258p, 2004.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M; COELHO, R.T.; SILVA, M. B et al. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 3. ed. 408 p. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2015.

MATSUMOTO, H. **Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos.** Tese(doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

MATSUMOTO, H., DINIZ, A. E. "Torneamento de Aços Endurecidos utilizando Ferramentas Cerâmicas", In: 1° **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM**, Natal – RN, 2000.

MATSUMOTO, H., DINIZ, A. E. Aspectos Tecnológicos da deterioração das ferramentas de PCBN e Cerâmica mista no torneamento de aços endurecidos. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais** – CBECIMAT, Natal – RN, 2002.

MENESES, L. J. **Estudo das condições dimensionais e forças geradas no fresamento do aço endurecido**. 96f. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade de Campinas – UNICAMP, 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 8. ed. 724p. New York: John Wiley, 2013.

NAKAI, M. E. **Avaliação de modelos neurais aplicados na estimação de parâmetros da retificação de cerâmicas avançadas,** 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

NORFAUZI T.; HADZLEY A. B. AZLAN U.A.A.; AFUZA A. A.; FAIZ M.M.; NAIM M.F. Fabrication and machining performance of ceramic cutting tool based on the Al_2O_3-ZrO_2-Cr_2O_3 compositions. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.034. **Journal of Materials Research and Technology.** Advanced Manufacturing Centre, 2019.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de Pinus elliottii,** 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/111059. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

PINHEIRO, C. **Avaliação da usinagem do Inconel 718 via metodologia de Taguchi**. 202f. Tese (doutorado) Universidade Estadual Paulista – Engenharia de Guaratinguetá, 2018

PIVETTA, C. S. **Uma contribuição ao estudo do fresamento do aço endurecido com fresa de topo esférico**. 110f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade de Campinas – UNICAMP, 2005.

OKADA, M.; HOSOKAWA, A.; TANAKA, R.; UEDA, T. Cutting performance of PVDcoated carbide and CBN tools in hardmilling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture,** v.51, p.127-132, 2011.

RAFAEL, G. R. P. **Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2008.

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

SA, V. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes.** 81f. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

SALES, T. G. e FERREIRA, R. J. Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas cerâmica e PCBN de geometria *WIPER.* **Anais do COBEF**, 2005.

SANTOS, J. C. **Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de Inconel 718**. 65f. Dissertação (Mestrado) Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2010.

SERGEY N. G.; VOLOSOVA M.; GURIN D. V. Investigation of force parameters acting on a single cutting insert made of ceramics in face milling of hardened steel. **Mechanics & Industry.** Volume 16. Article Number 702. 7p., 2015.

SILVA, M. F. A. **Estudo da utilização de ferramentas a base de nitreto de silício (Si_3N_4) e alumina (Al_2O_3) na usinagem do ferro fundido vermicular**. Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

SILVA, R. L.; COELHO, R. T.; CATAI, E. R. Desgaste de ferramentas no torneamentao com alta velocidade de corte da superliga "Waspaloy. ISSN 1807-0353. **Metalurgia & Materiais** Escola Minas, Ouro Preto, 57(2): 109-114, 2004.

SMITH, G.T. **Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology**", IFS Publications, England, 1989.

SOARES, L. R. L. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas.** 134 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SOARES, M. **Rugosidade de superfícies.** Disponível em: http://www.mspc.eng.br/tecdiv/rugosid110.shtml#pgfm. Acesso em: 6 jan. 2019.

SOUTO, U., B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica.** Tese (Doutorado).168f. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III, 2007.

SOUZA, R. C., NASCIMENTO, M. P., VOORWALD, H. J. C, PIGATIN, W. L. The effect of WC-17Co thermal spray coating by HVOF and hard chromium electroplating on the fatigue life and abrasive wear resistance os AISI 4240 high strength steel. **Corrosion reviews**, v.21. n.1, p.75 - 96, 2003.

SOUZA, A. J. **Aplicação de Multi-sensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. 2004. 211 f. Tese (Doutorado). Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88055/208616.pdf. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SOUSA, T. A. **Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de**

alumina magnésio – Tese (doutorado) UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.

SOUZA. J. V. C. Estudo dos tipos e mecanismos de desgastes na usinagem do ferro fundido vermicular (CGI) usando ferramenta de corte a base de Si3N4. **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Florianópolis, n.52 p. Anais, 2008.

STÅHL, J. E.; SECO TOOLS, **A**. Metal Cutting Theories and Models**. Sweden: Lund University Press**, 2012.

TONELLO, J.C.; BRESSIANI, J.C.; BRESSIANI, A.H.A. Influência dos parâmetros de sinterização e de aditivos na microestrutura e propriedades mecânicas do compósito Al_2O_3:NbC**.** IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares ,CCTM Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais. **52º. Congresso brasileiro de cerâmica** – Florianópolis Santa Catarina, 2008.

TREVELIN, R. **Influência dos parâmetros do processo de fresamento sobre a integridade superficial e forces de corte do aço AISI H13 endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica), Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2011.

VALVERDE, J.; DIAS, A. J. **Usinagem do alumínio da classe 6005 com uso de ferramenta cerâmica.** Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais. 71fl. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

VIGNEAU, J. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. **Revista Máquinas e Metais**, v. 32 (380), p. 16 – 32, 1997.

VIVANCOS, J; LUIS, C. J.; COSTA, L.; ORTIZ, J.A. Optimal Machining parameters selection in high speed milling of hardned steels for injection moulds**. Journal of Materials Processing Technology** 155–156. 1505–1512, 2004.

XAVIER, A. F. **Torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e cbn.** 144f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – Engenharia Mecânica, 2003.

XIAOBIN C. & ZHAO J. Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** volume 71, pages1811–1824, 2014.

ZAWATI, H.; NUR F. I.; NUR A. B. Effect of MgO additive on microstructure of Al_2O_3. **Journal Advanced Materials Research.** ISSN 1662-8985, Vols. 488 – 489 doi.10.4028**,** 2012

ZHENG, G.; CHENG, X.; RUFENG L.; YEBING T. Experimental investigation of cutting force, surface roughness and tool wear in high-speed dry milling of AISI 4340 steel. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Volume 33, pages341–349, 2019.

YANG W. H., & TARNG Y.S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. **Journal of Material Process Technology**, 84, 123-129, 1998.