

TAÍSE AZEVEDO DE SOUSA

**Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de alumina
magnésio**

Táise Azevedo de Sousa

**Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de alumina
magnésio**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para obtenção do título de
Doutora em Engenharia Mecânica área de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Co-orientador: Prof. Dr. José Vitor Cândido de
Souza
Co-orientador: Prof. Dr. Elson de Campos

Guaratinguetá - SP
2020

S725u Sousa, Taíse Azevedo de
Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de alumina magnésio / Taíse Azevedo de Sousa – Guaratinguetá, 2020
142 f. : il.
Bibliografia: f. 130-140

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

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. Élson de Campos

1. Usinagem. 2. Ferro fundido. 3. Material cerâmico. I. Título.

CDU 621.9(043)

Luciana Máximo


Bibliotecária-CRB-8/3595

TAISE AZEVEDO DE SOUSA

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

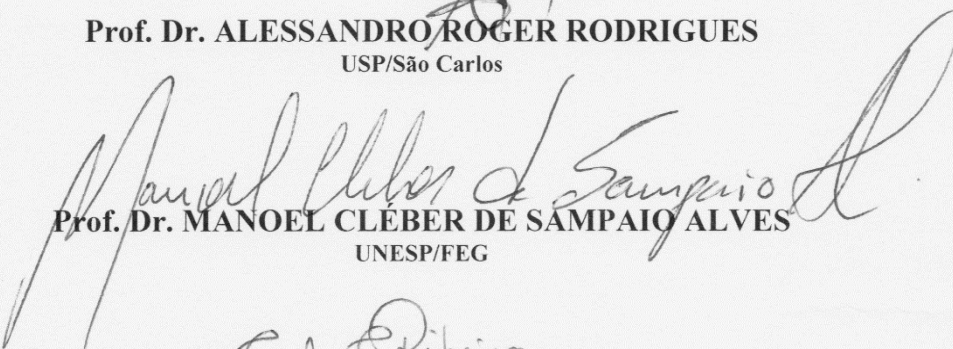

Prof.^a Dr.^a Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. FRANCISCO CRISTÓVÃO LOURENÇO DE MELO
CTA/IAE


Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
USP/São Carlos


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG


Prof.^a Dr.^a GISELI CRISTINA RIBEIRO
UNESP/FEG

Fevereiro de 2020

TAÍSE AZEVEDO DE SOUSA

NASCIMENTO	02.05.1985 – Volta Redonda/RJ
FILIAÇÃO	Carlos dos Santos de Sousa Tânia Maria Azevedo de Sousa
2004/2009	Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica Engenheira Metalúrgica Universidade Federal Fluminense UFF- <i>campus</i> Volta Redonda
2011/2013	Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais Mestre em Engenharia de Materiais Fundação Oswaldo Aranha FOA – <i>campus</i> Volta Redonda.
2016/2020	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.



Dedico este trabalho de modo especial, a meus avós Durval José de
Azevedo Neto (*in memoriam*) e Maria Aparecida Barbosa de
Azevedo.

AGRADECIMENTOS

“Um Amigo se faz rapidamente; já a amizade é um fruto que amadurece lentamente.”
Aristóteles

Em primeiro lugar agradeço a *Deus* e ao meu mentor espiritual pelo dom da vida.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* pelo apoio, dedicação e orientação para execução deste trabalho.

Ao meu coorientador, *Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza* pelo comprometimento, orientação e auxílio para a execução desse trabalho.

Ao meu coorientador *Prof. Dr. Elson de Campos* e família por ser uma pessoa que transcende a explicação humana e a qual não conseguiria somente com palavras agradecer por tanto.

Ao *Prof. Dr. Francisco Cristóvão Loureiro de Melo* pelo apoio e suporte para os ensaios.

Aos meus pais *Tânia Maria Azevedo de Sousa e Carlos dos Santos de Sousa*, pelo incentivo, amor e companheirismo.

Ao meu grande amigo, incentivador e companheiro *Wesley Ramos de Oliveira* pela confiança depositada em mim, pelas orações, pela mão amiga, pela dedicação e por sua existência.

Aos amigos da pós-graduação em especial, *Marcelo Antunes de Paula, Marcel Yuzo Kondo e Reginaldo Toshihiro Konatu* sem os quais jamais conseguiria concluir, pela amizade, suporte nos momentos mais difíceis.

Aos funcionários, bibliotecários e técnicos srs. *Manoel, Wilson, Odir, Célio, Pâmela, Ana Lúcia, Juciene* da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá pelo auxílio de sempre e dedicação.

Ao DEMAR -USP Lorena pelas análises em especial ao *Prof. Dr. Paulo Suzuki, Prof. Dr. Sebastião Ribeiro e Msc Pérsio Mozart Pinto*, pelo auxílio e amizade desenvolvida, os quais terão sempre minha admiração.

À coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior CAPES.

À Tupy Mauá Fundições pelo fornecimento dos corpos de prova.

À *Seco Tools* pelas ferramentas de corte cedidas para estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) código de financiamento 001.

É exatamente disso que a vida é feita: de momentos! Momentos os quais temos que passar, sendo bons ou não, para o nosso próprio aprendizado, por algum motivo. Nunca esquecendo do mais importante: nada na vida é por acaso...

Chico Xavier

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais apresenta extrema importância, devido a necessidade de obtenção de materiais com boas propriedades e baixo custo. Existe uma contínua necessidade de melhoria das ferramentas para usinagem de materiais que apresentam alta resistência em temperaturas elevadas as quais atendam ao ferro fundido vermicular. Pequenos avanços no desenvolvimento de novas ferramentas poderão significar importantes aspectos no campo da usinagem, além de tornar o mercado mais competitivo. O conjunto produção e aplicação de ferramentas de corte cerâmica nos processos de usinagem do ferro fundido vermicular (GJV450) necessita de maiores avanços, sendo objeto de grande interesse industrial. Neste contexto, o presente trabalho determinou a melhor condição de aplicação das ferramentas cerâmicas à base de Alumina (Al_2O_3), dopada com óxido de magnésio (MgO) em escala laboratorial, na usinagem sem fluido de corte do ferro vermicular classe GJV450 em comparativo com uma ferramenta comercial de metal duro revestida de alumina, fundamentado na necessidade de usinagem do ferro fundido vermicular nas indústrias e fundições. Para o torneamento do ferro fundido vermicular com ferramenta cerâmica os parâmetros utilizados foram velocidade de corte de 300-350-400-450-500-550-600-650 m/min; avanço de 0,1-0,3 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 -1,0 mm e para a ferramenta de metal duro, velocidade de corte de 150-250-350-450 m/min; avanço de 0,1-0,3 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 -1,0 mm. As variáveis de entrada previamente definidas (V_c, f, a_p), foram correlacionadas com as variáveis de saída como rugosidade (R_a e R_t), potência, emissão acústica, desgaste de flanco (V_b) e vibração. Utilizou-se o planejamento de experimentos Taguchi com a definição de menor é melhor, pode-se avaliar os efeitos dos fatores de entrada que afetaram as variáveis resposta. Verificou-se que o avanço (f) é um fator influente com tendência de crescimento com exceção da emissão acústica, potência e vibração para metal duro. Para cerâmica o avanço (f) foi influente com exceção da potência e desgaste de flanco. A ferramenta cerâmica de alumina apresentou melhores condições de usinagem quanto ao desgaste de flanco, com uma velocidade de corte $V_c = 350$ m/min, enquanto o metal duro apresentou melhor condição com velocidade de corte $V_c = 150$ m/min. Os mecanismos de desgaste foram analisados e para a cerâmica o desgaste foram predominantemente abrasivo e no metal duro ocorreu o mecanismo difusivo, as condições de usinagem se apresentaram favoráveis a utilização da ferramenta cerâmica.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramentas cerâmicas. Metal duro. Usinagem à seco. Ferro Fundido Vermicular.

ABSTRACT

The development of new materials is extremely important, due to the need to obtain materials with good properties and low cost. There is a continuing need to improve tools for machining materials that have high strength at elevated temperatures that meet the vermicular cast iron. Small advances in the development of new tools could mean important aspects in the field of machining, in addition to making the market more competitive. The set of production and application of ceramic cutting tools in the machining processes of vermicular cast iron (GJV450) needs further advances, being an object of great industrial interest. In this context, the present work determined the best application condition of the ceramic tools based on Alumina (Al_2O_3), doped with magnesium oxide (MgO) on a laboratory scale, in the machining without cutting fluid of the vermicular iron class GJV450 in comparison with a commercial carbide tool coated with alumina, based on the need for machining vermicular cast iron in industries and foundries. For turning vermicular cast iron with a ceramic tool, the parameters used were cutting speeds of 300-350-400-450-500-550-600-650 m / min; feed of 0.1-0.3 mm / rev and machining depth of 0.5 - 1.0 mm and for the carbide tool, cutting speeds of 150-250-350-450 m / min; feed rate of 0.1-0.3 mm / rev and machining depth of 0.5 - 1.0 mm. The previously defined input variables (V_c, f, a_p), were correlated with the output variables such as roughness (R_a and R_t), power, acoustic emission, flank wear (V_b) and vibration. Taguchi design of experiments was used with the definition of smaller is better, one can evaluate the effects of the input factors that affected the response variables. It was found that the advance (f) is an influential factor with a tendency for growth except for the acoustic emission, power, and vibration for carbide. For ceramics, the feed (f) was influential except for the power and flank wear. The ceramic alumina tool presented better machining conditions in terms of flank wear, with a cutting speed $V_c = 350$ m / min, while the carbide showed a better condition with cutting speed $V_c = 150$ m / min. The wear mechanisms were analyzed and for ceramics, the wear was predominantly abrasive and, in the carbide, the diffusive mechanism occurred, the machining conditions were favorable to the use of the ceramic tool.

KEYWORDS: Ceramic tools. Hard metal. Dry machining. Vermicular Cast Iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens da morfologia do ferro fundido cinzento.....	23
Figura 2 – Microestrutura de ferro fundido nodular com ataque em nital 3%, matriz perlítica-ferrítica.....	23
Figura 3 – a) Microestrutura de ferro fundido vermicular com ataque em nital 3%; b) 3D grafita vermicular.	24
Figura 4 – Microestrutura ferro fundido vermicular ataque nital 3%.....	25
Figura 5 – Fatores que influenciam a usinabilidade do CGI.....	28
Figura 6 – Principais processos de fabricação convencionais.	30
Figura 7 – Divisão dos principais processos de torneamento.....	31
Figura 8 – Principais movimento no processo de torneamento entre ferramenta de usinagem e peça.....	32
Figura 9 – Parâmetros de entrada e saída no torneamento.	34
Figura 10 – Parâmetros de Rugosidade Ra e Rt de comprimento L.....	38
Figura 11 – Perfil de Rugosidade Ra ao longo do comprimento Lm.....	38
Figura 12 – Perfil de Rugosidade Rt ao longo do comprimento Lm.....	39
Figura 13 – Comprimento de avaliação e amostragem.	40
Figura 14 – a) Variação da evolução da temperatura em função da resistência a compressão da alumina e metal duro; b) Variação da dureza em função da tenacidade dos diferentes materiais para corte.....	42
Figura 15 – Ferramenta de metal duro com múltiplas camadas ISO 513/2015.	44
Figura 16 – Principais etapas usualmente envolvidas no processamento de materiais cerâmicos.....	48
Figura 17 – Esquema das técnicas de prensagem :uniaxiais simples(a), dupla ação (b) e isostática (c).....	49
Figura 18 – Etapas do processo de sinterização por fase sólida (a) adesão, (b) estágio.....	51
Figura 19 – Etapa de sinterização por fase líquida.....	51
Figura 20 – Impressão da indentação Vickers para medida de dureza.....	53
Figura 21 – Esquema do Cp padrão com dimensões para realização do ensaio de flexão em três pontos com entalhe.	55
Figura 22 – Defeitos que comprometem a resistência de um material cerâmico.	57
Figura 23 – Desgastes nas ferramentas de corte.....	59
Figura 24 – Partes de ferramentas monocortantes.....	61

Figura 25 – Centro de Torneamento ROMI GL240M e corpo de prova acoplado na castanha.	66
Figura 26 – Valores de saída de emissão acústica, vibração e potência captados com <i>MATLAB</i> ®.	68
Figura 27 – Corpo de prova de ferro fundido vermicular GJV450	68
Figura 28 – Ferramentas de metal duro e de Al_2O_3+MgO	70
Figura 29 – Especificação metal duro catálogo <i>SECO</i> SNMA 120408 TK1001; porta-ferramentas B01T9032446 <i>SECO TOOLS</i>	70
Figura 30 – Processo de confecção das ferramentas de alumina.	72
Figura 31 – Esquema 3D e molde metálico para fabricação das ferramentas cerâmicas.	73
Figura 32 – Esquema da curva de sinterização da cerâmica Al_2O_3+MgO	74
Figura 33 – Desenho esquemático das dimensões da ferramenta cerâmica.	74
Figura 34 – Medição de rugosidade com rugosímetro portátil <i>MarSurf</i> RD18 e <i>MarSurf</i> M300.	76
Figura 35 – Ensaio de densidade – Método Arquimedes.	77
Figura 36 – Porta amostra e difratômetro de raios x <i>Empyreal</i>	78
Figura 37 – Corpo de prova cerâmico embutido e microdurômetro <i>Wilson Instruments</i>	80
Figura 38 – Metalizadora Baltec MED020 ; microdurômetro <i>Wilson Instruments</i>	81
Figura 39 – Equipamento utilizado para confecção dos entalhes. A) Esquema lateral dos Cp's colados na placa de aço; B) Esquema frontal da lâmina correndo sobre os Cp's de cerâmica.	82
Figura 40 – Estereoscópio para verificação e medida do entalhe; Imagem do entalhe em estereoscópio Zeiss (Axion Cam ICC33).	82
Figura 41 – Parâmetros de corte ferramenta de metal duro.	83
Figura 42 – Micrografia do corpo de prova de ferro fundido vermicular GJV450 (ataque com nital 3%).	86
Figura 43 – Distribuição granulométrica dos pós de Al_2O_3	87
Figura 44 – Difratogramas de raios x do Metal duro e da mistura precursora de $Al_2O_3 + MgO$	88
Figura 45 - Micrografia da amostra fraturada de Al_2O_3+MgO Sinterizada a 1600 °C.	89
Figura 46 - Micrografias da ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ fraturada e atacada termicamente à 1400°C.	89
Figura 47 - Microscopia óptica da amostra de $Al_2O_3 +MgO$ após entalhe profundidade.	92
Figura 48 – Esquema da amostra após ruptura e micrografia obtida por MEV para medição e cálculo de K_{IC} pelo método SEVNB, regiões de fratura e de entalhe.	92

Figura 49 – Modo de fratura da amostra de $Al_2O_3 + MgO$ após ensaio de tenacidade à fratura.....	93
Figura 50 – Análise dos efeitos principais das médias para emissão acústica com ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.	95
Figura 51 – Gráfico de Pareto dos efeitos principais para emissão acústica.	97
Figura 52 – Análise dos efeitos principais das médias para potência com ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.	98
Figura 53 – Gráfico de Pareto dos efeitos da potência de usinagem com metal duro.	99
Figura 54 – Análise dos efeitos principais das médias para vibração da ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.	100
Figura 55 – Gráfico de Pareto dos efeitos da vibração de usinagem com metal duro.	101
Figura 56 – Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Ra) com ferramenta de metal duro.	103
Figura 57 – Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Rt) com ferramenta de metal duro.	103
Figura 58 – Gráfico de Pareto dos efeitos da rugosidade de usinagem com metal duro.	104
Figura 59 – Análise dos efeitos principais das médias para desgaste de flanco com ferramenta de metal duro.	106
Figura 60 - Gráfico de Pareto dos efeitos do desgaste de flanco de usinagem com metal duro.	107
Figura 61 – Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Ra) com ferramenta de cerâmica.	109
Figura 62 – Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Rt) com ferramenta de cerâmica.	110
Figura 63 – Gráfico de Pareto dos efeitos para rugosidade Ra e Rt.	112
Figura 64 – Análise dos efeitos principais das médias para desgaste de flanco ($V_b * L_c / 1000$), com ferramenta de cerâmica.	113
Figura 65 – Gráfico de Pareto para desgaste de flanco.	114
Figura 66 – Análise dos efeitos principais das médias para vibração com ferramenta de cerâmica.	115
Figura 67 – Gráfico de Pareto dos efeitos da vibração de usinagem com cerâmica.	116
Figura 68 – Análise dos efeitos principais das médias para emissão acústica com ferramenta de cerâmica.	117
Figura 69 – Gráfico de Pareto para emissão acústica.	118

Figura 70 – Análise dos efeitos principais das médias para potência com ferramenta de cerâmica e razão sinal-ruído.....	119
Figura 71 – Gráfico de Pareto dos efeitos da potência de usinagem com cerâmica.....	120
Figura 72 – Análise do mecanismo de desgaste por MEV e EDS da ferramenta cerâmica.	123
Figura 73 – Análise do mecanismo de desgaste por MEV e EDS da ferramenta metal duro.	125
Figura 74 – Mapeamento de elementos da ferramenta de metal duro realizado no MEV. ..	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de ferro fundido vermicular de acordo com ISO116/2017.....	27
Tabela 2 – Comprimentos de amostragem para medição da rugosidade.	39
Tabela 3 – Propriedades dos Óxidos.	46
Tabela 4 – Informações de diferentes materiais cerâmicos (tenacidade à fratura, densidade e estrutura cristalina)	56
Tabela 5 – Composição química do ferro fundido vermicular GJV 450®.....	69
Tabela 6 – Características da alumina CT3000.....	71
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ensaio de DRX.	79
Tabela 8 – Parâmetros de corte ferramenta de metal duro.	84
Tabela 9 – Matriz de experimento do arranjo ortogonal L16, para ensaio de inserto cerâmico de alumina.	85
Tabela 10 – Distribuição granulométrica alumina.	87
Tabela 11 – Contagem da porosidade no Image J®.....	89
Tabela 12 – Contagem da porosidade no Image J®.....	89
Tabela 13 – Planilha com as massas referentes ao ensaio de densidade por Arquimedes.	90
Tabela 14 – Resultados da análise de dureza da ferramenta cerâmica.....	91
Tabela 15 – Média dos valores de tenacidade à fratura SEVNB amostra de Al ₂ O ₃ +MgO.....	93
Tabela 16 – Análise de variância ANOVA para emissão acústica de usinagem com metal duro.	96
Tabela 17 – Análise de variância ANOVA para potência de usinagem com metal duro.....	99
Tabela 18 – Análise de variância ANOVA para vibração de usinagem com metal duro.	102
Tabela 19 – Análise de variância ANOVA para média de rugosidade (Ra, Rt) de usinagem com metal duro.....	105
Tabela 20 – Análise de variância para média de desgaste de flanco de usinagem com metal duro.....	107
Tabela 21 – Análise de variância ANOVA para rugosidade (Ra) de usinagem com cerâmica	111
Tabela 22 – Análise de variância ANOVA para rugosidade de usinagem com cerâmica	111
Tabela 23 – Análise de variância ANOVA para desgaste de flanco de usinagem com cerâmica.	113
Tabela 24 – Análise de variância ANOVA para vibração de usinagem com cerâmica.	116

Tabela 25 – Análise de variância ANOVA para emissão acústica de usinagem com cerâmica.	118
Tabela 26 – Análise de variância ANOVA para potência de usinagem com cerâmica.	120
Tabela 27 – Síntese dos resultados das ferramentas de metal duro e cerâmica.....	121
Tabela 28 – Estratificação do desgaste de flanco da ferramenta cerâmica.	122
Tabela 29 – Estratificação do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro	124

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	FERROS FUNDIDOS	22
2.1.1	Ferro fundido vermicular	24
2.1.2	Processo de obtenção do ferro vermicular	26
2.1.3	Classificação do ferro fundido vermicular	26
2.1.4	Usinabilidade do ferro fundido vermicular	27
2.1.4.1	Efeito da forma da grafita e perlita	28
2.1.4.2	Efeito do titânio	29
2.2	PROCESSOS DE USINAGEM	29
2.2.1	Torneamento	30
2.2.2	Variáveis de entrada e saída da usinagem	33
2.2.2.1	Emissão acústica	34
2.2.2.2	Vibrações	36
2.2.2.3	Potência de corte	36
2.2.3	Rugosidade	37
2.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	40
2.3.1	Metal duro	43
2.3.2	Ferramenta cerâmica	45
2.3.2.1	Alumina Al_2O_3	46
2.3.2.2	Processamento de materiais cerâmicos	47
2.3.2.3	Sinterização de cerâmicos	50
2.3.3	Aditivos de sinterização para Al_2O_3	51
2.3.4	Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos	53
2.3.4.1	Dureza	53
2.3.4.2	Tenacidade à fratura	54
2.3.4.3	Defeitos em materiais cerâmicos	56
2.3.4.4	Desgaste das ferramentas de corte	58
2.3.5	Geometria da ferramenta de corte	61
2.4	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	62

3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NO TORNEAMENTO.....	66
3.1.1	Ferro fundido vermicular	68
3.1.2	Ferramentas e porta ferramentas	69
3.2	PROCESSAMENTO DA CERÂMICA Al_2O_3+MgO	71
3.3	RUGOSIDADE E DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....	75
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	76
3.4.1	Densidade arquimedes $Al_2O_3 + MgO$	77
3.4.2	Difratometria de raios x	78
3.4.3	Distribuição do tamanho de partículas pó Al_2O_3	79
3.4.4	Dureza	79
3.4.5	Microscopia eletrônica de varredura	80
3.4.6	Tenacidade à fratura $Al_2O_3 + MgO$	81
3.5	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS METAL DURO.....	83
3.6	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS CERÂMICA.....	84
4	RESULTADOS	86
4.1	FERRO FUNDIDO VERMICULAR.....	86
4.2	FERRAMENTA CERÂMICA.....	86
4.2.1	Distribuição granulométrica e tamanho de partícula	86
4.2.2	Difratometria de raios x	87
4.2.3	Microscopia eletrônica de varredura	88
4.2.4	Densidade	90
4.2.5	Dureza	90
4.2.6	Tenacidade à fratura $Al_2O_3 + MgO$	91
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA USINAGEM COM METAL DURO.....	94
4.3.1	Emissão acústica	94
4.3.2	Potência consumida	97
4.3.3	Vibração	100
4.3.4	Rugosidade R_a e R_t	102
4.3.5	Desgaste de flanco V_b	105
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA USINAGEM COM CERÂMICA.....	108
4.4.1	Rugosidade R_a e R_t	108
4.4.2	Desgaste de flanco V_b	112
4.4.3	Vibração	114

4.4.4	Emissão acústica	117
4.4.5	Potência de usinagem	118
4.5	MECANISMO DE DESGASTE DO METAL DURO E CERÂMICA.	121
5	CONCLUSÃO.	128
	REFERÊNCIAS	130

1. INTRODUÇÃO

Uma constante evolução na indústria automotiva em função dos avanços tecnológicos, e sistemas produtivos com altas demandas e variedades de produtos, fazem com que as indústrias busquem agilidade no processo com qualidade e eficiência. Dentre todos os processos de fabricação existentes a usinagem é o de maior destaque na indústria, com destaque para o desenvolvimento de ferramentas de corte que atendam às necessidades do processo com alto desempenho, resistência ao desgaste visando suprir as exigências de um mercado competitivo.

O processo de usinagem transforma em cavacos, algo em torno de 10 % da produção mundial de materiais metálicos (EZUGWU, 2005). Avanços constantes em pesquisas por otimização dos processos de fabricação com remoção de cavacos, melhoria da aerodinâmica, consumo de combustível vem se destacando na cadeia produtiva, porém este último tem sido de maior interesse uma vez que a mudança de materiais conferindo redução de peso nos veículos asseguraria economia de combustível (KLINK, U., FLORES, 2001).

Em substituição ao ferro fundido cinzento ganha destaque o ferro fundido vermicular o qual surgiu em virtude de erro de composição química durante a preparação do ferro fundido nodular. No ano de 1965 este material conhecido como *Compacted Graphite Iron* (CGI) foi patentado, somente na década de 90 com aprimoramento dos processos de fundição o ferro fundido vermicular ganha destaque na indústria, apresentando menor espessura de parede, maior pressão de trabalho e aumento da resistência mecânica (JUNIOR; GUESSER; SCHMIDT, 2011).

Pesquisas no desenvolvimento de novos materiais e revestimento para ferramentas de corte têm sido objeto de importantes estudos realizados em todo mundo, com objetivo de atender as mais diversas implicações das indústrias aeronáuticas, aeroespacial, automobilística, siderúrgicas, petroquímica e outras, que possuem aplicações de ligas resistentes ao calor (SZMYTKA, 2013; SOUZA, 2011). (HÜBNER; SOUZA, 2013)

Segundo Guesser et al (2011) desde 1995 as pesquisas com relação à usinabilidade do ferro fundido vermicular se dividem em diferentes campos como aprimorar tecnologia de usinagem, e o desenvolvimento de ferramentas de usinagem que se adequem as condições do CGI.

Neste contexto, para atender as exigências da indústria no desenvolvimento de ferramentas, os materiais cerâmicos apresentam importante utilização e evolução, no mercado, devido a sua estabilidade térmica e química e resistência ao desgaste, permitindo a produção de peças usinadas dentro das tolerâncias especificadas.

Por outro lado, as ferramentas cerâmicas podem sofrer variações intensas de solicitações mecânicas, o que podem promover lascas e fraturas devido a um processo contínuo de deterioração da aresta de corte, o que pode inibir em alguns casos a aplicação dessas ferramentas (LEE; RATNAM; AHMAD, 2016).

A presente pesquisa consiste na avaliação do comportamento de uma ferramenta cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) desenvolvida em escala laboratorial com o grupo de pesquisa da instituição, assim como a influência dos parâmetros de corte, velocidade de corte (V_c), profundidade de usinagem (a_p) e avanço (f) sobre as variáveis de saída, comparando esta ferramenta com uma comercialmente vendida de metal duro na usinagem do ferro fundido vermicular classe ISO16112/17- JV450/S no laboratório de usinagem do departamento de materiais e tecnologia da FEG/UNESP.

Apesar destas vantagens da ferramenta de corte cerâmico, e com um mercado crescente em expansão no campo da usinagem, no Brasil existem estudos relacionados ao desenvolvimento, a caracterização e à fabricação de ferramentas cerâmicas, mais o qual ainda pode ser ampliado. Atualmente, as ferramentas cerâmicas são produzidas, em sua quase totalidade no exterior, sendo estrategicamente interessante o estudo da ferramenta cerâmica no torneamento a seco do ferro vermicular para aprimorar o domínio desta tecnologia de fabricação desses produtos no Brasil, viabilizando seu uso comercial.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é o estudo da usinabilidade do ferro fundido vermicular ISO16112/17- GJV450/S no processo de torneamento sem fluido lubrificante e a utilização de uma ferramenta de corte cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) desenvolvida em escala laboratorial, visando a qualidade do material em comparativo com ferramenta comercial de metal duro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Nesta pesquisa definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Análise do torneamento com a ferramenta cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) desenvolvida em escala laboratorial seguindo em comparativo com a ferramenta de metal duro.

- Avaliação dos parâmetros de corte: velocidade de corte (V_c); profundidade de usinagem (a_p); avanço (f), correlacionando com os parâmetros de saída emissão acústica, potência de usinagem, rugosidade R_a e R_t ; e desgaste de flanco.
- Utilização das ferramentas cerâmicas laboratoriais na usinagem do ferro fundido vermicular; e comparação com uma ferramenta comercial de metal duro, avaliando a influência dos parâmetros de usinagem e aumento da velocidade de corte utilizando a metodologia de *Taguchi* para planejamento do experimento e posterior comparação dos desgastes sofridos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERROS FUNDIDOS

O ferro fundido material tradicional e promissor na indústria automobilística se destaca pela busca constante em novas tecnologias para melhorias no processo de fabricação e consequente redução de custo (GUESSER, W, GUEDES, 1997). Segundo a ABIFA- Associação Brasileira de Fundição a produção brasileira de peças fundidas aumentou pelo terceiro ano seguido, totalizando 2,28 milhões de toneladas em 2019 no Brasil e a projeção estimada é que a demanda do setor de fundido aumentará gradativamente, atingindo 3,2 milhões de toneladas em 2023 (ABIFA, 2020).

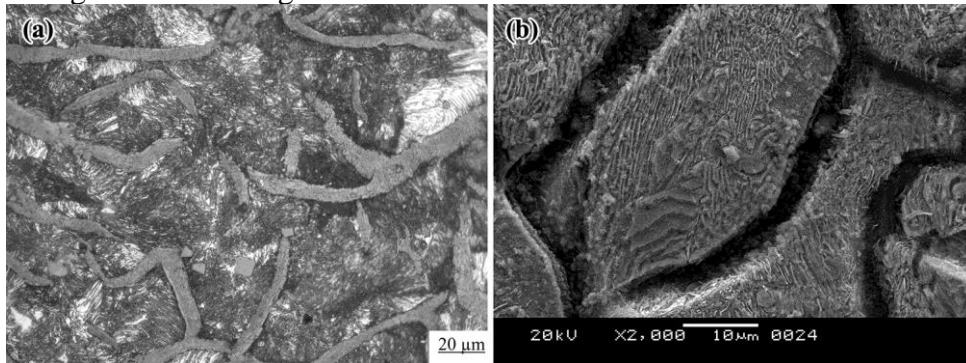
Estes materiais são amplamente utilizados na indústria em virtude de serem versáteis, possibilitando a obtenção de peças com geometria complexa por meio do processo de fundição, o qual não possibilita a obtenção de tolerâncias de projeto, onde emprega-se a usinagem para atender a qualidade do fundido e especificações de projeto (DE SOUSA; SALES; MACHADO, 2018). Ferro fundido é a definição para ligas ternárias de Fe-C-Si as quais possuem teor de carbono superior a 2.14% em peso, por apresentar valor elevado de carbono, e sua microestrutura é constituída de partículas de grafite em matriz perlítica ou ferrítica (PINA et al., 2016).

Os ferros fundidos possuem classes em função das famílias as quais pertencem, sendo que a designação de cada família é em função da forma a qual se apresenta a grafita que pode ser nodular, vermicular e cinzento (DE SOUSA; SALES; MACHADO, 2018).

- Ferros fundidos cinzentos: apresentam em sua microestrutura lamelas de grafita com orientação aleatória e interconectadas, em forma de veios, o que torna esses materiais bons condutores térmicos, sendo empregado em componentes sujeitos à fadiga térmica (tambores e discos de freio, cabeçotes de motor). Apresenta, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade e boa resistência ao desgaste (GUESSER, 2009). Na Figura 1, apresenta-se a microestrutura com a morfologia da grafita do ferro fundido cinzento.

O ferro fundido cinzento na imagem da Figura 1 possui elevada concentração de flocos de grafite dispersos de forma uniforme com matriz majoritária perlítica, esses flocos atuam como concentrador de tensão (SARKAR; SUTRADHAR, 2018)

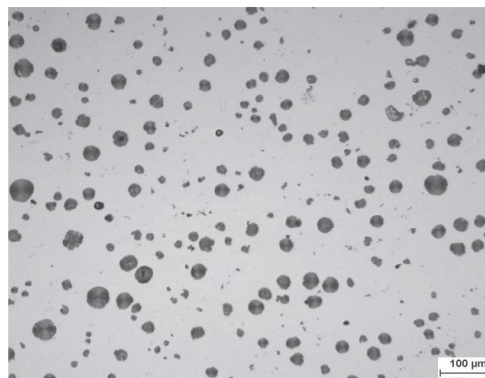
Figura 1 - Imagens da morfologia do ferro fundido cinzento.



Fonte: Sarkar e Sutradhar (2018)

- Ferros fundidos nodulares: também conhecido como “nodular” (Figura 2) apresenta desenvolvimentos sendo um material promissor nas fundições, pode ser usinado com as técnicas utilizadas para o ferro fundido cinzento (P.A BARBOSA; W.L GUESSER, 2015). Esta classe é obtida por meio da adição de magnésio, cálcio e cério a um ferro fundido comum, produzindo uma grafita em formato de nódulos quase esféricos, de modo que a ductilidade seja uma propriedade importante desses materiais. Especialmente utilizados na fabricação de virabrequins, eixos comando de válvulas, carcaças e componentes hidráulicos (GUESSER, 2009).

Figura 2– Microestrutura de ferro fundido nodular com ataque em nital 3%, matriz perlítica-ferrítica.



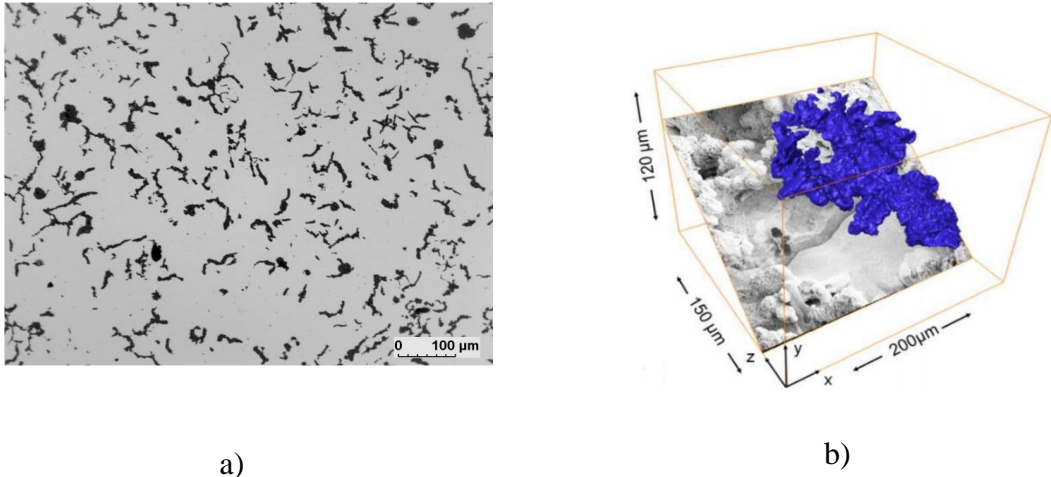
Fonte: Velichko (2008).

Elementos nodularizantes como FeSiMg são adicionados no ferro fundido base, e controle do processo de solidificação asseguram a formação da grafita em forma de nódulos.

- Ferros fundidos vermiculares: esta classe apresenta a grafita predominantemente em forma de “vermes” (Figura 3). Apresentam boas características de resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, resistência a choques térmicos, entre outras.

Principalmente utilizados em coletores de exaustão e blocos de motores diesel (GUESSER, 2009).

Figura 3 – a) Microestrutura de ferro fundido vermicular com ataque em nital 3%; b) 3D grafita vermicular.



Fonte: Velichko (2008).

O ferro fundido vermicular tem se destacado cada vez mais, obtendo uma crescente busca no mercado e aceitação na indústria, com destaque a automobilística, apresentando enormes possibilidades de utilização em substituição a peças que originalmente eram produzidas em ferro cinzento. Porém, em contrapartida, tem-se a disputa para manter preços competitivos para o mercado em função de sua baixa usinabilidade.

2.1.1 Ferro Fundido Vermicular

Na década de 40, Morrogh, realizou intensos estudos sobre o processo de fundição do ferro nodular adicionando alguns elementos como cério e magnésio, também conhecidos como terras raras, e obteve uma microestrutura de formato quase lamelar a qual denominou “quase-flake”, também conhecida como CGI (“Compacted Graphite Iron”) (OATHOUT, 1978; SERGEANT, G. F.; EVANS, 1978).

Na década de 60, Shelleng visando melhorar a possibilidade de utilização do ferro vermicular, introduziu algumas técnicas de processamento, como a adição de Mg (magnésio) como elemento nodularizante para não permitir o crescimento de lamelas, e adição de Ti (titânio), agindo como antinodularizante e inibindo o crescimento da grafita em nódulos, porém

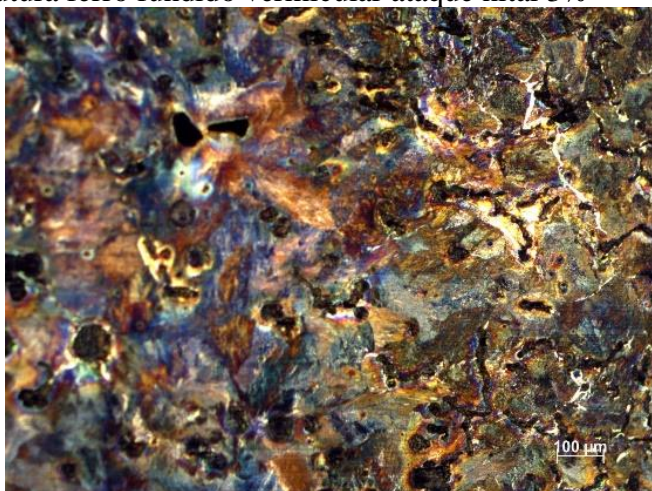
o tratamento dificulta a usinabilidade em função da presença de titânio, favorecendo formação de carbonitreto (GUESSER et al., 2001).

Na década de 90, a empresa Tupy Fundições adotou o processo Sintercast, no qual por meio de análise térmica realiza-se o controle da solidificação, posteriormente ao tratamento do metal com adição de magnésio (GUESSER et al., 2001). Quanto a sua composição química tanto o ferro cinzento quanto o ferro nodular, se assemelham em percentuais de composição do ferro base, exceto pelas correções e adições de elemento de liga. O principal fator que distingue essas classes é a morfologia quanto ao tipo da grafita (DAWSON; SCHROEDER, 2004a).

No ferro fundido cinzento a estrutura de lamelas assegura a este material boa usinabilidade em função da melhor condutividade térmica e amortecimento (JUNIOR; GUESSER; SCHMIDT, 2011). As lamelas de grafita com superfície lisa do ferro fundido cinzento promovem o início de trincas tornando-o frágil, o que não ocorre com o vermicular, uma vez que o entrelaçamento da grafita em função da morfologia impede a trajetória das fraturas naturais (KUZU; BIJANZAD; BAKKAL, 2015).

Na Figura 4 apresenta-se uma imagem da microestrutura do ferro fundido vermicular.

Figura 4 – Microestrutura ferro fundido vermicular ataque nital 3%



Fonte: Própria autora (2020).

No ferro fundido vermicular (CGI) a grafita está presente na matriz em forma de “vermes” com formato alongado e aleatório de cantos arredondados e interconectados, não atuando como concentrador de tensões, propiciando maior transferência de calor comparado ao nodular, porém algumas partículas na forma nodular também estão presentes na matriz e este é um fator necessário ser controlado em virtude do aumento da rigidez e resistência mecânica em função

do aumento da nodularidade e conseqüentemente redução da usinabilidade (DAWSON, 2009; DAWSON; SCHROEDER, 2004b).

De acordo com a norma ASTM842/85 uma das variáveis mais importantes no ferro fundido vermicular e que influencia diretamente suas propriedades, é o grau de nodularidade fundamental níveis menores que 20% o qual contribui para o aumento da vida da ferramenta de corte (DAWSON et al., 2001).

2.1.2 Processo de obtenção do ferro vermicular

Considerado o ferro fundido mais moderno, sendo o intermediário entre o ferro em flocos e nódulos, não apresentando diferença significativa do ponto de vista da composição química, comparado com cinzento e nodular onde cada um contém aproximadamente 94% de ferro, 3% de carbono, 2,5% de silício e o restante de elementos residuais de fusão e de liga, onde para o ferro fundido vermicular o percentual de magnésio deve estar presente entre 0,01% a 0,02% (DE SOUSA; SALES; MACHADO, 2018).

Para elaboração do *Compacted Graphite Iron*, mais conhecido como ferro fundido vermicular, realiza-se um processamento do metal onde o produto obtido deverá ficar entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Inicialmente pode-se adicionar magnésio para atuar como nodulizante de maneira a não ser suficiente à obtenção de ferro nodular, uma segunda forma é adicionando elementos que sejam nodulizantes propiciando a formação do ferro nodular juntamente com elementos anti-nodulizantes como Ti (HOLLINGER, 2014).

A presença do titânio na segunda forma de obtenção do ferro fundido vermicular caracteriza forte tendência a formação de carbonetos o que dificulta o processo de usinagem reduzindo a vida útil da ferramenta, verificando-se que percentuais de 0,01% a 0,02% são suficientes para redução da vida em aproximadamente metade do tempo (KUZU; BIJANZAD; BAKKAL, 2015).

2.1.3 Classificação do Ferro Fundido Vermicular

Normas como ISO, SAE, VDG, ASTM para designação do CGI (*Compacted Graphite Iron*) nacionais e internacionais foram desenvolvidas especificando as classes quanto ao percentual de nodularidade e microestrutura. Em 2006 designou-se para o ferro fundido vermicular (CGI) uma abreviação “GJV” e subdivisões para esta classe como: GJV 300 (ferrítico), GJV 350, GJV 400, GJV 450 (perlítico) e GJV 500 (ligado) (DAWSON;

SCHROEDER, 2004b). Na ISO16112/2017 apresenta a classificação dos ferros fundidos de acordo com suas propriedades, especificando cinco grades para o ferro fundido vermicular conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de ferro fundido vermicular de acordo com ISO116/2017.

Classe ISO 16112	LR min (MPa)	LE min (MPa)	Alongamento min (%)	HB 30 (faixa típica)
JV-300/S	300	210	2,0	140-210
JV-350/S	350	245	1,5	160-220
JV-400/S	400	280	1,0	180-240
JV-450/S	450	315	1,0	200-250
JV-500/S	500	350	0,5	220-260

Fonte: Adaptado ISO1162/2017.

2.1.4 Usinabilidade do ferro fundido vermicular

Uma desvantagem na utilização do CGI quando comparado com o ferro cinzento seria sua baixa usinabilidade, elevando o custo de produção. A utilização de titânio na obtenção do ferro fundido vermicular propicia a precipitação de inclusões de carboneto de titânio o que se torna um problema comprometendo a usinabilidade (MOCELLIN.F, 2004).

Usinabilidade é a relativa facilidade com que o material pode ser usinado, utilizando de ferramentas e condições de corte adequadas. De acordo com Ferraresi (2003), a usinabilidade retrata, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão a definição quanto a estas propriedades foi definida por (TRENT, M. C., WRIGHT, 2000) como um fator indicativo do índice da usinabilidade.

Segundo (MOCELLIN.F, 2004) o ferro fundido vermicular 100% perlítico apresenta 44% de usinabilidade comparado com o ferro cinzento, e 67% de usinabilidade os ferros vermiculares com matriz 84% perlítica.

Valores de alta usinabilidade dos ferros fundidos são confirmados e verificados por meio de baixas taxas de desgaste da ferramenta, alta taxa de remoção do material, força e potência de usinagem baixas e cavacos com fragmentos pequenos facilmente removidos (TRENT, M. C., WRIGHT, 2000).

Na usinagem do ferro fundido cinzento em função da presença do sulfeto de manganês MnS, a oxidação e difusão na ferramenta de usinagem são reduzidas, porém um desgaste químico pode propiciar uma redução na vida útil. Entretanto, quando se usina o ferro fundido vermicular CGI, não ocorre a formação do sulfeto de manganês uma vez que o enxofre combina primeiramente com o magnésio no processo de fusão (WU, 2019).

Os efeitos do teor de titânio adicionados ao metal para melhoria de desgaste da ferramenta de corte bem como a rugosidade do CGI no processo de torneamento, indicaram a diminuição efetiva e significativa da vida da ferramenta (ROSA, S.N; DINIZ, A.E; GUESSER, W.L; ANDRADE, 2010).

O estudo de Dawson sobre o processo de torneamento de CGI, demonstrou uma redução em 50% da vida da ferramenta com um aumento de titânio de 0,01% para 0,02% (DAWSON et al., 2001). Nesse contexto a usinabilidade sempre foi tópico de estudos e a usinabilidade do ferro fundido vermicular ainda pode ser afetada por alguns fatores conforme Figura 5.

Figura 5 – Fatores que influenciam a usinabilidade do CGI.



Fonte: Adaptado de Velichko (2008).

2.1.4.1 Efeito da forma da grafita e perlita

O ferro fundido vermicular também conhecido como ferro de grafite compactado ou CGI, necessita conter 80% de grafita na forma compactada e um percentual de grafita esferoidal de 20%, os ferros fundidos têm suas propriedades predominantemente determinadas pelo tamanho, forma e quantidade de partículas de grafita. A previsibilidade da quantidade de perlita para cada operação de usinagem é difícil, para tanto adota-se que as ligas com baixo percentual de perlita são mais facilmente deformáveis na usinagem em função de serem mais moles e deformáveis, as ligas com alto percentual de perlita são mais duras portanto abrasivas (DAWSON et al., 2001).

Em função da irregularidade da interface entre grafita e matriz, ocorre uma forte adesão, a grafita apresenta-se unida a matriz com morfologia tipo coral não possibilitando a propagação das trincas. Essa condição faz com que a resistência mecânica e tenacidade deste material seja superior aos demais ferros fundidos. No processo de solidificação os ferros fundidos podem apresentar matriz ferrítica ou perlítica dependendo do processo de solidificação. Aumentando o percentual de perlita conseqüentemente aumentará a resistência à tração e dureza os quais impactam na vida útil da ferramenta de corte (MOHAMMED; NG; ELBESTAWI, 2012)

2.1.4.2 Efeito do titânio

O titânio está presente no ferro fundido em até 0,02%, podendo ocorrer a reação com carbono ou nitrogênio formando inclusões de carbonitreto (Ti (C, N)) as quais se formam ainda na fase líquida crescendo de forma cúbica, sendo que essas inclusões se aglomeram e coalescem. No processo produtivo do ferro fundido vermicular o titânio é utilizado para impedir a formação de grafita nodular permitindo maior concentração de magnésio, as adições de titânio reduzem a usinabilidade do ferro vermicular (GUESSER et al., 2001).

2.2 PROCESSOS DE USINAGEM

A busca crescente nos processos de fabricação por materiais que apresentem boa relação entre eficiência e peso se concentram em selecionar materiais que apresentem propriedades e resistência semelhantes ou melhores que o anterior ou melhorando os materiais existentes com adição de elementos de liga. Desde o cenário da primeira revolução industrial o ferro fundido ganha destaque em propriedades e vantagens econômicas sendo o segundo mais produzido após o aço, e após o processo de fabricação estes devem ser processados por usinagem agregando mais valor ao produto (DE SOUSA; SALES; MACHADO, 2018).

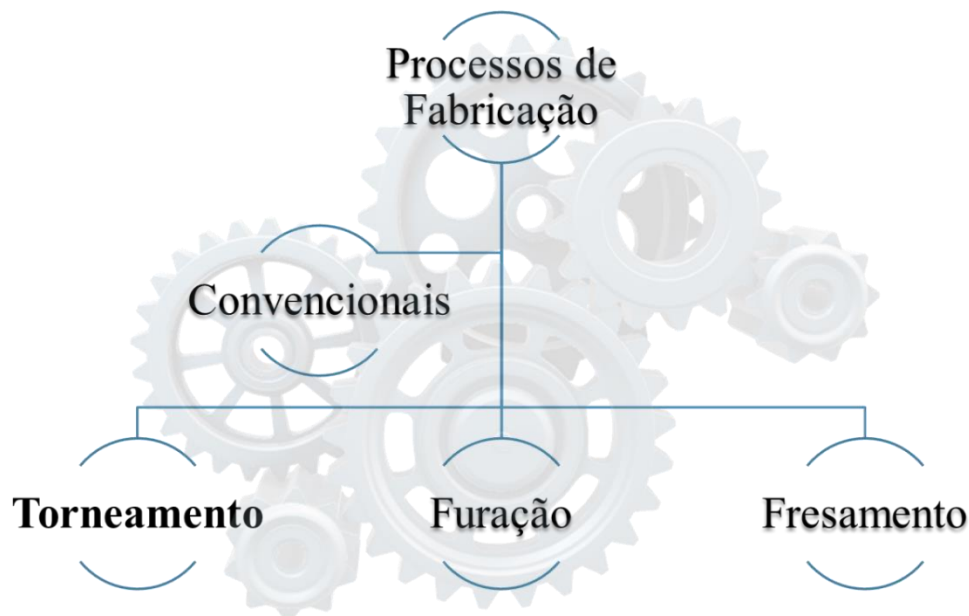
O termo usinagem é utilizado para o processo no qual ocorre remoção de material de uma peça, podendo ser empregado em diversas etapas. Este processo é caracterizado como uma das mais importantes atividades da indústria. A usinagem é um processo de fabricação com remoção de cavaco, conferindo à peça a forma, ou as dimensões ou acabamentos necessários, especificados em projetos, sendo o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 % da produção mundial de metais, empregando milhões de pessoas. Apesar de toda essa popularidade, trata-se de um processo ainda bastante imprevisível (EZUGWU, 2005; MACHADO, 2004).

O objetivo das indústrias é avançar na direção do corte a seco, minimizando ou eliminando os fluidos de corte em função de melhor a remoção de material e em função de problemas ambientais (DEVILLEZ et al., 2011).

A usinagem possui a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, mas envolvendo um número grande de variáveis, tornando muito difícil fazer uma previsão do que ocorre durante o andamento do processo, sendo necessários estudos, para que se tenha um aumento de produção nas operações de usinagem, através dos desgastes da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final da peça ((SOUZA, 2014); HUANG, 2007)).

A Figura 6 mostra os processos de usinagem os quais podem ser classificados como convencionais e não convencionais e estas operações subdividem-se em desbaste e ou acabamento, assegurando integridade e qualidade superficial ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

Figura 6 - Principais processos de fabricação convencionais.



Fonte: Adaptado de Machado (2015).

A evolução dos materiais de um modo geral tem demandado muito dos processos de fabricação, dentre eles, os de usinagem. O surgimento de novos materiais e revestimentos propicia o estudo e desenvolvimento de ferramentas de corte para atender a este mercado (CASTRO, 2012).

2.2.1 Torneamento

O processo de torneamento consiste em um processo mecânico de usinagem no qual pode-se obter superfícies de revolução com auxílio de ferramentas monocortantes. Para que ocorra este processo a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta desloca-se simultaneamente segundo trajetórias em relação ao eixo principal. Este é considerado um dos processos de corte mais significativos em função da possibilidade de gerar uma ampla gama de peças (KUMAR; KUMAR, 2017).

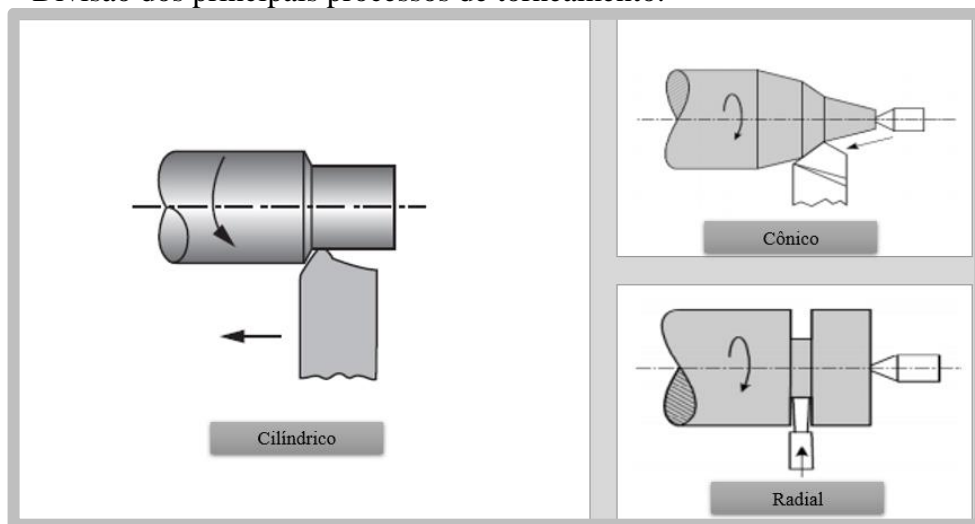
O processo de torneamento pode ser dividido em três formas, conforme Figura 7:

Torneamento cônico: processo no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória retilínea conforme o eixo principal de forma inclinada;

Torneamento cilíndrico: processo pelo qual uma ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela em relação ao eixo de rotação;

Torneamento radial: processo no qual a ferramenta desloca-se segundo uma trajetória retilínea em função do eixo principal perpendicular ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

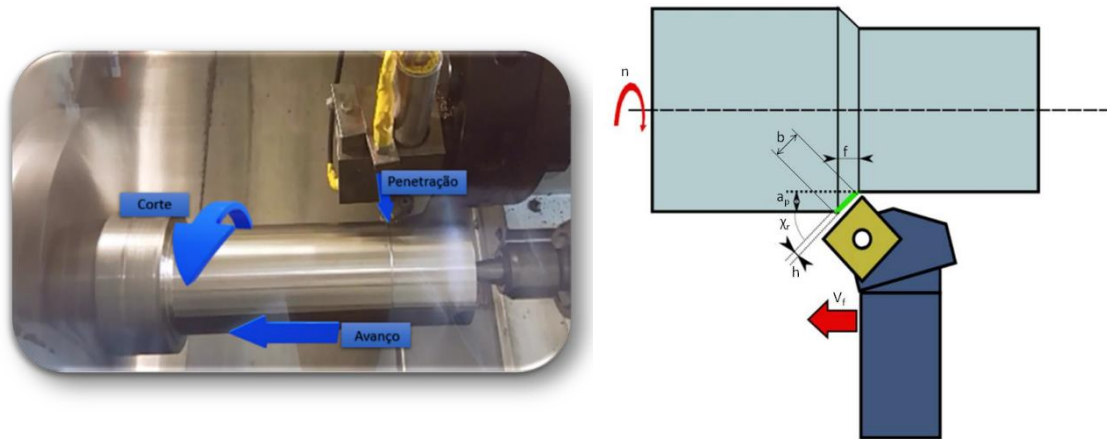
Figura 7 – Divisão dos principais processos de torneamento.



Fonte: Adaptado de Machado (2015).

No processo de torneamento alguns movimentos relativos entre a ferramenta e a peça são realizados conforme Figura 8.

Figura 8 – Principais movimento no processo de torneamento entre ferramenta de usinagem e peça.



Fonte: Própria Autora (2020).

O ângulo de posição (χ_r) está relacionado com a aresta principal de corte, este é o ângulo entre a aresta principal de corte em graus ($^\circ$) com a direção de avanço; (f) é o avanço em cada volta da ferramenta em mm/rotação (mm/rot); (b) é a largura calculada da seção transversal de corte em mm, apresenta o mesmo comprimento da aresta de corte; (a_p) é a profundidade de corte ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça em mm;; (h) é a espessura de corte da seção transversal de corte em mm; (V_c) é a velocidade de corte definida em função da rotação da peça e é medida em metros por minuto (m/min); (V_f) é a velocidade de avanço a qual é determinada em função do movimento de avanço da ferramenta e é medida em milímetros por minuto (mm/min).

O principal movimento que possibilita o corte rotativo é realizado pela peça, também conhecido como movimento de corte. Subsequentemente com o deslocamento da ferramenta ao longo da peça realiza-se o movimento de avanço. A ferramenta é empurrada para o interior da peça regulando a profundidade de usinagem e a espessura do cavaco, esse movimento é conhecido como penetração (KALPAKJIAN, 2005).

Existe uma grande variedade de tornos para executar as operações de torneamento, podendo apresentar diferentes configurações como torno universal, vertical e com comando numérico. Essas operações quando combinadas entre máquina-ferramenta com diversas capacidades é conhecida como centro de torneamento, os quais são máquinas que tem controle numérico capaz de atuar em operações simultâneas em diferentes direções (SOUZA, 2014).

Durante o torneamento a utilização de fluido de corte reduzem o calor gerado em função da redução do atrito entre a ferramenta de corte e cavaco. O fluido também pode transportar o

cavaco para fora da região de corte. Já durante a usinagem a seco; atrito entre peça e ferramenta é maior, podendo resultar em maior desgaste, abrasão e difusão. Os fatores que favorecem a usinagem a seco são a economia em relação aos custos com fluídos refrigerantes e o processo mais limpo, aumentando a vida da ferramenta. O ferro fundido cinzento foi um dos materiais precursores na operação de usinagem a seco no torneamento (MOMPER, 2000).

Grandes avanços ocorreram na usinagem sem fluido lubrificante como, o arrefecimento por vaporização, sistemas criogênicos e melhoria nas propriedades dos materiais para ferramentas de corte, os tornando mais refratários para gerar menos calor destacando-se ferramentas com ligas de cobalto, carboneto de tungstênio, carbonetos revestidos, nitreto de boro cúbico e diamante. Para possibilitar a usinagem com velocidades de corte mais altas, faz-se necessário o desenvolvimento de materiais para ferramentas com destaque aos cerâmicos (SREEJITH; NGOI, 2000).

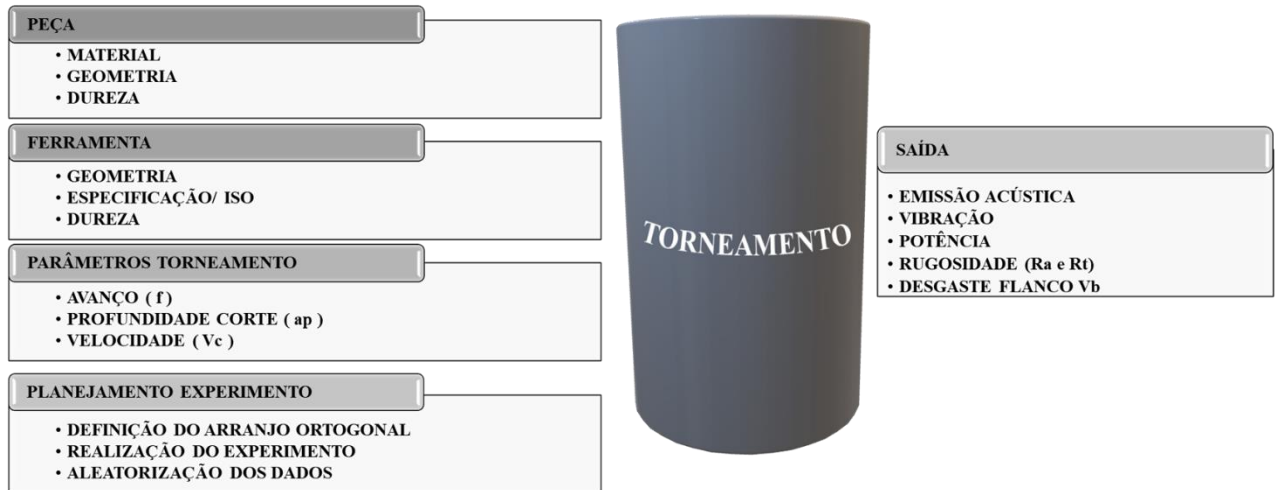
2.2.2 Variáveis de entrada e saída da usinagem

Variáveis de entrada e saída do processo estão compreendidas no processo de usinagem. Algumas destas variáveis, as quais pode-se intervir mediante modificação de parâmetros, são conhecidas como variáveis de entrada, e outras as quais não pode-se intervir diretamente, conhecidas como variáveis de saída, as quais sofrem a influência direta da definição dos parâmetros de entrada (SOUZA, J.V.C., 2005). É fundamental o controle das variáveis de entrada para assegurar produtividade e qualidade dos produtos na saída. As variáveis de entrada, apresentadas na Figura 9, são conhecidas como independentes. Durante o processo de usinagem utilizam-se parâmetros de corte como velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade (a_p), para definição do processo e especificação da ferramenta. Se ocorrerem mudanças em qualquer um dos parâmetros de entrada durante o processo de usinagem escolhido, ocorrerão alterações não previstas nos valores de saída, portanto é fundamental realizar um planejamento adequado (KUMAR; ZINDANI; DAVIM, 2018). Algumas grandezas dos processos de usinagem serão detalhadas a seguir, segundo (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013):

- Velocidade de Corte (V_c) – no torneamento, para o qual os movimentos de corte e avanço simultaneamente ocorrem ao mesmo tempo, a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça.
- Avanço (f) – é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta.

- Profundidade de usinagem (a_p) – para o torneamento é considerado profundidade de usinagem, sendo a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça.

Figura 9 – Parâmetros de entrada e saída no torneamento.



Fonte: Adaptado de Souza (2015).

As propriedades do material da peça como dureza, resistência à tração, composição química, inclusões, afinidade com a ferramenta e microestrutura, devem ser previamente conhecidas, entretanto a geometria da peça como o tamanho e forma, podem ser previamente selecionados, uma vez que estas variáveis influenciarão diretamente no processo de usinagem ou na seleção dos parâmetros de corte. Na usinagem para a remoção de material, utiliza-se uma ferramenta com material mais duro, e mais resistente do que o material da peça, para produzir um bom desempenho durante a usinagem (SOUZA, 2014).

2.2.2.1 Emissão Acústica

Em 1950 na Alemanha foi descoberta a técnica de emissão acústica para monitorar o processo e fabricação. As pesquisas englobam a utilização da emissão acústica no monitoramento das condições de máquinas-ferramenta e análise de processos. A motivação dos estudos iniciais para emissão acústica foram os problemas para detectar o desgaste e a fratura das ferramentas, tornando esta uma ferramenta básica para o processo de corte (DORNFELD, 1997).

A emissão acústica, de acordo com a ASTM E610-77, é classificada como uma série de fenômenos onde ondas elásticas transitórias geradas através da liberação rápida de energia de

uma fonte, ou fontes localizadas dentro de um material, ou por meio de ondas elásticas transitórias assim geradas. Emissão acústica é uma onda sonora que percorre um material em função da liberação de energia de deformação essas oscilações decorrentes dos componentes da força geram movimentos na estrutura da máquina-ferramenta. Estas oscilações são conhecidas por vibrações mecânicas, que podem ser decorrentes de interação do processo de usinagem com a estrutura entre máquina-ferramenta (auto excitados), ou causados por elementos mecânicos da máquina-ferramenta (LI, 2002).

A emissão acústica, (EA) também definida como sendo ondas de tensão elástica, de baixa amplitude e alta frequência, as quais são geradas por atuadores dinâmicos sobre os materiais, conforme este é submetido a um estímulo externo qualquer (como a formação de cavaco), desse modo o atrito entre ferramenta e peça ou mesmo o simples contato promove uma deformação e uma reordenação da estrutura cristalina do material com a liberação de energia de forma suficiente à produzir ondas de tensão, provocando assim deslocamentos sobre a superfície do material (ondas *Rayleigh*), estes são atenuados de forma exponencialmente à medida que se afastam da superfície para dentro do material (MILLER, 1991).

O equilíbrio entre o desgaste da ferramenta de corte e a qualidade superficial da peça associados com a produtividade, são extremamente importantes nas indústrias. É fundamental o controle e monitoramento por meio de sistemas, onde uma variedade de sensores como o de emissão acústica são utilizados para capturar as informações necessárias como o desgaste da ferramenta que pode ser detectado pela aplicação do princípio de detecção de sinais (PAPACHARALAMPOPOULOS et al., 2013).

O resultado da liberação de energia a qual propagar-se-á na forma de uma onda elástica corpos sólidos ou em fluidos onde a velocidade de propagação é dada em função da densidade e do módulo elástico do meio no qual a onda se propagará, como um impacto excitado por um corpo externo incidindo sobre o corpo no qual se verificará a emissão acústica (SREEJITH e NGOI, 2000; SENA, 2007).

A utilização da emissão acústica no monitoramento de processos de fabricação tem sido discutida desde a sua descoberta na década de 50 na Alemanha (DORNFELD, 1997)

De acordo com Blum e Inasaki (1990), os parâmetros de corte influenciam de maneira decisiva na intensidade do sinal de EA e no estado da ferramenta de corte durante as operações de torneamento. O estudo apresentou crescimento da EA com o aumento da velocidade de corte, redução do sinal com o aumento do avanço e a indiferença do sinal às alterações na profundidade de usinagem (MORIWAKI, 1983).

2.2.2.2 Vibrações

Durante o processo de usinagem, ocorre deformação plástica e atrito entre o cavaco, e a ferramenta de corte com a peça produzindo vibrações em função do tempo de corte desgastando a ferramenta, sendo a vibração considerada um movimento ondulatório o qual propaga-se por meio dos materiais variando com o tempo. As vibrações em um sistema podem ser classificadas como vibrações livres, forçadas, as vibrações auto excitadas associadas aos processos de manufatura como a retificação, o fresamento e o torneamento. Essa vibração denominada auto excitada ou *chatter* ocorre em função do movimento de atuação da ferramenta de corte sobre a peça durante usinagem, e o atrito que ocorre entre a superfície usinada e o flanco da ferramenta são umas das causas de vibração (STEMMER, 1995).

O processo de vibração nas máquinas durante o torneamento é um tipo de oscilação associada com a flexibilidade da máquina, ferramenta de corte e da peça de trabalho. Sua avaliação no processo de usinagem é importante para avaliar com precisão o processo e evitar vibrações planejando de forma eficaz do processo de corte (STEPAN et al., 2017a).

A vibração apresenta limitações quanto ao monitoramento nos sinais em função de não apresentarem variação somente com o desgaste, mas sim com a interpolação de desgaste, parâmetros da usinagem e geometria do inserto, onde algumas particularidades podem ser observadas como:

- Com aumento da dureza e tenacidade a vibração tende a diminuir expressivamente;
- Com aumento progressivo da velocidade de corte, há maior vibração na ferramenta;
- Com aumento da profundidade de usinagem (a_p) há tendência de maior vibração na ferramenta;
- O avanço é quase desprezível para vibração (DINIZ, A. E.; HARA, 1999).

2.2.2.3 Potência de Corte

No processo de usinagem, o motor necessita gerar potência mecânica de forma proporcional a potência, juntamente com as forças de corte no processo, sendo o produto das forças pela velocidade de corte. As forças irão influenciar na qualidade dimensional da peça, assim como no desgaste e rugosidade. Conhecer essas forças possibilitam o cálculo prévio da

potência e sua relação em função do desgaste nas ferramentas ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

A força “F” na usinagem é a força atuante no gume na operação de corte e as suas componentes da decomposição ortogonal geram a componente “F_z”, a projeção sobre o sentido do corte é conhecida como força de corte (F_c); e a normal à direção de corte “F_x”, a projeção na direção do avanço é conhecida como força de avanço (F_f), a radial “F_y”, e a força a qual se projeta perpendicularmente em relação ao plano de trabalho é a força passiva ou de profundidade (F_p) (KÖNIG; KLINGER; LINK, 1990).

No desgaste de flanco as forças aumentam em função do aumento da área de contato entre peça e ferramenta. Em velocidades de corte mais baixas, a ferramenta desgasta, com aumento ocorrem alterações no desgaste e acomodação com redução do desgaste. O desgaste de flanco ocorre em função dos mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo (DIMLA, 2000).

2.2.3 Rugosidade

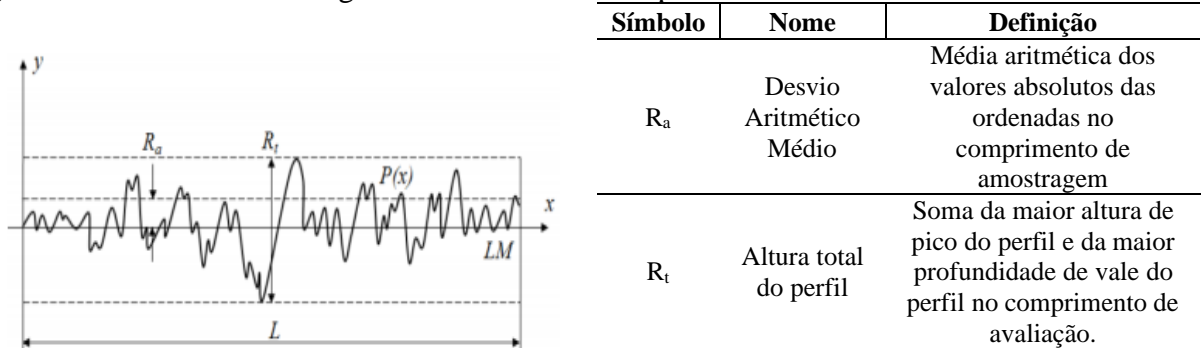
O desempenho funcional de qualquer componente que pode sofrer influência da qualidade e confiabilidade da superfície produzida, tanto em termos de qualidade topográfica, metalúrgica, assim como estado mecânico das camadas mais profundas. Esforços foram realizados por diversos pesquisadores para investigar as relações entre parâmetros do processo de usinagem, a natureza das alterações superficiais produzidas e os efeitos no desempenho quanto a funcionalidade do produto. Os aspectos relacionados à qualidade de uma superfície usinada podem ser divididos em quatro parâmetros: rugosidade, ondulações e marcas (FIELD; KAHLES; JOHN, 1972).

O conjunto de irregularidades na superfície da peça, as quais podem ser avaliadas com aparelhos como o rugosímetro, é conhecida como rugosidade, e é fundamental no comportamento dos componentes mecânicos, influenciando diretamente na qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, resistência na superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes (NBR ISO 4287, 2008).

Nos processos de usinagem a qualidade superficial é classificada em termos de parâmetros para rugosidade como erros micro geométricos pré-existent nas superfícies das peças expressos pela rugosidade média ou pela rugosidade total. Rugosidade média (Ra) é definida em termos gerais como sendo o valor médio aritmético atribuído a todos os desvios do perfil com relação a uma linha média especificada em um comprimento de medição L. Rugosidade total (Rt) é definida como a distância entre duas linhas que estão paralelas à linha

média e que tangenciam o perfil com pico mais elevado e no vale mais profundo para um comprimento de medição L ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015), os parâmetros R_a e R_t podem ser observados conforme Figura 10.

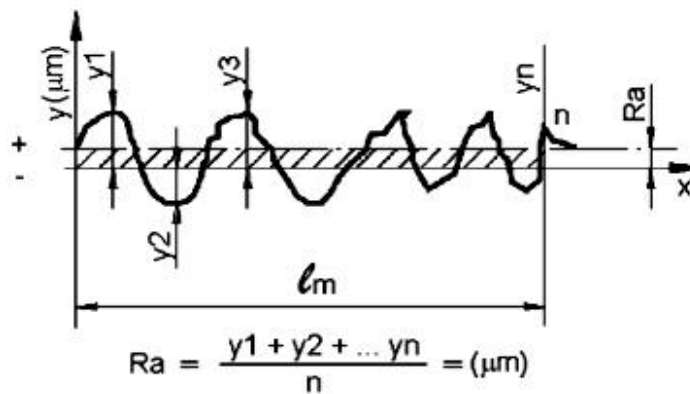
Figura 10 - Parâmetros de Rugosidade R_a e R_t de comprimento L .



Fonte: Adaptado de Souza (2015).

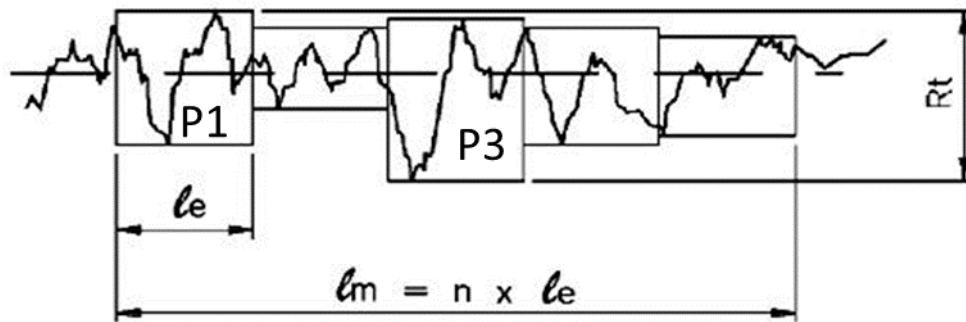
A rugosidade média ou *roughness average* é uma média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em y relacionada com os pontos do perfil de rugosidade em relação à linha mediano percurso total L_m , podendo corresponder a uma altura de um retângulo, onde a área é à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média conforme Figura 11.

Figura 11 – Perfil de Rugosidade R_a ao longo do comprimento L_m .



Fonte: Adaptado Rosa (2006).

A rugosidade R_t é correspondente à distância vertical do pico mais alto com o vale mais profundo ao longo do comprimento L_m . Na Figura 12, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo P_1 , e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo P_3 . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade R_t .

Figura 12 – Perfil de Rugosidade R_t ao longo do comprimento l_m .

Fonte: Adaptado Rosa (2006).

Na análise de rugosidade utiliza-se o comprimento de amostragem na direção do eixo x utilizado para identificar as irregularidades características no perfil conhecido como l_e ou l_r e o comprimento de avaliação l_n ou l_m comprimento no eixo x o qual estabelece o perfil sob avaliação o comprimento de amostragem será igual ao *cut-off* (valores presentes na Tabela 2). O *Cut-off* é um parâmetro padrão o qual filtra o perfil, separando o que é rugosidade, ondulação ou desvios de ordem superior, numericamente especifica a frequência limite superior ou inferior as quais serão mantidas ou eliminadas não deve ser confundido com a distância a qual o apalpador percorre (ROSA, 2006). A norma ABNT NBR ISO 4288 (2008), determina os valores de cut-off o qual depende dos valores da distância entre os sulcos os quais são determinados em função do avanço.

Tabela 2 – Comprimentos de amostragem para medição da rugosidade.

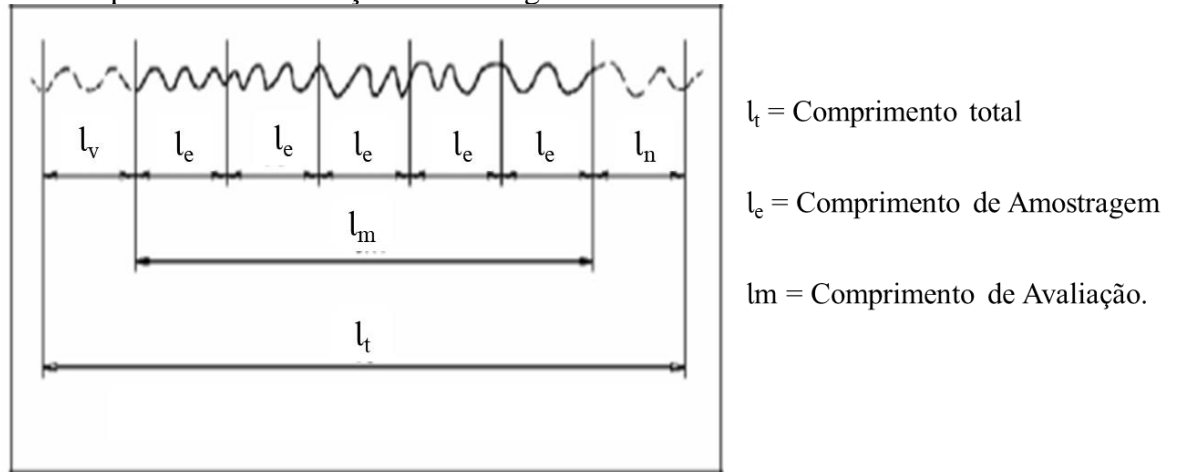
R_{Sm} (mm)	Comprimento de amostragem da rugosidade (mm) l_r	Comprimento de avaliação da rugosidade (mm) l_n
0,013 $R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4
0,04 $R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25
0,13 $R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4
0,4 $R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5
1,3 $R_{Sm} \leq 4$	8	40

Fonte: Adaptado ISO 4288 (2008).

Onde: R_{Sm} valor médio da largura de um perfil.

O acabamento de uma superfície posterior a usinagem, conforme Figura 13, é produto do processo entre fatores como a ruptura, geração de calor, vibração, tensões residuais e reações químicas, propiciando diferentes efeitos na superfície, porém deve manter a qualidade e integridade quanto a ondulações e rugosidade ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

Figura 13 - Comprimento de avaliação e amostragem.



Fonte: Adaptado Rosa (2006).

No torneamento a determinação da vida das ferramentas depende de especificações finais da peça usinada. Para se definir o momento de substituição das ferramentas utiliza-se como um dos parâmetros o limite de desgaste de flanco ($V_{Bmax} = 0,3$ mm) e a rugosidade da peça usinada (KUNDRÁK et al., 2008).

O controle da saída do processo quanto a qualidade é medida pela avaliação da rugosidade sendo este um parâmetro específico analisado em acordo com a aplicação da superfície usinada. A rugosidade de uma superfície compreende irregularidades finas ou erros micro geométricos, resultado da ação do processo de corte. esta por sua vez é dependente de vários parâmetros como: máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem (RISBOOD; DIXIT; SAHASRABUDHE, 2003).

2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

No início do século XX, com o aprimoramento dos processos produtivos e desenvolvimento de materiais mais resistentes e difíceis de usinar, cresceu a busca por ferramentas que atendam a estes materiais e nesse contexto se destacam as ferramentas de aços

rápido e carboneto de tungstênio, as quais possibilitam a usinagem de diversos materiais metálicos (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016).

A realização de seleção de um material adequado para ferramentas de corte depende diretamente de fatores como a operação de corte, material da peça, e acabamento. É de fundamental importância que a ferramenta apresente resistência ao impacto e choque, resistência ao desgaste, e inércia química. É necessário o conhecimento dos diferentes elementos de liga os quais impactam nos diferentes tipos de material conferindo a este maior dureza e resistência ao desgaste, resistência ao impacto, dureza em altas temperaturas de corte (KALPAKJIAN, 2005).

No processo de usinagem utiliza-se como ferramenta de corte, materiais mais resistentes do que o material da peça a ser usinada. Dentro deste princípio da relação de dureza relativa, ganha destaque o desenvolvimento de novos materiais que apresentem propriedade de resistência mecânica e dureza elevadas, as quais contribuem no surgimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem, dessa forma as ferramentas de corte exercem importância fundamental, tanto no aspecto econômico quanto no resultado final das peças (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

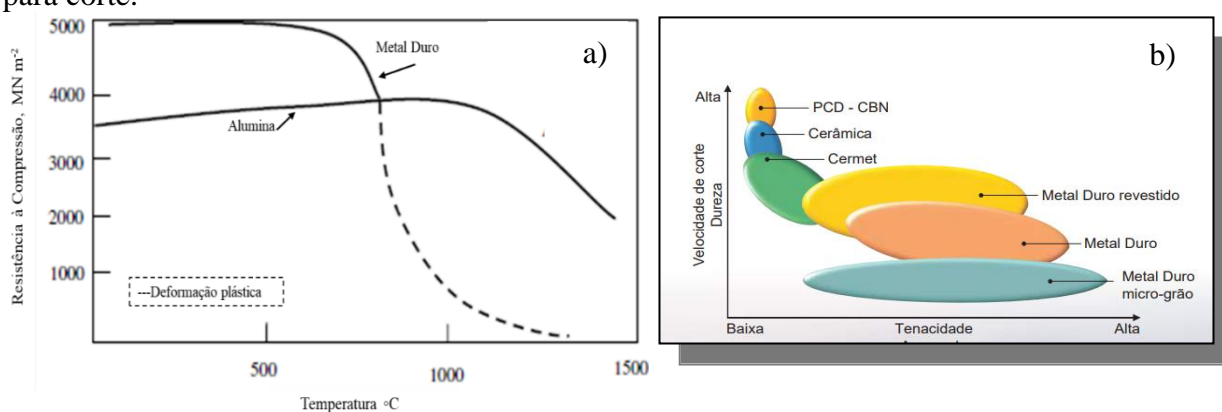
Durante o processo de usinagem as ferramentas estarão susceptíveis a alta temperatura em função do atrito com o cavaco e a superfície da peça, solicitando da ferramenta algumas propriedades como:

- Dureza para assegurar a resistência ao desgaste e resistência mecânica. Essa dureza a frio na aresta de corte da ferramenta necessita de um valor três vezes maior que a dureza da peça. As ferramentas cerâmicas que apresentam maior dureza à temperatura ambiente são as de alumina (2000 HV), mesmo que os insertos cerâmicos não atinjam a dureza adequada na temperatura ambiente este fator não deve ser avaliado de forma isolada em virtude da variação da dureza a quente variar em função da interface ferramenta-peça (NAKAYAMA; ARAI; KANDA, 1988). Alguns materiais são classificados conforme Figura 14 b, em função da velocidade de corte com dureza e tenacidade.
- Resistência ao choque térmico em alterações bruscas de temperatura, ou em um corte interrompido, interrupção do fluido refrigerante podem propiciar fraturas na ferramenta cerâmica.
- Resistência mecânica em função da possibilidade de falha por fratura frágil, em geral essa ruptura ocorre de forma catastrófica a partir da propagação de uma trinca. O metal duro pode apresentar a queda da resistência mecânica em função da temperatura de trabalho, os materiais cerâmicos apresentam comportamento inverso e a sua resistência

a tração é baixa, razão esta da escolha de ângulos de saída negativos em função da resistência compressiva dificultando a falha prematura. A resistência mecânica para alumina pode ser verificada na Figura 14a.

Propriedades como dureza e tenacidade tornaram-se um desafio para os fabricantes uma vez que alta dureza está associada a baixa tenacidade, para conciliar ambas propriedades necessita de um controle do processo de fabricação, refinamento dos grãos e tratamento. Em uma ferramenta de corte as propriedades desejadas são: alta dureza; tenacidade que evite a falha por fratura; resistência ao desgaste abrasivo; boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas (SOUZA, 2004).

Figura 14 – a) Variação da evolução da temperatura em função da resistência a compressão da alumina e metal duro; b) Variação da dureza em função da tenacidade dos diferentes materiais para corte.



Fonte: Adaptado de Ezugwu (2016).

- Resistência a reações químicas em função da incidência de altas temperaturas na interface do cavaco com a ferramenta e conseqüentemente da ferramenta com a peça, ocorre o desgaste da ferramenta em processo difusivo, mecanismo observada em altas temperaturas e para temperaturas mais baixas, predomina o desgaste abrasivo. A ferramenta de alumina por apresentar inatividade química é ideal para ferramenta cerâmica (SOUZA, 2015).

Os materiais para ferramentas de corte de destaque no processo de usinagem do ferro fundido vermicular são CBN (nitreto cúbico de boro), metal duro e cerâmica (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016).

2.3.1 Metal duro

As ferramentas de metal duro propiciaram grande avanço na linha de materiais de corte, em virtude da sua elevada dureza e resistência ao desgaste, esta grande descoberta aconteceu em 1926, na Alemanha e foi batizado de *Widia* (*Wie Diamont*, em alemão, como o diamante), em função de sua semelhança com diamante. O metal duro é composto inicialmente por carbeto de tungstênio e cobalto. Seu processamento é pela rota da metalurgia do pó assegurando precisão dimensional. Nas primeiras produções da ferramenta de metal duro contendo WC e Co, os resultados na usinagem de ferro fundido cinzento e materiais não ferrosos foram excelentes, entretanto a resistência ao desgaste não foi satisfatória. Para melhorar essa deficiência foi adicionado à este os carbonetos de titânio, tântalo e ou nióbio, os quais melhoraram o desempenho ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

O metal duro conhecido como *hard metal* ou *cemented carbide* parte inicialmente dos materiais precursores na forma de pó, sendo eles o carbeto de tungstênio (WC), o componente principal, e o cobalto (Co) ligante. A NBR ISO513-2013 versão atualizada 2015 relaciona três grupos de metais-duros às letras maiúsculas P,M e K e um código de cores (azul, amarelo e vermelho) conforme Figura 15. A classe P é constituída de metais duros com alto teor de TiC + TaC conferindo ao material elevada dureza e resistência as desgaste, a classe M apresenta propriedades intermediárias para usinagem de aço inoxidável em geral, a classe K foi a primeira a ser desenvolvida, composta de WC aglomerados por cobalto para os ferros fundidos. Em geral utiliza-se o grupo ISO K, posteriormente criaram-se as classes N, S e H com composição similar as primeiras classes e a escolha baseada na composição química (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

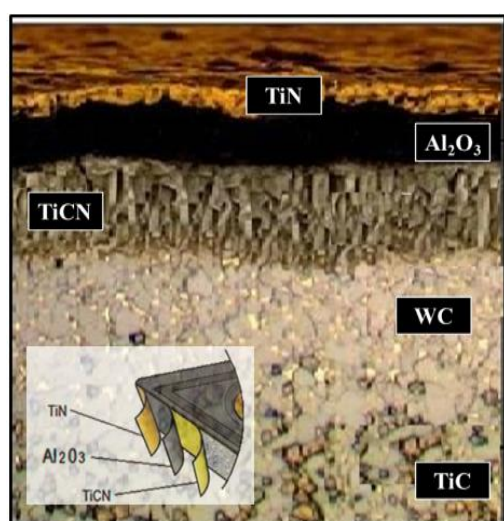
A classe ISO K atende a usinagem dos ferros fundidos os quais possuem cavacos curtos, a usinagem dos ferros fundidos cinzentos (GCI) e os ferros fundidos maleáveis (MCI) são fáceis porém os ferros fundidos nodulares (NCI), ferros fundidos vermiculares (CGI) e ferros fundidos austemperados (ADI) são mais difíceis, todas as classes de ferros fundidos contêm SiC (carboneto de silício) material extremamente abrasivo para a aresta de corte (SANDVIK, 2019).

Buscando uma otimização das ferramentas estas são revestidas com substrato de metal duro. A finalidade dessas camadas é melhoria na resistência ao desgaste da camada superior esta entrará em contato com cavaco, essa deposição pode ser por processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*) sendo o processo mais popular em função da boa difusão revestimento-substrato e o PVD (*Phisical Vapour Deposition*) o material do revestimento é transportado na

forma de íons, moléculas ou átomos obtidos por aquecimento, feixe de elétrons ou feixe de laser (STEMMER, 1995).

Na indústria utiliza-se alguns revestimentos e cada um destes apresentam características como dureza, aplicação e cor. O carboneto de titânio (TiC) possui afinidade com o metal duro sendo aplicado em finas camadas de 4 a 8 μm , possui excelente adesão a parte do núcleo da ferramenta de corte, apresenta dureza de 3000 HV resistência ao desgaste por abrasão quase nenhuma soldagem com a peça. O outro revestimento é o carbonitreto de titânio (TiCN) o qual é resistente ao desgaste de flanco (Vb). O TiC apresenta estabilidade química como o TiN, o que confere a este material resistência ao desgaste de cratera e oxidação. O óxido de alumínio (Al_2O_3) é o melhor material quanto a estabilidade química encontrado na natureza, em função disso é utilizado como cobertura para manter a estabilidade química do núcleo da ferramenta impedindo desgaste por difusão de átomos da peça para a ferramenta. Outro fator fundamental do óxido de alumínio é a redução da condutividade térmica com o aumento progressivo da temperatura, garantindo barreira térmica na superfície da ferramenta (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013; STEMMER, 1995). O revestimento de múltiplas camadas possibilita a união das características individuais de cada material para melhorar a vida útil da ferramenta, conforme Figura 15.

Figura 15 – Ferramenta de metal duro com múltiplas camadas ISO 513/2015 e classes de metal duro.



IDENTIFICAÇÃO	COR	MATERIAL USINADO	METAL DURO	RESISTÊNCIA AO DESGASTE	AUMENTO DA TENACIDADE
P	AZUL	AÇOS, EXCETO INOX	P01;P05;P10;P15;P20;P25;P30;P35;P40;P45;P50	↑	↓
M	AMARELO	AÇO INOX E DUPLEX	M01;M05;M10;M15;M20;M25;M30;M35;M40	↑	↓
K	VERMELHO	FERRO FUNDIDO	K01;K05;K10;K15;K20;K25;K30	↑	↓
N	VERDE	MATERIAIS NÃO FERROSOS	N01;N05;N10;N15;N20;N25;N30	↑	↓
S	MARROM	SUPERLIGAS E TITÂNIO	S01;S05;S10;S15;S20;S25;S30	↑	↓
H	CINZA	AÇO TEMPERADO	H01;H05;H10;H15;H20;H25;H30	↑	↓

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR ISO 513 (2015).

2.3.2 Ferramenta cerâmica

Os materiais cerâmicos se apresentam em sua maioria na forma de carbetos, nitretos e óxidos para cerâmicas avançadas, e para cerâmicas tradicionais em um processamento simples composto por argilominerais e areia, compostos por elementos não-metálicos e metálicos. Apresenta baixa condutividade térmica, dureza à quente, baixa resistência à tração, boa estabilidade química ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015). Cerâmicas avançadas são iônicas ou covalentes, possuindo propriedades específicas que as levam a uma série de aplicações tecnológicas, com destaque aos óxidos de alumínio (Al_2O_3), de zircônio (ZrO_2), nitreto de silício (Si_3N_4), e nitreto de boro (BN).

Na Alemanha em 1905, foram iniciados estudos para possível aplicação da cerâmica como ferramenta de corte. A primeira patente da cerâmica a base de alumina foi em 1912, contendo teor de alumina (Al_2O_3) superior a 99%, e seu processamento seguia a rota de prensagem a quente e utilização de pequena quantidade de agente sinterizante como MgO, NiO, Cr_2O_3 , TiO. Porém esta ferramenta não apresentou boa resistência ao impacto, sendo adequado somente a ferros fundidos com dureza Brinell (HB) menores que 230 e para aços dureza Rockwell (HRC) menores que 38 em função da abrasão em altas temperaturas (LIKE et al., 2007).

Dentre os materiais cerâmicos utilizados como ferramenta de corte na usinagem, destaca-se a cerâmica de óxido de alumínio (Al_2O_3), que se apresenta de forma estável como alfa alumina. Estes insertos cerâmicos se dividem nos materiais praticamente puros com 98% de alumina e os materiais contendo 90% de alumina juntamente com outros óxidos como SiO_2 , MgO, Cr_2O_3 , Fe_3O_4 (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016). Estes materiais apresentam em geral alta densidade contendo menos que 3% de porosidade. Em função de apresentar ótimas propriedades como dureza a quente, é possível usinar em altas velocidades de corte, porém em função da baixa condutividade térmica o que dificulta a transferência de calor atingindo altas temperaturas na região próxima ao contato cavaco-ferramenta. A baixa tenacidade pode propiciar trincas e quebra abrupta das ferramentas (TRENT, M. C., WRIGHT, 2000).

As aplicações das ferramentas cerâmicas com altas temperaturas são uma realidade enquanto as ferramentas de metal duro, aço rápido, cermet atingiram o limite em seu potencial de aplicação em função da temperatura de fusão. Em função disso ferramentas cerâmicas ganham mais espaço devido às poucas opções de materiais para utilizar em altas temperaturas com baixa densidade, inércia química, alta resistência à abrasão e alta dureza, potencial para satisfazer as necessidades dos processos atuais. Podendo-se afirmar que as ferramentas

cerâmicas possuem potencial de aumento da produtividade devido a sua combinação única de propriedades (SOUSA, 2013).

As ferramentas cerâmicas de alumina são utilizadas principalmente no desbaste e acabamento de ferros fundidos (STEMMER, 1995).

Estas ferramentas apresentam como justificativa a seu emprego a não utilização do fluido de corte e como principal benefício na usinagem à seco com cerâmicas é redução de custos, ambiente de manufatura saudável, segurança do trabalhador, proteção dos efeitos adversos das químicas e proteção ao meio ambiente, por muito tempo, em virtude das limitações dos materiais de ferramentas de corte disponíveis, o uso de fluidos de corte era parte integral e portanto essencial do sistema máquina e ferramenta. O custo médio de utilização de fluidos de corte é de 17% da manufatura, a não utilização deste representa expressivo valor no processo produtivo (EZUGWU, 2005; POPKE; EMMER; STEFFENHAGEN, 1999).

2.3.2.1 Alumina Al_2O_3

Em geral os óxidos dos elementos da tabela periódica pertencem a materiais cerâmicos, estes materiais de óxido cerâmico são caracterizados por sua ligação iônica e, portanto não apresentam condutividade eletrônica, o que explica sua alta resistência elétrica específica os óxidos são selecionados em função da aplicação a qual se designam os que se destacam são: óxido de magnésio (óxido binário), alumina cerâmica (Al_2O_3), por apresentarem ponto de fusão extremamente altos (Tabela 3). Os óxidos são em geral selecionados para componentes cerâmicos em função do alto grau de pureza (HEINRICH; GOMES, 2000).

Tabela 3 – Propriedades dos Óxidos.

Óxido	Massa específica g/cm^3	Ponto de Fusão $^{\circ}C$	Tenacidade [MPa.m ^{1/2}]
MgO	3,57	2840	3
Al_2O_3	3,99	2050	2,5 -5,5

Fonte: Adaptado de Heinrich (2000).

As cerâmicas a base de óxido de alumínio tiveram seu primeiro uso comercial em 1907, mesmo já havendo pesquisas sobre este material datadas do século XIX. A alumina, coríndom ou *corundum* é um dos cerâmicos de maior importância. Sua utilidade deriva de suas propriedades, sua dureza, resistência mecânica e resistência à abrasão da alumina estão entre os

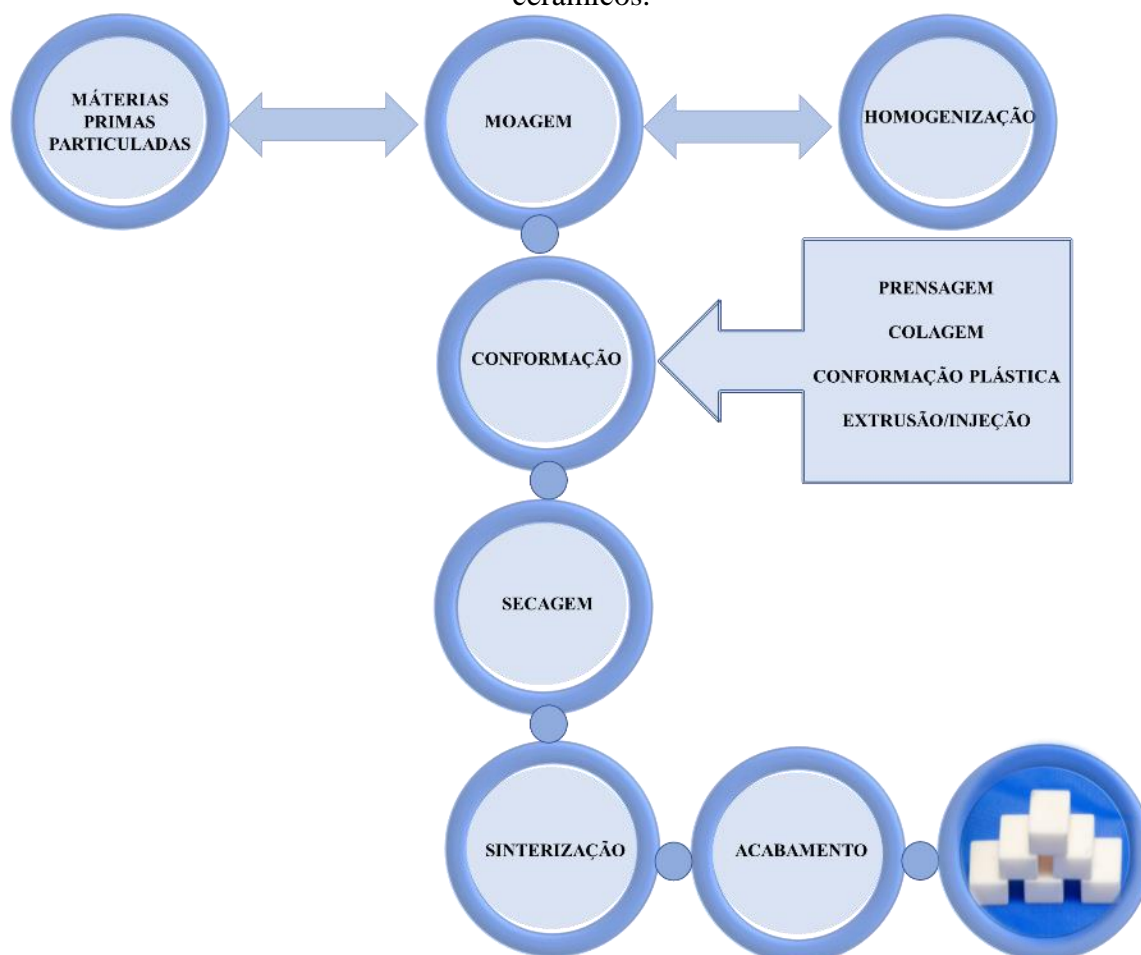
mais altos para óxidos, tornando-o útil para materiais abrasivos, rolamentos e ferramentas de corte. Apresenta massa específica de $3,99 \text{ g/cm}^3$ a expansão de sua utilização se associa ao avanço dos fornos para elevadas temperaturas o que contribui diretamente para melhoria da qualidade do material após sinterização (SALVINI, 2018).

2.3.2.2 Processamento de materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não-metálicos, em sua maioria compreendem compostos entre elementos metálicos e não-metálicos com ligações interatômicas totalmente iônicas ou predominantemente iônicas com caráter covalente. Apresenta configuração eletrônica $1s^2 2s^2 2p^6$ com íon O^{2-} , o que assegura ao óxido cerâmico a transferência completa de elétrons com ligação forte. A existência de planos de deslizamento independentes e ligações iônicas ou covalentes com ordem a longa distância caracterizam os cerâmicos como duros e frágeis com valores de tenacidade baixos e com mecanismo de ruptura (HEIMANN, 2010).

As cerâmicas podem ser classificadas em cerâmicas tradicionais como vidros, produtos à base de argila, louças e refratários, ou cerâmicas avançadas com aplicações como sensores, biocerâmicas, barreira térmica formadas de estrutura óxido como Al_2O_3 (óxido de alumínio), ZrO_2 (óxido de zircônio). Sua sequência de processamento inicia com a obtenção da matéria prima, cominuição do material para homogeneização, compactação, sinterização. Cada particulado influencia no resultado do material cerâmico em função da composição química, ligações atômicas e estrutura (RAHAMAN, 2007). As principais etapas envolvidas no processamento de materiais cerâmicos, são apresentadas conforme Figura 16.

Figura 16 - Principais etapas usualmente envolvidas no processamento de materiais cerâmicos.



Fonte: Adaptado de Pandolfelli, *et al* (2000).

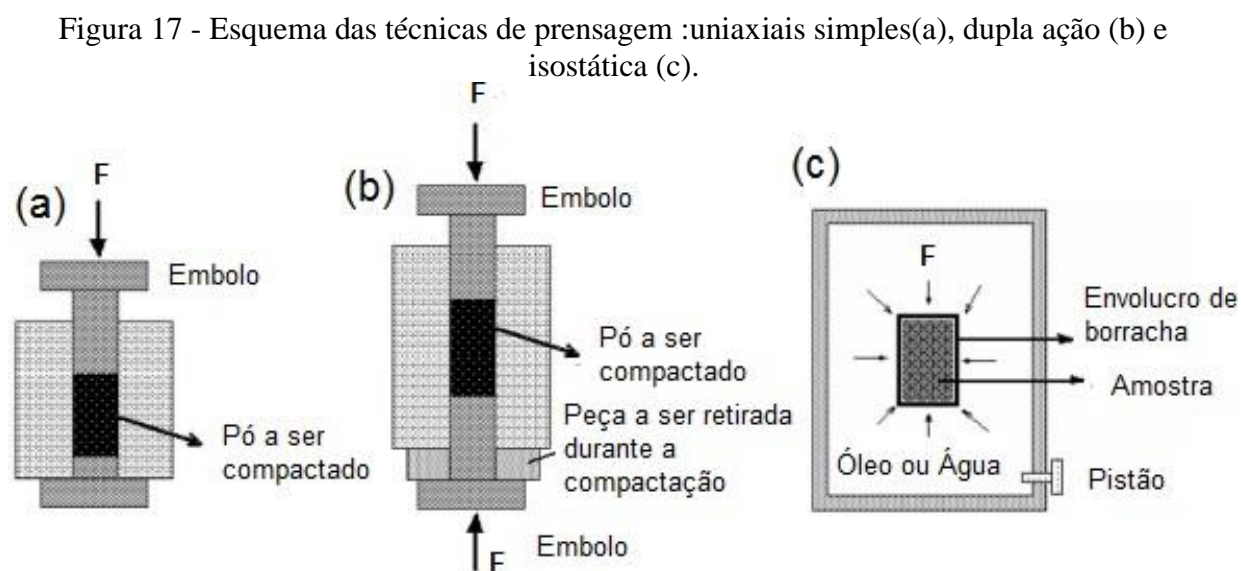
No processo de densificação na sinterização o tamanho do material particulado é fundamental. Dependendo do tamanho ocasionará maior ou menor ativação térmica e química influenciando na sinterização assim como na compactação. Partículas grandes irão gerar grãos grandes, o que reduz a resistência mecânica em virtude da possibilidade de propagar trincas intergranulares ou intragranulares, a redução do particulado e conseqüentemente grãos menores possibilitam a redução de defeitos. Os pós finos propiciam a obtenção materiais com alta densidade e temperaturas mais baixas para queima (KLEIN; HOTZA, 2012).

Para obtenção de um corpo verde, os pós cerâmicos são conformados a seco ou semi-seco através da prensagem do pó em uma matriz ou mistura do pó cerâmico com água ou polímeros orgânicos. É fundamental que exista área de ligação entre as partículas e boa compactação para aumentar a resistência a verde um compacto denso evitando porosidade, a qual diminuem as propriedades mecânicas, por serem concentradores de tensão o que possibilita micro trincas, é fundamental que o material apresente boa tenacidade a fratura (SATO; TAKAHASHI, 2018).

Durante o processo de conformação procura-se dar forma ao objeto cerâmico mais próxima do produto final, podendo ser conformação por injeção, a técnica coloidal, conformação direta ou o método de prensagem com pó cerâmico, água ou aglutinante são compactados por pressão o que resulta em amostra com alto grau de empacotamento e agregação das partículas. O método de prensagem se subdivide-se em três categorias: uniaxial, isostática e prensagem a quente, embora as duas primeiras sejam as mais utilizadas (COBLE, 1961b).

Um pó compactado em um molde metálico com pressão em uma direção é conhecido como uniaxial, método de alta produtividade. A presença de trincas ou distorções após sinterização podem estar correlacionadas a distribuição não uniforme durante a compactação decorrente do atrito existente entre as partículas do pó ou atrito entre as partículas e a parede do molde. Com a finalidade de minimizar esses problemas pode-se utilizar lubrificantes como a estearina para reduzir o atrito com a parede do molde e adicionar ligantes como álcool polivinílico e posterior prensagem isostática, onde é aplicada pressão por meio de um fluido em todas as direções para promover densidade na compactação (CHAIM et al., 2013).

Na Figura 17 são mostrados esquematicamente os princípios das prensagens uniaxiais simples, dupla ação e isostática.



Fonte: Amorós (2000).

Na prensagem isostática é utilizado um molde constituído de várias partes, sendo a principal uma membrana elastomérica flexível, a qual é preenchida pela mistura do pó cerâmico sua superfície externa desta matriz elastomérica deverá ser comprimida por meio de um fluido compressão constante em uma prensa isostática para obtenção do corpo a verde o qual seguirá

para o processo posterior de sinterização. A prensagem uniaxial consiste em conformar peças através da compactação de uma massa aglomerada da mistura cerâmica, dentro de uma cavidade rígida aplicando pressão em uma única direção axial utilizando punções (BRISTOT; BRISTOT; GRUBER, 2014).

2.3.2.3 Sinterização de Cerâmicos

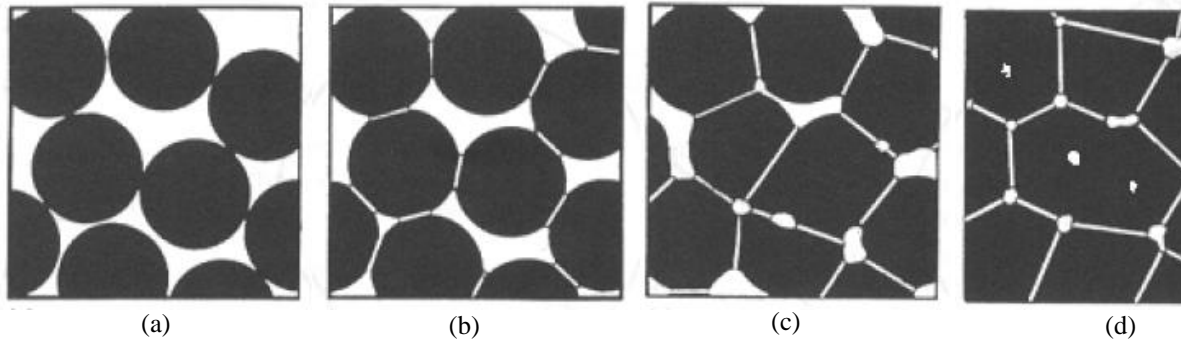
O processo de sinterização ocorre após obtenção dos corpos a verde. Esta etapa do processamento de cerâmicos é para densificação do material compactado. O transporte de matéria possibilita a obtenção de um corpo sólido com a união das partículas dos pós sem fundi-las, mediante tratamento térmico apropriado reduzindo a superfície específica e porosidade (LAKSHMANAN, 2012).

Similar ao processo de conformação, o mecanismo de sinterização exerce influência na geometria, tamanho de grão e poros do material cerâmico, desta forma as microestruturas específicas são oriundas do contato entre as partículas denominadas de sinterização por fase sólida e por fase líquida, os quais pode ocorrer por meio de cinco diferentes mecanismos de transporte (RAHAMAN, 2007).

No mecanismo de sinterização por fase sólida, o transporte de matéria ocorre por difusão, é o processo mais utilizado em sistemas óxidos necessitando de pós muito finos e temperaturas altas para ocorrer a difusão atômica, é o tipo mais comum de sinterização utilizado na produção de materiais cerâmicos não ocorrendo formação de fase líquida e as forças motrizes podem ser a diferença de energia livre e a curvatura entre as partículas (HEINRICH; GOMES, 2000).

A sinterização sólida (Figura 18) consiste em três estágios: inicial onde inicia-se a formação e crescimento de pescoço, contornos de grãos e redução da área de superfície, o pescoço cresce pelo mecanismo difusional, unindo o centro das esferas (Figura 18 b); intermediário com o crescimento de pescoço ocorre uma interconexão com os poros mais arredondados (Figura 18 c) e a difusão de volume neste estágio possibilita maior densificação do material; final é a etapa onde os poros se fecham completando a densificação a qual pode ocorrer por difusão do contorno de grão (Figura 18 d) (COBLE, 1961a).

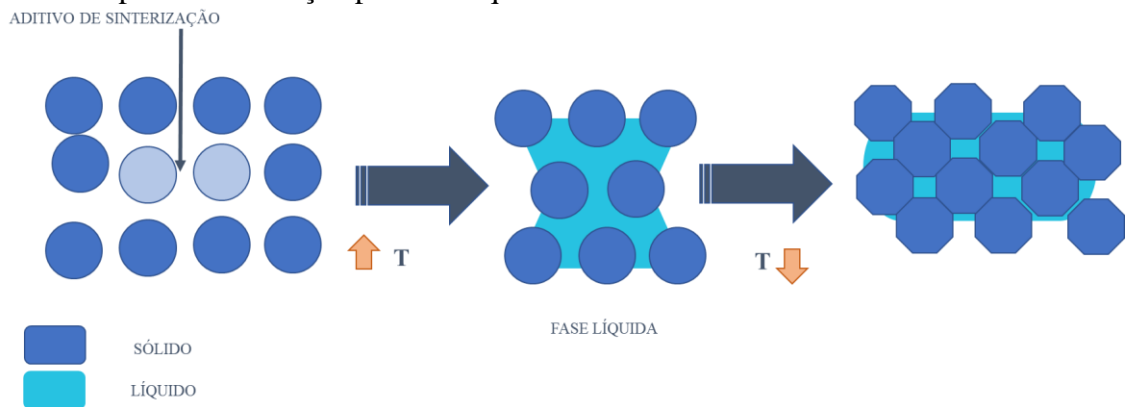
Figura 18– Etapas do processo de sinterização por fase sólida (a) adesão, (b) estágio inicial, (c) estágio intermediário, (d) Estágio final.



Fonte: Adaptado de Rahaman (2007).

O processo de sinterização por fase líquida (Figura 19) consiste na adição de materiais denominados aditivos de sinterização aos pós cerâmicos, formando uma fase líquida entre estas partículas, molhando as partículas sólidas. Este mecanismo pode ocorrer pelo aquecimento do material em temperatura superior à do ponto de fusão ou como produto da reação entre seus constituintes. Essa sinterização com formação de fase líquida é considerada a mais rápida, constituída por três estágios: o inicial é o de rearranjo de partículas, com formação de um material fluido com alta viscosidade se distribuindo pelas partículas e molhando; a etapa final consiste da presença de uma estrutura sólida (coalescência), oriunda do crescimento dos grãos, reduzindo as taxas de contração e densificação, ocorre densificação quando a quantidade de líquido preencher os poros (LIN, J.T; JONGHE, 1997).

Figura 19 – Etapa de sinterização por fase líquida.



Fonte: Adaptado de Barsoum (2003).

2.3.3 Aditivos de sinterização para Al_2O_3

Em função da dificuldade durante a densificação de alguns materiais cerâmicos, pode-se inibir o crescimento dos grãos durante a sinterização com adição de aditivos para obtenção das

propriedades mecânicas almejadas, um parâmetro muito comum na escolha do aditivo adequado é a utilização de materiais que formem pontos de fusão mais baixos em relação ao ponto de fusão da matriz. Para não decompor a matriz cerâmica, porém é fundamental avaliar a estabilidade dos aditivos com a matriz para não ocorrer perda de massa por volatilização. Para sinterização de cerâmicas de alumina o mais comum é utilização do óxido de magnésio (MgO) (BARSOUM, 2003).

A utilização dos aditivos em proporções menores demonstrou-se importante para controlar a microestrutura da alumina, podendo modificar a concentração de defeitos; auxiliar durante a sinterização por facilitar absorção de defeitos pontuais nos contornos. Quando em solução sólida o óxido de magnésio segrega na região do contorno de grão e reduz a mobilidade do contorno gerando um efeito de arraste de soluto, o qual possibilita que os poros se movimentem juntamente com a superfície dos grãos durante o processo de coalescimento, de forma a prevenir o crescimento da alumina e evitando poros intragranulares (RICE, 2000).

O MgO é um dos principais aditivos utilizados na sinterização por facilitar o mecanismo para prevenção do crescimento anormal dos grãos gerando uma uniformidade na microestrutura. Esta capacidade o torna um aditivo com características boas para a sinterização da alumina, agindo diretamente no processo de aceleração do mecanismo difusivo no contorno de grão, proporcionando maior densificação, e redução da porosidade do corpo sólido após sinterizado (LIN, J.T; JONGHE, 1997).

Existe uma correlação entre a resistência mecânica com o tamanho de grão a qual demonstra que os materiais com grãos grandes apresentam tendência a fraturar caso estes apresentem trincas ou poros e na superfície destes grãos grandes, pode haver falhas de usinagem ou poros na superfície, em ambos os casos a fratura do material poderá ocorrer (JOHNSON; COBLE, 1978).

A principal função do MgO como aditivo na sinterização é de não permitir o crescimento exagerado do grão, o que poderia tornar a cerâmica menos resistente mecanicamente. Para utilização foram sugeridos mecanismos de atuação do MgO, somente quando é utilizado em pequenas quantidades na matriz de alumina:

- em solução sólida, o óxido de magnésio MgO concentra-se nos contornos do grão reduzindo sua mobilidade;
- o óxido de magnésio quando em solução sólida aumenta a taxa de densificação em relação a taxa de crescimento de grão, facilitando o transporte de oxigênio ao longo dos contornos de grão (COBLE, 1961a).

2.3.4 Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos

Em virtude de uma ampla variedade de propriedades e aplicações em diversas áreas, é fundamental conhecer as propriedades mecânicas e a caracterização dos materiais cerâmicos, assim como os mecanismos de desgaste, a fim de conhecer como aplicar e a forma como são solicitados mecanicamente sem fraturar. As principais propriedades dos materiais cerâmicos são: tenacidade à fratura e dureza. Nesse contexto, as cerâmicas estruturais como carbetos de silício (SiC), zircônia (ZrO₂) e alumina (Al₂O₃) são as mais usadas como ferramentas de corte, trocadores de calor, e peças de motor, sendo fundamental que apresentem propriedades relevantes como elevada dureza (14 -18 GPa), baixa massa específica, resistência mecânica a altas temperaturas, resistência à corrosão e inércia química (CARTER; NORTON, 2013).

2.3.4.1 Dureza

A dureza é uma propriedade inerente aos materiais sólidos relacionada com a resistência a deformações, as quais são permanentes em função da aplicação de força externa, alguns métodos são: Brinnell, Vickers e Knoop (ACCHAR; SEGADÃES, 2009).

Para o cálculo da dureza Vickers, a marca formada pelo indentador de diamante conforme Figura 20, é medida e seus valores utilizados na equação (1):

$$H = \frac{2 \cdot \text{sen } 68^\circ \cdot P}{d^2} \quad (1)$$

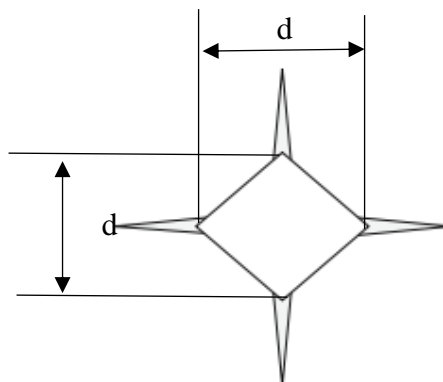
Onde:

H: Dureza Vickers

P: Carga aplicada

d: diagonais (média d1 e d2) da indentação.

Figura 20 - Impressão da indentação Vickers para medida de dureza.



Fonte: Adaptado de Carter e Norton (2013).

A dureza é determinada dividindo a força aplicada, F , pela média das diagonais medidas. Os processos na ponta do indentador são complexos, onde o estresse de indentação é proporcional à tensão de endentação. Trincas podem ocorrer no recuo e isso pode ser usado posteriormente como uma forma de determinar a tenacidade à fratura.

2.3.4.2 Tenacidade à fratura

Os materiais cerâmicos tem cada vez mais se destacado em virtude de elevada resistência mecânica e química em trabalhos de alto desempenho nas aplicações tecnológicas, porém apresenta ainda como desvantagem a baixa tenacidade à fratura (RIBEIRO; RIBEIRO; RODRIGUES, 2014).

De acordo com Ribeiro (2014) a tenacidade à fratura, K_{IC} , é uma das mais importantes propriedades dos materiais cerâmicos que mede a capacidade de um material resistir à propagação de uma trinca em uma peça pré-trincada. Entretanto, a medida dessa propriedade é ainda motivo de discussões e controvérsias, existindo vários métodos, uns padronizados e outros não, além de diversas equações para seu cálculo. Apesar das controvérsias, o método da indentação e posterior medida da trinca, IF (*Indentation Fracture*), é muito utilizado para cerâmicas densas, não porosas, porém para cerâmicas porosas esse método é completamente inútil.

A tenacidade à fratura (K_{IC}) é a medida da resistência de determinado material resistir a propagação inicial de uma trinca, é a capacidade de suportar as falhas.(RIBEIRO et al., 2013)

Os materiais cerâmicos podem apresentar defeitos inerentes de seu processo produtivo, choque térmico ou no processo de usinagem, fatores os quais podem comprometer a tenacidade e resistência mecânica.(YANG; WEI, 2000)

Existem vários métodos para verificação da tenacidade a fratura, o mais comum é o método de indentação sobre uma amostra utilizando indentador Vicker, porém é um método pouco confiável em função do crescimento de trincas na região indentada, a qual na maioria das vezes torna-se difícil a visualização dos limites de propagação dessas trincas (STRECKER; RIBEIRO; HOFFMANN, 2005)

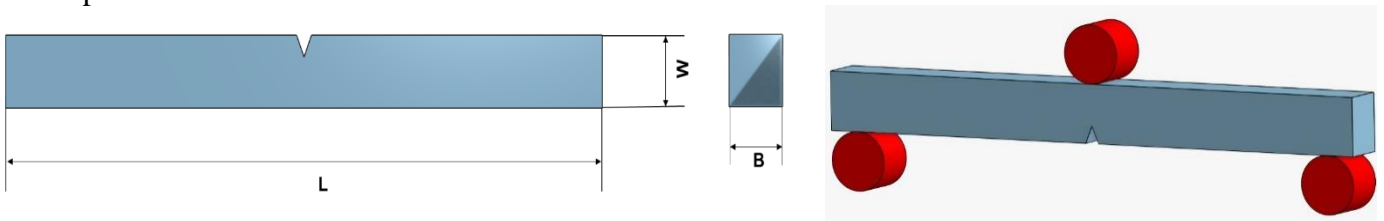
A vida útil de determinada peça estrutural a qual possa apresentar defeitos ou trincas, pode ser inicialmente calculada por meio da propagação dessas trincas através da mecânica da fratura (CRACK, 2019).

Existem alguns métodos para determinação da tenacidade à fratura como: (SCF) *Surface Crack in Flexure* procedimento de fratura superficial em flexão (TORRES et al., 2001a), IF

(*Indentation Fracture*) fratura por entalhe (QUINN; BRADT, 2007), SENB (*Single Edged Notched Beam*) (QUINN; SWAB, 2017), SEVNB (*Single Edge V-Notch Beam*) técnica de borda única com entalhe em V entalhe raso (TORRES et al., 2001b). Todas estas técnicas são importantes na determinação da tenacidade à fratura.

A partir do aprimoramento do método SENB (*Single Edge Notched Beam*) surgiu o método SEVNB (*Single Edge V-Notched Beam*), o qual apresenta grande aceitação (QUINN; SWAB, 2017). A norma ISO23146:2008 foi editada para aprimorar o método SEVNB com a padronização para execução do método (pode-se verificar o esquema do corpo de prova e do ensaio utilizado para o método SEVNB na Figura 21), sendo este o método mais seguro para cálculo do K_{IC} (ISO 23146, 2008).

Figura 21 – Esquema do Cp padrão com dimensões para realização do ensaio de flexão em três pontos com entalhe.



W 4,00 mm ± 0,2 mm

L 35 mm (flexão 3 pontos)

B 3,00 mm ± 0,2 mm.

Fonte: Própria Autora (2020)

Na década de 70, Evans e Charles apresentaram uma técnica para medir tenacidade à fratura, a partir da observação do crescimento de trincas causadas por indentações com ponta Vickers. As medidas da indentação e das trincas radiais que se formam são determinadas por microscopia. Em seguida, basta substituir os valores na expressão (2) desenvolvida e demonstrada por Evan e Charles (EVAN E CHARLES, 1976; CASTRO et al, 2016)

Para o ensaio de flexão em três pontos:

$$K_{IC,SEVNB} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{S_1}{W} \cdot \frac{3\sqrt{\alpha}}{2} \cdot Y^* \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (3)$$

Onde:

$$Y = 1,947 - 5,024\alpha + 11,895\alpha^2 - 18,063\alpha^3 + 14,598\alpha^4 - 4,689\alpha^5 \quad (4)$$

Onde:

K_{IC} = tenacidade à fratura no modo I (MPa.m^{1/2})

F = carga de fratura no instante da ruptura da barra entalhada e flexionada a 3 pontos (N)

B = espessura da amostra (m)

W = altura da amostra (m)

S1 = distância dos dois roletes mais distantes (m)

α = relação entre o tamanho (profundidade) do entalhe da amostra pela dimensão da altura da amostra

Y = fator de forma

O entalhe exerce influência na tenacidade à fratura nos diferentes materiais, para os resultados serem consistentes, o raio da região entalhada deve ser abaixo de um valor crítico (ÖZCOBAN; JELITTO; SCHNEIDER, 2010)

A tabela 4 apresenta valores de tenacidade à fratura para alguns materiais cerâmicos.

Tabela 4 - Informações de diferentes materiais cerâmicos (tenacidade à fratura, densidade e estrutura cristalina)

Tenacidade à Fratura de Cerâmicas			
Cerâmica	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	Massa Específica (g/cm ³)	Estrutura
Al ₂ O ₃	2,0 - 6,0	3,96	Corundum
MgO	2,5	3,59	Periclase
MgAl ₂ O ₄	1,9 - 2,4		Spinélio

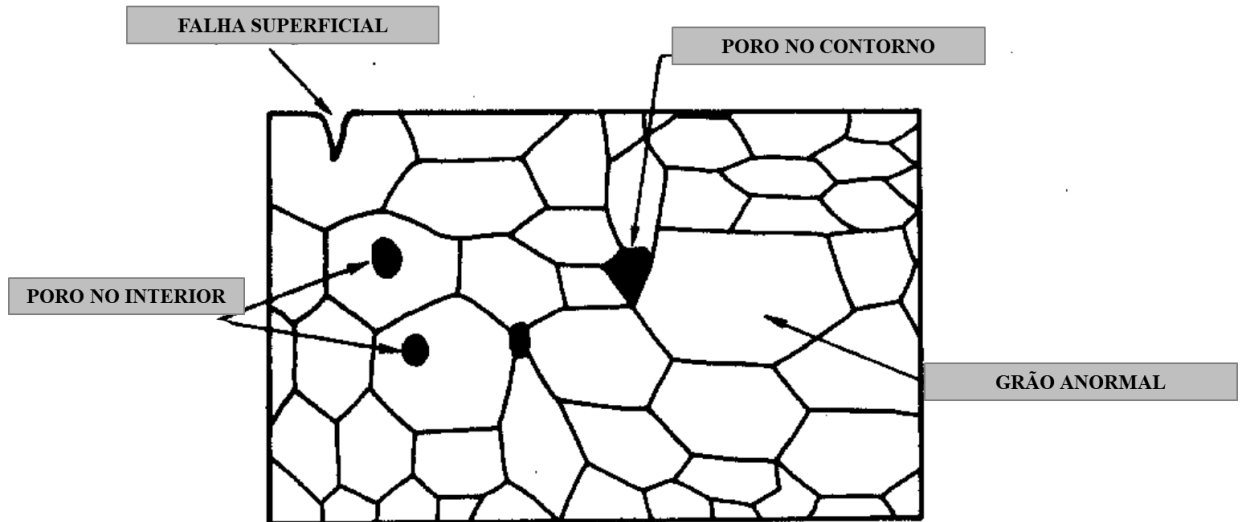
Fonte: Adaptado Carter e Norton (2013).

2.3.4.3 Defeitos em materiais cerâmicos

Defeitos em materiais são importantes para determinar de forma adequada a resistência mecânica de um material frágil (Figura 22). Em materiais cerâmicos, a presença de defeitos propicia a formação de tensões e, conseqüentemente pode comprometer a resistência da peça. Desta forma os defeitos são classificados como:

- pré-existentes (extrínsecos ou intrínsecos): os quais são originados por tensões induzidas. Os defeitos do tipo intrínsecos podem ocorrer em virtude de características as quais são inerentes ao material ou por meio de fatores relacionados diretamente à sua microestrutura. Os defeitos chamados extrínsecos referem-se aos agregados no material em função do processamento ou provocados por falhas na forma de manuseio durante o lixamento e polimento para acabamento (ZANOTTO, E.D; MIGLIORE, 1991).

Figura 22 - Defeitos que comprometem a resistência de um material cerâmico.



Fonte: Adaptado de Zanotto (1991).

Dentre os defeitos os quais podem comprometer a resistência dos materiais cerâmicos destacam-se:

- porosidade é o mais crítico de todos defeitos, apresenta maior probabilidade de fratura, na extremidade encontra-se alto fator de intensidade de tensão, o qual facilita o início da sua propagação. Estes exercem um efeito negativo nos cerâmicos atuando como concentradores de tensão, em função da redução da área de seção reta onde a carga é aplicada, a tensão aplicada nos poros é suficiente para provocar fratura. A equação de Knudsen prevê que a resistência mecânica de um corpo cerâmico, δ , irá variar em função da porosidade p , conforme a expressão abaixo:

$$\delta = \delta_0 e^{-\ell p} \quad (5)$$

sendo:

δ_0 : resistência mecânica do material com porosidade zero;

ℓ : constante em função da forma, orientação e empacotamento dos poros; por exemplo para poros cilíndricos 1,4; quadrados 2,0; losangos 3,0. Esta equação faz a previsão de que a resistência mecânica terá um decréscimo exponencial em função do aumento da porosidade, sendo a resistência do cerâmico associada diretamente ao tamanho e morfologia do defeito mais crítico;

- inclusão defeito o qual ocorre durante a mistura dos pós. Impurezas podem reagir com o material cerâmico e formar inclusões na matriz, onde uma grande tensão residual poderá originar trincas, ou a inclusão soltar da matriz;

- defeitos de superfície podem ocorrer durante o processamento, a secagem e a pré-sinterização. Avarias na superfície em função do lixamento, acabamento ou polimento. O acabamento deve ser definido em função da aplicação estrutural a que se destinam, uma vez que as partículas danificadas podem agir como entalhes e introduzir falhas (BARSOUM, 2003).

2.3.4.4 Desgaste das Ferramentas de Corte

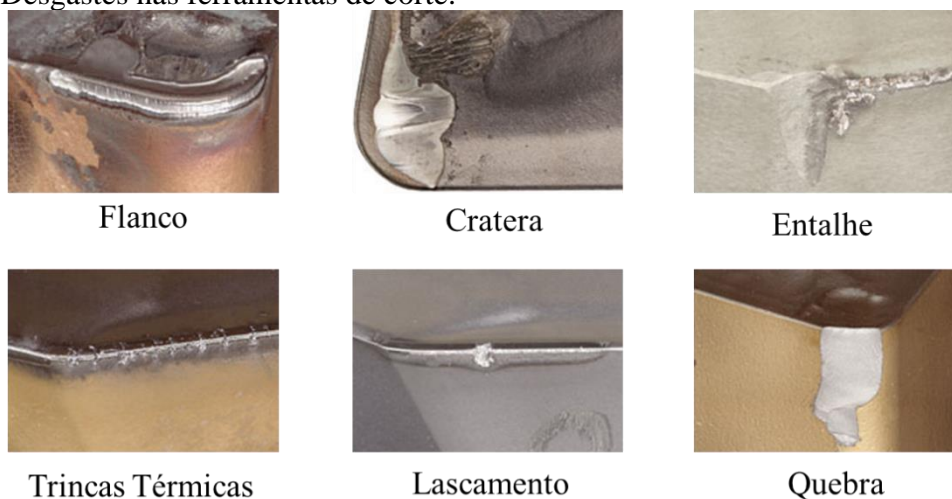
O desgaste de uma ferramenta é a mudança ocasionada na ferramenta a partir do estado original durante o processo de corte em função da perda sucessiva de material (ISO 3685, 1993).

O processo de final de vida de uma ferramenta pode ser ocasionado em função de duas causas principais:

- Avarias: é uma ocorrência de forma abrupta na ferramenta em processo de usinagem, pode ser lascamento, trincas ou quebra da aresta de corte;
- Desgaste: caracterizado como a perda contínua de forma microscópica das partículas na ferramenta de corte em função da ação contínua do corte o desgaste. Acontece de forma progressiva podendo ser classificado como: cratera, entalhe frontal ou de flanco (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

O desgaste mais comum é o desgaste de flanco em função do processo de usinagem propiciar o desgaste frontal, causando deterioração da parte superficial da peça e conseqüente modificação da aresta de corte geralmente ocasionado com o aumento da velocidade de corte. O uso de ferramenta de corte com ângulo de saída positivo propicia uma redução de pressão sobre a ferramenta reduzindo o contato entre o cavaco e a ferramenta, reduzindo a possibilidade de desgaste de cratera (MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015) conforme Figura 23.

Figura 23 – Desgastes nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado Sandvik (2019).

A elevada temperatura entre cavaco e ferramenta ocorre com a combinação de dois mecanismos difusão e adesão. A profundidade da cratera está relacionada a velocidade e o avanço (FERRARESI, 1977).

Ezugwu e Wallbank (1987) afirmam que ferramentas de cerâmica falham pelo desgaste de flanco, causado em função do movimento da ferramenta contra a peça. Esse desgaste é causado por partículas que desprendem da matriz. A temperatura elevada nessa região promove uma região de tensão na ferramenta, podendo ocorrer falhas catastróficas. A concentração de tensões na usinagem e altas temperaturas na ferramenta cerâmica enfraquece as ligações interpartículas, a inércia química do material assegura que o enfraquecimento seja mínimo assim como a difusão resultando em pequenas crateras, a cerâmica de alumina apresenta desgaste de cratera menores que as de óxido misto.

Abele (2002) analisou ferro fundido vermicular e cinzento afirmando que o vermicular apresenta 33% mais abrasividade do que o cinzento em função do vermicular não formar uma camada lubrificante de MnS em função da alta concentração de magnésio.

Heck (2008) relatou que a resistência do ferro fundido compacto é maior do que do ferro fundido cinza em função da camada de MnS no ferro cinzento que atua como lubrificante. A ferramenta com revestimento CVD é um dos métodos mais adequados para aumentar a vida da ferramenta aumentando a resistência ao desgaste.

O mecanismo de aderência é responsável pelo desgaste de cratera e desgaste de flanco, ocorrendo primordialmente em velocidades baixas, também podendo ocorrer em velocidades mais altas. O revestimento nas ferramentas de corte minimizam o atrito entre ferramenta e cavaco (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

O desgaste de entalhe ocorre nas regiões concordantes com as laterais do cavaco este mecanismo é associado a usinagem de materiais mais resistentes e usinagem em altas temperaturas (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016).

Um dos critérios usados na determinação do fim de vida da ferramenta no torneamento é o desgaste de flanco ($V_B = 300 \mu\text{m}$) ou a largura máxima da aferição da marca deixada pelo desgaste no flanco ($V_{B\text{max}} = 600 \mu\text{m}$) (ISO 3685, 1993).

Os principais mecanismos básicos de desgaste da ferramenta são controlados pelas propriedades mecânicas e características físico-químicas do material a ser usinado e da ferramenta, além da influência das condições de corte. Várias causas básicas de desgaste da ferramenta têm sido investigadas, sendo as mais importantes: difusão, adesão e abrasão (BINDER; KLOCKE; LUNG, 2015).

- abrasão: mecanismo que ocorre em decorrência do arrancamento de partículas finas de material oriundas do escorregamento em alta temperatura entre a peça e a ferramenta. O desgaste por abrasão, ocasionado pelo movimento relativo entre a superfície inferior do cavaco com a superfície de saída da ferramenta, simultaneamente entre nova superfície de corte e a aresta de corte da ferramenta causando desgaste de flanco. O mecanismo de desgaste abrasivo ocorre até na usinagem de materiais com dureza baixa, causado pela presença de inclusões ou precipitados (PÁLMAI, 2013).
- aderência: em baixas temperaturas e velocidades, a ferramenta em contato com material da peça provoca um elevado atrito rompendo um dos metais e estas partículas rompidas irão migrar para outra superfície causando gume posição sendo este comum na usinagem de materiais pastosos;
- difusão: o processo difusivo ocorre na transferência de átomos de um metal para outro em função da alta temperatura na região de corte esse processo é em função da afinidade físico-química entre os metais (STEMMER, 1995).

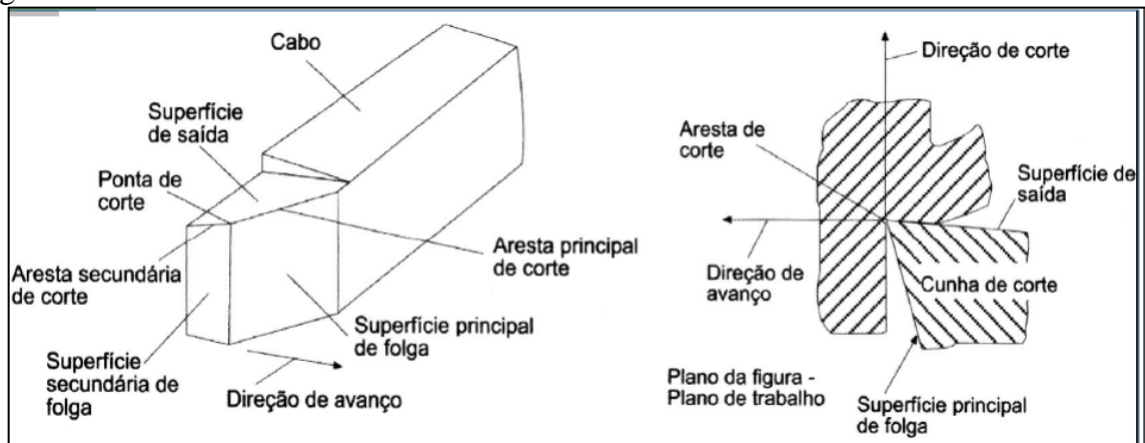
Estes mecanismos de falha ocorrem de forma simultânea não facilitando a identificação de sua causa e efeito, conhecer o mecanismo de desgaste é fundamental para escolher as condições mais apropriadas de usinagem (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

2.3.5 Geometria da Ferramenta de corte

As ferramentas para usinagem são constituídas principalmente pelas arestas cortantes, as quais promovem a remoção do cavaco. As ferramentas com uma única superfície de saída são monocortantes, e quando possuem mais de uma superfície de corte é multicortante. A geometria da ferramenta de corte tem influência sobre a usinagem e sobre a zona de deformação ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

Ferramentas monocortantes são aquelas que contêm apenas uma parte cortante ou elemento responsável pela geração de cavacos no processo de torneamento algumas definições são adotadas como a seguir, na Figura 24:

Figura 24 – Partes de ferramentas monocortantes.



Fonte: Adaptado de Machado (2009).

- Cunha de corte: formada pela intersecção entre a superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte.
- Superfície de saída é a superfície da cunha de corte sobre a qual forma-se o cavaco é onde o cavaco desliza durante sua saída da região de corte.
- Superfície principal de folga é a superfície da cunha de corte a qual contém seu gume principal e que defronta com a superfície em usinagem principal.
- Superfície secundária de folga é a superfície da cunha da ferramenta a qual apresenta que seu gume secundário e que defronta com a superfície em usinagem secundária.
- Gume principal é o gume da cunha de corte formado pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal.

- Gume secundário é o gume da cunha de corte formado pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária.
- Ponta de corte é a parte da cunha de corte na qual encontra-se o gume principal e o secundário ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

A codificação dos insertos foi estabelecida para definir os tipos de insertos utilizadas como ferramentas de corte a fim otimizando a classificação quanto a aplicação a classe SNMA 120408 é uma das especificadas segundo a norma (ISO 1832, 2004).

2.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O planejamento de experimentos envolve diversos fatores e tem como objetivo a avaliação dos fatores sobre a resposta com o experimento. Pode-se entender a relação de causa e efeito do sistema e observar as mudanças que as variáveis causam na saída (MONTGOMERY, 2013).

O *Design of Experiments* ou DOE é considerado um dos melhores métodos estatísticos para avaliação investigativa das variáveis do processo, é um método organizado e estruturado permitindo o planejamento utilizando conjunto de fatores e variando de forma sistêmica as variáveis de entrada e saída. Para a realização com embasamento estatístico e científico determina-se o quão influentes as variáveis de entrada são influentes sobre as variáveis de saída (HARIDY; GOUDA; WU, 2011).

O engenheiro Genichi Taguchi em 1950 apresentou na literatura sobre projeto de experimentos e importantes observações sobre ruídos, os quais não são controláveis enquanto o processo ocorre. Uma de suas idéias principais foi a observação desses fatores e que poderiam ser controlados, em muitos casos, propondo um modelo de respostas as quais são função de fatores controláveis e ruído. Esse modelo conhecido como projeto robusto, o qual possibilita a otimização de fatores controláveis, o foco do método de Taguchi é a de determinação da função perda do produto com a otimização empregando técnicas estatísticas. A finalidade é identificar os parâmetros ótimos do projeto os quais minimizam interferência dos fatores ruído no desempenho do produto (CASTILLO, 2007).

O método de Taguchi possibilita com menor número de experimentos realizar uma análise de diversos parâmetros correlacionando fatores de três níveis com fatores de dois níveis. Para planejar um experimento Taguchi deve-se escolher o arranjo ortogonal em função dos níveis designadas por L4, L8, L12, L16 e L32, de forma que cada número representa o total de ensaios de cada planejamento (VINET; ZHEDANOV, 2010).

O método atua em etapas fundamentais para o planejamento e análise de resultados conforme a seguir:

1ª etapa: identificação dos fatores e variáveis de entrada e controle que serão relevantes para a saída, reconhecendo e definindo o problema;

2ª etapa: planejamento para realização do experimento escolhendo variáveis ou fatores de influência e definindo o melhor arranjo ortogonal. Definir o nível específico para cada ensaio, verificar como serão medidos os níveis escolhidos. Essa análise é fundamental quando o estudo é exploratório e não há muita experiência em determinado processo

3ª etapa: realização da predição dos níveis otimizando os parâmetros do produto levando-se em consideração a relação sinal/ruído para avaliar os resultados. Isto significa obter um modelo estatístico desta relação com os dados coletados no experimento e aplicar, neste modelo, técnicas de otimização para encontrar os valores dos parâmetros ótimos dos produtos, assegurando a robustez e estabilidade do processo (MONTGOMERY, 2013).

As variáveis podem ser divididas em fatores de controle e fatores de ruído. A aplicação do método contribui para qualidade do produto, não objetivando a otimização de uma única função mais sim de todo projeto quanto a fatores incontroláveis no processo. Utiliza-se uma relação de sinal-ruído (S/N) para redução dos efeitos de fatores externos do projeto fornecendo uma otimização quanto a perda de qualidade sendo a função perda e sinal-ruído interconectadas e subdivididas em três categorias para a análise da relação S/N. A primeira quanto menor-melhor, quanto maior- melhor e nominal é melhor. Essa relação é função logarítmica usada para otimizar tanto o processo quanto ao design do produto, reduzindo a variabilidade, conforme a Equações 6,7 e 8 (SILVA, 2013):

- **Menor é Melhor**

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n} \right) \quad (6)$$

Onde o valor de n é o número de respostas de condição experimental, e Y_i o valor de resposta na condição experimental, i inteiro positivo;

- **Maior é Melhor**

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{1}{Y_i^2} \right) \right] \quad (7)$$

- **Nominal é Melhor**

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (8)$$

Onde

$$\bar{Y} = \frac{Y_i}{n} \quad \text{e} \quad S = \frac{1}{n-1} \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

As matrizes ortogonais de Taguchi são a forma mais eficaz de identificar a importância dos fatores, com utilização de um pequeno subconjunto de execuções experimentais filtrando os fatores importantes e com o planejamento fatorial multinível analisar as interações entre esses fatores. O método de Taguchi possui um modo estratégico baseado em arranjos ortogonais com os fatoriais fracionados permitindo robustez da análise sem combinar todos os parâmetros (WANG; HUANG, 2015)

A ANOVA, ou análise de variância, é um método estatístico utilizado na verificação dos efeitos dos fatores, adicional ao método de planejamento de experimentos, buscando facilitar a interpretação de forma coesa dos dados, comparando-se dois ou até mais fatores e sequencialmente avaliando a significância da regressão com o teste F (MONTGOMERY et al., 2000).

Na análise de variância (ANOVA) busca-se a análise da variabilidade das médias dos experimentos para identificar a significância dos fatores do experimento multifatorial ou identificar a significância dos parâmetros associado a equação de regressão. Quando a variância é associada ao tratamento do erro é analisada pelo teste F , sendo uma relação entre os quadrados médios das variâncias do fator que está sendo analisado e do resíduo. Para essa avaliação ocorre o teste de hipóteses, se a hipótese for nula será rejeitada, indicando que os valores médios associados a cada nível são diferentes significativamente, uma outra avaliação é o valor P , correspondente ao nível de significância no qual o valor analisado da estatística é significativo ou seja a hipótese nula pode ser rejeitada. Se o nível de confiança de um projeto for de 95%, então o parâmetro analisado é considerado significativo; quando o valor P for menor ou igual a 0,05, quanto menor o valor de P mais significativo é o parâmetro (MARKOPOULOS et al., 2016).

Os métodos para a análise de variância constituem um conjunto de técnicas estatísticas as quais possibilitam uma correlação das variáveis dependentes e independentes (fatores). Se utilizarmos um nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$), existe a probabilidade de ocorrência de 5 possibilidades em 100 de rejeitar a hipótese quando ela deveria ser aceita, ou seja, existe uma

confiança de 95% de que tenhamos tomado uma decisão correta. O valor de *P-Value*, fornece resultados em função de uma simples rejeição ou não rejeição (MONTGOMERY, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos realizados para confecção das ferramentas de Al_2O_3+MgO , as caracterizações dos materiais, o planejamento de experimentos e os equipamentos e métodos utilizados estão descritos neste tópico. Por meio de estudos bibliográficos definiu-se a melhor condição para aplicação na usinagem por torneamento a seco do ferro fundido vermicular, o software utilizado no planejamento de experimentos utilizando a metodologia de Taguchi foi *MINITAB 18*®.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NO TORNEAMENTO.

O estudo da usinagem foi realizado no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, UNESP, no centro de torneamento CNC ROMI (GL 240M) com potência de 18 kW sem presença de fluido de corte, conforme Figura 25. A captação dos sinais de emissão acústica, potência de corte e vibração foi realizada em um sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments* modelo BNC -2120, utilizando o software *LABVIEW*® que realiza o armazenamento dos dados.

Figura 25 – Centro de Torneamento ROMI GL240M e corpo de prova acoplado na castanha.



Fonte: Própria autora (2020).

Utilizou-se um transformador de potência da marca LEM modelo AT 100 acionado em uma das fases do motor possibilitando a rotação mandril/peça. O sensor emite um sinal de tensão para o módulo de canais sendo considerada uma medida indireta da potência consumida na usinagem estes sinais foram captados em 4000 pontos por segundo (4000Hz). A vibração foi captada utilizando-se um sensor piezelétrico de alcance 25mm/s (RMS), marca *VIBRO*

CONTROL modelo TV-100. Na emissão acústica foi utilizado um sensor com pré-amplificador modelo 1272 e sensor R15α, marca *Physical Acoustic Corporation* a saída em RMS no módulo de canais.

Primeiramente, realizou-se a conversão dos números decimais substituindo as vírgulas do texto gerado em *LABVIEW* por pontos para tratamento dos dados no *MATLAB*®. A matriz com os dados é convertida em coluna e posteriormente os sinais de tensão U_{cc} devem ser convertidos

Para vibração (mm/s), potência de corte (Watts) e emissão acústica (RMS) conforme equações (10), (11) e (12):

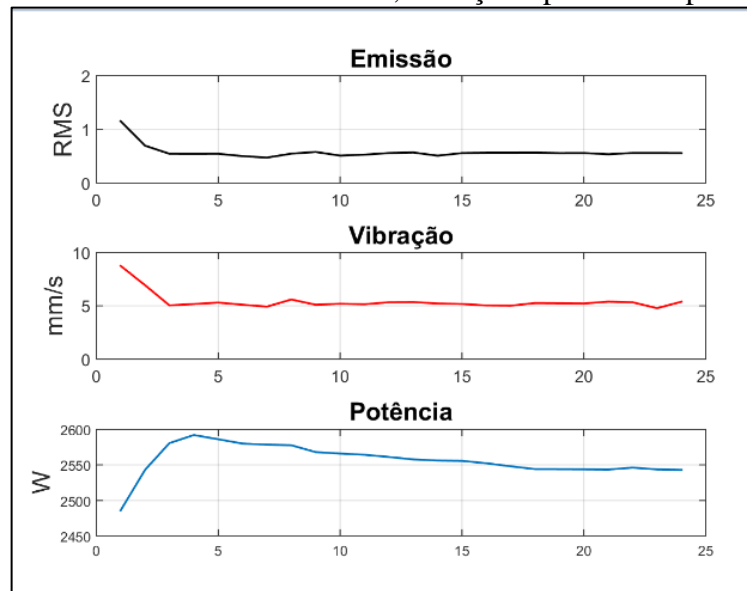
$$Vibração = \frac{U_{cc}.25}{8} \quad (10)$$

$$Potência = U_{cc}.10.220.0,79.\sqrt{3} \quad (11)$$

$$Emissão\ Acústica = U_{cc} \quad (12)$$

O tratamento dos dados captados foram posteriormente tratados com auxílio do software *MATLAB*® R2015b, com a finalidade de expurgar os valores iniciais e finais do gráfico considerados valores em vazio, e utilização dos valores onde a ferramenta em teste manteve-se em contato com a peça usinada, os dados foram convertidos e transformados nos sinais para potência (W), vibração (mm/s), emissão acústica (RMS). Exemplos dos sinais obtidos podem ser observados na Figura 26.

Figura 26 – Valores de saída de emissão acústica, vibração e potência captados com *MATLAB*®.



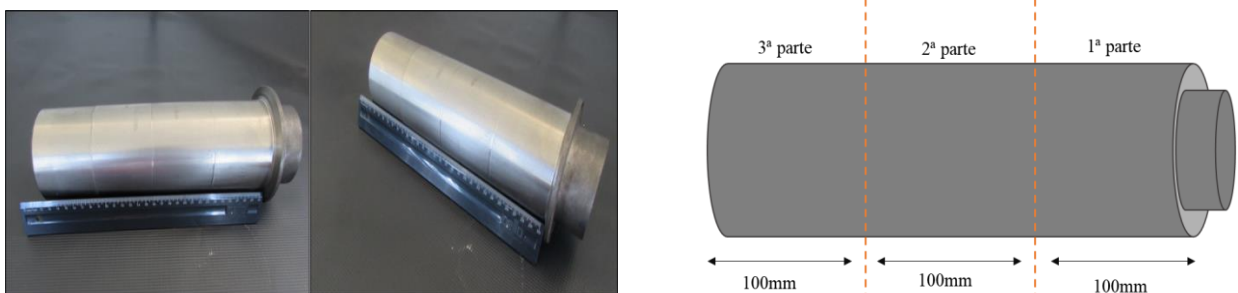
Fonte: Própria autora (2020).

Os valores efetivos do contato da peça para emissão acústica, potência e vibração, após expurgar os valores de potência em vazio, são utilizados para a análise e correlacionados com os fatores de entrada (V_c ; a_p ; f) no planejamento de experimento.

3.1.1 Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular utilizado neste trabalho foi o GJV450 (Figura 27), cedido pela Empresa Tupy Fundições - Mauá, no formato de tarugos de 300 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro com dureza de $241 \pm 3,4$ HB.

Figura 27 – Corpo de prova de ferro fundido vermicular GJV450.



Fonte: Própria autora (2020).

Os tarugos foram pré-usinados para remoção de eventuais defeitos superficiais de fundição com a finalidade de proporcionar melhor condição de usinagem. Posteriormente foram

fixados no CNC por meio de um contraponto e encaixados nas castanhas pelo rebaixo. O corpo de prova de 300 mm de comprimento foi dividido em 3 partes de 100 mm cada para otimização do torneamento (Figura 27). Cada aresta da ferramenta foi utilizada por três passadas (uma em cada parte), após a terceira passada verificou-se a rugosidade da peça sem retirar do CNC. A ferramenta foi retirada e girada no sentido horário para utilização da próxima aresta.

A composição química do ferro fundido vermicular conforme Tabela 5 foi fornecida pela empresa Tupy Mauá juntamente com os tarugos.

Tabela 5 – Composição química do ferro fundido vermicular GJV 450®.

Composição Química %									
Classe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Ti
GJV450	3,38	2,3	0,32	0,003	0,007	0,03	0,7	0,013	0,07

Fonte: Tupy Mauá Fundições (2016).

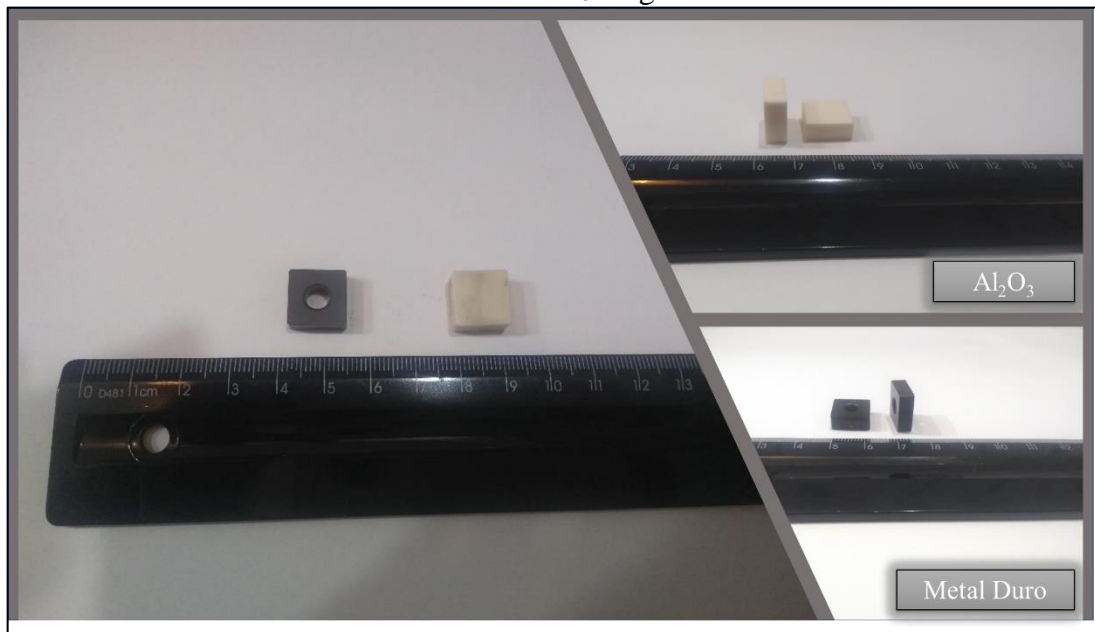
Para verificação da microestrutura do corpo de prova fornecido pela Tupy Mauá foi realizada uma análise micrográfica de um corpo de prova retirado do tarugo. A amostra foi seccionada em 4 partes (25mm x 35mm) lixada, polida e atacada (Nital 3%), e posteriormente analisada em microscópio modelo *Epiphot 200 Nikon*, no laboratório de microscopia do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, UNESP.

3.1.2 Ferramentas e porta-ferramentas

O torneamento foi realizado com ferramenta de metal duro classe SNMA 120408 TK1001 (Ti (C, N) + Al₂O₃ DURATOMIC®) CVD constituída de nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al₂O₃) e carbonitreto de titânio (TiCN) de maior resistência ao desgaste utilizada na usinagem de ferros fundidos fornecida pela SECO TOOLS.

A ferramenta cerâmica de Al₂O₃ + MgO (Figura 28), foi desenvolvida em escala laboratorial no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, UNESP em parceria com DCTA São José dos Campos. Após confecção as ferramentas foram retificadas e lapidadas na geometria SNGN 120408 ISOK10 (12,7 x 12,7 x 4,76 mm) pela empresa Mapal do Brasil -Mg.

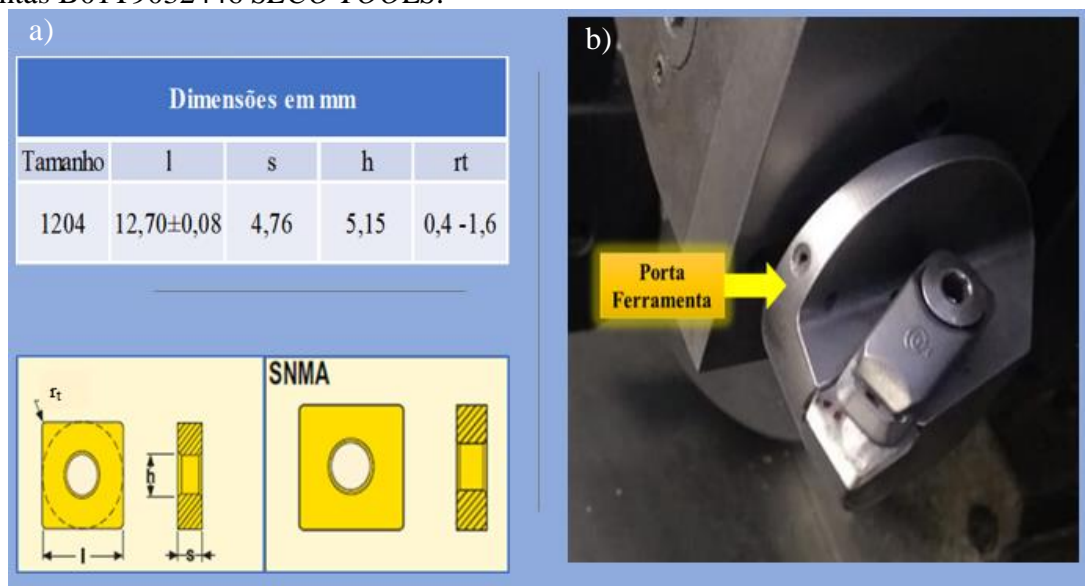
Figura 28 – Ferramentas de metal duro e de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.



Fonte: Própria autora (2020).

Foi utilizado nos ensaios de torneamento do ferro fundido vermicular, o suporte CAPTO B01T903446 (SECO TOOLS). Para a ferramenta de metal duro o ângulo de posição $\chi_r = 95^\circ$, ângulo de inclinação $\lambda_s = -6^\circ$, ângulo de saída $\gamma_o = -6^\circ$. Na Figura 2929 seguem especificações conforme catálogo da ferramenta de metal duro.

Figura 29 – Especificação metal duro catálogo *SECO* SNMA 120408 TK1001; porta-ferramentas B01T9032446 *SECO TOOLS*.



Fonte: a) Catálogo Seco Tools (2018), b) Própria autora (2020).

As ferramentas foram fixadas em um suporte do tipo B01T9032446 conforme Figura 29 o qual é apropriado para ferramentas cerâmicas submetidas ao torneamento, para acabamento.

A ferramenta de Al_2O_3+MgO foi utilizada no ensaio sem fluido lubrificante do ferro fundido vermicular com o suporte CAPTO B01T903445 (*SECO TOOLS*), nas especificações de ângulo de posição $\chi_r = 75^\circ$, ângulo de inclinação $\lambda_s = -6^\circ$, ângulo de saída $\gamma_o = -6^\circ$ sem quebra cavacos.

3.2 PROCESSAMENTO DA CERÂMICA $Al_2O_3 + MgO$.

As ferramentas cerâmicas a base de alumina foram produzidas usando pós de alumina α ($\alpha-Al_2O_3$ / CT3000 da Almatís do Brasil Ltda.) e óxido de Magnésio (MgO da Magnesita do Brasil), com uma composição de 99,75% em peso de Al_2O_3 e 0,25% em peso de MgO, com tamanho de partículas compreendido entre 0,40 - 0,60 μm .

Na Tabela 6, verifica-se as principais características extraídas do catálogo da Almatís da alumina CT3000.

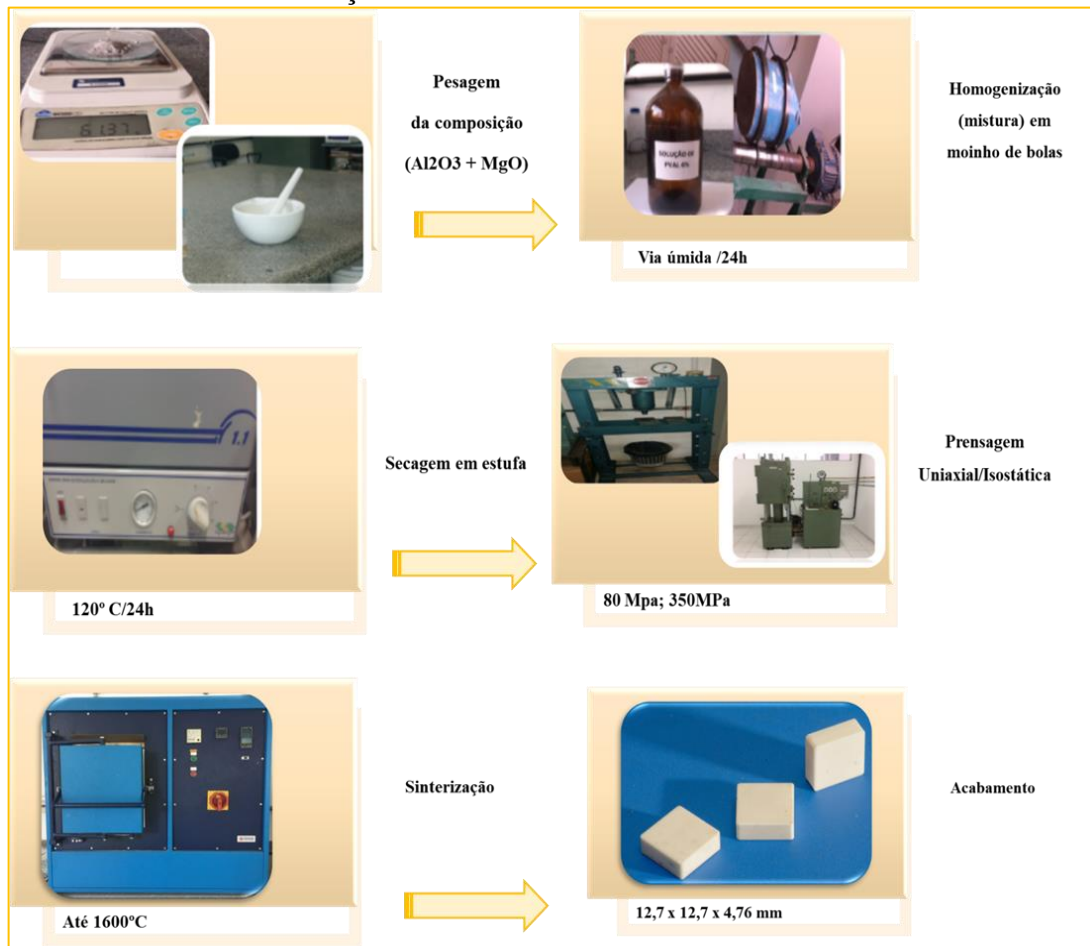
Tabela 6 - Características da alumina CT3000.

Análise Química Alumina CT3000 (%) Almatís		Granulometria (BET por Gemini 2360)	
Característica	Valor		
Al_2O_3	99,5	D50 (μm)	0,42
Na_2O - total	0,015	D90(μm)	1,9
Fe_2O_3	0,017	Propriedades	
SiO_2	0,018	Tamanho de Partícula por Laser – CILAS 1064	
CaO	0,016	Densidade à Verde (g/cm^3)	2,25
Perda ao fogo (300-1000°C)	0,1	Densidade sinterização (g/cm^3)	3,92
Umidade (300°C)	0,2	Densidade ao fogo 1540°C (retração) (%)	17

Fonte: Adaptado Catálogo Almatís (2017).

Após aquisição dos pós cerâmicos estes foram processados segundo a metalurgia do pó seguindo o esquema de confecção conforme Figura 30, a qual apresenta um fluxograma contendo as principais etapas do processamento cerâmico. Neste fluxograma destacam-se, além da sequência de processamento, as imagens dos equipamentos os quais foram utilizados para obtenção das ferramentas.

Figura 30 - Processo de confecção das ferramentas de alumina.



Fonte: Própria autora (2020).

As composições (99,75% Al₂O₃ m/m e 0,25% MgO m/m) foram moídas/homogeneizadas em moinho de bolas (SI 35 Solabcom) com rotação de 350 rpm e esferas de alumina em meio líquido (álcool polivinílico) por 24 h. Posteriormente, a mistura úmida foi devidamente seca em estufa marca Fanen Modelo 3155E a 120 °C por 24 h, pertencente ao Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá, UNESP. O material seco foi desaglomerado em almofariz e passados na peneira de #125 mesh (0,15mm).

A prensagem uniaxial dos corpos a verde foi realizada em uma matriz metálica na dimensão 16,36 x 16,36 x 7,50 mm, fabricada em aço resistente à abrasão tipo AISI D6 (58HRc), conforme Figura 31. A pressão aplicada para a compactação do pó foi de 80 MPa, utilizando uma prensa hidráulica (SCHIWING SIWA, modelo ART6500089). O material particulado foi mantido sob pressão por um tempo de 10 minutos para estabilização das cargas.

Figura 31 – Esquema 3D e molde metálico para fabricação das ferramentas cerâmicas.



Fonte: Própria autora (2020).

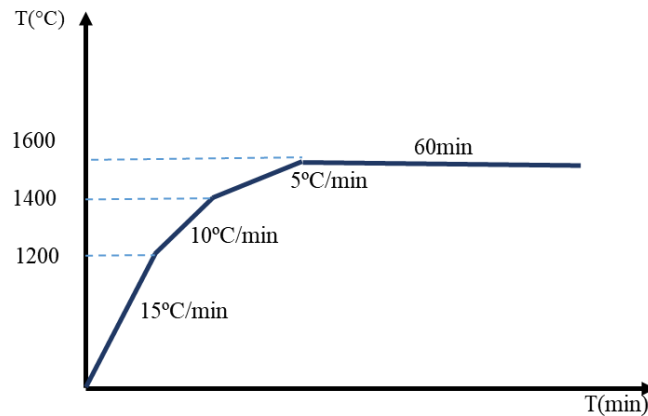
Após a prensagem uniaxial as amostras foram submetidas a prensagem isostática com carga de 350 MPa, por 2 min, utilizando uma prensa isostática tipo KIP 100E modelo Paul Weber no laboratório de materiais cerâmicos do DCTA São Jose dos Campos, empregando moldes flexíveis e óleo mineral insolúvel.

O processo de sinterização dos corpos a verde de alumina foi realizado em atmosfera ambiente em cadinhos de alumina de alta pureza, com o uso de um forno tipo mufla de alta temperatura. As amostras e os cadinhos foram protegidos por uma “cama” de alumina eletrofundida.

Para a realização das sinterizações foi utilizada a seguinte curva de queima, representada na Figura 32:

- Temperatura ambiente até 1200 °C, com taxas de aquecimento de 15 °C/min;
- De 1200 °C até 1400 °C, com taxa de aquecimento de 10°C/min
- De 1400 °C até 1600 °C, com taxa de aquecimento de 5°C/min. Sendo a temperatura mantida com um patamar de 1 h e posterior resfriamento na chamada “inércia do forno” (até \approx 200°C).

Figura 32 - Esquema da curva de sinterização da cerâmica Al_2O_3+MgO .

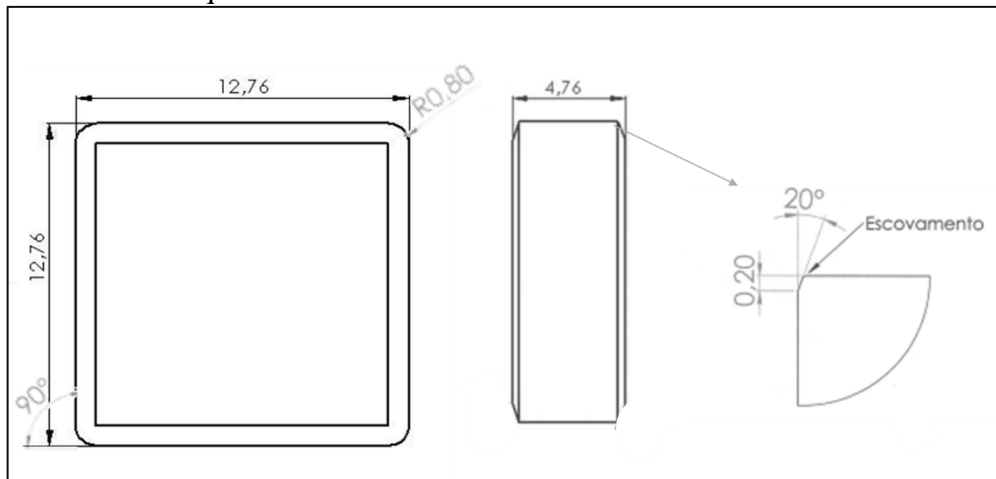


Fonte: Própria autora (2020).

Os insertos cerâmicos utilizados nos testes de torneamento foram desenvolvidos em laboratório, retificados e lapidados pela empresa MAPAL do Brasil-Mg na geometria final de $12,7 \times 12,7 \times 4,76$ mm, com 20° de chanfro de acordo com a norma (ISO 1832, 2004). O formato e dimensões foram definidos em função da resistência mecânica e necessidade específica para assegurar a qualidade no acabamento durante torneamento e em congruência com as dimensões do suporte de ferramenta.

Na Figura 33 apresenta-se os desenhos esquemáticos das ferramentas, geometria SNGN120408, as quais foram desenvolvidas para execução deste trabalho, destacando os ângulos utilizados para usinagem que podem ser observados.

Figura 33 - Desenho esquemático das dimensões da ferramenta cerâmica.



Fonte: Própria autora (2020).

Posterior ao processamento das ferramentas cerâmicas, estas juntamente com o ferro fundido vermicular GJV450, foram caracterizadas para realização do planejamento de experimentos.

3.3 RUGOSIDADE E DESGASTE DAS FERRAMENTAS.

De acordo com Piorino (1990), os defeitos de superfície são importantes na determinação da resistência mecânica de um material frágil, desta forma a especificação do acabamento superficial por meio da sua rugosidade tem grande importância quando da aplicação estrutural de um material cerâmico.

A rugosidade superficial para verificação da qualidade obtida na usinagem foi avaliada utilizando-se um rugosímetro portátil modelo MarSurf M300 e MarSurf RD18, sendo a calibração realizada antes do início dos ensaios com a configuração do cut-off conforme o valor do avanço definido, de acordo com ISO4287 (2008), para as medidas de rugosidade Ra e Rt o *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm. O parâmetro Ra se refere à rugosidade média determinada em função de uma linha média definida do perfil de rugosidade e o Rt que corresponde à distância vertical média entre o pico e vale no comprimento de avaliação. As medidas de rugosidade foram realizadas após a terceira passada (com mesma aresta da ferramenta) em cada parte do corpo de prova.

Após a utilização de todas as arestas da ferramenta de corte com a troca da pastilha nas paradas do equipamento, as arestas utilizadas na usinagem foram observadas em um microscópio óptico *MahrVision MM200*, onde verificou-se o desgaste de flanco para poder avaliar a condição de trabalho da pastilha e quando esta atinge $\approx 0,6$ mm de desgaste ($V_{b\text{máx}}$) e posteriormente em uma *LUPA ZEISS modelo STEMI 2000* no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá, UNESP, o uso desta aresta é interrompido conforme ISO3685 (2016). Os ensaios foram em caráter exploratório do inserto cerâmico para comparar com o inserto de metal duro, portanto ficou estabelecido que após a terceira passada em cada parte do corpo de prova seria interrompida a utilização da ferramenta, independentemente se o desgaste havia atingido o valor máximo. Na Figura 34 apresenta-se o equipamento utilizado para medição da rugosidade.

Figura 34 – Medição de rugosidade com rugosímetro portátil *MarSurf* RD18 e *MarSurf* M300.



Fonte: Própria autora (2020).

Após o torneamento das três partes (conforme Figura 34), a rugosidade (R_a e R_t) foi medida em cada parte (100mm) do tarugo realizando-se três medições em cada parte. Para cada medida de rugosidade rotaciona o tarugo em 120° diretamente no CNC para cada medição esse procedimento é realizado nas três partes. A medição do desgaste das ferramentas de cerâmica e metal duro foram realizadas após utilização de todas as arestas de corte da ferramenta, onde verificou-se a região do desgaste de flanco (V_b) em um microscópio óptico marca *Mahr* modelo MM200.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As caracterizações foram realizadas no material particulado precursor ($Al_2O_3 + MgO$), nas ferramentas de cerâmica e nas ferramentas de alumina e de metal duro. O intuito foi analisar qual a melhor condição das amostras obtidas e comparar a ferramenta produzida em escala laboratorial com uma comercial. Posterior ao processo de sinterização, as ferramentas cerâmicas foram analisadas quanto: à densidade relativa, pelo princípio de Arquimedes, análise das fases presentes pelo método de difração por raios x usando radiação $Cu-K\alpha$; análise microestrutural por microscópio eletrônico de varredura (MEV); e posterior avaliação de microdureza e tenacidade à fratura pelo método SEVNB.

3.4.1 Densidade por Arquimedes $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

A densidade das amostras de cerâmica foi realizada utilizando-se o princípio de Arquimedes. Este método abrange os procedimentos para determinação da absorção de água de materiais cerâmicos de acordo com a Norma ASTM C373-14a.

As amostras foram previamente secas em um forno a 150°C durante 24 h, e posteriormente pesadas para a determinação da massa seca. Logo após foram colocadas em um *Becker* com 75% do volume de água destilada (capacidade 500ml) para ferver por 2 h (1ª ETAPA), o fundo foi coberto com esferas de alumina para não haver contato das pastilhas diretamente com o *Becker*.

Para pesagem foi colocado um prato submerso e suspenso em água destilada sobre uma balança (2ª etapa -realizaram-se três medidas de massa imersa, seca e úmida para cada corpo de prova, num total de 20 corpos de prova), posteriormente a pesagem retira-se a amostra a qual é levemente secas em papel toalha e pesada (uma amostra de cada vez) para a obtenção da massa úmida conforme Figura 35.

Figura 35 – Ensaio de densidade – Método Arquimedes.



Fonte: Própria autora (2020).

A equação a seguir foi utilizada para o cálculo da massa específica aparente:

$$\rho_{aparente} = \frac{m_s}{m_u - m_i} \cdot \rho_{H_2O} \quad (10)$$

Onde: m_s = massa seca (g)

m_u = massa úmida (g)

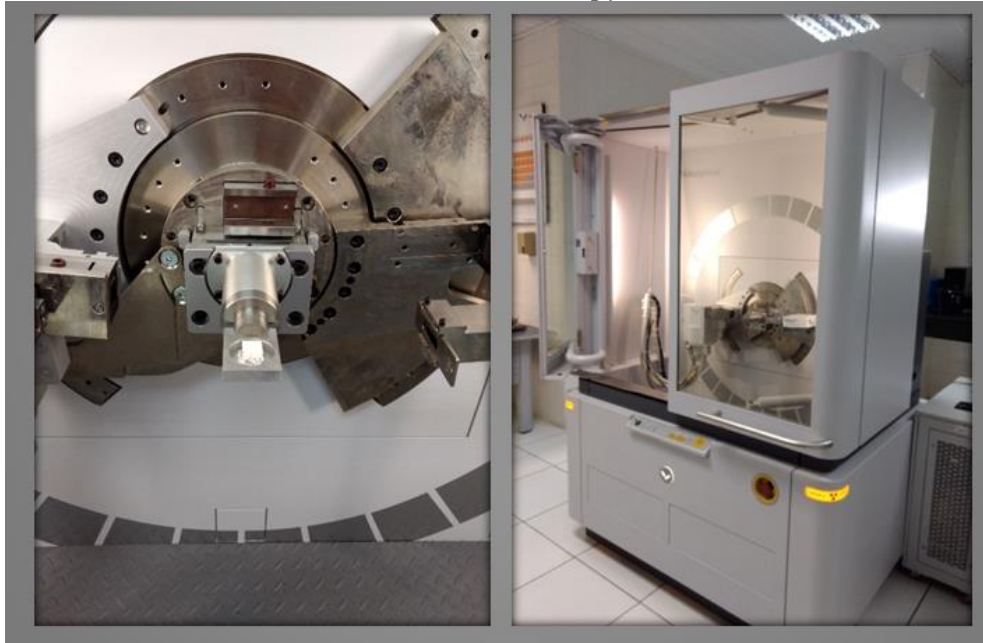
m_i = massa submersa (g)

ρ_{H_2O} = densidade da água (g/cm³)

3.4.2 Difratometria de raios x

A difratometria de raios x foi realizada em um difratômetro *de raios x Empyrean* (Panalytical) no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP/Demar) foram realizadas as análises do material particulado (Al₂O₃ +MgO) e das ferramentas cerâmicas após sinterizadas. As amostras foram seccionadas, lixadas e polidas antes da análise. Na Figura 36, pode-se observar o difratômetro *de raios x Empyrean* (Panalytical) e o porta amostra. Os dados foram analisados utilizando-se o *software* Crystallographica Search Match.

Figura 36 - Porta amostra e difratômetro de raios x *Empyrean*.



Fonte: Própria autora (2020).

Na

Tabela 7, são apresentados os parâmetros utilizados para a realização da difratometria de raios x.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados no ensaio de DRX.

Parâmetros	Valores
Intervalo 2θ de medição	20° a 90°
Corrente	25 mA
Tensão	40 kV
Passo	0,02°
Tempo de contagem	0,35 s
Fenda	0,6 mm

Fonte: Própria autora (2020).

3.4.3 Distribuição do Tamanho de Partículas pó Al_2O_3

A análise da distribuição granulométrica do material precursor cerâmico foi realizada em granulômetro Cilas pelo método de espalhamento a Laser, com dispersante pirofosfato de sódio. O granulômetro (CILAS 1064 - *Laser Particle Size Analyzer*) é um instrumento de pesquisa projetado para aplicações que exigem alta resolução na análise de partículas sub micron. As medições das amostras foram analisadas com um intervalo de medição de 0,04 a 500 μm .

3.4.4 Dureza

Para determinação da dureza as amostras de ferramenta cerâmica foram seccionadas com disco diamantado (13mm x 5mm), embutidas em baquelite a quente e lixadas com lixas diamantadas de 45, 30 e 15 μm , com polimento em suspensões de diamante de 6, 3, 1 e 0,25 μm . Para a determinação da dureza por microidentação foi utilizado o método Vickers de acordo com as normas ASTM-C-1327-99 e ASTM-C-1421. O ensaio de dureza foi realizado em um microdurômetro modelo *Wilson Instruments* 401MVD, pertencente ao laboratório do departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP, com tempo de carregamento chamado de *DWELL* de 25 s com carga de 1kgf. Na 37 apresenta-se a amostra embutida em baquelite e o microdurômetro utilizado.

Figura 37 – Corpo de prova cerâmico embutido e microdurômetro *Wilson Instruments*.



Fonte: Própria autora (2020).

Foram realizadas 30 medições de dureza sendo cinco colunas com seis identações cada da superfície (no limite da baquelite) para o interior a 5 μm da borda.

3.4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para melhor avaliação do mecanismo de desgaste e para confirmação e caracterização das arestas, a análise de imagens foi realizada em MEV (microscópio eletrônico de varredura) modelo *TM3000 Hitachi*, primeiramente foi metalizada em um metalizador *BALTEC MED020* (Figura 38), do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP) com ampliação de 100X e aceleração de voltagem de 15 kV.

A microestrutura da cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), ou “*scanning electron microscope*” (SEM), com utilização de elétrons retro espalhados (retro-espalhamento- “*backscattered*”) e elétrons secundários. As imagens foram obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura modelo *LEO 435 Vpi*, por elétrons secundários com excitação de 15 kV, pertencente ao Instituto de Aeronáutica e Espaço - São José dos Campos.

Figura 38 – Metalizadora Baltec MED020 ; microdurômetro *Wilson Instruments*.



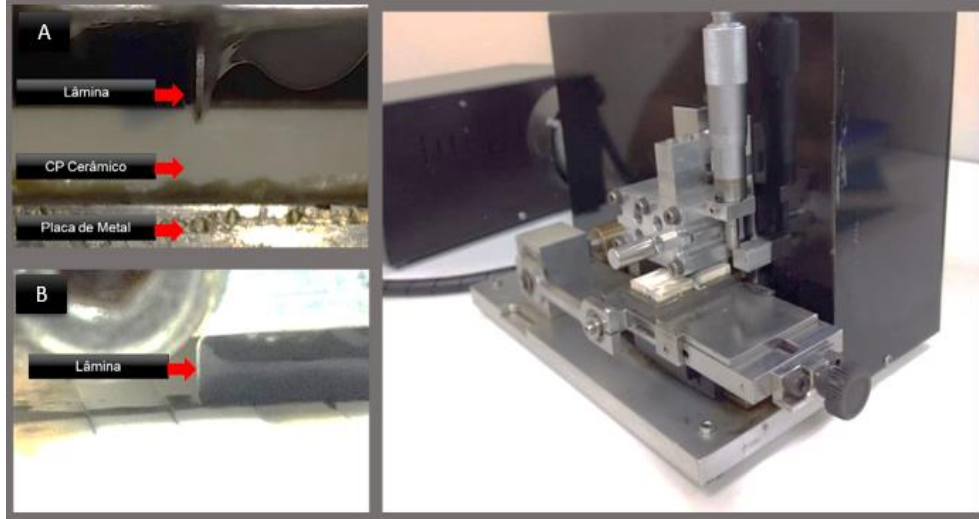
Fonte: Própria autora (2020).

3.4.6 Tenacidade à fratura $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

Para determinação da tenacidade à fratura pelo método SEVNB (*Single-Edge V-Notch Beam*) foram confeccionados corpos de prova com as dimensões de $W \approx 4$ mm (altura), $B \approx 3$ mm (largura), $L \approx 42,3$ mm (comprimento) conforme (ISO 23146, 2008). Sobre uma placa de aço foram colados com cola térmica 7 Cp's paralelamente para não haver deslocamento durante a movimentação dos cp's no equipamento ("entalhamento"). A força de deslocamento foi de 130 golpes por minuto e 3N. Na Figura 39, observou-se a máquina utilizada para confecção dos entalhes no Laboratório de Cerâmica da USP de Lorena. Equipamento fabricado pela Equitecs Ltda (EEL/USP) e perspectiva lateral dos Cp's colados sobre a placa.

Com utilização de uma lâmina de barbear de 0,06 mm realizou-se o entalhe nos Cp's com adição de pasta de diamante de 6 μm . A pasta auxilia no deslizamento da lâmina e por atrito e abrasão forma o entalhe. Esse processo é realizado até atingir um entalhe inicial de 0,8 mm. Posteriormente a lâmina é substituída e inicia-se o aprofundamento do entalhe com pasta de diamante de 1 μm até atingir aproximadamente 1,2 mm, conforme a norma.

Figura 39 – Equipamento utilizado para confecção dos entalhes. A) Esquema lateral dos Cp's colados na placa de aço; B) Esquema frontal da lâmina correndo sobre os Cp's de cerâmica.



Fonte: Própria autora (2020).

Após o desgaste dos Cp's para confecção do entalhe, estes foram analisados em um estereoscópio QUIMIS, tipo Q740SZ, com precisão de 0,025 mm, e uma régua auxiliar na lente para verificação das medidas entalhadas e obtenção do tamanho médio “a” o qual foi utilizado nos cálculos de K_{IC} , SEVNB. Na Figura 40, podê-se observar o estereoscópio Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP) utilizado para verificação e medida do entalhe.

Figura 40 – Estereoscópio para verificação e medida do entalhe; Imagem do entalhe em estereoscópio Zeiss (Axion Cam ICC33).



Fonte: Própria Autora (2020).

Os corpos de prova foram fraturados pelo método SEVNB de flexão em três pontos e a região fraturada foi medida em microscópio ótico para cálculo da tenacidade à fratura K_{IC} .

Para realização do ensaio de flexão em três pontos no Laboratório de Ensaio mecânicos da FEG-UNESP- Campus de Guaratinguetá na máquina Shimadzu AGX- com célula de carga de 50 kN, foram confirmadas as medidas dos Cp's de 1,2 mm de entalhe onde todos os Cp's atendiam a condição de $(a_{máx} \leq a_{mín})/a$ conforme norma e calculado de acordo com equação (11).

$$\alpha = \frac{a}{w} \quad (11)$$

Sendo:

a profundidade média do entalhe (mm);

α a profundidade relativa do entalhe, adimensional;

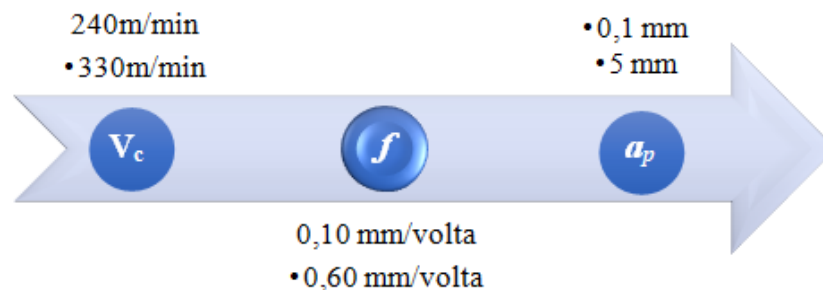
w espessura do corpo de prova (mm).

Posteriormente a superfície das fraturas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV DCTA) marca Zeiss modelo LEO 432VPi.

3.5 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS METAL DURO

O planejamento experimental foi realizado seguindo a metodologia de Taguchi adotando arranjos ortogonais diferentes para a ferramenta de metal duro e cerâmica. A ferramenta de metal duro classe K, TK 1001 a qual apresenta especificações do fornecedor para velocidade de corte (V_c) e o avanço (f) e profundidade de usinagem (a_p) conforme Figura 41.

Figura 41 - Parâmetros de corte ferramenta de metal duro.



Fonte: Adaptado Catálogo Seco Tools (2017).

Para o inserto de metal duro o planejamento de experimentos foi elaborado a partir de uma matriz ortogonal de Taguchi L8 ($4 \times 2 \times 2 = 16$) o fator velocidade de corte com quatro níveis e dois fatores profundidade de usinagem e avanço com dois níveis. Todo o ensaio foi

realizado na condição sem fluido lubrificante, conforme Tabela 8, e para cada um dos parâmetros foi realizada tréplica dos ensaios.

Tabela 8 - Parâmetros de corte ferramenta de metal duro.

NºExp.	V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)
1	150	0,1-0,3	0,5 -1,0
2	250	0,1-0,3	0,5 -1,0
3	350	0,1-0,3	0,5 -1,0
4	450	0,1-0,3	0,5 -1,0

Fonte: Própria Autora (2020).

3.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS CERÂMICA

Utilizando o método de Taguchi com planejamento de experimento com uma matriz L16, e valores de velocidade de corte em oito níveis de 300 m/min, 350 m/min, 400 m/min, 450 m/min, 500 m/min, 550 m/min, 600 m/min, 650 m/min; avanço variando em dois níveis 0,1 e 0,3 mm/volta e a_p em dois níveis sendo 0,5 e 1 mm, conforme Tabela 9. Estes valores de velocidade foram estabelecidos mediante ensaios preliminares com a ferramenta de alumina/óxido de magnésio e com base na literatura utilizando ferramenta de alumina com outros dopantes como Si_3N_4 , com a finalidade de comparar à ferramenta de metal duro comercialmente vendida, a qual se estabeleceu a especificação do inserto SNMA120408 TK1001 conforme parâmetros e especificações já abordados, velocidade de corte entre 150 a 450 m/min. Optou-se por utilizar valores comparativos para o ensaio com inserto cerâmico de alumina extrapolando para mais do limite de velocidade do inserto de metal duro. Para um planejamento de experimento de fatorial completo, para 8 níveis de velocidade, 2 níveis de avanço e 2 níveis de profundidade, seriam necessários 32 experimentos ($8 \times 2 \times 2$). Utilizando 3 réplicas para o experimento acarretariam um total de 96 experimentos. O método de Taguchi possibilita uma otimização e redução do projeto de experimentos, foi utilizado um arranjo ortogonal L16, o qual possibilitou a utilização de metade dos experimentos em relação a um fatorial completo.

Tabela 9 – Matriz de experimento do arranjo ortogonal L16, para ensaio de inserto cerâmico de alumina.

NºExp.	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
1	300	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
2	350	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
3	400	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
4	450	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
5	500	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
6	550	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
7	600	0,1 – 0,3	0,5 -1,0
8	650	0,1 – 0,3	0,5 -1,0

Fonte: Própria autora (2020).

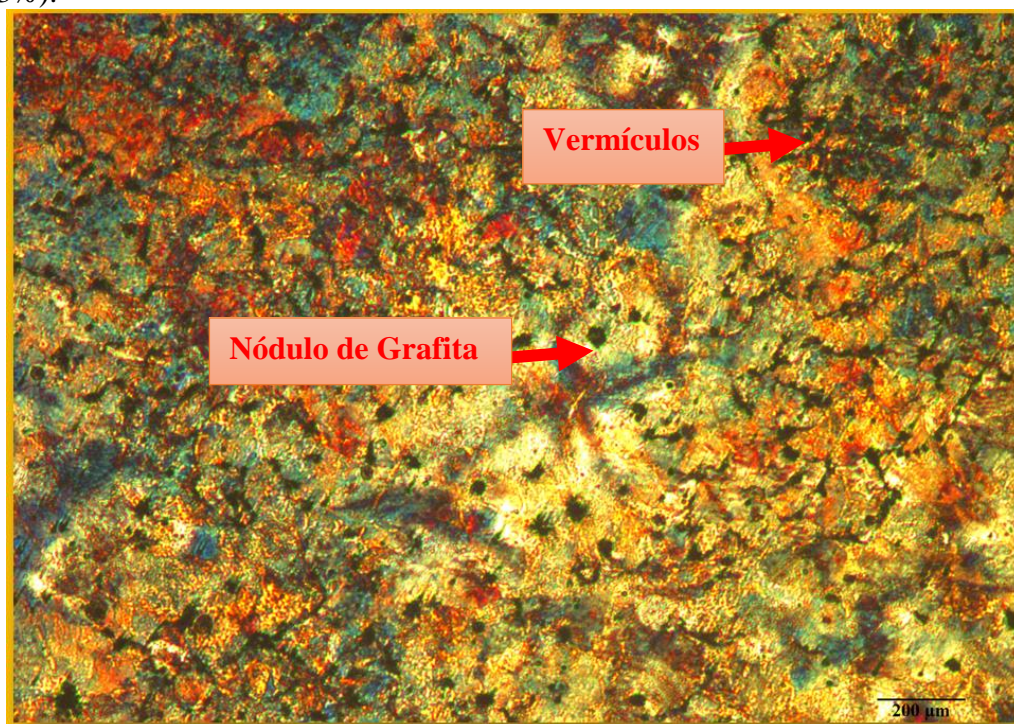
O arranjo ortogonal L16 foi realizado com 16 experimentos e 3 réplicas, resultando em 48 experimentos, para análise do inserto cerâmico com os respectivos valores de saída para emissão (RMS), potência (W), vibração (mm/s) coletados pelo equipamento de aquisição de dados *LABVIEW* para posterior análise no *software MINITAB18®*.

4 RESULTADOS

4.1 FERRO FUNDIDO VERMICULAR

A amostra de ferro fundido vermicular analisada em microscópio modelo *Epihot 200 Nikon*, no laboratório de microscopia do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, UNESP, apresentou matriz perlítica e uma microestrutura vermicular interligada por nódulos de grafita (Figura 42).

Figura 42 – Micrografia do corpo de prova de ferro fundido vermicular GJV450 (ataque com nital 3%).



Fonte: Própria autora (2020).

4.2 FERRAMENTA CERÂMICA

4.2.1 Distribuição granulométrica e tamanho de partícula

Na Tabela 10 apresenta-se os dados de distribuição de tamanho das partículas da alumina CT 3000. Os resultados da análise indicaram tamanho de partículas das medidas acumulativas de $D_{10} = 0,07 \mu\text{m}$, $D_{50} = 0,11 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 1,21 \mu\text{m}$.

O material precursor (pó) tem maior número de partículas com tamanho menor que $1,2 \mu\text{m}$, havendo uma pequena quantidade na faixa grosseira. Tais valores obtidos estão dentro das especificações estipuladas pelo fabricante, apresentando uma distribuição de partículas bem

estreita e com partículas de pequenas dimensões. Estas características permitem esperar uma cerâmica sinterizada com alta densificação e uma dispersão com tendência a aglomeração por ação das forças atrativas.

Tabela 10 – Distribuição granulométrica alumina.

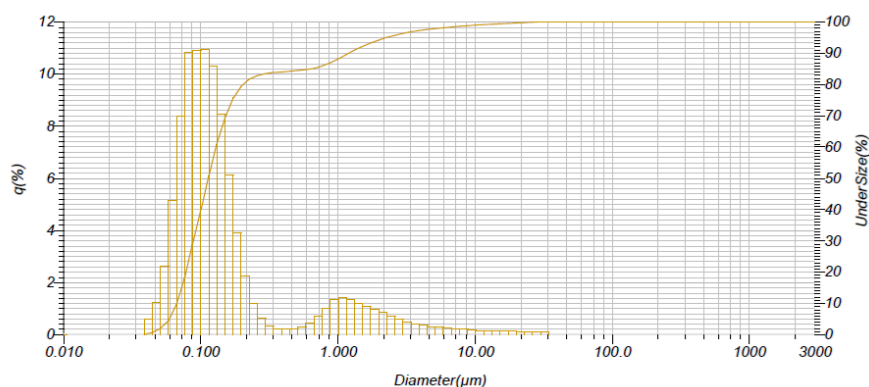
Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	D médio
Alumina CT3000(LSSG)	0,07	0,11	1,21	0,46

Fonte: Própria autora (2020).

Os valores para os diâmetros de partículas interferem na coesão e na sinterização da cerâmica, as partículas maiores necessitam de maiores valores de temperatura para sinterizar com uma boa densificação do material, a distribuição de forma mais homogênea permite um empacotamento adequado, encontrando valor médio para alumina de $4,16\mu\text{m}$ distribuição de partículas em amplo espectro de $0,1$ a $10\mu\text{m}$ adequado ao empacotamento (ROCHA, 2011).

Na Al_2O_3 precursora para confecção das ferramentas o valor de distribuição médio de partículas foi de $0,46\mu\text{m}$ proporcionando maior densificação conforme Figura 43.

Figura 43- Distribuição granulométrica dos pós de Al_2O_3 .



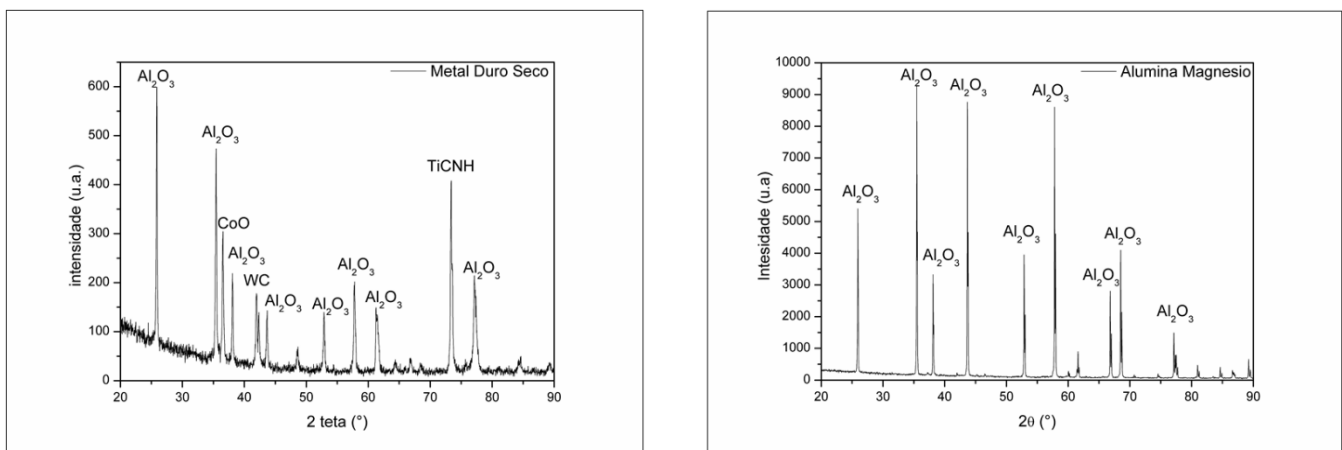
Fonte: Própria autora (2020).

4.2.2 Difractometria de raios x

Na Figura 44 apresenta-se o difratograma de raios x do inserto cerâmico de alumina com óxido de magnésio e o do inserto de metal duro fornecido pela *SECO TOOLS*. Foi utilizado o software Search Match para identificação das fases do material e da estrutura cristalina obtida.

Para a caracterização da ferramenta cerâmica utilizou-se à microficha ICSD *Number* 030026 referentes ao óxido de alumínio (Corundum), com estrutura cristalina romboédrica. Para o inserto de metal duro fornecedor SECO foram utilizadas as fichas ICSD009774 referente ao óxido de alumínio, ICSD 030028 referente ao óxido de alumínio dopado com cromo, ICSD 076638 referente ao óxido de cobalto (CoO), ICSD 039956 referente ao TiC025N022H019 (*titanium carbide nitride hydred*), referente ao carbeto de tungstênio ICSD 424342. Conforme Figura 44, pode-se observar no inserto de alumina a presença das estruturas referentes a Al_2O_3 sendo predominante no material. No inserto de metal duro verificou-se a presença das estruturas de óxido de cobalto, carbeto de tungstênio, carbonitreto de titânio e alumina predominantemente, à qual recobre a superfície do inserto de acordo com fabricante.

Figura 44 - Difratomogramas de raios x do Metal duro e da mistura precursora de $Al_2O_3 + MgO$.



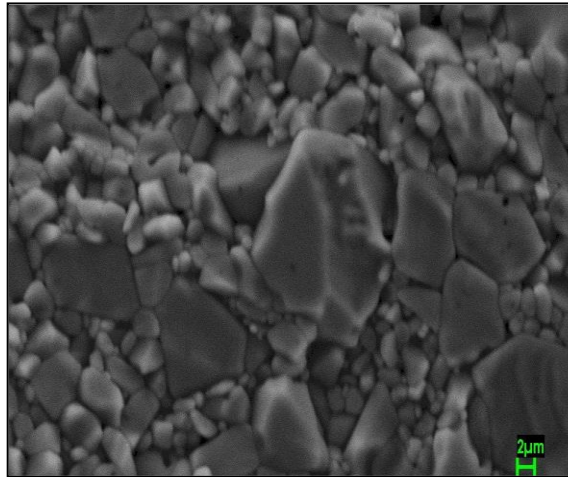
Fonte: Própria Autora (2020).

4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 45 e

Figura 46, observa-se uma imagem obtida por MEV revelando a microestrutura compacta, com a presença de alguns poros intragranulares e não se observaram grãos com crescimento exagerados e número reduzido de poros intergranulares. A morfologia observada indica que o MgO foi efetivo na obtenção da microestrutura. O diâmetro médio de *Feret* é a soma entre os diâmetros, horizontal e vertical do objeto.

Figura 45 - Micrografia da amostra fraturada de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ Sinterizada a 1600 °C.



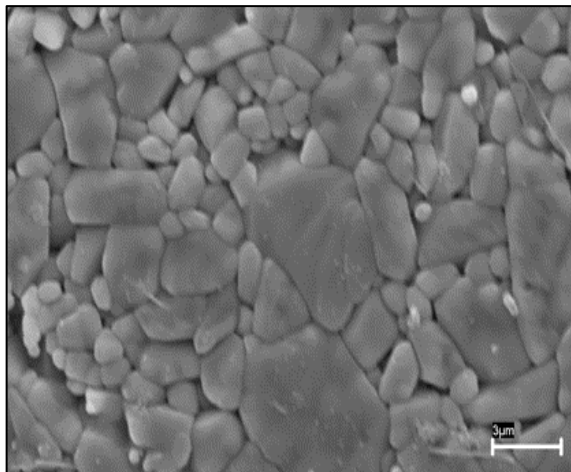
Fonte: Própria Autora (2020).

Tabela 11 - Contagem da porosidade no Image J®.

Diâmetro Feret	Tamanho	0,557(μm)
	Média	0,947(μm)
	Desvio Padrão	$\pm 0,206(\mu\text{m})$

Fonte: Própria Autora (2020).

Figura 46 - Micrografias da ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ fraturada e atacada termicamente à 1400°C.



Fonte: Própria Autora (2020).

Tabela 12 - Contagem da porosidade no Image J®.

Diâmetro Feret	Tamanho	2,112(μm)
	Média	1,849(μm)
	Desvio Padrão	$\pm 0,46(\mu\text{m})$

Fonte: Própria Autora (2020).

As imagens foram transformadas em binárias (8 bits) com utilização do software *Image J*®. Definiu-se os contornos de grão das imagens pelo contraste entre os pixels mais claros e

escuros, a partir da imagem binarizada mediu-se o diâmetro de *Feret*, no qual pode-se medir a região de duas retas tangentes ao objeto excluindo os grãos na borda.

4.2.4 Densidade

As ferramentas cerâmicas de alumina apresentaram valor médio de densidade relativa igual a $98,25\% \pm 0,15$ conforme Tabela 13, foram medidos 30 corpos de prova. Este valor encontra-se na condição específica, para utilização das cerâmicas como ferramentas de corte.

Tabela 13 - Planilha com as massas referentes ao ensaio de densidade por Arquimedes.

DENSIDADE ARQUIMEDES	
Massa submersa (g)	2,81
Massa úmida (g)	3,80
Massa seca (g)	3,84
<u>Massa específica aparente (g/cm³)</u>	<u>3,91 (98,25% densidade)</u>

Fonte: Própria autora (2020).

Um estudo de material cerâmico de alumina sinterizada na faixa de 1600 - 1800°C com pequena adição de MgO (0,5%), com a finalidade de inibir o crescimento anômalo dos grãos, foi realizado e apresentou 3,98 g/cm³ de massa específica aparente (CARTER; NORTON, 2013). O valor da massa específica de 3,91g/cm³ da Al₂O₃ + MgO conforme Tabela 13, é próximo ao valor encontrado por CARTER e NORTON (2013).

O método de Arquimedes é utilizado para quantificar somente os poros que estão abertos, enquanto a análise de imagem pelo método de *Feret* pode-se medir os poros fechados.

4.2.5 Dureza

Os resultados da medida de dureza por microindentação são apresentados na Tabela 14. Houve dificuldade para visualização da indentação, uma vez que a cerâmica branca não proporcionava boa visibilidade, então realizou-se a pintura do corpo de prova de alumina com caneta de ponta porosa (hidrocor) PILOTO® vermelha para propiciar visibilidade da indentação.

Tabela 14 - Resultados da análise de dureza da ferramenta cerâmica.

Medidas de Dureza Cerâmica (Al₂O₃ + MgO)		
Dureza (HV)	Média	1483
	Desvio padrão	126
Dureza (GPa)	Média	14,6
	Desvio padrão	1,2

Fonte: Própria Autora (2020).

A necessidade de materiais cerâmicos melhores para ferramentas exigem: dureza; tenacidade; e resistência ao desgaste cada vez maiores. As ferramentas de corte de alumina embora em termos de estabilidade abrasiva não sejam o principal material escolhido para trabalho. Porém, em virtude do aspecto econômico e por ainda apresentar boas propriedades com dureza entre 14 a 17 GPa continua sendo amplamente utilizado para desenvolvimento de ferramentas (HEIMANN, 2010).

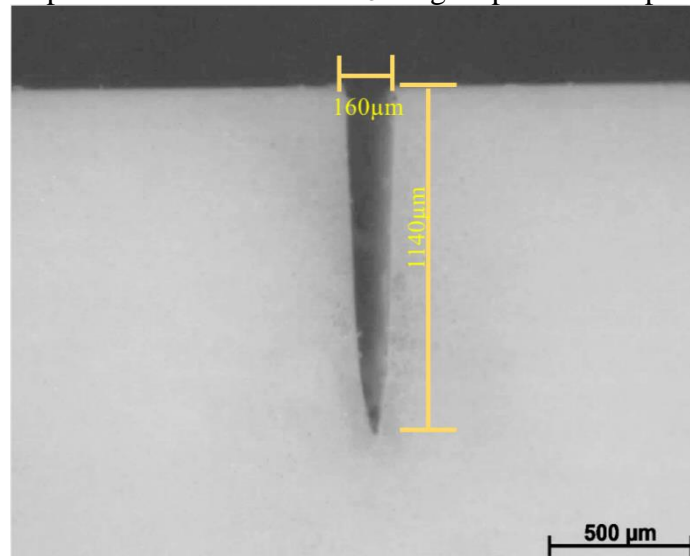
Segundo a literatura, valores de tenacidade à fratura e dureza Vickers para cerâmica de Al₂O₃+ MgO são respectivamente $K_{IC} = 2$ a $6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ e $HV = 14$ a 18 GPa (BARSOUM, 2003).

Os valores medidos para a Al₂O₃ + MgO desenvolvida em escala laboratorial utilizada neste trabalho, podem ser considerados elevados para uma cerâmica de alumina para corte e com uma dispersão de valores relativamente baixa.

4.2.6 Tenacidade à fratura Al₂O₃ + MgO

Após entalhe das amostras com a lâmina de barbear estas foram analisadas para verificação da profundidade do entalhe a qual deve estar entre 0,8 e 1,2 mm. Na Figura 47 observou-se que a profundidade do entalhe atende ao padrão da norma ISO 23146:2008.

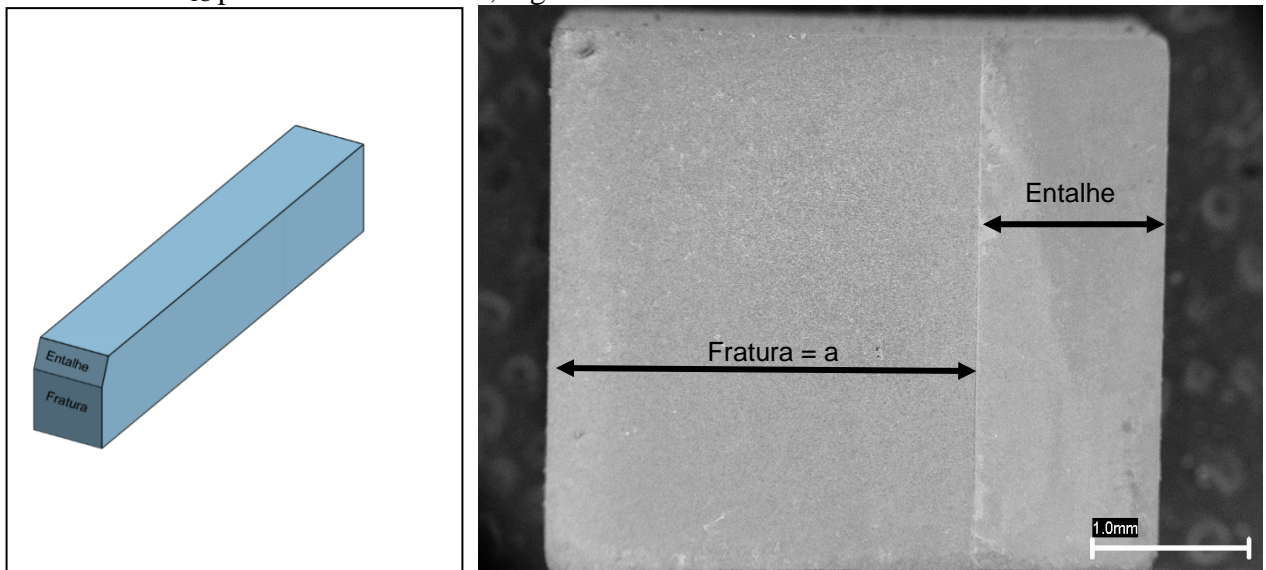
Figura 47 - Microscopia óptica da amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ após entalhe profundidade.



Fonte: Própria Autora (2020).

Na 48, observou-se o esquema da região do entalhe e da fratura e MEV desta região.

Figura 48 – Esquema da amostra após ruptura e micrografia obtida por MEV para medição e cálculo de K_{IC} pelo método SEVNB, regiões de fratura e de entalhe.



Fonte: Própria Autora (2020).

Nas regiões fraturadas dos 20 corpos de prova foram realizadas três medidas de “a” em microscópio óptico conforme norma para posterior cálculo do K_{IC} . Na T segundo equação (2). Na Tabela 15 a média da tenacidade à fratura encontrada para o corpo de prova de alumina e comparado com a média de tenacidade de dois autores.

Tabela 15 - Média dos valores de tenacidade à fratura SEVNB amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.

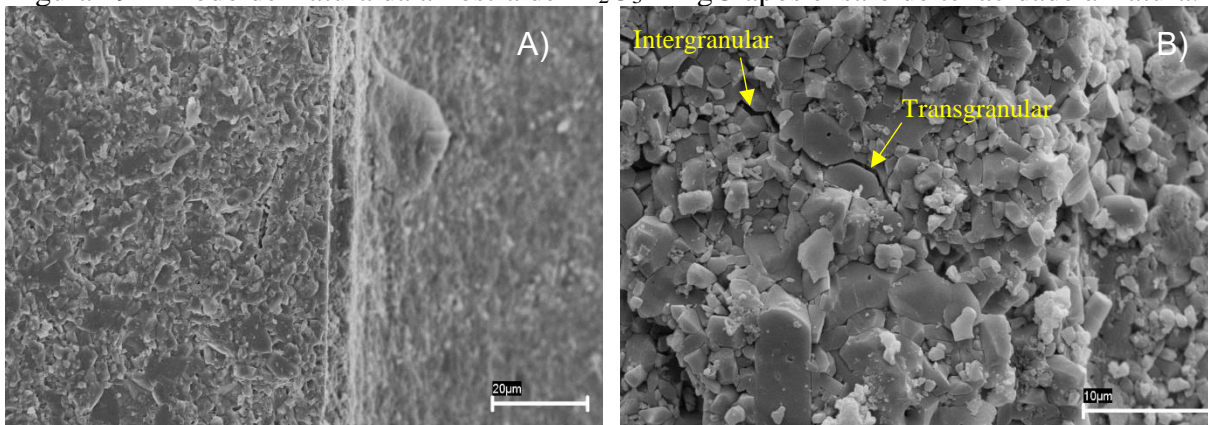
Amostras (1 -20)	K_{IC} - ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) SEVNB
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$	$2,13 \pm 0,25$
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (CARTER; NORTON, 2013)	1,9 – 2,4
Metal duro (TORRES et al., 2001b)	$18,7 \pm 0,9$

Fonte: Própria Autora (2020).

Segundo Ribeiro et al (2013) no ensaio de tenacidade a fratura pelo método SEVNB para corpos de prova de alumina, o valor encontrado foi de $2,41 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. A média dos valores encontrados para os corpos de prova de alumina conforme Tabela 15 de $2,13\pm 0,25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ é próximo ao encontrado por Ribeiro et. al (2013). Este método foi utilizado em função da confiabilidade em comparação ao método de indentação e medição das trincas.

A boa tenacidade a fratura do metal duro (grupo K) é associada a forte ligação de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto caracterizado por ser a classe dos ferros fundidos muito resistentes ao desgaste de cratera (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

Na Figura 49, observa-se a micrografia realizada em microscópio eletrônico de varredura, dos corpos de prova fraturados em flexão por três pontos após realização do ensaio pelo método SEVNB. As amostras de Al_2O_3 apresentam o modo de fratura transgranular e intergranular (CUI et al., 2018).

Figura 49 – Modo de fratura da amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ após ensaio de tenacidade à fratura.

Fonte: Própria Autora (2020).

A fratura intergranular típica pode ser observada no material de granulação fina e a fratura transgranular de granulação grossa, com modos de fratura transgranular e fratura intergranular conforme Figura 49(B).

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA USINAGEM COM METAL DURO

O torneamento do ferro fundido vermicular GJV450 foi realizado com ferramenta de metal duro SNMA120408, TK1001. Os parâmetros de entrada foram estabelecidos com base na especificação do catálogo do fornecedor *Seco* para esta ferramenta. Dentro dos limites estabelecidos pelo fornecedor, o planejamento de experimentos da ferramenta de metal duro comercial foi utilizado como parâmetro exploratório e comparativo com a ferramenta de cerâmica fabricada em laboratório. Os resultados do planejamento de experimentos por DOE com a análise das variáveis velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem (entrada) e sua correlação com os valores de emissão, vibração, potência, rugosidade R_a , rugosidade R_t e desgaste de flanco (saída).

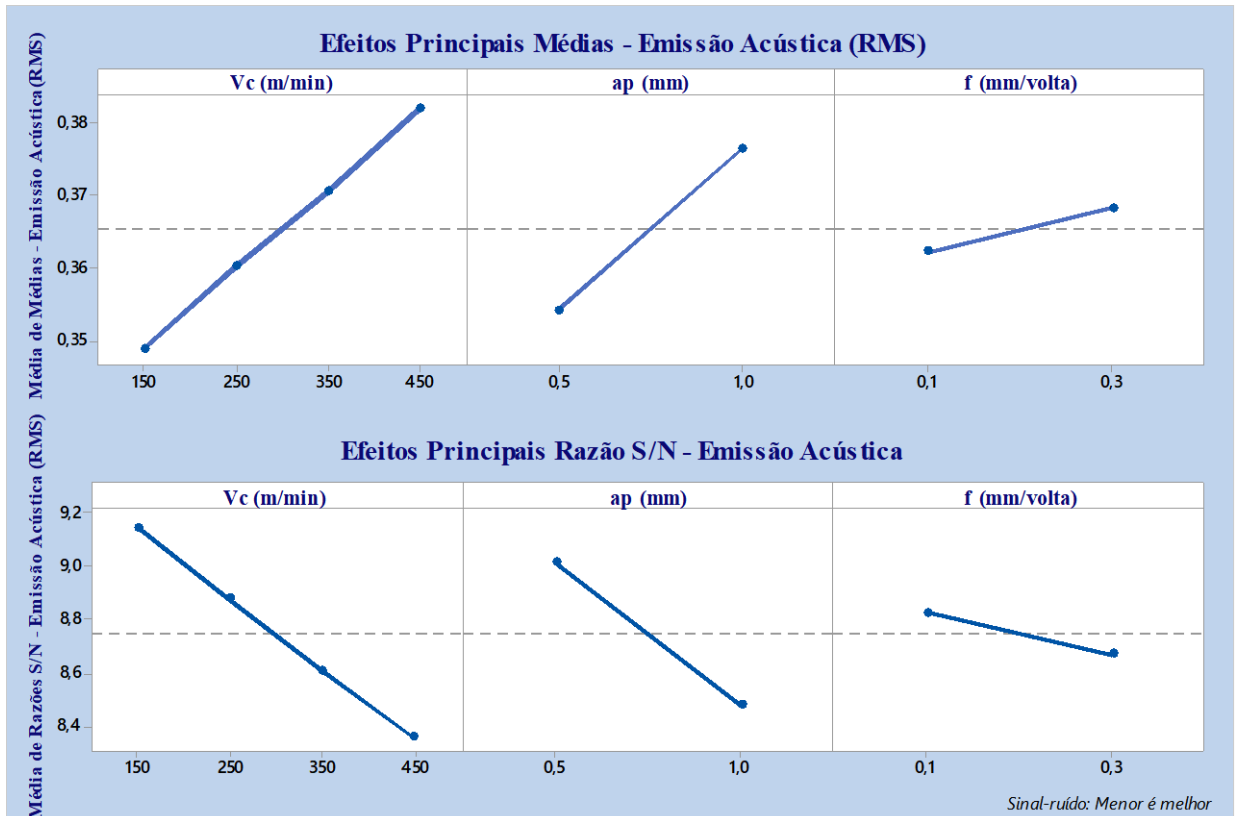
O ferro fundido vermicular apresenta um bom desempenho quanto ao processo de usinagem, entretanto trata-se de um processo complexo e imprevisível que necessita especial atenção para cada material (MACHADO; SILVA, 2004).

Utilizou-se para análise o *software MINITAB 18*® com análise de efeitos principais das médias e sinal-ruído, Pareto dos efeitos e análise de variância ANOVA.

4.3.1 Emissão Acústica

Na Figura 50, verifica-se os efeitos principais das médias para os fatores. A combinação que melhor se adequa a condição de menores valores para a média das médias de emissão acústica são: velocidade de corte 150 m/min; avanço de 0,1 mm/rev; profundidade de corte de 0,5 mm para ferramenta de metal duro na condição sem fluido lubrificante.

Figura 50 – Análise dos efeitos principais das médias para emissão acústica com ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.



Fonte: Própria Autora (2020).

Para avaliar quais efeitos foram significativos realiza-se a análise de variância, para um nível de significância de 95%, como o valor de $P = 0,160$ no teste de normalidade não foi significativo. Como não apresentando normalidade realizou-se uma transformação dentro do software *MINITAB18*® conhecida como algoritmo de *Box-Cox* o qual determina a transformação adequada para normalidade, porém nenhum dos métodos foi satisfatório para realização da transformação.

George Pólya, em 1920 desenvolveu o termo "teorema do limite central" este, está associado a uma infinidade de declarações relacionadas à convergência de distribuições de probabilidade, este teorema é de fundamental importância para descrever a aleatoriedade de uma amostra com variância finita, quando o tamanho da amostra for suficientemente grande, um tamanho amostral de 20 é adequado assegurando robustez para normalidade, este teorema do limite central possibilita a aplicação destes procedimentos a populações que são fortemente não-normais (FISCHER, 2011). A análise de variância por ANOVA foi realizada conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância ANOVA para emissão acústica de usinagem com metal duro.

Análise de Variância Para Médias (Emissão Acústica)							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	3	0,0012	0,0012	0,0004	2,58	0,29	46,66
ap (mm)	1	0,000989	0,000989	0,00099	6,37	0,13	38,45
f (mm/volta)	1	0,000072	0,000072	7,2E-05	0,47	0,57	2,80
Erro de Resíduos	2	0,000311	0,000311	0,00016			
Total	7	0,002572					

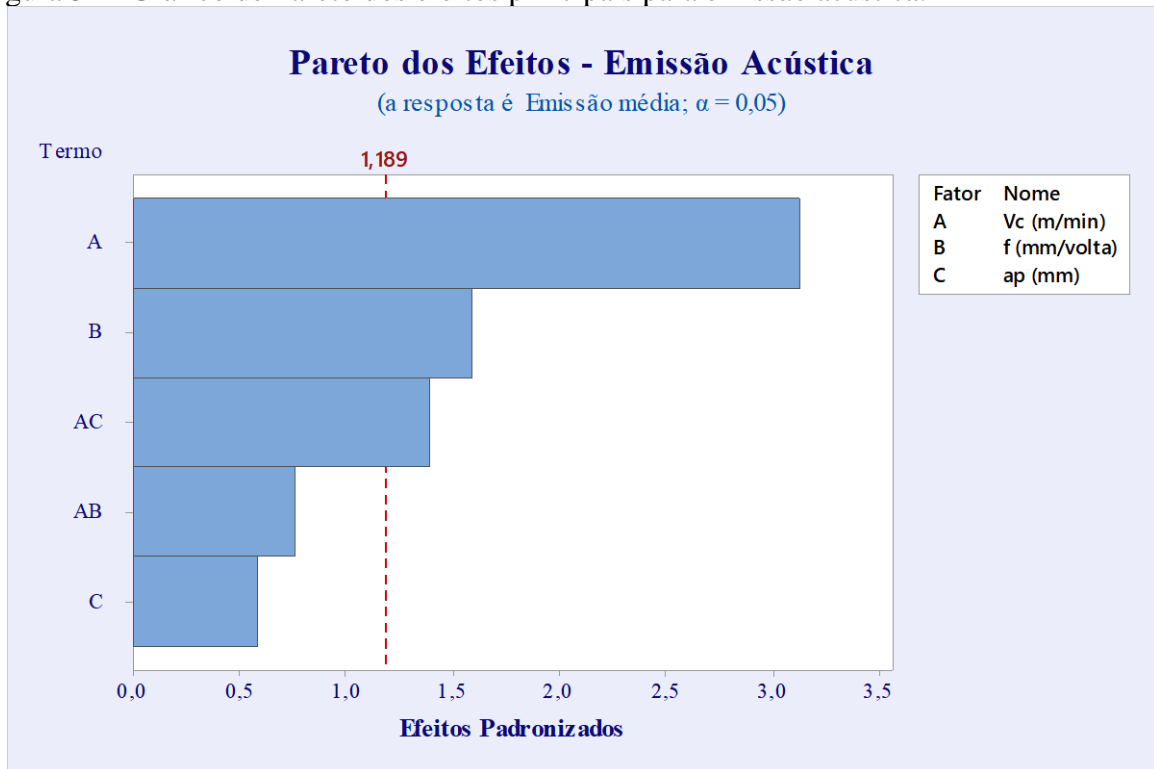
Fonte: Própria Autora (2020).

Na análise de variância por ANOVA permitiu avaliar que os fatores não foram significativos para emissão acústica, com P 0,05. Os efeitos em função dos valores de F, o qual indica que um valor suficientemente grande exerceria uma significância estatística, é associado a estatística que determina a correlação do fator com a resposta. Um ponto fundamental é avaliar que o valor para F menor que 1 prediz que seu efeito é menor que o erro; maior que 2, o efeito não é pequeno e devem ser considerados; maior que 4, é suficientemente grande e deve ser considerado (MENTEN; PHADKE, 1991). Os fatores velocidade e profundidade de corte devem ser considerados em função de F e os fatores com maiores contribuições foram Vc (46,66%) e ap (38,45%). O cálculo da contribuição foi feito conforme equação (OKASHA et al., 2012).

$$\text{Contribuição} = \frac{\text{soma dos desvios quadrados}}{\text{soma total dos desvios quadrados}} \quad (12)$$

O gráfico de Pareto do efeito (Figura 51) estratifica os fatores em ordem de significância. Pôde-se observar que o fator A, B e AC, relacionados a: velocidade de corte; avanço; e interação entre os dois fatores, os quais cruzam a linha de referência de 1,189. Estes são os que mais influenciam na emissão acústica sendo estatisticamente significativos ao nível 0,05.

Figura 51 - Gráfico de Pareto dos efeitos principais para emissão acústica.

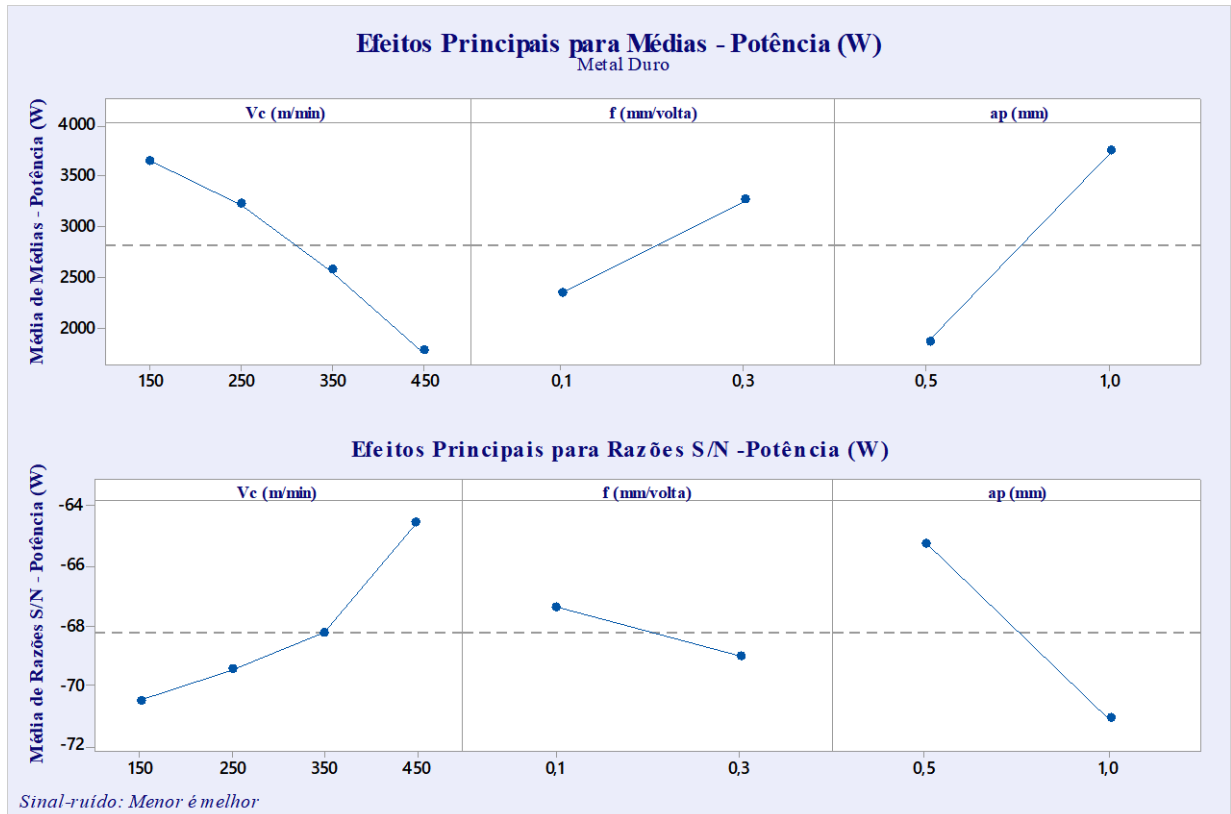


Fonte: Própria Autora (2020).

4.3.2 Potência consumida

O gráfico de efeitos principais é representando para os valores de potência de corte com a ferramenta de metal duro no gráfico da Figura 52 para as médias. A linha central do gráfico das médias é a mesma para todos os fatores relacionados com a potência de corte de 2807 W, conforme determinado na condição menor é melhor os valores de $V_c = 450$ m/min; $f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 0,5$ mm indicam ser a condição a qual minimiza a potência. Para avaliar a significância destes valores utilizou-se a análise ANOVA.

Figura 52 – Análise dos efeitos principais das médias para potência com ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.

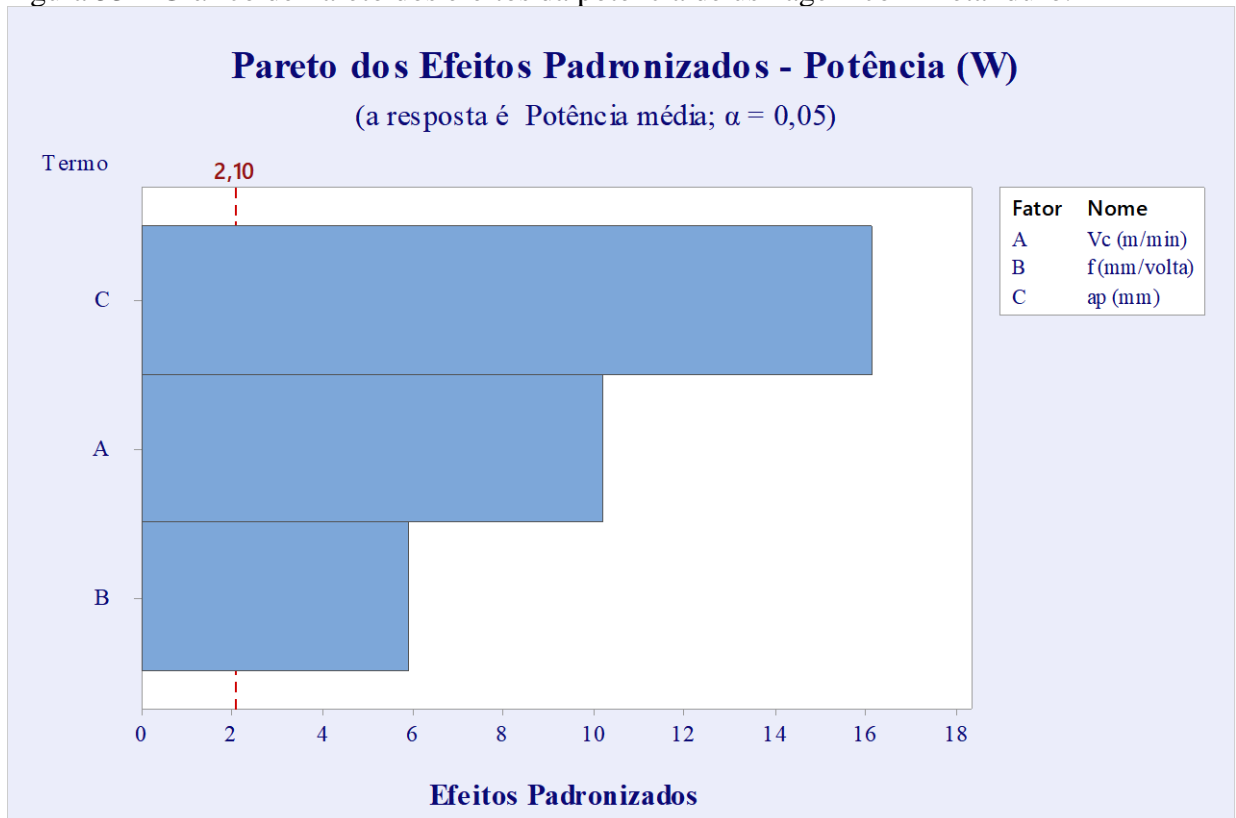


Fonte: Própria Autora (2020).

Os valores do gráfico de efeitos principais para médias foram comprovados pelo gráfico dos efeitos para razão S/N demonstrando que estes valores minimizam a razão S/N. A linha quando não se apresenta na horizontal, demonstra que há um efeito e a média tem variação em cada nível do fator. A inclinação da linha demonstra a magnitude do efeito principal.

Observa-se no gráfico de efeito de Pareto para potência com relação a ordem de significância dos fatores Vc; f e ap, a influência quanto a potência na usinagem (Figura 53). O fator C (profundidade de corte - ap) é o fator mais significativo, seguido da velocidade de corte (Vc), e posteriormente o avanço f é o fator menos influente. No gráfico da Figura 53 de Pareto pode-se verificar a importância dos efeitos e variáveis de entrada relacionando quais são significativos para análise de potência de corte, baseado na confiabilidade de 95%, uma vez que a barra que passa a linha tracejada é um valor significativo no nível de 0,05.

Figura 53 – Gráfico de Pareto dos efeitos da potência de usinagem com metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

A análise do gráfico de Pareto permite a avaliação do valor dos efeitos referentes as variáveis, na determinação de quais dos efeitos são significativos por meio da análise da linha tracejada ou linha de *lenth*, demonstrando que a profundidade de usinagem e velocidade de corte são os fatores mais influentes o que pode ser comprovado em função do gráfico para efeitos principais em função da inclinação da linha que quanto maior for sua inclinação maior é a magnitude do efeito. A análise de variância ANOVA conforme Tabela 17 foi realizada para potência da ferramenta de metal duro.

Tabela 17 – Análise de variância ANOVA para potência de usinagem com metal duro.

Análise de Variância Para Médias (Potência)							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	% Contribuição
Vc (m/min)	3	4409276	4409276	1469759	21,60	0,05	33,23
ap (mm)	1	7683695	7683695	7683695	112,90	0,01	57,91
f (mm/volta)	1	1038469	1038469	1038469	15,26	0,06	7,83
Erro de Resíduos	2	136110	136110	68055			
Total	7	13267550					

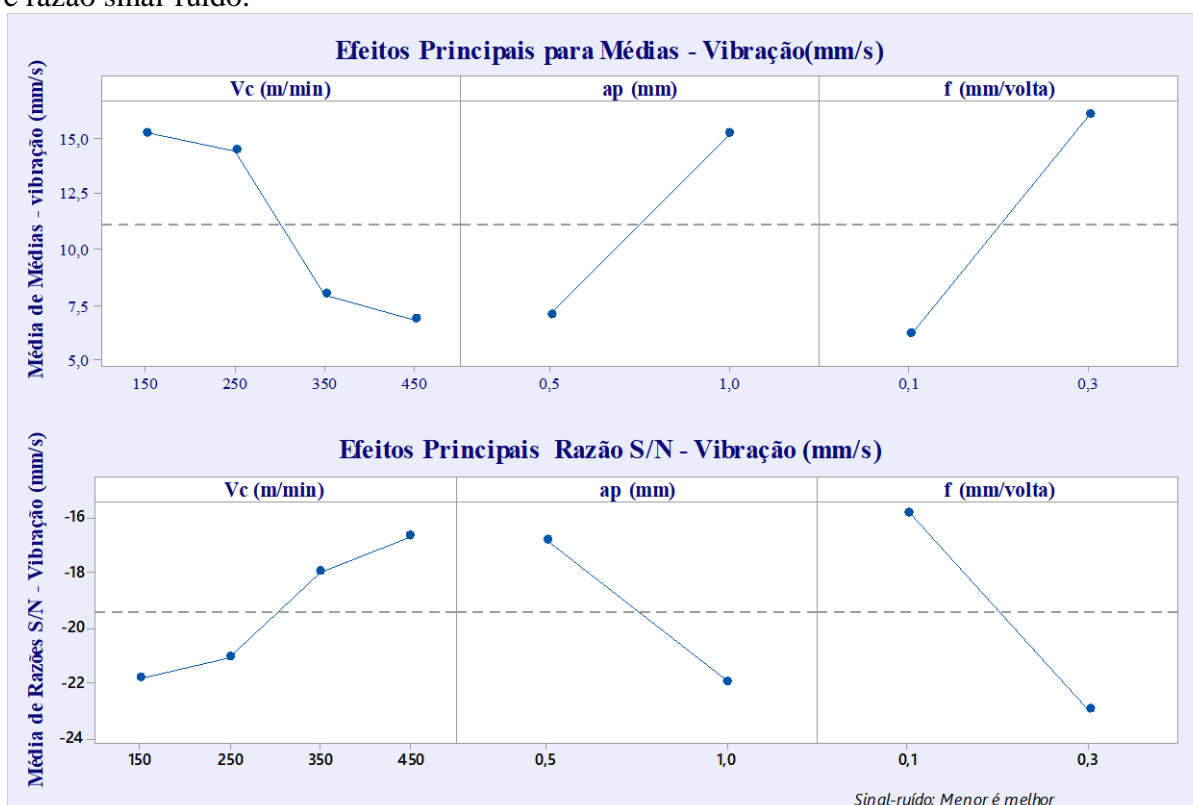
Fonte: Própria Autora (2020).

Conforme tabela 17 de variância por ANOVA os fatores velocidade de corte e profundidade de usinagem foram significativos em função da potência de usinagem. Para o fator avanço, não foi significativo, e o fator com maior contribuição foi a profundidade de usinagem 57,91%.

4.3.3 Vibração

No gráfico da Figura 54, pode-se verificar os resultados dos efeitos principais das médias para vibração no torneamento com metal duro.

Figura 54 - Análise dos efeitos principais das médias para vibração da ferramenta de metal duro e razão sinal-ruído.



Fonte: Própria Autora (2020).

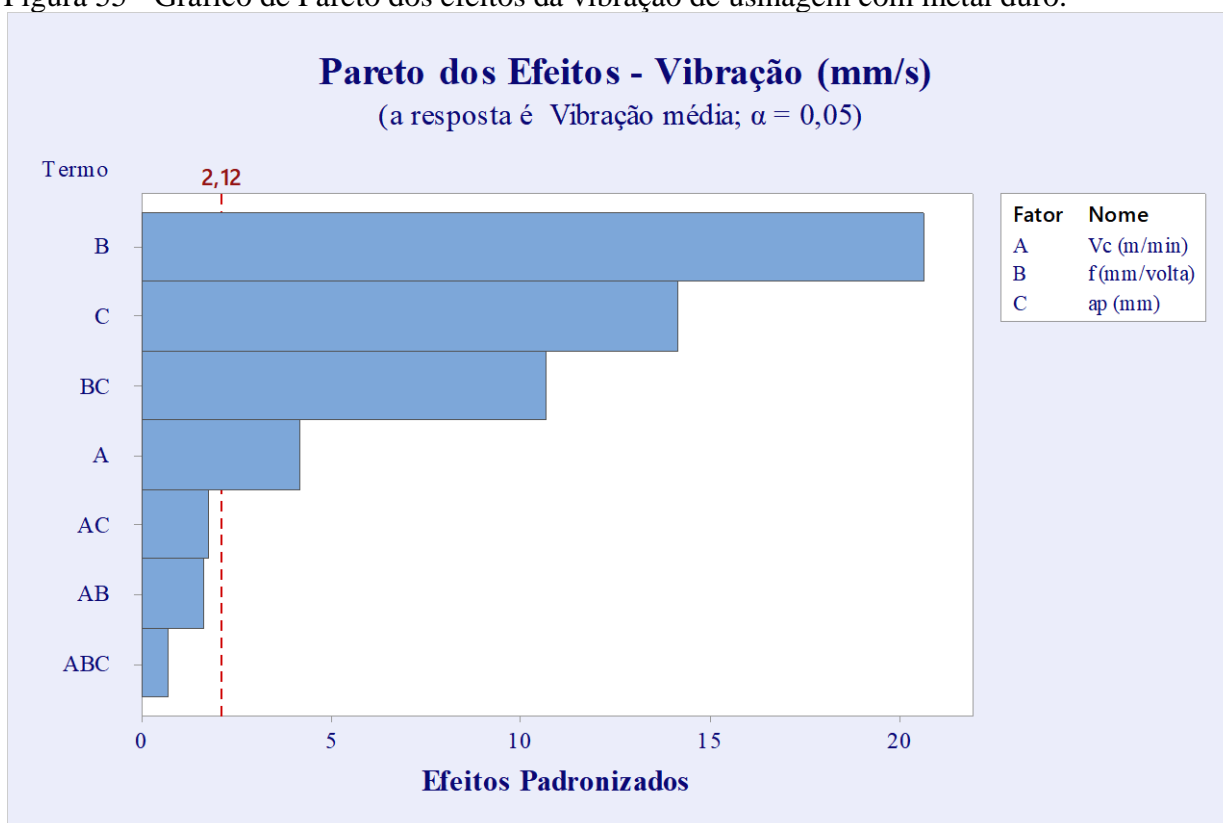
De acordo com Bonifácio1993, os fatores de entrada: avanço e profundidade de corte, afetam a estabilidade do sistema, e à medida que estes aumentam ocorre um aumento da vibração. Sendo a vibração um fator associado ao material da peça, quanto maior a dureza a vibração apresentaria redução da velocidade de corte, com o aumento da velocidade a vibração reduz, com aumento da profundidade de usinagem a vibração aumentaria.

Na Figura 55, para o fator aumento da velocidade de corte, é observado um decréscimo da vibração, confirmando os estudos de Bonifácio (1993), assegurando que um bom

acabamento estaria associado a vibrações menores ocorrendo com o aumento da velocidade. Os valores menores que reduzem a vibração foram observados na $V_c = 450$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/volta a média de médias (linha tracejada) na vibração foi 11,3 mm/s.

No gráfico de Pareto conforme Figura 55, os fatores mais influentes foram: avanço (f) seguido da profundidade de usinagem (a_p), comprovando a análise do gráfico de efeitos principais.

Figura 55 - Gráfico de Pareto dos efeitos da vibração de usinagem com metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

Na análise quanto a normalidade no *MINITAB18*® pelo teste de Anderson-Darling para a vibração na usinagem o valor encontrado foi normal *P-Value* 0,05, possibilitando posterior análise da variância conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Análise de variância ANOVA para vibração de usinagem com metal duro.

Análise de Variância Para Médias (Vibração)								
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	% Contribuição	
Vc (m/min)	3	112,376	112,376	37,459	117,17	0,008	25,65	
ap (mm)	1	131,087	131,087	131,087	410,03	0,002	29,92	
f (mm/volta)	1	194,01	194,01	194,01	606,84	0,002	44,28	
Erro de Resíduos	2	0,639	0,639	0,32				
Total	7	438,112						

Fonte: Própria Autora (2020).

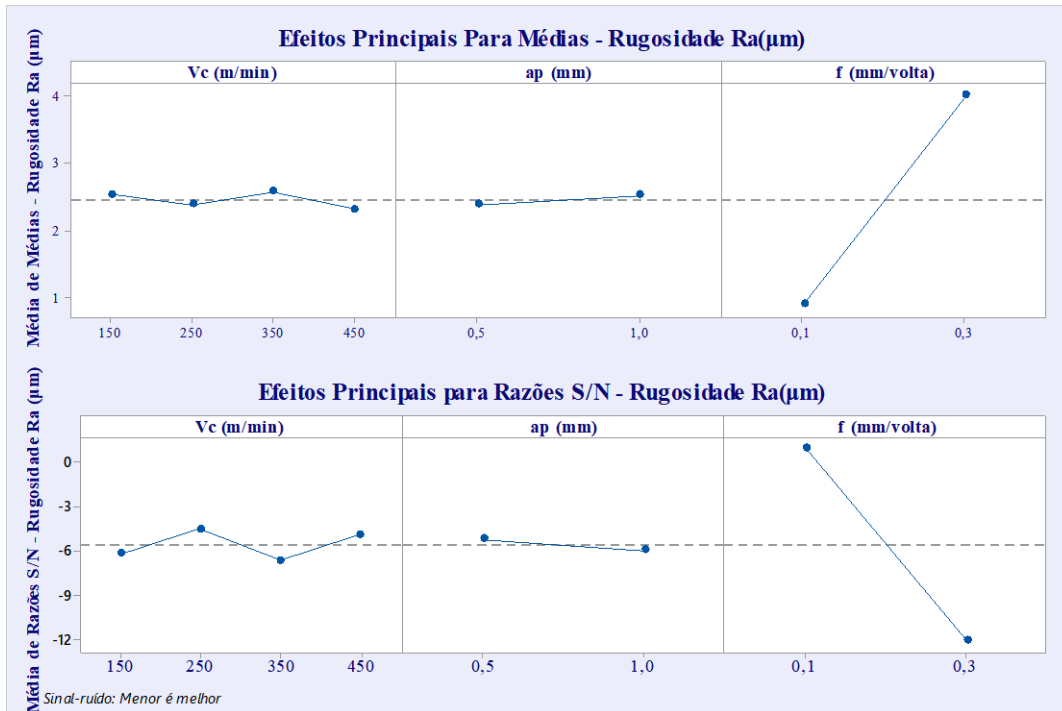
No cálculo de contribuição para vibração os quais foram significativos (f) de 44,28% seguido da profundidade de corte (a_p) 29,92% e velocidade de corte (V_c) 25,65%, os fatores contribuem significativamente visto que o P-valor 0,05.

4.3.4 Rugosidade R_a e R_t

Os valores de rugosidade na superfície da peça de ferro fundido vermicular foram medidos e analisados quanto aos valores das médias utilizando o *software MINITAB18*®. Na análise dos efeitos principais das médias para rugosidade R_a e R_t seguem conforme Figura 56 e Figura 57.

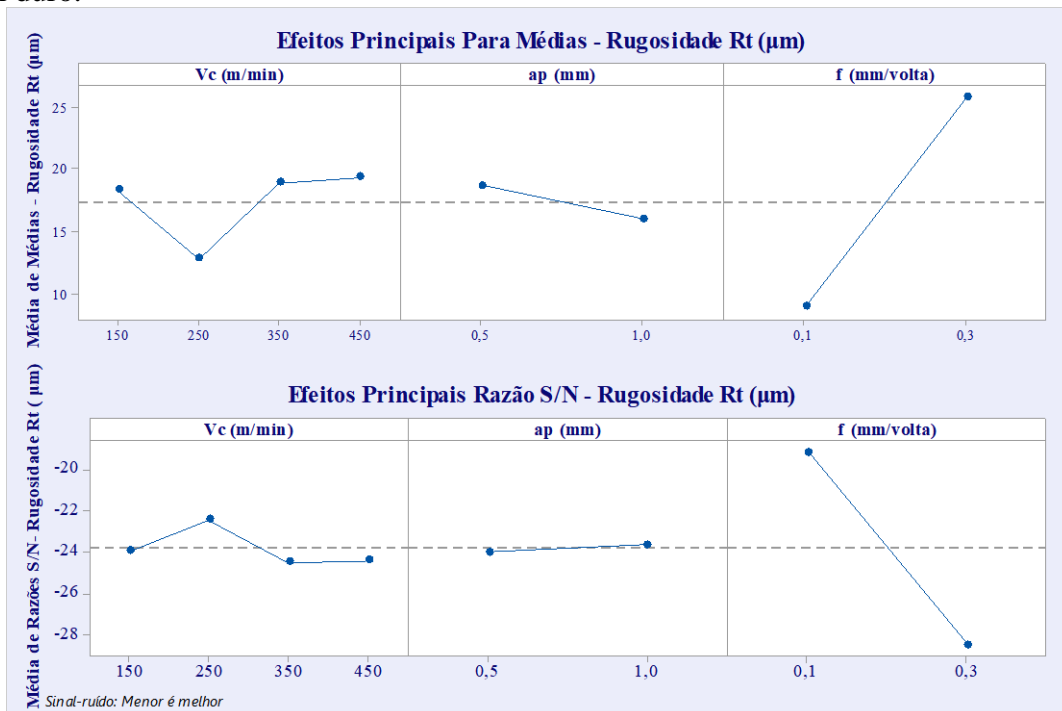
O valor médio das médias para R_a e R_t foram respectivamente 2,45 e 17,54 μm com níveis dos fatores para R_a que proporcionam melhor qualidade foram $V_c = 450$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/volta e para R_t foram $V_c = 250$ m/min; $a_p = 1$ mm; $f = 0,1$ mm/volta.

Figura 56 - Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Ra) com ferramenta de metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

Figura 57 - Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Rt) com ferramenta de metal duro.

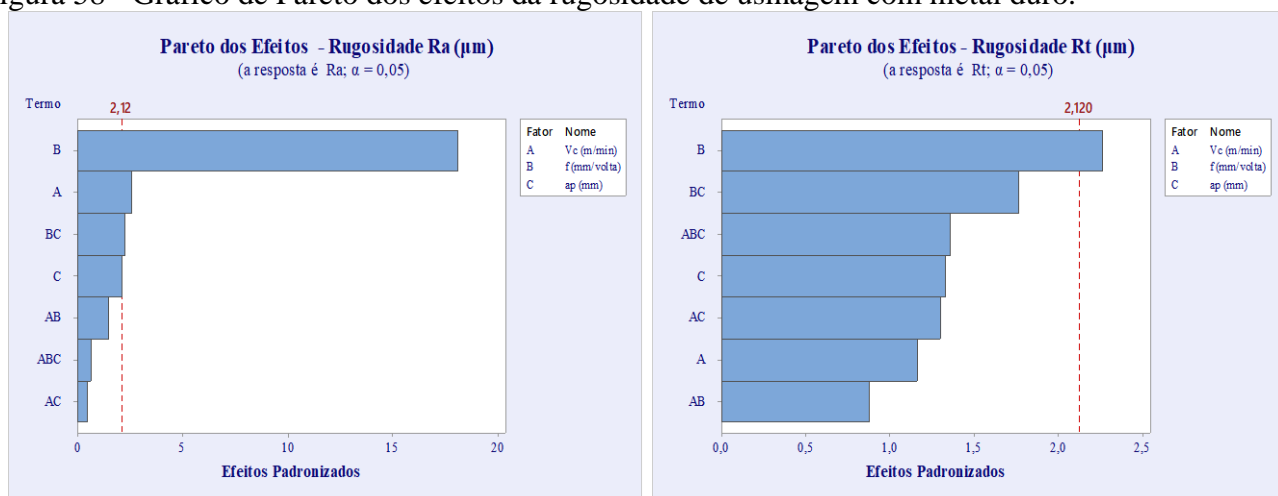


Fonte: Própria Autora (2020).

A ordem de influência dos fatores pode ser observada, sendo respectivamente para rugosidade Ra e Rt, o fator avanço (f) o mais influente onde, com o aumento do avanço ocorreu

um aumento da rugosidade. Os fatores que mais contribuíram para a redução da rugosidade foram analisados no gráfico de Pareto da Figura 58.

Figura 58 - Gráfico de Pareto dos efeitos da rugosidade de usinagem com metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

A ferramenta revestida de metal duro apresenta melhor desempenho quanto a rugosidade em função de apresentarem menor coeficiente de atrito quando comparada a outros revestimentos (PUNEETH; SMITHA, 2017).

Os valores de rugosidade aumentam com o avanço, apresentando valores de 4-6 µm na condição de usinagem sem fluido lubrificante. A melhoria na rugosidade do CGI com metal duro foi verificada na condição com lubrificante em função da redução das temperaturas de corte (KUZU; BIJANZAD; BAKKAL, 2015).

O avanço é considerado um dos parâmetros mais influentes sobre a rugosidade em função da altura dos picos e da profundidade dos. As marcas do avanço aumentam em proporção quadrática ao avanço, e com o aumento da temperatura reduz a resistência ao cisalhamento do material da peça reduzindo as forças de usinagem e promovendo melhoria do acabamento ((MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

Na análise quanto a contribuição dos fatores para rugosidade R_a e R_t os mais significativos foram, em ordem decrescente (f): de 85,75% para R_t e (f) 99,18% para R_a comprovando a avaliação do gráfico de Pareto. A análise de variância por ANOVA foi realizada para rugosidade, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Análise de variância ANOVA para média de rugosidade (Ra, Rt) de usinagem com metal duro.

Análise de Variância Para Médias Rt							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	3	55,51	55,51	18,5	1,57	0,412	8,50
ap (mm)	1	14,02	14,02	14,02	1,19	0,389	2,15
f (mm/volta)	1	560	560	560	47,58	0,02	85,75
Erro de Resíduos	2	23,54	23,54	11,77			
Total	7	653,07					

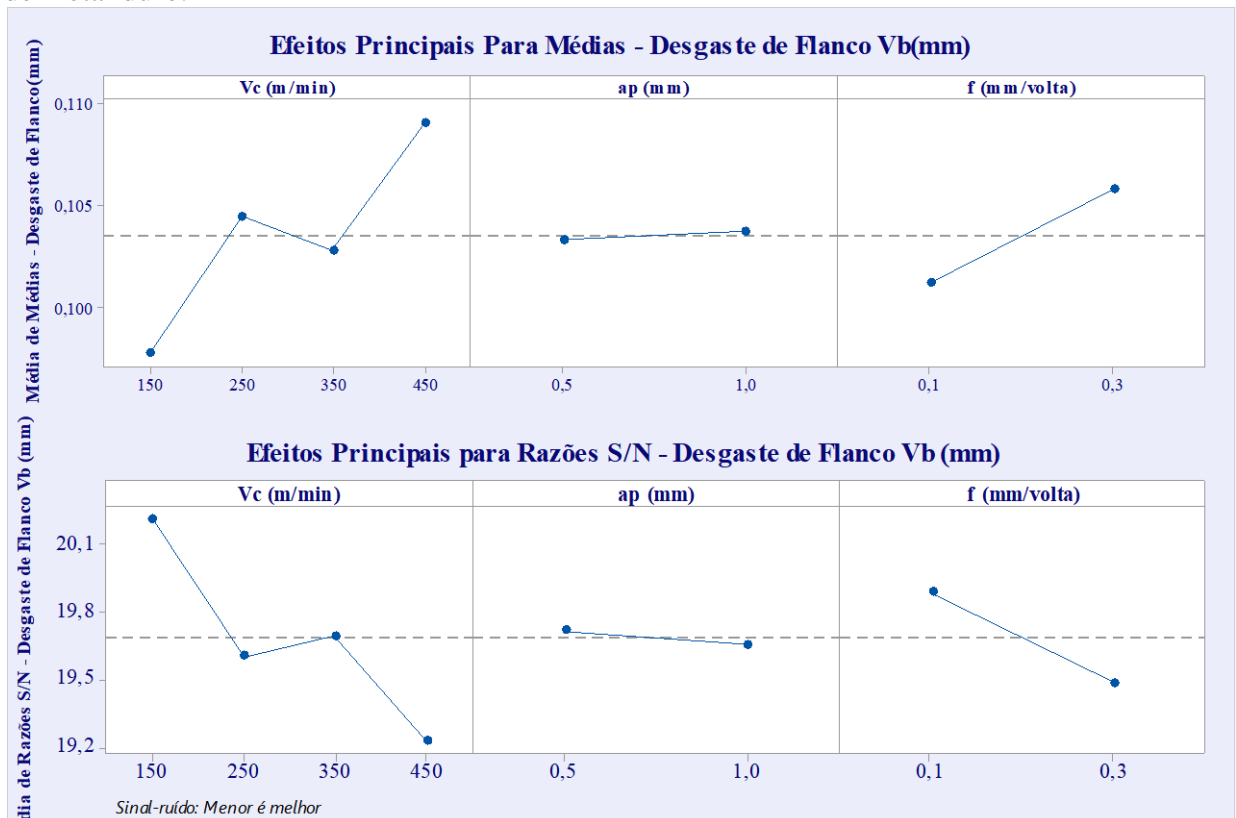
Análise de Variância Para Médias Ra							
	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	3	0,0898	0,0898	0,0299	1,93	0,359	0,46
ap (mm)	1	0,0387	0,0387	0,0387	2,5	0,255	0,20
f (mm/volta)	1	19,2293	19,2293	19,2293	1241,86	0,001	99,18
Erro de Resíduos	2	0,031	0,031	0,0155			
Total	7	19,3887					

Fonte: Própria Autora (2020).

4.3.5 Desgaste de Flanco V_b

O desgaste de flanco V_b foram medidos e analisados quanto aos valores das médias utilizando o *software MINITAB18*®. Na análise dos efeitos principais das médias para desgaste seguem conforme Figura 59. O valor da linha média das médias foi de 0,103 mm representado pela linha pontilhada ao centro do gráfico. A inclinação das retas indica os fatores mais influentes para efeitos principais, e o gráfico da razão sinal-ruído comprova que os fatores são menores são os mais influentes. A avaliação quanto a normalidade no *MINITAB18*® pelo teste de Anderson-Darling para o desgaste de flanco, apresentou-se significativa com P-value = 0,547. Mesmo os valores não apresentando normalidade de acordo com Pólya,1920 pelo método do teorema do limite central, aplicou-se a análise de variância ANOVA em função da quantidade de amostras N20.

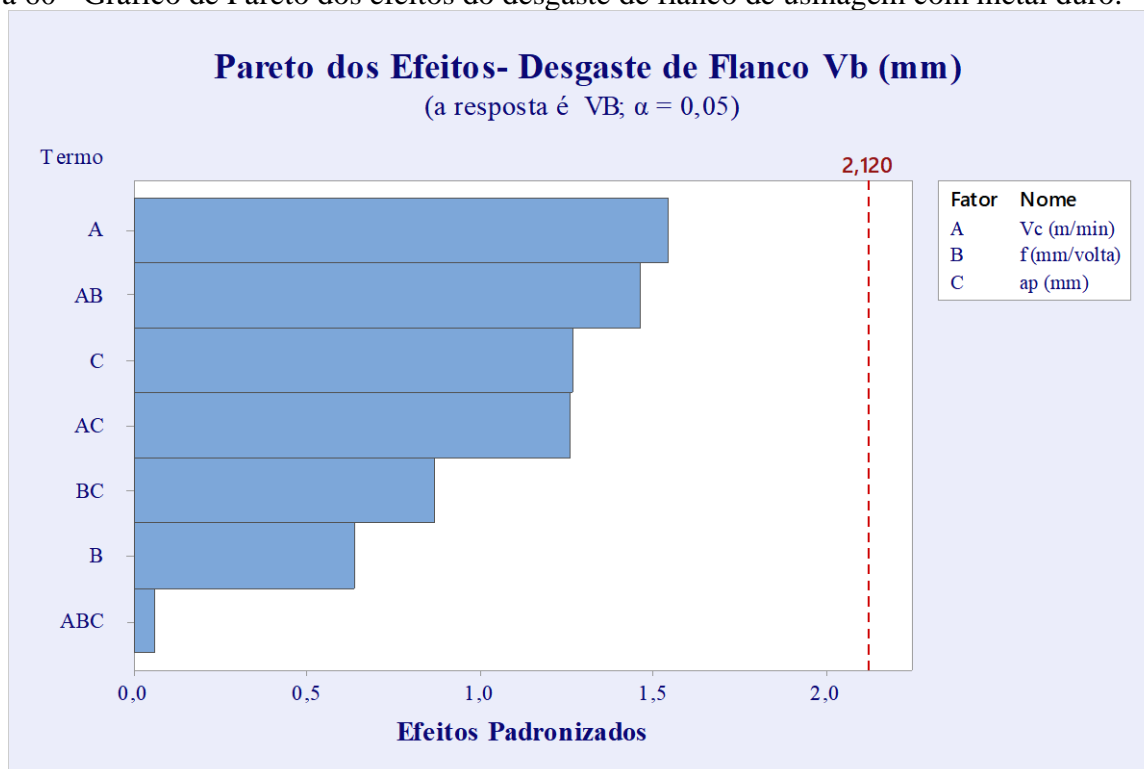
Figura 59 - Análise dos efeitos principais das médias para desgaste de flanco com ferramenta de metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

O gráfico de Pareto Figura 60, apresenta a magnitude dos efeitos, e nenhum dos efeitos foram significativos, com análise da ANOVA pode-se confirmar que os efeitos não são significativos uma vez que nenhum dos fatores cruzou a linha tracejada. Na Tabela 20, pôde-se verificar os valores de contribuição F dos fatores.

Figura 60 - Gráfico de Pareto dos efeitos do desgaste de flanco de usinagem com metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

Tabela 20 - Análise de variância para média de desgaste de flanco de usinagem com metal duro.

Análise de Variância Para Médias Vb								
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	% Contribuição	
Vc (m/min)	3	0,000128	0,000128	0,000043	0,66	0,65	42,81	
ap (mm)	1	0	0	0	0,01	0,948	0,00	
f (mm/volta)	1	0,000042	0,000042	0,000042	0,65	0,505	14,05	
Erro de Resíduos	2	0,000129	0,000129	0,000065				
Total	7	0,000299						

Fonte: Própria Autora (2020).

A contribuição por ordem decrescente foi Vc = 42,81% seguida do avanço f = 14,05%.

Segundo uma taxa de desgaste aumentará com o mecanismo difusivo e em função do aumento progressivo da velocidade de corte e do avanço, com o aumento desses parâmetros há aumento da temperatura de corte sendo esta a fonte para propiciar o mecanismo de difusão. Os desgastes mesmo não atingindo o critério para fim de vida (muito pequenos) são suficientes para uma avaliação do comportamento da ferramenta, a ferramenta de metal duro revestida apresenta desgaste de flanco muito lento, as camadas da cobertura propiciam alta resistência ao desgaste (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, 2013).

Reuter (1999) analisou torneamento com ferramentas cerâmica e metal-duro em ferros fundidos cinzento e vermicular e observou que a variação significativa quanto ao desgaste foi mais acentuada em altas velocidades de corte. Em baixas velocidade de corte as ferramentas de metal-duro apresentaram melhor desempenho.

O menor valor para o desgaste de flanco foi observado na seguinte configuração $V_c = 150$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/volta. O metal duro, no processo de usinagem apresenta melhor desempenho em baixa velocidade (REUTER, U., SCHULZ, 1999).

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA USINAGEM COM CERÂMICA

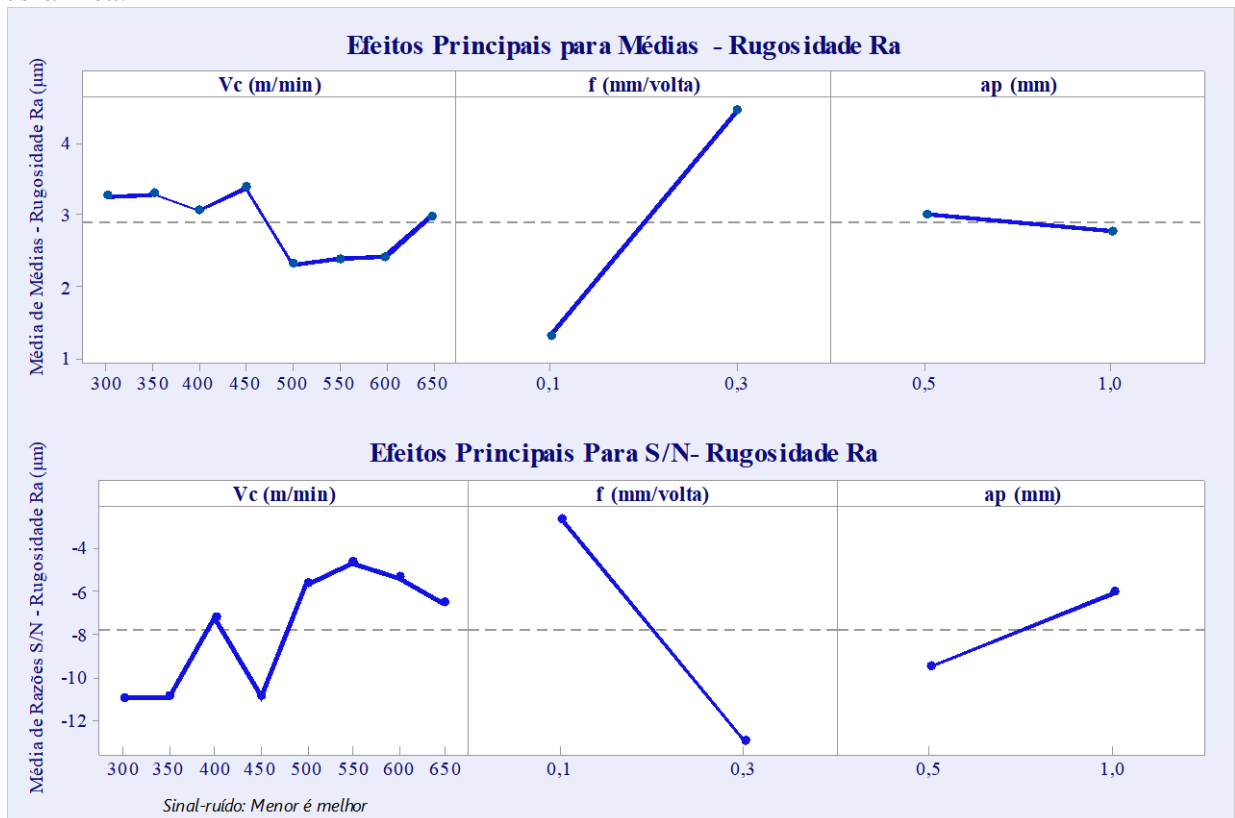
O torneamento do ferro fundido vermicular GJV450 foi realizado com ferramenta cerâmica $Al_2O_3 + MgO$, os parâmetros de entrada foram estabelecidos com base na literatura e com base em estudos do grupo de usinagem. A ferramenta foi desenvolvida em escala laboratorial, portanto os valores dos parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem da ferramenta foram realizados em caráter exploratório e comparativo com a ferramenta de metal duro comercial. Os resultados do planejamento de experimentos por Taguchi com matriz L16 foi analisado correlacionando as variáveis de saída e de entrada conforme planilha em anexo.

Utilizou-se para análise o *software MINITAB 18*® com análise de efeitos principais das médias e sinal-ruído, Pareto dos efeitos principais e análise de variância ANOVA.

4.4.1 Rugosidade Ra e Rt

A análise dos efeitos principais da médias para rugosidade Ra e Rt seguem conforme Figura 61 e Figura 62 com ferramenta de cerâmica, a linha média tracejada da média das médias para Ra foi de $2,88 \mu\text{m}$ e para Rt foi de $17,39 \mu\text{m}$.

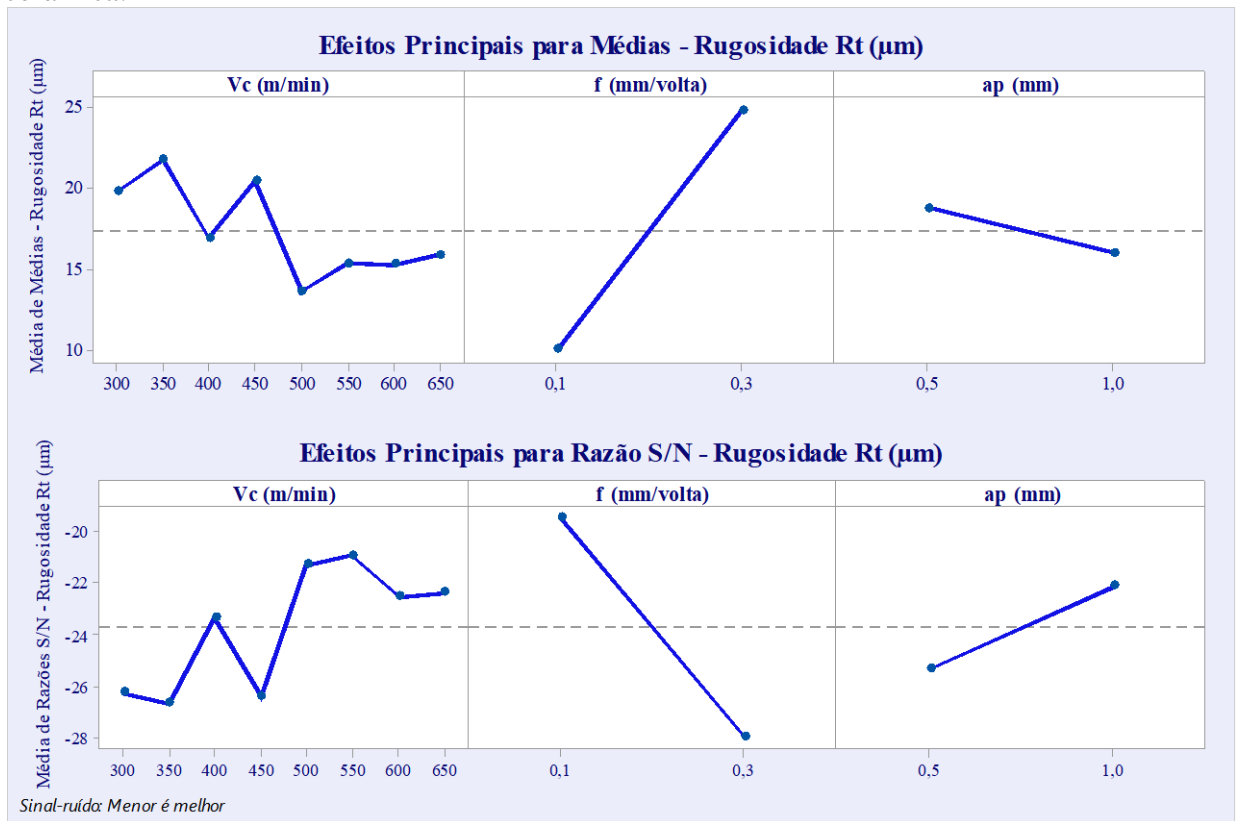
Figura 61 - Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (Ra) com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

A partir dos fatores, os valores os quais indicam minimizar a rugosidade Ra são foram $V_c = 500$ m/min; $a_p = 1,0$ mm; $f = 0,1$ mm/volta e para R_t foram $V_c = 500$ m/min; $a_p = 1,0$ mm; $f = 0,1$ mm/volta com usinagem a seco, este valores são comprovados na Figura 62 com aos efeitos principais para média e razão S/N, foi realizada análise variância por ANOVA conforme Tabela 21 e 22.

Figura 62 - Análise dos efeitos principais das médias para rugosidade (R_t) com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

Tabela 21 - Análise de variância ANOVA para rugosidade (Ra) de usinagem com cerâmica

Análise de Variância para Médias -Ra							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	7	2,7137	2,7137	0,3877	1,25	0,4	6,21
f (mm/volta)	1	38,9352	38,9352	38,9352	125,75	≈ 0	89,04
ap (mm)	1	0,2208	0,2208	0,2208	0,71	0,431	0,50
Erro de Resíduos	6	1,8578	1,8578	0,3096			
Total	15	43,7274					

Fonte: Própria Autora (2020).

Tabela 22 - Análise de variância ANOVA para rugosidade de usinagem com cerâmica

Análise de Variância para Médias - Rt							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	7,00	119,51	119,51	17,07	2,77	0,12	11,31
f (mm/volta)	1,00	869,12	869,12	869,12	140,96	≈ 0	82,25
ap (mm)	1,00	31,09	31,09	31,09	5,04	0,07	2,94
Erro de Resíduos	6,00	36,99	36,99	6,17			
Total	15,00	1056,71					

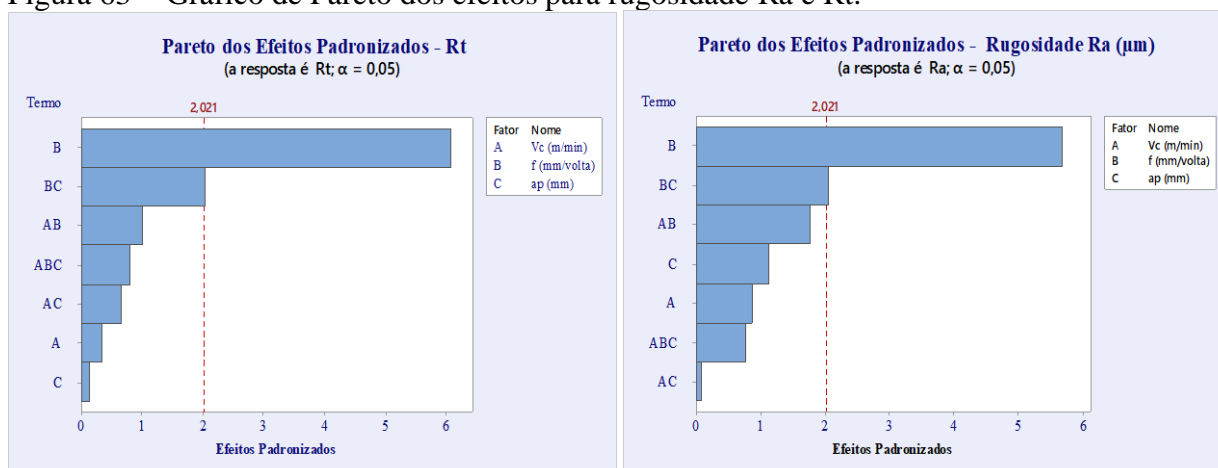
Fonte: Própria Autora (2020).

A análise de variância em relação a contribuição dos fatores para rugosidade R_a e R_t quanto aos efeitos significativos, são em ordem decrescente: avanço (f) de 89,04% para R_a , e (f) 82,25% para R_t . A contribuição da velocidade de corte para R_t foi de 11,31%, apresentou efeito F de 2,77. Para o efeito da profundidade de usinagem $F = 5,04$, o qual apresentou uma contribuição de 2,94%, é um efeito significativo F2. Para a Rugosidade R_a os efeitos F não foram relevantes na Vc e ap os quais apresentaram baixa contribuição e não foram significativos, porém foram altamente relevantes no avanço. Na Figura 63, verifica-se o gráfico de Pareto com os efeitos em ordem de influência, tanto para R_a quanto para R_t .

No torneamento com alumina 99,7% de pureza, foi observado que com aumento da velocidade de corte houve redução da rugosidade (MAIER; MICHAELI, 1997).

A análise da influência dos fatores e suas interações em relação a rugosidade média R_a e R_t podem ser observados no gráfico de Pareto sendo avanço o fator que maior exerce influência (f) seguido da interação do avanço (f) com a profundidade de usinagem (a_p), comprovando a análise do gráfico dos efeitos principais com o avanço apresentando maior inclinação de reta.

Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos para rugosidade Ra e Rt.

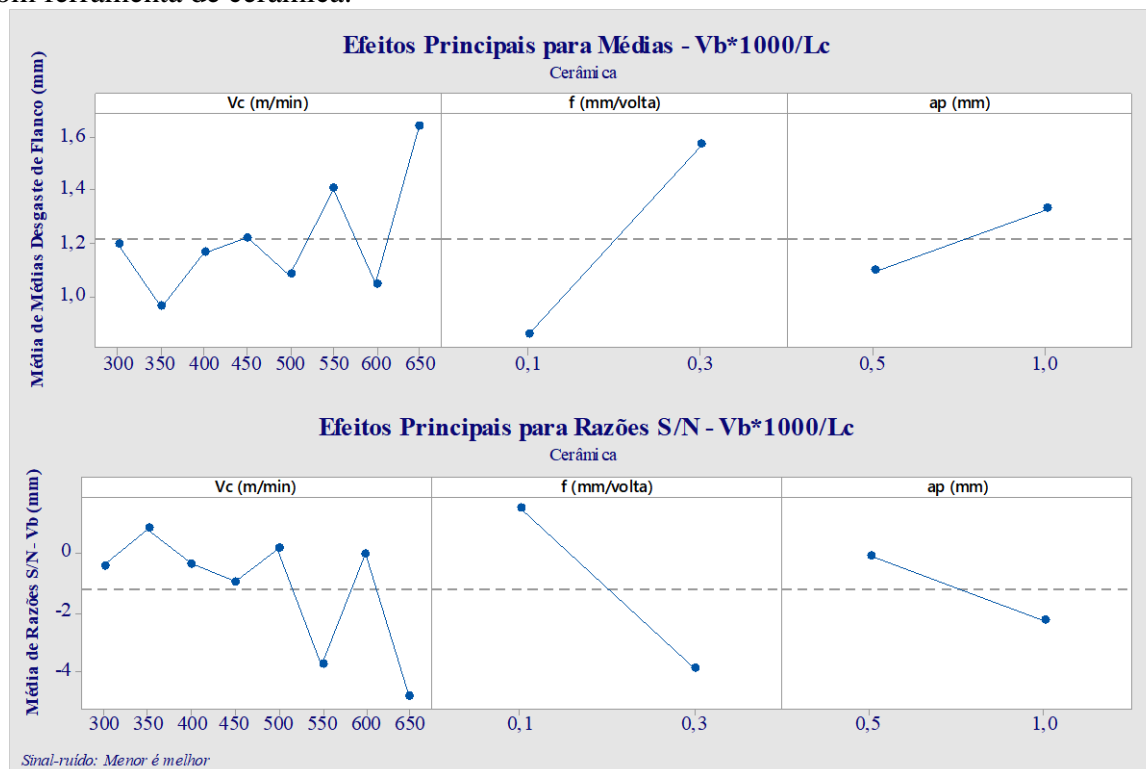


O avanço é o parâmetro mais influente a altura dos picos e a profundidade dos vales aumentam proporcionalmente ao avanço (MACHADO, A.R; COELHO, R.T; SILVA, M.B; ABRÃO, A.M, 2015).

4.4.2 Desgaste de Flanco V_b

O desgaste de flanco V_b foi medido e analisado em relação aos efeitos principais para médias em relação aos efeitos principais, conforme Figura 64. A linha tracejada da média das médias está em 0,19mm e os valores os quais minimizam o desgaste de flanco foram $V_c = 350$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/volta.

Figura 64 - Análise dos efeitos principais das médias para desgaste de flanco ($V_b \cdot L_c / 1000$), com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

Com análise da variância conforme Tabela 23, verificou-se os efeitos significativos para desgaste de flanco: o avanço seguido da profundidade de corte com contribuições de 62,17% e 6,74% a velocidade de corte não foi significativa.

Tabela 23 - Análise de variância ANOVA para desgaste de flanco de usinagem com cerâmica.

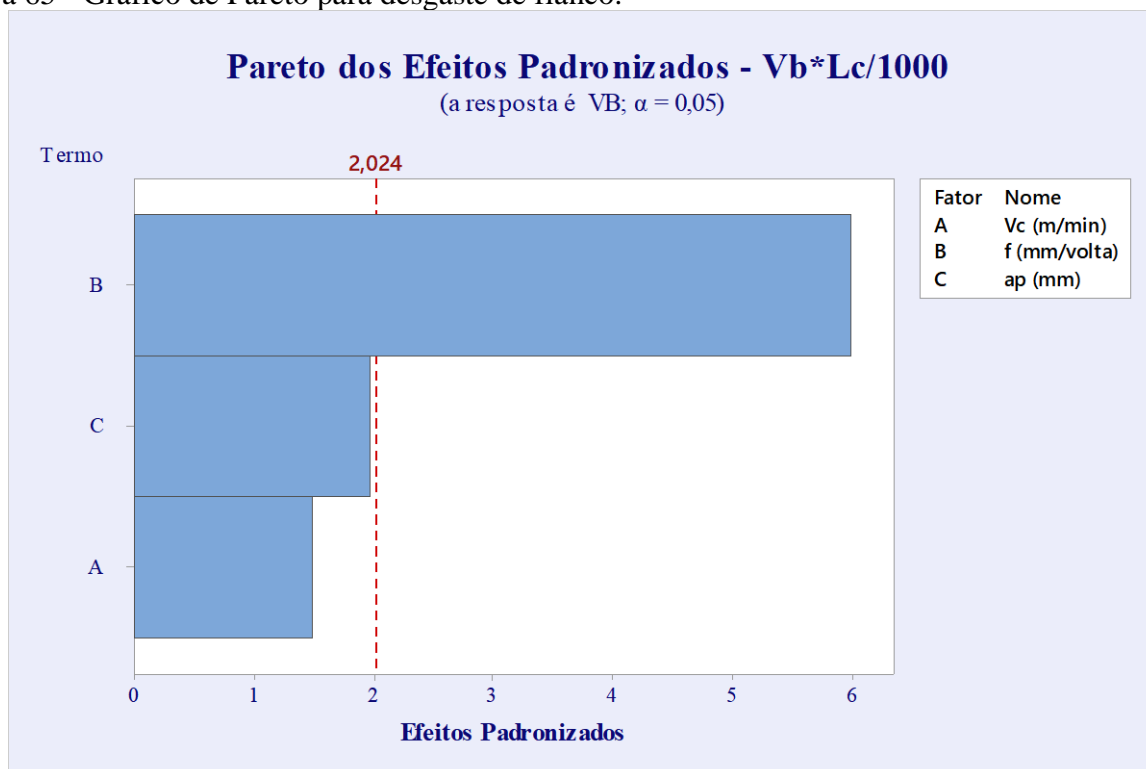
Análise de Variância para Médias - $V_b \cdot 1000 / L_c$

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	7	0,6683	0,6683	0,09547	1,65	0,278	20,47
f (mm/volta)	1	2,0294	2,0294	2,02944	35,15	0,001	62,17
ap (mm)	1	0,2199	0,2199	0,21988	3,81	0,099	6,74
Erro de Resíduos	6	0,3464	0,3464	0,05774			
Total	15	3,2641					

Fonte: Própria Autora (2020).

Na Figura 65, observou-se que o fator que maior exerceu influência para o desgaste de flanco foi o avanço, comprovado na análise da ANOVA.

Figura 65 - Gráfico de Pareto para desgaste de flanco.



Fonte: Própria Autora (2020).

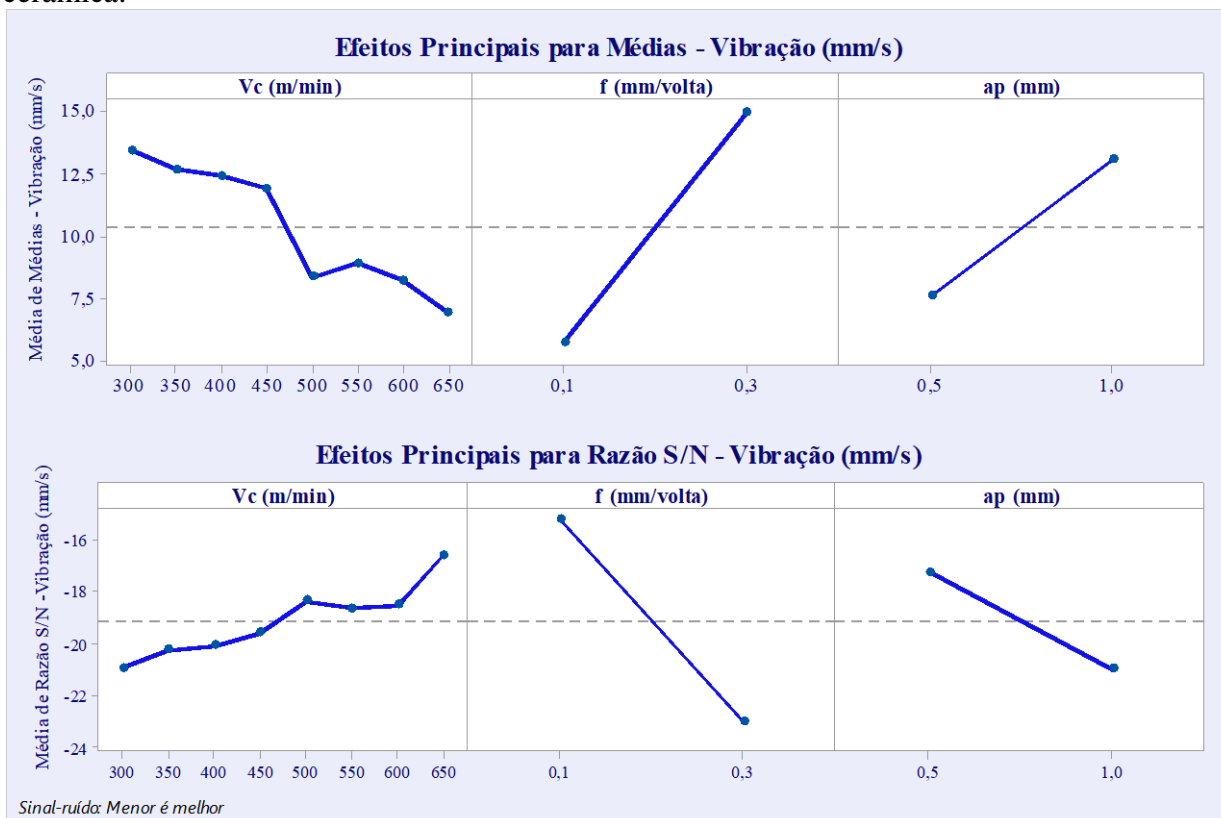
A análise da influência dos fatores e suas respectivas interações do desgaste de flanco V_b , foram comprovadas com o gráfico de Pareto, sendo o avanço o fator que maior exerceu influência, comprovando a análise do gráfico dos efeitos principais com o avanço apresentando maior inclinação de reta.

No estudo de desgaste de Robert-Perron, et al. (2007), foi realizada a operação de torneamento com cerâmica e verificou-se que o avanço foi o parâmetro mais influente. A variação dos esforços pode ser usada no monitoramento do desgaste da ferramenta para melhorar o acabamento (GONÇALVES JÚNIOR et al., 2015).

4.4.3 Vibração

No gráfico da Figura 66, pode-se verificar os resultados dos efeitos principais das médias e da razão S/N para vibração no torneamento com ferramenta cerâmica.

Figura 66 - Análise dos efeitos principais das médias para vibração com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

Na Figura 66, para o fator vibração é observado um decréscimo da vibração com o aumento da velocidade de corte, os valores menores que reduzem a vibração foram observados na $V_c = 650$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/volta. A média de médias na vibração, linha pontilhada, foi 10,37 mm/s.

A análise da vibração é fundamental para o planejamento do processo de corte, no torneamento e assegurar a qualidade do material usinado (STEPAN et al., 2017b).

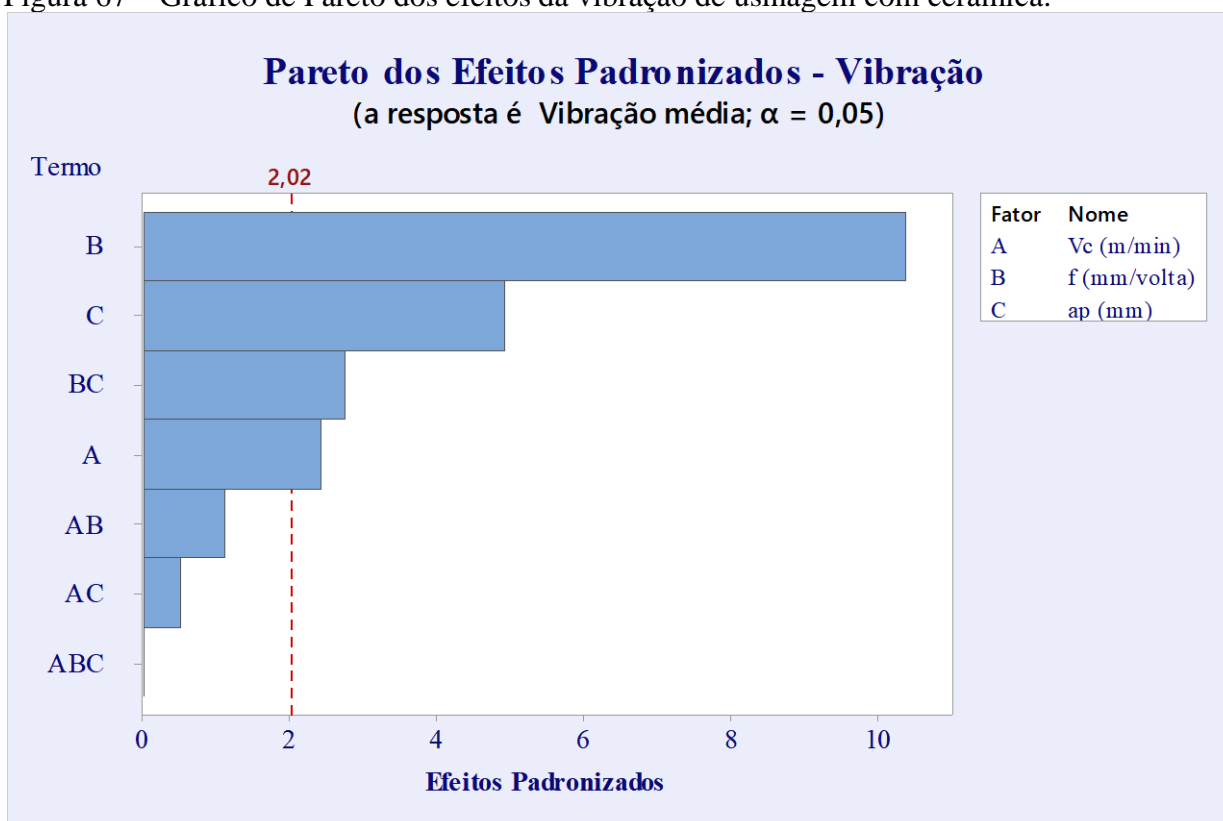
Os valores foram analisados pelo método da análise por variância ANOVA conforme Tabela 24 para verificar a significância dos efeitos, e na Figura 67, foram confirmados, pelo gráfico de Pareto os fatores mais influentes para vibração. Os efeitos que maior exercem influência, para a vibração com avanço foram avanço, com contribuição de 61,50% e profundidade de corte 21,78%, foram em ordem decrescente os que apresentaram maior significância na vibração, todos os fatores foram significativos.

Tabela 24 - Análise de variância ANOVA para vibração de usinagem com cerâmica.

Análise de Variância para Médias - Vibração							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição
Vc (m/min)	7	86,561	86,561	12,366	15,44	0,002	15,83
f (mm/volta)	1	336,23	336,23	336,23	419,87	≈ 0	61,50
ap (mm)	1	119,097	119,097	119,097	148,72	≈ 0	21,78
Erro de Resíduos	6	4,805	4,805	0,801			
Total	15	546,693					

Fonte: Própria Autora (2020).

Figura 67 – Gráfico de Pareto dos efeitos da vibração de usinagem com cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

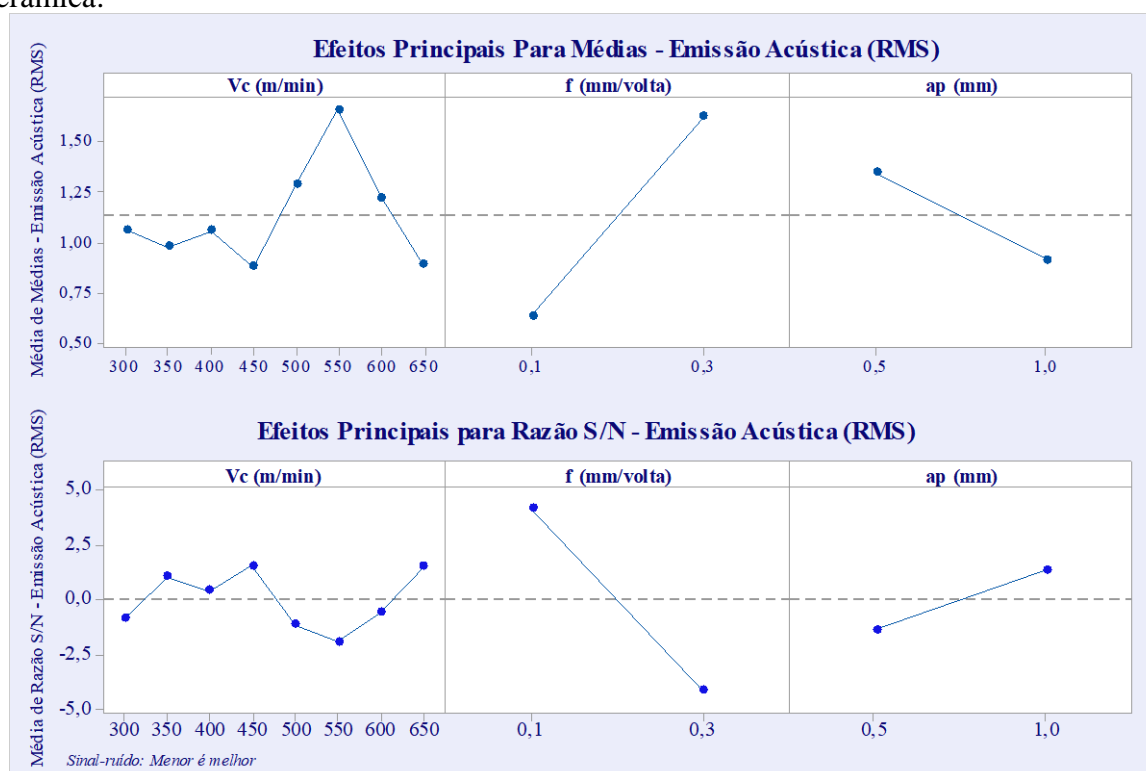
No gráfico de Pareto conforme Figura 67 os fatores influentes foram avanço (f) seguido da profundidade de usinagem (a_p), comprovando a análise do gráfico de efeitos principais.

Com aumento da velocidade de corte no processo de usinagem, ocorre um decréscimo da amplitude de vibração, o tipo de ferramenta também exerce grande influência (LIU et al., 2012). Como foi evidenciado nos gráficos de efeitos principais para vibração com ferramenta cerâmica.

4.4.4 Emissão Acústica

Na Figura 68, verificou-se os efeitos principais relacionados com os efeitos principais das médias para os fatores, os quais se adequam a condição de menores valores para emissão acústica com a ferramenta cerâmica: velocidade de corte 450 m/min; avanço de 0,1 mm/rev; profundidade de usinagem de 1,0 mm, com a linha média de 1,131 RMS.

Figura 68 – Análise dos efeitos principais das médias para emissão acústica com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

A análise de variância, foi realizada no software *MINITAB18*® por ANOVA foi realizada conforme Tabela 25 e verificado quais fatores mais significativos conforme Figura 69.

Os fatores mais significativos para médias da emissão acústica foi o avanço (f) com contribuição de 57,18%. O efeito da profundidade de usinagem, deve ser considerado uma vez que o valor de $F=3,5$ não é pequeno (F_2) deve ser considerado. O fator, associado a estatística que determina se este está associado com a resposta, quando maior que 2, determina que o efeito não é pequeno e devem ser considerados (MENTEN; PHADKE, 1991).

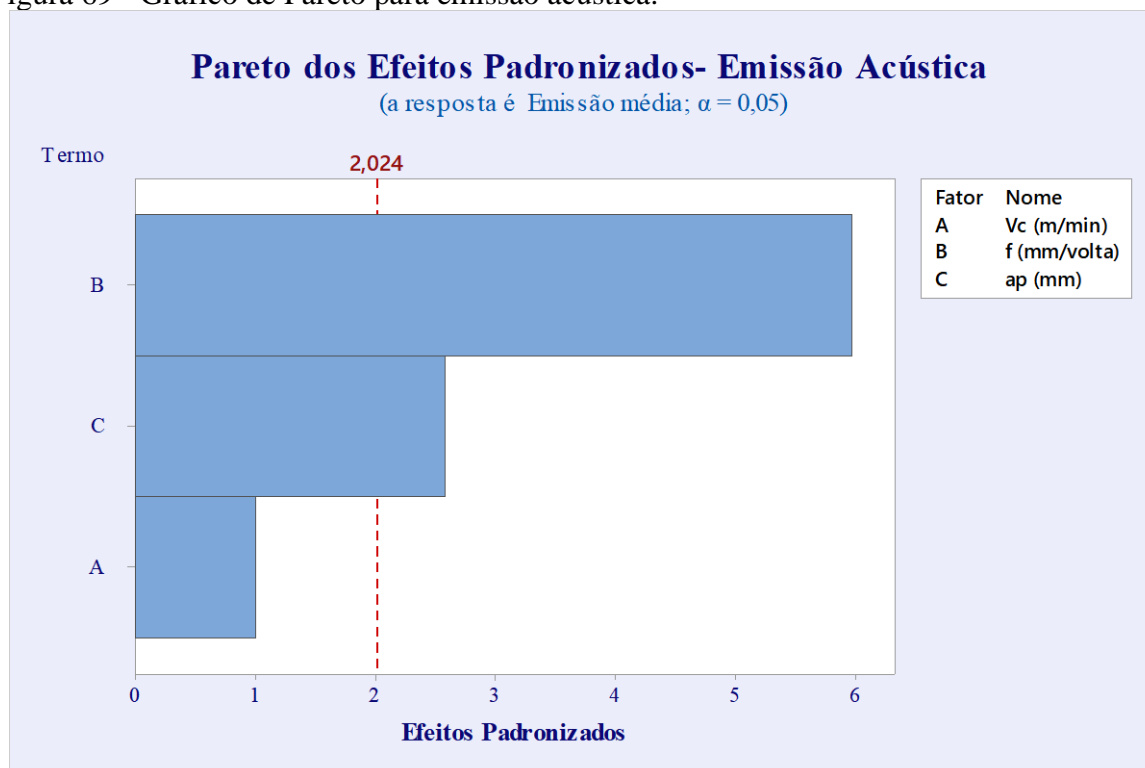
Tabela 25 – Análise de variância ANOVA para emissão acústica de usinagem com cerâmica.

Análise de Variância para Médias - Emissão Acústica								
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	%Contribuição	
Vc (m/min)	7	0,9165	0,9165	0,1309	0,63	0,721	13,57	
f (mm/volta)	1	3,8604	3,8604	3,8604	18,57	0,005	57,18	
ap (mm)	1	0,7274	0,7274	0,7274	3,5	0,111	10,77	
Erro de Resíduos	6	1,2471	1,2471	0,2079				
Total	15	6,7514						

Fonte: Própria Autora (2020).

No gráfico de Pareto os fatores estão dispostos em ordem de significância, confirmando que o avanço (f) é o que mais influencia na emissão acústica sendo o mais significativo pela ANOVA.

Figura 69 - Gráfico de Pareto para emissão acústica.



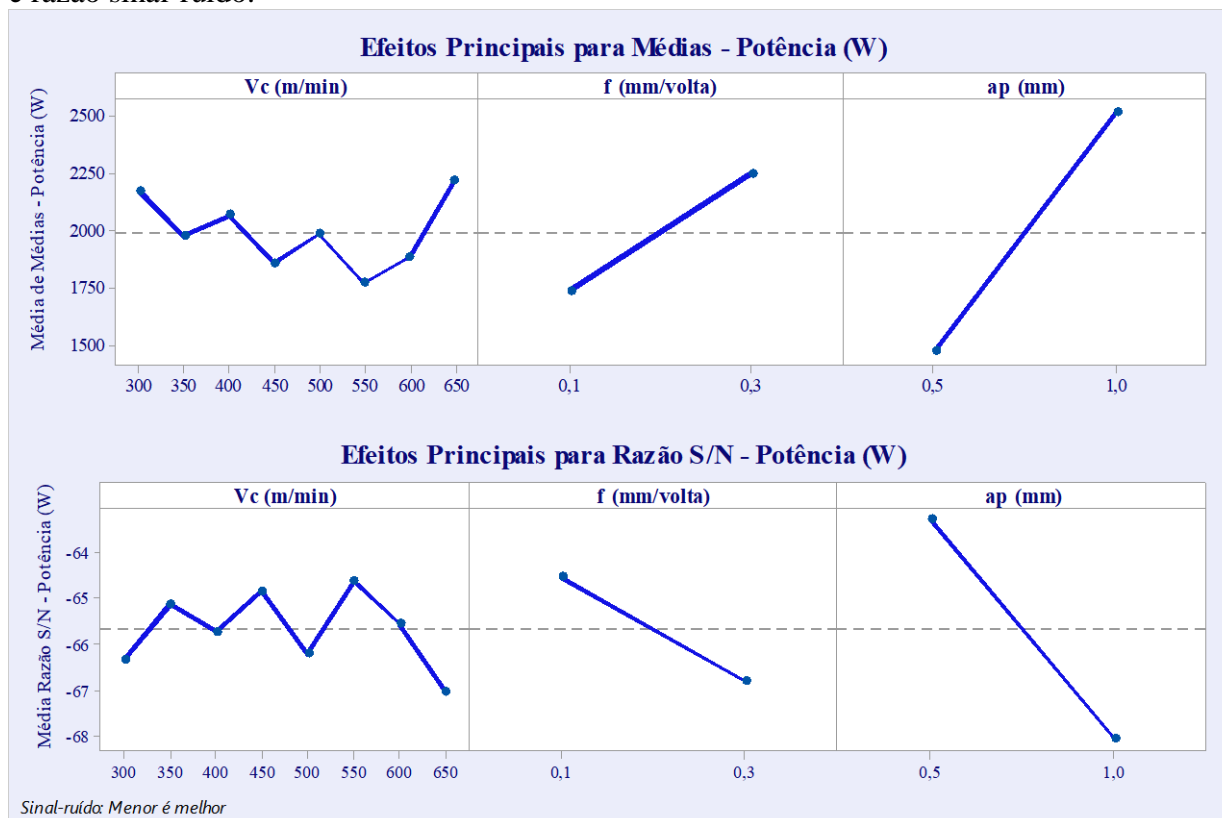
Fonte: Própria Autora (2020).

4.4.5 Potência de usinagem

Os efeitos principais para os valores de potência de corte com a ferramenta de cerâmica no gráfico da Figura 70 para as médias, apresentou a linha central do gráfico das médias 1992 W, para condição menor é melhor os valores de $V_c = 550\text{m/min}$; $f = 0,1\text{ mm/volta}$; $ap = 0,5$

mm são os fatores que minimizam a potência, e para avaliar a significância destes valores utiliza-se a análise ANOVA conforme Tabela 25.

Figura 70 – Análise dos efeitos principais das médias para potência com ferramenta de cerâmica e razão sinal-ruído.



Fonte: Própria Autora (2020).

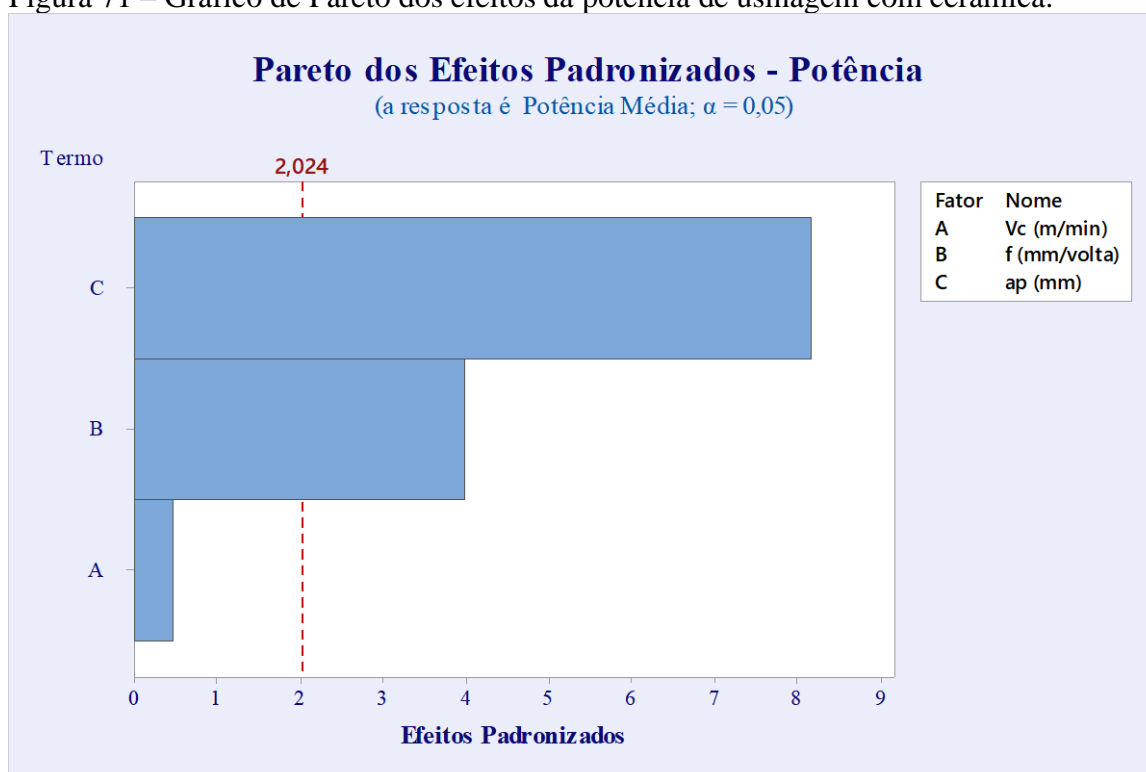
Conforme tabela 26 de variância por ANOVA os fatores avanço (f), com contribuição 17,49%, e profundidade de corte (a_p) com 72,65% foram significativos em função da potência consumida na usinagem. Para o fator velocidade de corte V_c , não foi significativo para variabilidade do processo, em relação a potência. A ordem de significância foi analisada no gráfico de Pareto da Figura 71.

Tabela 26 – Análise de variância ANOVA para potência de usinagem com cerâmica.

Análise de Variância para Médias - Potência							
Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P	% Contribuição
Vc (m/min)	7	328102	328102	46872	1,15	0,44	5,65
f (mm/volta)	1	1015835	1015835	1015835	24,96	0,002	17,49
ap (mm)	1	4219314	4219314	4219314	103,66	≈ 0	72,65
Erro de Resíduos	6	244222	244222	40704			
Total	15	5807473					

Fonte: Própria Autora (2020).

Figura 71 – Gráfico de Pareto dos efeitos da potência de usinagem com cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

No gráfico de efeito de Pareto para potência com a ferramenta cerâmica pode-se observar que os efeitos significativos por meio da análise da linha de *lenth* (linha tracejada), os quais demonstraram que: a profundidade de usinagem (*ap*) seguida do avanço (*f*) influenciaram na potência de corte com índice de confiabilidade de 95%. A barra que passa a linha tracejada é considerada com um valor significativo. Com intuito de assegurar a qualidade do material usinado (ferro fundido vermicular) e obter um bom rendimento das ferramentas, tomando como parâmetro o desgaste de flanco e a rugosidade (menor é melhor), observou-se conforme Tabela 27 a síntese dos resultados para ambas as ferramentas.

Tabela 27 – Síntese dos resultados das ferramentas de metal duro e cerâmica.

MATERIAL	VARIÁVEIS	Vc	f	ap
METAL DURO	EMISSÃO ACÚSTICA	150	0,1	0,5
	VIBRAÇÃO	450	0,1	0,5
	POTÊNCIA	450	0,1	0,5
	Ra	450	0,1	0,5
	Rt	250	0,1	1
	Vb	150	0,1	0,5
CERÂMICA	EMISSÃO ACÚSTICA	450	0,1	1
	VIBRAÇÃO	650	0,1	0,5
	POTÊNCIA	550	0,1	0,5
	Ra	500	0,1	1
	Rt	500	0,1	1
	Vb	350	0,3	0,5

Fonte: Própria Autora (2020).

Para os valores de rugosidade Ra e Rt a ferramenta cerâmica possibilitou usinagem com velocidades de corte maiores quando comparadas ao metal duro. O desgaste de flanco para a ferramenta cerâmica foi mais eficiente, do ponto de vista da possibilidade de utilização de: velocidade de corte maior, avanço e profundidade de corte maiores, fatores estes que do ponto de vista de processo poderiam assegurar um melhor desempenho no processo industrial.

4.5 MECANISMO DE DESGASTE FERRAMENTA METAL DURO E CERÂMICA.

Os principais mecanismos de desgaste dos insertos de metal duro e cerâmica foram analisados em microscópio óptico modelo *Stemi 2000* marca *Zeiss* e posteriormente confirmado em MEV TM3000 com utilização do espectrômetro de energia dispersiva (EDS). As ferramentas cerâmicas foram revestidas com prata para análise.

Nos insertos cerâmicos foram observados somente desgastes e nenhuma avaria. Na Figura 72 pode-se avaliar os desgastes ocorridos na ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$. Foram avaliados os três maiores desgastes de flanco V_b (medidos após a tréplica em cada seção do tarugo usinado), causados pelo mecanismo abrasivo e pouca mais clara aderência de material da peça usinada, os quais foram avaliados em microscópio óptico e confirmados analisando-se no MEV. A Tabela 28 apresenta os valores estratificados do desgaste de flanco para o planejamento de experimentos da cerâmica.

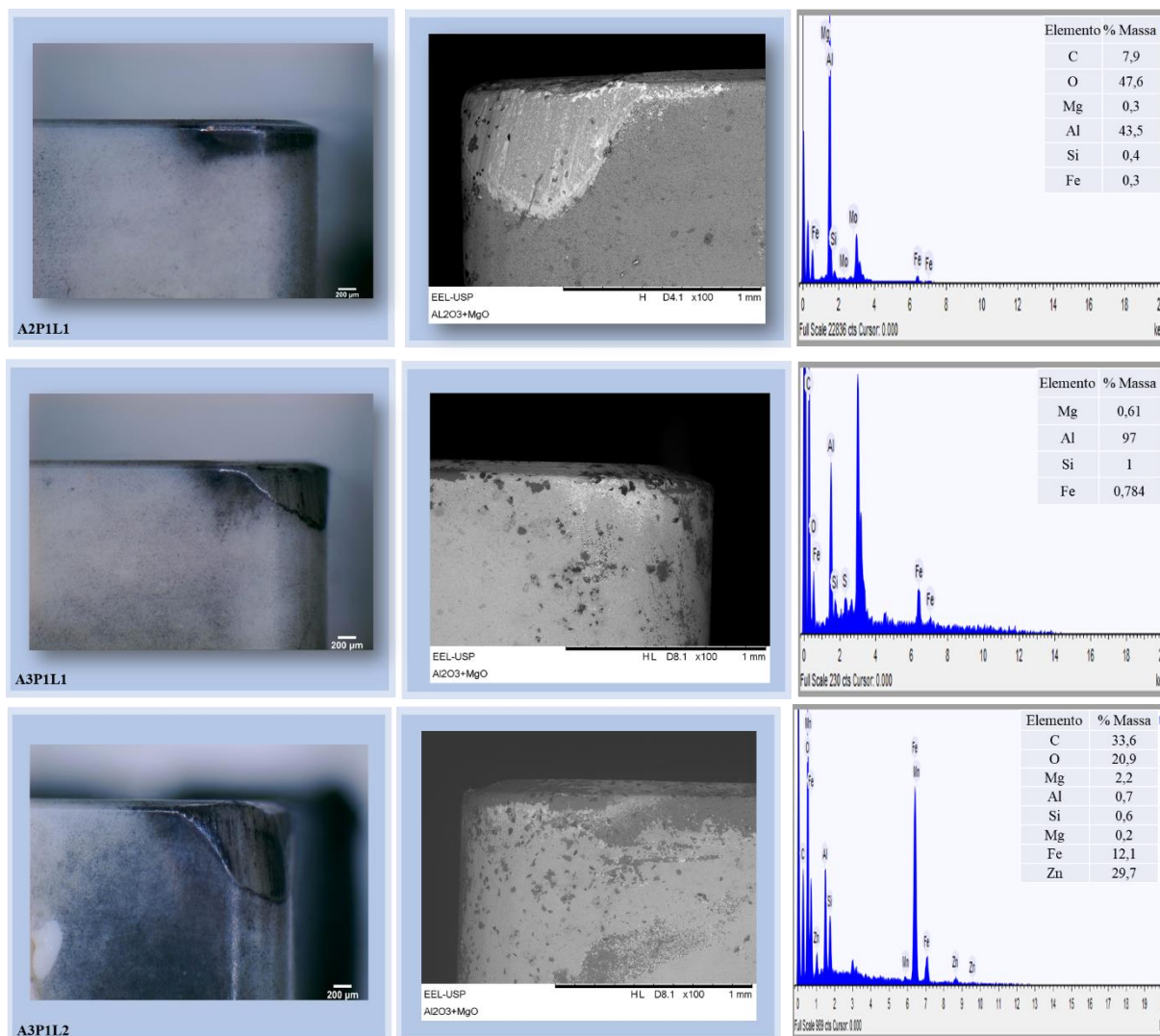
Tabela 28 - Estratificação do desgaste de flanco da ferramenta cerâmica.

	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	V_b (mm)
1	650	0,1	1	0,777
2	550	0,1	1	0,743
3	650	0,1	1	0,654

Fonte: Própria Autora (2020).

Os espectros de EDS da superfície da ferramenta apresentaram presença de C (carbono), Fe (ferro) e Si (silício), elementos associados ao material da peça usinada aderidos à superfície da ferramenta cerâmica, de acordo com a Figura 72.

Figura 72 - Análise do mecanismo de desgaste por MEV e EDS da ferramenta cerâmica.



Fonte: Própria Autora (2020).

Nas velocidades mais altas, com desgaste mais acentuado de flanco, a superfície da peça no torneamento apresenta uma camada branca, variando conforme a estrutura do material. Essas camadas brancas podem ser resultado de um aquecimento e resfriamento rápido, especialmente em desgaste excessivo de flanco (KÖNIG; KLINGER; LINK, 1990).

As arestas de corte com velocidades de 650 e 550 m/min selecionadas estratificando os três maiores valores de desgaste de flanco do ensaio, apresentaram desgaste abrasivo e material da peça aderido, evidenciado nas arestas analisadas na região da superfície de saída. As partes claras são associadas ao óxido de silício confirmado em EDS. E corroborando a análise de temperaturas mais elevadas as quais favorecem esse desgaste.

A morfologia da grafita é o principal fator de influência na geração de calor ao usar, o CGI gera intenso calor (desgaste de flanco) (TOOPTONG; PARK; KWON, 2018).

Conforme Abele et al. (2002) na usinagem do ferro fundido vermicular é evidenciado predominantemente os desgastes abrasivo e adesivo. O desgaste abrasivo e adesivo são os mecanismos de desgaste mais importantes na usinagem CGI (XAVIER, 2003).

Segundo Souza, L.F (2017) na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta de alumina magnésio ($V_c = 200, 300$ e 500 m/min.), avanço de $0,25$ mm/rot. e profundidade de corte de $0,5$ mm, apresentou o desgaste de flanco como principal mecanismo de desgaste, associando o melhor desempenho da cerâmica ao aumento da velocidade em função do calor gerado na interface da ferramenta com a peça, o que possibilita uma diminuição da resistência do material que está sendo usinado.

Conforme analisado no gráfico de Pareto para a ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ (Figura 65), o avanço foi o fator mais influente para minimizar o desgaste de flanco em função do aumento da velocidade de corte e concentração de calor na interface ferramenta e peça.

A Tabela 29 apresenta os valores estratificados do desgaste de flanco para o planejamento de experimentos da ferramenta de metal duro.

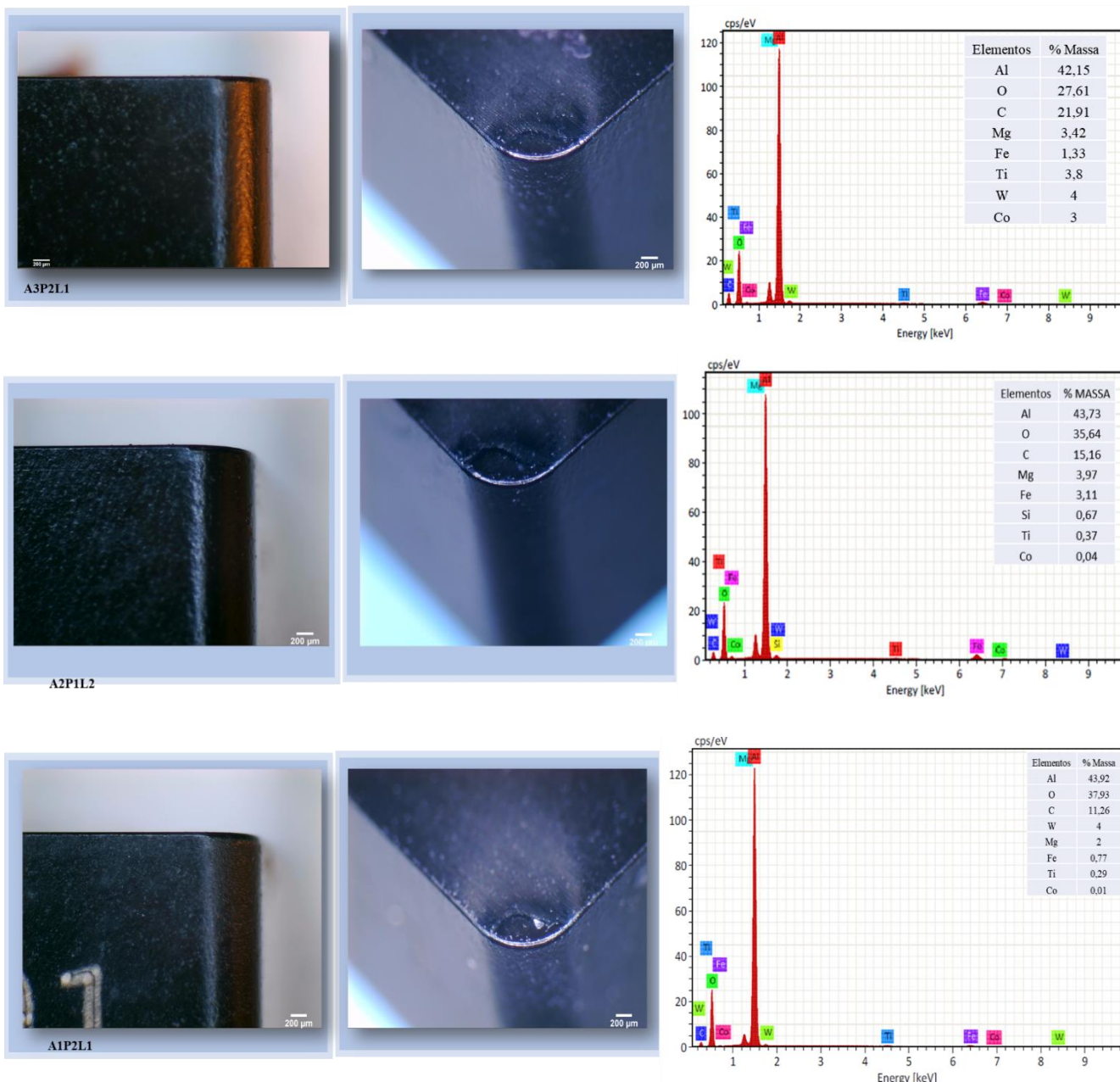
Tabela 29 – Estratificação do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro

	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	V_b(mm)
1	450	0,3	0,5	0,122
2	250	0,1	0,5	0,118
3	350	0,3	0,5	0,115

Fonte: Própria Autora (2020).

As arestas de corte com maiores valores de V_b foram analisadas em microscópio óptico modelo *Stemi 2000* e posteriormente no MEV *TM 3000 Hitachi*, conforme Figura 73 com região do desgaste de flanco observada no óptico e de saída no MEV, com análise por EDS e mapeamento de cores.

Figura 73 – Análise do mecanismo de desgaste por MEV e EDS da ferramenta metal duro.



Fonte: Própria Autora (2020).

A velocidade de corte foi o fator mais influente na análise do gráfico de Pareto para ferramenta de metal duro, onde observou-se um aumento do desgaste de flanco com o aumento da velocidade de corte, e na avaliação do desgaste de flanco o maior V_b foi evidenciado na $V_c = 450$ m/min. Após a terceira passada de cada aresta da ferramenta de metal duro na seção (tarugo dividido em três seções de 100mm) foi medido o valor de V_b para cada aresta estabelecendo-se o limite máx de $V_b = 0,6$ mm. Porém, como os testes foram exploratórios para comparação com a ferramenta de cerâmica, mesmo não atingindo o $V_{b\text{ máx}}$ após o terceiro passe, a aresta foi trocada assim como a seção da peça. Esse desgaste predominantemente abrasivo

ocorre em função do atrito entre a ferramenta e a peça. Com o tempo ocorre a remoção da camada revestida aumentando o desgaste de flanco.

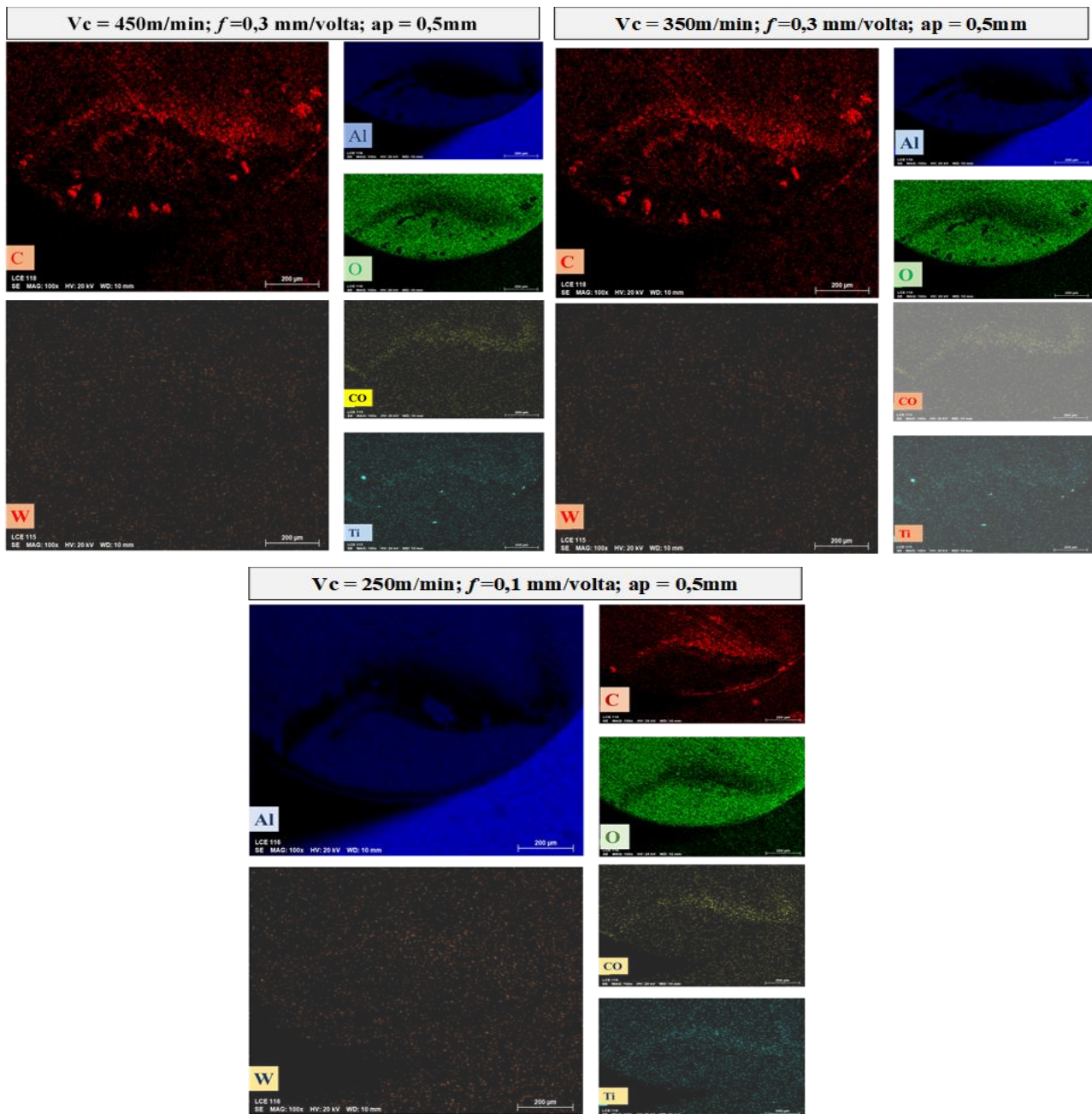
O revestimento de Al_2O_3 que recobre a ferramenta de metal duro, favorece a redução do desgaste em virtude da baixa condutividade térmica da alumina, favorecendo a redução do fluxo de calor na ferramenta, sendo este atribuído a espessura do revestimento o qual protege a ferramenta do mecanismo abrasivo. A remoção desse revestimento ocorreu em curto espaço de tempo em função do atrito e com a redução da dureza a alta temperatura ocasionada pela alta velocidade de corte (SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012).

A espectroscopia de energia dispersiva EDS, foi realizada na superfície da ferramenta de corte para as condições $V_c = 450; 350; 250$ m/min. Na análise foi possível identificar os elementos Al (alumínio), O (oxigênio), C (carbono); componentes do revestimento do metal duro, W (tungstênio) e Co (cobalto); componentes do substrato evidenciando que houve o desgaste em partes da superfície de flanco e saída e o Ferro (Fe), Silício (Si) componente do material usinado evidenciando que também houve pequena adesão de material do ferro fundido. Foi comprovada a presença destes elementos no mapeamento realizado no MEV conforme Figura 74. A interação entre a ferramenta e peça durante o torneamento com aumento de temperatura, devido ao aumento da velocidade de corte favorecendo a adesão de material do ferro fundido vermicular à peça.

Trent e Wright (2000) verificaram que ligas com alto teor de titânio e carbonetos favoreciam o mecanismo abrasivo e posteriormente a adesão.

Conforme avaliado na análise do planejamento em relação ao mecanismo de desgaste foi evidente a influência da velocidade de corte o que foi comprovado nas análises do MEV/EDS. A presença de ferro, carbono e silício sugerem adesão de material da peça de ferro fundido na ferramenta usinada e a presença de alumínio e oxigênio justificam a formação da camada de alumina (Al_2O_3), mesmo com baixo desgaste na região de flanco (DA SILVA et al., 2011).

Figura 74 - Mapeamento de elementos da ferramenta de metal duro realizado no MEV.



Fonte: Própria Autora (2020).

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado o estudo comparativo da aplicação da ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ com a ferramenta de metal duro almejando uma melhor condição de usinagem, a qual assegura um bom acabamento do ferro fundido vermicular. Com as análises realizadas, correlacionadas com os parâmetros de saída, para ambas ferramentas, pode-se perceber a melhor condição do processo para cada ferramenta.

A utilização de 0,25% peso de MgO como aditivo de sinterização foi eficaz quanto a massa específica aparente para as ferramentas desenvolvidas as quais apresentaram um valor de $3,91\text{g/cm}^3$, assim como os valores de K_{IC} obtidos para a cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, as quais se aproximaram dos valores encontrados na literatura entre 1,9 a $2,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para a cerâmica desenvolvida foi obtido K_{IC} de $2,13 \pm 0,25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, os quais possibilitaram sua utilização para ferramenta de corte.

Realizou-se a avaliação da influência de cada ferramenta analisada correlacionando com os parâmetros de saída, com uma menor variação quanto ao desgaste e rugosidades, e consequentemente menores variações no processo.

Para a ferramenta de metal duro os valores de potência consumida com as condições testadas de menor é melhor, foram $V_c = 450 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, sendo os fatores velocidade de corte, avanço e profundidade de corte os mais significativos. Na ferramenta de metal duro, a potência de corte aumenta de forma lenta até atingir um determinado desgaste, a qual propiciou a remoção do substrato. Profundidade de corte e avanço para a ferramenta cerâmica foram os fatores mais significativos, em função do aumento das áreas de contato e planos cisalhantes, o que propiciou um aumento das forças e potência consumida. Em relação as condições as quais minimizaram a variabilidade foi $V_c = 550\text{m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

Quanto a rugosidade R_a e R_t para a ferramenta de metal duro e cerâmica o fator de maior influência foi o avanço em ambos os casos. A ferramenta de metal duro apresentou menores valores de rugosidade R_a quando comparada a ferramenta de alumina em virtude da influência da tripla camada de revestimento e da presença do nitreto de titânio (TiN). Como o ferro fundido vermicular é abrasivo propicia uma perda do revestimento da ferramenta, porém a camada de nitreto de titânio impediu o maior desgaste da ferramenta em função de proporcionar baixo coeficiente de atrito.

O desgaste de flanco V_b não apresentou nenhum fator como significativo para o metal duro, porém a condição que minimiza a contribuição dos fatores no processo foram: $V_c = 150$

m/min, $f=0,1$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm. Os fatores de entrada não foram influentes para o desgaste de flanco (V_b) com o aumento da velocidade de corte no metal duro, em função da cobertura da ferramenta que propicia um desgaste mais lento, esta ferramenta apresenta melhor desempenho em velocidades de corte mais baixas quando comparada a ferramenta cerâmica o que favorece a utilização da ferramenta de alumina, quanto a obtenção de um menor desgaste de flanco na usinagem do ferro fundido vermicular, uma vez que a velocidade de corte utilizada para a cerâmica ($V_c = 350$ m/min) representa quase o dobro da velocidade com o metal duro.

Para a emissão acústica as melhores condições (menor é melhor), apresentada foi para o metal duro $V_c = 150$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, $a_p=0,5$ mm, com os fatores velocidade de corte, avanço e a interação de ambos como mais significativos. Na ferramenta cerâmica a melhor condição foi $V_c = 450$ m/min, $f = 0,1$ mm/rev, $a_p = 1,0$ mm com avanço e profundidade de corte como fatores mais significativos.

O desgaste na usinagem do ferro fundido vermicular (CGI) com ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ foi predominante abrasivo. O ferro fundido vermicular é abrasivo e possui coeficiente de transmissão de calor baixo comparados aos demais ferros fundidos propiciando um aumento de temperatura na ponta da ferramenta. Para o metal duro o mecanismo de desgaste em função das evidências encontradas por meio de EDS na ferramenta a qual apresentou elementos do ferro fundido foi difusivo. A ferramenta cerâmica de $Al_2O_3 + MgO$ se apresentou potencialmente favorável na utilização para torneamento do ferro fundido vermicular quando comparada a uma ferramenta comercial.

Para trabalhos futuros, uma avaliação da ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ em comparativo com outra ferramenta cerâmica, variando o teor de alumina. Para verificar a influência da composição em relação a usinabilidade do ferro fundido vermicular, e os mecanismos de desgaste da ferramenta cerâmica. Comparar a ferramenta cerâmica (desenvolvida em escala laboratorial) na usinagem do ferro fundido vermicular e nodular para estudar a influência da microestrutura do material (ferro fundido) no processo de usinagem, e o comportamento das ferramentas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **ABIFA**. Produção de fundidos tem novo incremento em 2019. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019>. Acesso em: 08 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 513)**: classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas - designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro: 2015. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 4287)**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: 2008. 18p.

ACCHAR, W.; SEGADÃES, A. M. Properties of sintered alumina reinforced with niobium carbide. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 27, n. 2, p. 427-430, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.05.004>. Acesso em: 13. dez 2019.

AMORÓS, J. L. A Operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial parte I: o preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n.3, p. 23–28, 2000. Disponível em: http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5_4.pdf. Acesso em: 13 dez. 2019.

BARSOUM, M. W. **Fundamentals of Ceramics**. In: __. Mc Graw Hill (Ed.). . IOP institute of physics publishing Bristol. 2. ed. Philadelphia: 1997, 2003. p. 1-587.

BINDER, M.; KLOCKE, F.; LUNG, D. Tool wear simulation of complex shaped coated cutting tools. **Wear**, v. 330-331, p. 600-607, maio. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.015>. Acesso em: 22 dez. 2019.

BRISTOT, V. M.; BRISTOT, V. M.; GRUBER, V. Estudo para utilização de prensagem uniaxial de ação simples para compactação de corpos moedores utilizada na indústria de placas de revestimentos cerâmicos. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica**, Espanha, v. 18, n.1, p. 47-55, 2014. Disponível em: <https://www2.uned.es/ribim/volumenes/Vol18N1Abril2014/V18N1A03%20Bristot.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. Ceramic materials: Science and engineering. **Ceramic Materials: Science and Engineering**, New York, v.1 , n.2, p. 1–766, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-71435-6>. Acesso em: 22 dez. 2019.

CASTILLO, E. **Process optimization a statistical approach**. 1e.d. Pennsylvania: Springer, Boston, M.A, 2007. 462p. 2007. Disponível em: <https://www.springer.com/gp/book/9780387714349>. Acesso em: 21 dez. 2019.

CHAIM, R. *et al.* Sintering and densification of nanocrystalline ceramic oxide powders : a review Sintering and densification of nanocrystalline ceramic oxide powders : a review. **Advances in Applied Ceramics**, Londres, v. 107, p.159-169, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174367508X297812>. Acesso em: 21 dez. 2019.

COBLE, R. L. Sintering crystalline solids. I. intermediate and final state diffusion models. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 32, n. 5, p. 787–792, 1961a. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1736107>. Acesso em: 21 dez. 2019.

CRACK, F. O. R. **NASA Technical Memorandum**. v. 3190, n.1, p.1-26, 1983. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19900016044>. Acesso em: 18 dez. 2019.

CUI, J. *et al.* Effect of notch depth on fracture toughness of zirconia ceramics tested by SEVNB method. **Ceramics International**, v. 44, n. 14, p. 17218–17223, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.179> . Acesso em: 18 dez. 2019.

DA SILVA, M. B. *et al.* Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron. **Wear**, Suíça, v. 271, n. 9–10, p. 2426–2432, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.030>. Acesso em: 18 dez. 2019.

DAWSON, S. *et al.* The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. **Transactions Journal of Materials & Manufacturing**, v. 110, n.5, p. 1-21, 2001. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2001-01-0409>. Acesso em: 22 dez. 2019.

DAWSON, S. Compacted graphite iron – A material solution for modern engine design. **SAE Internacional**, Estados Unidos, v.1, p. 241–246, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1083>. Acesso em: 22 dez. 2019.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. Practical applications for compacted graphite iron. **AFS Transactions**, Estados Unidos, v. C, n. 05, p. 1–10, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242272405_Practical_Applications_for_Compacted_Graphite_Iron. Acesso em: 22 dez. 2019.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. Practical applications for compacted graphite iron. **AFS Transactions**, Estados Unidos, v. C, n. 05, p. 1–10, 2004b. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242272405_Practical_Applications_for_Compacted_Graphite_Iron. Acesso em: 22 dez. 2019.

DE SOUSA, J. A. G.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. A review on the machining of cast irons. **Int J Adv Manuf Technol**, Londres, v. 94, n. 9–12, p. 4073–4092, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-1140-1>. Acesso em: 22 dez. 2019.

DEVILLEZ, A. *et al.* Journal of Materials Processing Technology Dry machining of Inconel 718 , workpiece surface integrity. **Journal of Materials Processing Tech**, Amsterdam, v. 211, n. 10, p. 1590–1598, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011>. Acesso em: 22 dez. 2019.

DIMLA, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Inglaterra, v. 40, n. 8, p. 1073–1098, jun. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00122-4). Acesso em: 22 dez. 2019.

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

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. **Artiber**, 8 ed. São Paulo. Editora: M.M, 2013.

DINIZ, A. E.; MACHADO, Á. R.; CORRÊA, J. G. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 87, n. 9–12, p. 3157–3168, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3>. Acesso em: 19 dez. 2019.

DORNFELD, D. A. NII-Electronic Library Service. **JSME Internacional Journal**, Califórnia, v. 45, n. 9, p. 1527–1529, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1248/cpb.37.3229>. Acesso em: 19 dez. 2019.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Inglaterra, v. 45, n. 12-13, p. 1353-1367, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003>. Acesso em: 19 dez. 2019.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 796p.

FIELD, R.; KAHLES, J. I.; JOHN, I. C. A review of measuring methods for surface integrity. **CIRP**, Estados Unidos, v. 21, n. 2, p. 219-238, 1972. Disponível em: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1972000.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2019.

FISCHER, Hans. **A history of the central limit theorem from classical to modern**. New York: Springer, 2011. 378p.

GONÇALVES JÚNIOR, M. *et al.* Análise do acabamento superficial e força de corte no torneamento de alumina a verde. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 480–490, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0048>. Acesso em: 19 dez. 2019.

GUESSER, W, GUEDES, L. C. Desenvolvimento recente em ferros fundidos aplicados à industria automobilística. In: Seminário da Associação de Engenharia Automotiva, 1997, São Paulo. **Anais... São Paulo: IX Simpósio da Associação de Engenharia Automotiva, 1997.** p. 1-11.

GUESSER, W. *et al.* Production experience with compacted graphite iron automotive components. **AFS transactions**, Estados Unidos, v. 071, n. 2, p. 1–11, 2001. Disponível em: http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/product_exp_grafita_auto.pdf. Acesso em: 17 dez. 2019.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 336p.

HARIDY, S.; GOUDA, S. A.; WU, Z. An integrated framework of statistical process control and design of experiments for optimizing wire electrochemical turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 53, n. 1–4, p. 191–207, 2011. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-010-2828-7>. Acesso em: 22 dez. 2019.

HEIMANN, R. B. Oxide ceramics: structure, technology, and applications. In: **Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**. 9.ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. p. 175–252.

HEINRICH, J. G.; GOMES, C. M. **Introduction to ceramics processing**. 1e.d. Alemanha: 2000. TU Clausthal, 2000. 229p.

HOLLINGER, S. D. AND I. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron. **SAE Internacional**, Estados Unidos: v.5, n.1, p.724, 2014. Disponível em: <https://www.sae.org/content/2001-01-0409>. Acesso em: 22 dez. 2019.

HÜBNER, H. B.; SOUZA, A. J. DE. Avaliação da rugosidade gerada no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido nodular DIN GGG50. In: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia- MG: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2013. p.9-10.

INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 1832**: Indexable inserts for cutting tools designation. 4nd. ed. França: ISO, 2004. 7p.

INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 23146**: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) Test methods for fracture toughness of monolithic ceramics - Single-edge V-notch beam (SEVNB) method. 1 st. ed. Suíça: ISO, 2008. 16p.

INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 3685**. Tool life testing with single-point turning tools. 2nd. ed. França: ISO, 1993. 15p.

JOHNSON, W. C.; COBLE, R. L. A Test of the Second-Phase and Impurity-Segregation Models for MgO-Enhanced Densification of Sintered Alumina. **Journal of the American Ceramic Society**, United States, v. 61, n. 3–4, p. 110–114, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09250.x> . Acesso em: 22 dez. 2019.

JUNIOR, E. M.; GUESSER, W. L.; SCHMIDT, R. A. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furação. In: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul : VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011. p.11.

KALPAKJIAN, S. **Machining processes and machine tools**. 11th. ed. Mc Graw-Hill, 2005. 1800p.

KLINK, U., FLORES, G. O uso da grafita vermicular em cilindros fundidos. **Revista Máquinas e Metais**, p. 38-47., 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>. Acesso em: 22 dez. 2019.

KÖNIG, W.; KLINGER, M.; LINK, R. Machining hard materials with geometrically defined cutting edges - field of applications and limitations. In: CIRP, 1990, Alemanha. **Anais...** Alemanha: CIRP, 1990.p. 61–64, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61003-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61003-8). Acesso em: 22 dez. 2019.

KUMAR, A.; KUMAR, S. Optimization of process parameters in turning operation – a review. **IJSRD** v. 4, n. 11, p. 423–425, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/31689739/Optimization_of_Process_Parameters_in_Turning_Operation_A_Review. Acesso em: 22 dez. 2019.

KUMAR, K.; ZINDANI, D.; DAVIM, J. P. Introduction to machining processes. In: advanced machining and manufacturing processes. 1 st. ed. Suíça: Springer International Publishing, 2018. 201p.

KUNDRÁK, J. *et al.* Accuracy of hard turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, v.2, n. 1–3, p. 328–338, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.056>. Acesso em: 22 dez. 2019.

KUZU, A. T.; BIJANZAD, A.; BAKKAL, M. Experimental investigations of machinability in the turning of compacted graphite iron using minimum quantity lubrication. **Machining Science and Technology**, Londres, v.19, n. 4, p.559-576, 2015. Disponível <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1345-5>. Acesso em: 22 dez. 2019.

LAKSHMANAN, A. Sintering of ceramics. **Intechopen**, Croácia, v. 1, p.251-270, 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/sintering-of-ceramics-new-emerging-techniques> . Acesso em: 22 dez. 2019.

LEE, W. K. K.; RATNAM, M. M. M.; AHMAD, Z. A. A. Detection of fracture in ceramic cutting tools from workpiece profile signature using image processing and fast Fourier transform. **Precision Engineering**, Japão, v. 44, n.1, p. 131–142, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.11.001>. Acesso em: 22 dez. 2019.

LI, X. A brief review : acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Inglaterra, v. 42, n.1, p. 157-165, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00108-0) . Acesso em: 22 dez. 2019.

LIKE, Q. *et al.* Types, performance and application of Al₂O₃ system ceramic cutting tool. **Journal of Rare Earths**, China, v. 25, n. 2, p. 322–326, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60495-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60495-5). Acesso em: 22 dez. 2019.

LIN, J.T; JONGHE, L. C. Initial coarsening and microstructural evolution of fast-fired and mgo-doped Al₂O₃. **J. am ceramic society**, United States, v. 80, n. 11, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb03208.x>. Acesso em: 22 dez. 2019.

LIU, D. *et al.* A cutting force model for rotary ultrasonic machining of brittle materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Inglaterra, v. 52, n. 1, p. 77-84, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.006>. Acesso em: 22 dez. 2019.

MACHADO, Á.; SILVA, M. **Usinagem dos Metais**. Uberlândia: Livro técnico Científico, 2004. 262p. Disponível em: https://www.academia.edu/37307326/laborat%c3%93rio_de_ensino_e_pesquisa_em_usinagem_faculdade_de_engenharia_mec%c3%82nica_universidade_federal_de_uberl%c3%82ndia_usinagem_dos_metalis. Acesso em: 22 dez. 2019.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos metais**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2015.408 p.

MAIER, H. R.; MICHAELI, N. Green machining of alumina. **Key Engineering Materials**, Alemanha, v. 132-136, p. 436-439, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.132-136.436>. Acesso em: 22 dez. 2019.

MARKOPOULOS, A. P. *et al.* **Modelling and optimization of machining with the use of statistical methods and soft computing**. 1st. Suíça: Springer Cham, 2015.. p.p. 39-88. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23838-8_2. Acesso em: 20 dez. 2019.

MENTEN, T.; PHADKE, M. Quality Engineering Using Robust Design. **Technometrics**, New York, v. 33, n. 2, p. 236, 1991. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/525794>. Acesso em: 22 dez. 2019.

MILLER, R. K. *et al.* (1991). **Process monitoring with acoustic emission**. **ASNT Nondestructive Testing Handbook**. 2.ed. New Jersey: Physical Acoustic Corporation, v.5, n.14, p.467-511.

MOCELLIN, F. Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**. Rio de Janeiro, v. XXVI, n. 1, p. 18-21, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167858782004000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 22 dez. 2019.

MOHAMMED, W. M.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Modeling the effect of compacted graphite iron microstructure on cutting forces and tool wear. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Inglaterra, v. 5, n. 2, p. 87-101, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175558171200017X>. Acesso em: 22 dez. 2019.

MOMPER, F. J. “Usinagem a seco e de materiais endurecidos”,. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.51, n.10-11, p. 753-765, 2000. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511001180>. Acesso em: 22 Dez 2019.

MONTGOMERY, D. C. *et al.* Using statistically designed experiments for process development and improvement: An application in electronics manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 16, n. 1, p. 55-63, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00057-5). Acesso em: 22 dez. 2019.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Croatia: InTech, 2013. 757p.

MORIWAKI, T. Application of acoustic emission measurement to sensing of wear and breakage of cutting tool. **Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering**, Japão, v.17, n.3, p.154-160, 1983. Disponível em: [10.1016/j.measurement.2016.06.006](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.006). Acesso em: 22 dez. 2019.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M.; KANDA, T. Machining characteristics of hard materials. In: **CIRP Annals**, 1988, Inglaterra. **Anais...** **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 1988. p.89-92.

OATHOUT, R. R. Compacted graphite iron for diesel engines castings. **Metal Progress**, United States, v. 113, p. 54-58, 1978. Disponível em: http://www.tupy.mx/downloads/guesser/compacted_graphite_iron_for_diesel.pdf. Acesso em: 22 dez. 2019.

OKASHA, M. M. *et al.* Mechanical microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Suíça, v. 61, n. 1-4, p. 213-225, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3714-7>. Acesso em: 22 dez. 2019.

ÖZCOBAN, H.; JELITTO, H.; SCHNEIDER, G. A. Influence of finite notch root radius and optically determined crack length on the measured fracture toughness of brittle materials. **Journal of the European Ceramic Society**, Inglaterra, v. 30, n. 7, p. 1579-1583, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221910000361>. Acesso em: 17 nov. 2019.

P.A BARBOSA; W.L GUESSER. Comparative study of the machinability of austempered and pearlitic ductile irons in drilling process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Rio de Janeiro, v.37, p. 115-122, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40430-014-0161-z>. Acesso em: 22 dez. 2019.

PÁLMAI, Z. Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear. **Wear**, Suíça, v. 303, n. 1-2, p. 437-445, 2013. Disponível em: 10.1016/j.wear.2013.03.025. Acesso em: 22 dez. 2019.

PAPACHARALAMPOPOULOS, A. *et al.* Acoustic emission signal through turning tools : A computational study. **Procedia CIRP**, Inglaterra, v. 8, p. 426-431, 2013. Disponível em: 10.1016/j.procir.2013.06.128. Acesso em: 15 dez. 2019.

PINA, J. C. *et al.* Microstructural study of the mechanical response of compacted graphite iron: An experimental and numerical approach. **Materials Science and Engineering: A**, Suíça, v. 658, p. 439-449, mar. 2016. Disponível em: 10.1016/j.msea.2016.02.017. Acesso em: 22 dez. 2019.

POPKE, H.; EMMER, T.; STEFFENHAGEN, J. Environmentally clean metal cutting processes-machining on the way to dry cutting environmentally clean cutting. **SAGE journal**, Alemanha, v. 213, p. 329-332, 1999. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/0954405991516813>. Acesso em: 22 dez. 2019.

PUNEETH, H. V; SMITHA, B. S. Studies on Tool Life and Cutting forces for drilling operation using Uncoated and coated HSS tool. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 6, 2017. Disponível em: <https://irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6605.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

QUINN, G. D.; BRADT, R. C. On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test. **Journal of the American Ceramic Society**, United States, v. 90, n. 3, p. 673-680, 2007. Disponível em: <https://irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6605.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

QUINN, G. D.; SWAB, J. J. Fracture toughness of glasses as measured by the SCF and SEPB methods. **Journal of the European Ceramic Society**, United States, v. 37, n. 14, p. 4243-4257, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.012>. Acesso em: 22 dez. 2019.

RAHAMAN, M. N. M. **Sintering of ceramics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 1-43.

REUTER, U., SCHULZ, H. Economic Machining of CGI. **Presentation in Engine Expo, Hamburg**, 1999. Disponível em: [10.1016/S0263-4368\(00\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(00)00032-9). Acesso em: 22 dez. 2019.

RIBEIRO, S. *et al.* Entalhamento de cerâmicas para medida de tenacidade à fratura pelo método SEVNB. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 350, p. 285–292, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132013000200014&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 22 dez. 2019.

RIBEIRO, S.; RIBEIRO, G. C.; RODRIGUES, J. A. Tenacidade à fratura de cerâmicas de carbetto de silício, alumina e argila vermelha pelos métodos IF e SEVNB. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 356, p. 509–515, dez. 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132014000400008&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 22 dez. 2019.

RICE, R. W. **Introduction to grain and particle effects on ceramic and ceramic composite properties**. 1^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2000, 712p.

RISBOOD, K.; DIXIT, U. S.; SAHASRABUDHE, A. D. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. **Journal of Materials Processing Technology**, Alemanha, v. 132, n. 1–3, p. 203–214, jan. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602009202>. Acesso em: 22 dez. 2019.

ROCHA, C. D. **Estudo do processamento da alumina visando aplicação em geometria hemisférica**. 2011. 92p. Dissertação (Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE, Rio de Janeiro, 2011.

ROSA, S.N; DINIZ, A.E; GUESSER, W.L; ANDRADE, L. F. Analysis of tool wear, surface roughness and cutting power in the turning process of compact graphite irons with different titanium content. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v.32, n.3, p. 234-239. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782010000300006> . Acesso em: 22 dez. 2019.

ROSA, L. C. **Acabamento de Superfícies - rugosidade superficial, oma – oficina mecânica para automação**. Sorocaba: Livros técnicos, 2006. 13p.

SALVINI, V. R. P. V. C. Mechanical properties of porous ceramics. Intchopen recent advances in porous ceramics. **Intechopen**, v.1, n.1, p. 171-193. 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-porous-ceramics/mechanical-properties-of-porous-ceramics>. Acesso em: 22 dez. 2019.

SANDVIK. **Materiais para usinagem**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>. Acesso em: 22 dez. 2019.

SARKAR, T.; SUTRADHAR, G. Investigation into the microstructure and mechanical properties of thin wall austempered gray cast iron. **Transactions of the Indian Institute of**

Metals, Índia, v. 71, n. 9, p. 2133–2143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1345-5>. Acesso em: 22 dez. 2019.

SERGEANT, G. F.; EVANS, E. R. The Production and properties of compacted Graphite Irons. **British Foundryman**, London, v.75, n^o, p. 115-124, 1978. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285539427_PRODUCTION_AND_PROPERTIES_OF_COMPACTED_GRAPHITE_IRONS. Acesso em: 22 dez. 2019.

SILVA, M. **Design of Experiments - Applications**. 1. ed. Croatia: InTech, 2013. 279p.

SOUZA, J.V.C., *et al.* Cutting tool development, characterization and application in machining of compacted cast iron. **AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology**, Itália, v.7, p. 551-561, 2005. Disponível em: 10.1007/3-211-38053-1_54 . Acesso em: 22 dez. 2019.

SOUZA, A. Avaliação da rugosidade gerada no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido nodular DIN GGG50. In: Congresso nacional de engenharia mecânica, 2014, Uberlândia **Anais...** CONEM, 2014. p.7. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280716619_AVALIACAO_DA_RUGOSIDADE_GERADA_NO_FRESAMENTO_FRONTAL_ASSIMETRICO_DO_FERRO_FUNDIDO_NODULAR_DIN_GGG50. Acesso em: 22 dez. 2019.

SOUZA, A. J. **Aplicação de multi-sensores no prognóstico da vida da ferramenta de Corte em torneamento**. 2004. 211 f. Tese (Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88055/208616.pdf?1>. Acesso em: 10 Nov 2019.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, Alemanha, v. 101, n. 1, p. 287–291, 2000. Disponível em: 10.1016/S0924-0136(00)00445-3. Acesso em: 22 dez. 2019.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.249 p.

STEPAN, G. *et al.* Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, Inglaterra, v. 66, n. 1, p. 377–380, 2017a. Disponível em: https://www.mm.bme.hu/~kiss_a/publications/2016_Kiss_CIRP_Ann.pdf. Acesso em: 22 dez. 2019.

STEPAN, G. *et al.* Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 377–380, 2017b. Disponível em: https://www.mm.bme.hu/~kiss_a/publications/2016_Kiss_CIRP_Ann.pdf/. Acesso em: 22 dez. 2019.

STRECKER, K.; RIBEIRO, S.; HOFFMANN, M.-J. Fracture toughness measurements of LPS-SiC: a comparison of the indentation technique and the SEVNB method. **Materials Research**, São Carlos, v. 8, n. 2, p. 121–124, jun. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000200004> . Acesso em: 03 out. 2019.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 45, n. 7, p. 1872–1884, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224112001443>. Acesso em: 22 dez. 2019.

TOOPTONG, S.; PARK, K.; KWON, P. A comparative investigation on flank wear when turning three cast irons. **Tribology International**, Inglaterra, v. 120, n. December 2017, p. 127-139, abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez87.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301679X17305832>. Acesso em: 22 dez. 2019.

TORRES, Y. *et al.* Fracture toughness evaluation of hardmetals: influence of testing procedure. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Inglaterra, v. 19, 2001a. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436800000445>. Acesso em: 22 dez. 2019.

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

VELICHKO, A.; MÜCKLICH, F. Bildanalytische Formanalyse und Klassifizierung der irregulären Graphitmorphologie in Gusseisen. **Practical Metallography**, Alemanha, v. 43, n.4, p.192-207, 2006. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.702.1847&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 18 nov. 2019.

VINET, L.; ZHEDANOV, A. A “missing” family of classical orthogonal polynomials. **Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical**, Inglaterra, v.44, n.8, 2010. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1751-8113/44/8/085201>. Acesso em: 22 dez. 2019.

WANG, S.; HUANG, G. H. A multi-level Taguchi-factorial two-stage stochastic programming approach for characterization of parameter uncertainties and their interactions : an application to water resources management. **European Journal of Operational Research**, Alemanha, v. 240, n. 2, p. 572–581, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.011>. Acesso em: 22 dez. 2019.

WU, Y. L.; W. Investigation of drilling machinability of compacted graphite iron under dry and minimum quantity. **Metals MDPI**, Suíça, v.9, n.10, p. 1–13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9101095>. Acesso em: 22 dez. 2019.

XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Tese (Doutorado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84763>. Acesso em: 22 dez. 2019.

YANG, C. T.; WEI, W. J. Effects of material properties and testing parameters on wear properties of fine-grain zirconia (TZP). **Wear**, Suíça, v. 242, n. 1–2, p. 97–104, jul. 2000. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164800004099>. Acesso em: 22 Dez 2019.

ZANOTTO, E. D; MIGLIORE, A. R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos. **Cerâmica**, São Carlos, v.37, n.247, p.7-16, 1991. Disponível em: <http://www.lamav.ufscar.br/artpdf/c37m.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

ANEXO

Planilha valores do planejamento de experimentos e valores de saída.

Ensaio	Vc (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Ra (μ m)	Rt (μ m)	VB (mm)	Emissão (RMS/volta)	Potência Média (W)	Vibração média (mm/s)
1	650	0,1	1	1,04	7,50	0,13	0,58	2556,70	5,42
2	650	0,1	1	0,81	7,50	0,78	0,54	2965,19	5,33
3	650	0,1	1	0,80	5,74	0,65	0,52	1615,57	5,00
4	600	0,1	1	0,71	6,30	0,30	0,71	2819,82	11,36
5	600	0,1	1	0,93	10,47	0,17	0,56	1795,97	5,55
6	600	0,1	1	0,96	5,11	0,16	0,54	1731,92	5,62
7	550	0,1	1	0,68	5,32	0,74	0,56	2787,02	6,38
8	550	0,1	1	0,60	3,69	0,18	0,54	2088,69	6,04
9	550	0,1	1	0,86	4,92	0,20	0,53	2031,69	5,83
10	500	0,1	1	1,12	7,34	0,19	0,54	2374,36	6,24
11	500	0,1	1	0,50	4,15	0,18	0,56	1889,58	6,20
12	500	0,1	1	1,22	7,21	0,18	0,54	2062,99	6,35
13	450	0,3	1	5,71	30,48	0,16	1,09	3603,49	19,19
14	450	0,3	1	4,53	25,34	0,16	1,78	2153,37	19,16
15	450	0,3	1	4,44	23,58	0,18	0,81	2089,83	18,79
16	400	0,3	1	4,87	28,13	0,16	0,91	3406,69	19,44
17	400	0,3	1	4,86	22,80	0,16	1,93	2640,68	20,24
18	400	0,3	1	5,65	25,32	0,15	1,88	2431,05	19,21
19	350	0,3	1	4,73	23,82	0,11	0,83	2959,25	20,88
20	350	0,3	1	4,58	34,01	0,10	1,71	2932,78	19,83
21	350	0,3	1	3,87	25,21	0,13	1,75	2667,28	19,45
22	300	0,3	1	4,00	19,86	0,16	1,06	3171,31	21,26
23	300	0,3	1	4,89	27,42	0,15	0,80	2446,35	21,06
24	300	0,3	1	4,13	22,68	0,16	0,72	2916,35	20,50
25	650	0,3	0,5	5,09	23,44	0,14	1,65	2394,86	7,99
26	650	0,3	0,5	5,44	26,75	0,14	1,24	2050,04	8,71
27	650	0,3	0,5	4,70	24,28	0,14	0,83	1705,22	9,44
28	600	0,3	0,5	3,92	25,74	0,14	1,56	1700,89	9,43
29	600	0,3	0,5	4,01	24,65	0,11	2,37	1625,90	8,74
30	600	0,3	0,5	4,03	19,53	0,11	1,60	1633,08	8,74
31	550	0,3	0,5	3,51	19,22	0,14	2,02	1321,43	15,45
32	550	0,3	0,5	4,20	26,54	0,11	3,02	1204,72	9,94
33	550	0,3	0,5	4,52	32,46	0,14	3,26	1211,46	9,90
34	500	0,3	0,5	3,47	17,23	0,13	0,63	999,00	6,35
35	500	0,3	0,5	3,39	23,18	0,16	3,54	2032,37	10,64
36	500	0,3	0,5	4,20	22,55	0,10	1,92	2563,25	14,52

37	450	0,1	0,5	4,23	24,67	0,14	0,57	1355,53	4,96
38	450	0,1	0,5	0,66	10,85	0,15	0,54	1165,27	5,24
39	450	0,1	0,5	0,68	7,85	0,23	0,50	801,71	4,07
40	400	0,1	0,5	1,26	7,37	0,16	0,56	1475,42	5,30
41	400	0,1	0,5	0,64	9,05	0,18	0,54	1258,40	5,27
42	400	0,1	0,5	1,07	9,04	0,15	0,54	1179,00	5,07
43	350	0,1	0,5	4,65	22,01	0,16	0,53	1345,67	5,04
44	350	0,1	0,5	0,96	11,44	0,16	0,52	682,64	5,27
45	350	0,1	0,5	0,98	14,21	0,16	0,53	1276,68	5,51
46	300	0,1	0,5	4,82	26,19	0,15	0,53	1487,81	5,57
47	300	0,1	0,5	0,76	13,38	0,16	1,36	1615,62	6,51
48	300	0,1	0,5	0,95	9,16	0,15	1,90	1402,78	5,73