

EDILON DE OLIVEIRA FRANÇA

**Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmicas de
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$**

Edilon de Oliveira França

**Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmicas de
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica área materiais.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

F814u	França, Edilon de Oliveira Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmicas de $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ e $Al_2O_3 + MgO$ / Edilon de Oliveira França – Guaratinguetá, 2020 114 f. : il. Bibliografia: f. 109-114 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves 1. Ferramentas de corte. 2. Usinagem. 3. Ferro fundido. I. Título. CDU 621.9.02(043)
-------	--

Luciana Máximo

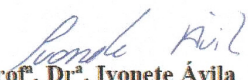
Bibliotecária-CRB-8/3595

EDILON DE OLIVEIRA FRANÇA

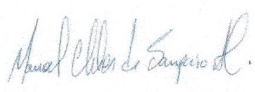
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

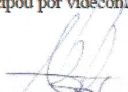
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
UNESP/FEB
participou por videoconferência


Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
USP
participou por videoconferência


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP/FEG
participou por videoconferência


Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP/FEG
participou por videoconferência

Setembro de 2020

DADOS CURRICULARES

EDILON DE OLIVEIRA FRANÇA

NASCIMENTO	13.02.1976 – Pindamonhangaba/SP
FILIAÇÃO	Geraldo de Oliveira França Maria Helena Arlochi França
2007/2010	Curso de Graduação Tecnologia em Metalurgia – FATEC Pindamonhangaba – SP.
2003/2015	Curso de Pós-Graduação Mestre em Ciência no programa Engenharia de Materiais, Área de Concentração: Metálicos, Cerâmicos e Polímeros da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena.
2016/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho, em memória de meu Pai
Geraldo de Oliveira França, a minha esposa
Maria Silvia Almeida de Souza França e a
minha filha Sabrina de Souza França, que
sempre me incentivam e tiveram paciência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a *Deus* que me deu a capacidade para concluir este trabalho e que sempre ilumina meu caminho.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves*, obrigado por toda a paciência, dedicação, orientação e auxílio.

Ao *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* sempre pronto a ajudar e prestativo FEG/UNESP.

Ao *Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza* FEG/UNESP que foi quem me incentivou e acreditou em meu pontecial, por toda sua ajuda, auxílio e apoio recebido, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao *técnico José Manoel Bernardes* – FEG/UNESP – Departamento de Materiais e Tecnologia, pelo apoio nos procedimentos de ensaio em usinagem e programação do centro de torneamento.

Aos colegas, professores e técnicos do *Campus* da UNESP de Guaratinguetá, que contribuíram para o bom andamento e conclusão deste estudo.

À *profª Dra. Cristina Aires Elisei de Carvalho* diretora da Fatec de Pindamonhangaba que disponibilizou os laboratórios da sua instituição.

Ao *Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa* USP/EEL que auxiliou na realização da composição química do ferro fundido e sempre pronto a ajudar.

À *empresa Seco Tools*, pelo apoio à pesquisa e fornecimento das ferramentas de estudo.

À Indústria de Fundição Tupy Ltda, pelo fornecimento do material utilizado nos testes.

Ao *amigo Marcel Yuzo Kondo* pela parceria e todo o apoio com os programas em *LabView* e *Matlab* e apoio nos ensaios de usinagem e outros procedimentos de laboratório.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin.

RESUMO

A crescente utilização do ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron* (CGI), para aperfeiçoamento dos motores diesel tem o objetivo de aumentar a eficiência energética, reduzir o peso do motor e os níveis de emissão de poluentes. O ferro fundido vermicular possui a desvantagem de possuir baixa usinabilidade, se comparado ao ferro fundido nodular e cinzento, motivando pesquisas de aprimoramento das técnicas de usinagem e desenvolvimento dos materiais das ferramentas. Este trabalho teve como objetivo analisar o processo de torneamento sem fluido de corte do ferro fundido vermicular utilizando três tipos de ferramentas de cortes, sendo duas ferramentas cerâmicas experimentais e uma ferramenta de metal duro comercial. A ferramenta de metal duro possui código SNMA 120408 comercial TK1001, marca Seco Tools, com revestimentos pelo processo de deposição química de vapor (*chemical vapor deposition* – CVD) possuindo duas camadas, uma de cabonitreto de titânio e outra de óxido de alumínio ($\text{TiNC} + \text{Al}_2\text{O}_3$) e ferramentas experimentais cerâmicas a base de óxido de alumínio dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) com código SNMN 120408. Utilizou-se como planejamento experimental o método fatorial completo com as seguintes condições: velocidade de corte (100 e 400 m/min), avanços (0,05 e 0,25 mm/volta) e duas profundidades de corte (0,25 e 1,00 mm). Para a análise do desempenho das ferramentas foram adquiridas as seguintes variáveis respostas: potência de usinagem, desgaste das ferramentas, qualidade superficial das peças usinadas, sinais de emissão acústica e vibração do processo, tipos de desgastes e mecanismos. Também foram realizadas as análises dos tipos e formas dos cavacos gerados durante os ensaios e dureza do material usinado. Após a realização do projeto de experimento, a melhor condição para as três ferramentas ensaiadas foi velocidade de corte de 400 m/min, avanço de 0,05 mm/volta e profundidade de 0,25 mm. No ensaio de vida a ferramenta metal duro Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ obteve-se um comprimento de 5km, a cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ com um comprimento de 4,7 km e a cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ com comprimento de 3,9 km. Em todas as ferramentas foram observadas que ocorreu o desgaste de flanco, sendo a ferramenta de metal duro a que apresentou o menor desgaste. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do desenvolvimento de ferramentas cerâmicas, e que o sucesso na usinagem do ferro fundido vermicular pode estar na combinação de propriedades mecânicas e físicas, aliada aos parâmetros de usinagem.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramentas de corte. Usinagem. Avanço científico. Ferro fundido vermicular. Acabamento superficial.

ABSTRACT

The increasing use of vermicular cast iron or Compacted Graphite Iron (CGI), for the improvement of diesel engines has the objective of increasing energy efficiency, reducing engine weight and pollutant emission levels. Vermicular cast iron has the disadvantage of having low machinability, when compared to nodular and gray cast iron, motivating research to improve machining techniques and development of tool materials. This work aimed to analyze the process of turning without cutting fluid of the vermicular cast iron using three types of cutting tools, being two experimental ceramic tools and a commercial carbide tool. The carbide tool has SNMA code 120408- commercial TK1001, Seco Tools brand, with coatings by the chemical vapor deposition (CVD) process having two layers, one of titanium carbonitride and the other of aluminum oxide ($\text{TiNC} + \text{Al}_2\text{O}_3$) and ceramic experimental tools based on aluminum oxide doped with magnesium oxide ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) and chromium oxide ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) with code SNMN 120408. The complete factorial method with the following conditions was used as experimental design: cutting speed (100 and 400 m / min), feeds (0.05 and 0.25 mm / turn) and two depths of cut (0.25 and 1.00 mm). For the analysis of the performance of tools, the following variables were acquired: machining power, tool wear, surface quality of machined parts, signs of acoustic emission and process vibration, types of wear and mechanisms. Analyzes of the types and shapes of the chips generated during the tests and hardness of the machined material were also carried out. After carrying out the design of the experiment, the best condition for the three tools tested was a cutting speed of 400 m / min, an advance of 0.05 mm / revolution and a depth of 0.25 mm. In the life test the Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ carbide tool obtained a length of 5 km, the ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$ with a length of 4.7 km and the ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ with a length of 3.9 km. In all tools, flank wear was observed, with the carbide tool having the least wear. The results obtained demonstrate the feasibility of developing ceramic tools, and that the success in machining vermicular cast iron may be in the combination of mechanical and physical properties, combined with machining parameters.

KEYWORDS: Cutting tools. Machining. Scientific advancement. Surface finish. Compacted graphite iron.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Os Ferros fundidos e suas estruturas das grafitas : (a) cinzento (b) vermicular c) nodular-----	21
Figura 2 - Diferença na formação do cavaco no ferro fundido cinzento, vermicular e Nodular-----	24
Figura 3 - Micrografia do ferro fundido vermicular (ataque com Nital 2%) -----	24
Figura 4 - Forma da grafita em função da porcentagem de Mg -----	25
Figura 5 – Principias influência da nodularidade no ferro fundido vermicular -----	26
Figura 6 - Peças fabricadas com ferro fundido vermicular-----	28
Figura 7 - Comparação de Vida de Ferramentas na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento e CGI-----	29
Figura 8 – a) Relação entre o tempo de corte e desgaste da ferramenta e b) comparação da vida-----	31
Figura 9 – Imagem Microscópio de varredura ferramenta com a v_c 200m/min.-----	32
Figura 10 – Usinagem ferramenta de CBN: a) Vermicular; b) Cinzento-----	34
Figura 11 - Inclusões de carbonitreto cúbicos de titânio -----	34
Figura 12 - Redução da Vida da Ferramenta de Metal Duro em Função do Aumento da Porcentagem de Titânio no Ferro Fundido Vermicular-----	35
Figura 13 - Distribuição dos processos de usinagem no mundo-----	37
Figura 14 - Resultado do avanço na rugosidade superficial usinada.-----	38
Figura 15 - Mercado global de ferramenta de corte -----	40
Figura 16 – Micro dureza de do Metal duro e cada camada de revestimento -----	44
Figura 17 - Pastilha de metal duro e camadas revestidas por CVD-----	45
Figura 18 - Impactos ambientais dos fluidos de corte -----	49
Figura 19 - Aplicabilidade da usinagem a seco-----	50
Figura 20 - Locais de ocorrência de desgastes-----	51
Figura 21 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte-----	54
Figura 22 - Comparação da formação de cavacos entre aços e ferro fundidos-----	55
Figura 23 - Filmagem do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico -----	56
Figura 24 - Rugosidade R_t e R_a -----	58
Figura 25 - Forças de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento-----	60
Figura 26 - Tarugo de ferro fundido vermicular dimensões em mm. -----	64
Figura 27 - Microestrutura do ferro fundido vermicular sem ataque (A) superfície e (B) centro -----	65
Figura 28 – Valores do ensaio de dureza <i>Brinell</i> .-----	66

Figura 29 - A) Centro de torneamento CNC marca <i>Romi</i> modelo GL240M B) sistema de aquisição de dados acoplado -----	67
Figura 30 - Ferramenta metal duro Tk 1001 (TiCN Al ₂ O ₃)-----	69
Figura 31 - Ferramenta cerâmica Al ₂ O ₃ MgO. -----	70
Figura 32 - Ferramenta cerâmica Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ -----	71
Figura 33 - Porta-ferramenta SECO TOOLS Capto B01T9032445. -----	72
Figura 34 - Rugosímetro portátil da marca <i>Mahr</i> modelo (a) <i>MarSurf</i> M300; (b) <i>MarSurf</i> RD -----	74
Figura 35 - Corte da amostra A) primeiro corte B) diâmetro dividido ao meio. -----	76
Figura 36 - Pareto dos fatores de maior influência par ferramenta de Al ₂ O ₃ MgO -----	80
Figura 37 - Efeitos para as variáveis respostas para Al ₂ O ₃ MgO -----	81
Figura 38 - Fatores de maior influência par ferramenta de Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ -----	84
Figura 39 - Efeitos principais das variáveis respostas para Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ -----	85
Figura 40 - Fatores de maior influência par ferramenta de metal duro Tk1000 (TiCN Al ₂ O ₃)---	88
Figura 41 - Efeitos das variáveis respostas para ferramenta MD -----	89
Figura 42 – Ferramenta Al ₂ O ₃ MgO (A) v _c 100, f 0,2, a _p 0,25 (B) v _c 400, f 0,2, a _p 0,25 -----	91
Figura 43 - Ferramenta Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ (A) v _c 100, f 0,2, a _p 0,25 (B) v _c 400, f 0,2, a _p 0,25 -----	92
Figura 44 - Ferramenta metal duroTk1001(TiCNAl ₂ O ₃) (A) v _c 100, f 0,2, a _p 0,25 (B) v _c 400, f 0,2, ap ,25-----	93
Figura 45 - Cavaco (A) ferramenta Al ₂ O ₃ MgO (B) ferramenta Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ e (C) ferramenta metal duro Tk10001 (TiCN Al ₂ O ₃)-----	95
Figura 46 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Corte Desgaste de Flanco em Função do Cumprimento Usinado -----	96
Figura 47 - Progressão da Rugosidade R _a com Aumento do Desgaste da Ferramenta. -----	98
Figura 48- Evolução da Rugosidade R _t com Aumento do Desgaste da Ferramenta-----	98
Figura 49 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão da Potência em Função do Cumprimento Usinado -----	99
Figura 50 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão Emissão Acústica em Função do Cumprimento Usinado -----	100
Figura 51 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão da Vibração em Função do Cumprimento Usinado -----	101
Figura 52 - Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta Cerâmica de Al ₂ O ₃ MgO -----	103
Figura 53 – Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta Cerâmica de Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃ -----	104

Figura 54 - Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta
Metal Duro Tk1000 TiCN Al₂O₃ -----104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação das propriedades mecânicas e físicas entre os ferro fundido vermicular, cinzento e nodular -----	22
Quadro 2 - Propriedades mecânicas do vermicular conforme % de nódulo -----	27
Quadro 3 - Classe de Ferro Fundido Vermicular Corpo de Prova Fundido em Separado-----	27
Quadro 4 - Propriedade do metal duro com tamanho de grão normais (THM e THR) e com grãos ultrafinos (THM-F e THR-F) -----	41
Quadro 5 - Ferramentas revestidas pelos processos PVD e CVD-----	43
Quadro 6 – Relação ente o avanço comprimento da mostra no perfis de rugosidade periódicos.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do ferro fundido vermicular, expressos em percentual de massa-----	65
Tabela 2 - Variáveis e níveis do projeto de experimento-----	75
Tabela 3 - Matriz de experimentos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ -----	78
Tabela 4 - Matriz de experimentos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ -----	83
Tabela 5 - Matriz de experimentos para ferramenta metal duro Tk1001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) -----	86
Tabela 6 - Melhores condições de usinagem para as ferramentas -----	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta Postiça de Corte
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> (Deposição Química de Vapor)
DOE	<i>Design of Experiment</i> (Projeto de Experimentos)
NBR	Norma Brasileira
(CGI)	<i>Compacted Graphite Iron</i> (Ferro Fundido Vermicular)
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> (Deposição Física de Vapor)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor Quadrático Médio)

LISTA DE SÍMBOLOS

HV	Dureza Vickers	[HV]
HB	Dureza Brinell	[HB]
L_c	Comprimento de Usinagem	[mm]
L_f	Comprimento de Avanço	[mm]
P_c	Potência de Corte	[W]
P_U	Potência de Usinagem	[W]
R_a	Rugosidade Aritmética Média	[μm]
R_t	Rugosidade Total do Perfil	[μm]
r_ϵ	Raio de Ponta da Ferramenta	[mm]
U_{cc}	Sinal de Tensão do Sensor	[V]
V_B	Desgaste de Flanco	[mm]
VB_B	Desgaste de Flanco Médio	[mm]
V_{BC}	Desgaste de Entalhe Aresta Secundária	[mm]
$V_{B \text{ máx}}$	Desgaste de Flanco Máximo	[mm]
V_B/L_c	Desgaste de Flanco Por Percurso de Corte	[m]
V_c	Velocidade de Corte	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Vib	Sinal de Vibração	[mm/s]
f	Avanço	[mm/rev]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA	19
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FERRO FUNDIDO	21
2.1.1	Ferro fundido vermicular	24
2.1.1.2	Classificação ferro fundido vermicular	26
2.1.1.3	Usinagem ferro fundido vermicular	27
2.1.1.3.1	<i>Efeito das variáveis metalúrgicas na usinabilidade</i>	33
2.2	USINAGEM	35
2.2.1	Torneamento	37
2.2.1.1	Paramentos de cortes	37
2.2.2	Materiais para ferramentas de corte	39
2.2.2.1	Metal duro	40
2.2.2.2	Cerâmica	45
2.3	FLUIDO DE CORTE	45
2.4	AVARIAS E DESGASTES DE FERRAMENTAS DE CORTE	45
2.4.1	Desgaste de flanco	45
2.4.2	Desgaste de cratera	54
2.4.3	Desgaste de entalhe	45
2.4.4	Vida de ferramenta	55
2.5	FORMAÇÃO DE CAVACO NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO	57
2.6	TECNOLOGIA DE SUPERFÍCIE	59
2.6.1	Rugosidade	57
2.7	AQUISIÇÃO DE DADOS DO TORNEAMENTO	58
2.7.1	Medição da potência de corte	61
2.7.2	Emissão acústica	62
2.7.3	Vibração	62
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	MATERIAL DA PEÇA A SER USINADA	64

3.2	MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR-----	65
3.3	CENTRO DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS -----	66
3.4	FERRAMENTAS -----	68
3.4.2	Ferramenta de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$-----	69
3.4.3	Ferramenta de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$-----	70
3.5	Parâmetros De Usinagem Controlados-----	72
3.6	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE-----	73
3.8	PROJETO DE EXPERIMENTO -----	74
3.9	ENSAIOS DE VIDA -----	75
3.10	ANÁLISE DE MICROESTRUTURA -----	76
3.11	ENSAIO DE DUREZA -----	77
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS-----	78
4.1	PROJETO DE EXPERIMENTO -----	78
4.1.1	Ferramenta de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$-----	78
4.1.2	Ferramenta de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ -----	84
4.1.3	Ferramenta metal duro Tk1001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$)-----	86
4.4	DESGASTE DA FERRAMENTA E ESTUDO DO CAVACO GERADO NA USINAGEM -----	90
4.5	ENSAIOS DE VIDA PARA AS FERRAMENTAS DE METAL DURO E CERÂMICA -----	96
4.5.1	Análise dos desgastes das ferramentas após ensaio de vida -----	102
5	CONCLUSÃO -----	107
5.1	INDICAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS -----	108
	REFERÊNCIAS -----	109

1 INTRODUÇÃO

Na busca de atuais mercados, a diminuição dos custos e melhora do produto se tornam essenciais. Nessa circunstância, a indústria automobilística e seus fornecedores vêm procurando cada vez mais melhorar seus produtos e processo, como a finalidade de desenvolver novos materiais que deixe alcançar a solução de compromisso entre lucro e baixo impacto ambiental (SILVA *et al.*,2011).

Para obtenção dessas metas, a indústria automobilística vem substituindo o ferro fundido cinzento por ferro fundido vermicu Heck lar ou “*Compacted Graphite Iron*” (CGI) na fabricação de blocos de motores a diesel, que apresenta uma boa resistência à abrasão, resistência mecânica, à fadiga, boa condutividade térmica e facilidade de fundição, possibilitando uma maior economia de combustível e menor peso do bloco de motor (GUESSER, 2019; SILVA *et al.*,2011; ROSA *et al.*, 2010).

Uma desvantagem na utilização do ferro fundido vermicular é a sua dificuldade em ser usinado em processos de usinagem contínuos como torneamento, quando comparado com o ferro fundido cinzento, aumentando os custos de fabricação. Estas dificuldades fizeram com que fossem desenvolvidas várias pesquisas, com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo empresas automobilísticas, fabricantes de ferramentas, universidades, fundições e empresas de usinagem de blocos de motores (XAVIER, 2013; HECK *et al.*,2008).

Estas pesquisas se concentram em melhoria metalúrgica na estrutura do ferro fundido vermicular, aprimoramento das técnicas de usinagem e desenvolvimento dos materiais das ferramentas para usinagem. As empresas de fundições que fabricam os blocos de motores para serem utilizadas nas principais indústrias automobilísticas, vem aumentando as pesquisas na área de ferro fundido vermicular desde 1992, trazendo como primeiros passos o domínio das etapas do processo de fabricação,fundição-usinagem, objetivando o controle do processo e a melhoria da usinabilidade por fatores metalúrgicos (MASSIRE JR; GUESSER; SCHMIDT, 2011; SILVA *et al.*,2011).

Estudo de fatores relacionados à tecnologia de usinagem é importante para que essa empresa possa competir ainda mais intensamente no mercado global, agregando valor ao seu produto, gerando empregos e aumentando as divisas do nosso país (MASSIRE JR; GUESSER; SCHMIDT, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

A indústria automobilística vislumbrando novos mercados tem a redução dos custos e maior desempenho dos motores a diesel como fatores essenciais. O material tipicamente empregado para a confecção de blocos de motores a diesel, ferro fundido cinzento, está no seu limite de resistência, possibilitando este aumento de sua performance somente com o aumento da espessura das paredes do bloco, o que eleva o peso, aumenta o consumo de combustível e o custo de produção (ROSA *et al.*, 2010; SILVA, 2007).

Já o ferro fundido vermicular possui características de condutividade térmica e amortecimento próximo ao do ferro fundido cinzento e propriedades mecânicas superiores, possibilitando fabricar motores com menor peso, melhor desempenho e custo. Sua utilização se torna mais difícil por possuir baixa usinabilidade em processos de corte contínuo, existindo a necessidade de reduzir os seus custos (ROSA *et al.*, 2010).

A utilização de ferramentas cerâmicas para usinar o ferro fundido vermicular vem cada vez mais ganhar destaque na área de usinagem, devido suportar altas velocidades de corte, ter estabilidade química, trabalhar em altas temperaturas, como as cerâmicas puras e misturadas à base de Al_2O_3 . Para a usinagem de ferros fundidos, o principal tipo de desgaste químico (difusão) ocorre principalmente na face de saída da ferramenta. Como o cavaco formado na usinagem do ferro fundido é muito pequeno, ele não atrita tanto com esta face, prejudicando a formação desse tipo de desgaste (Diniz *et al.*, 2008).

Por outro lado, as cerâmicas de alumina dopada com óxido de magnésio e cerâmica de alumina dopada com óxido de cromo têm baixa condutividade térmica a ferramenta recebe uma pequena porcentagem do calor total gerado, portanto, torna as regiões da ferramenta próximas às interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta mais quentes. Outra propriedade típica da cerâmica é a baixa tenacidade, o que facilita a ocorrência de trincas e quebras (Machado *et al.*, 2009).

A busca para desenvolver e aperfeiçoar a usinagem deste material é uma luta de anos de universidades, fundições e fabricante de componentes automotivos para agregar mais valores ao seu produto.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o processo de torneamento sem fluido de corte do ferro fundido vermicular com ferramentas cerâmicas experimentais compostas por óxido de alumínio dopada com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e óxido de alumínio dopada com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) e com ferramenta de metal duro com recobrimento de carbonitreto de titânio e óxido de alumínio ($\text{TiNC} + \text{Al}_2\text{O}_3$), visando identificar a ferramenta que forneça o maior tempo de vida, menor desgaste e melhor qualidade superficiais.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o desempenho entre as ferramentas de metal duro e cerâmicas experimentais;
- b) Avaliar a influência da velocidade de corte sobre a vida das ferramentas e seus desgastes;
- c) Mensurar o desempenho do recobrimento do metal duro ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) para usinar ferro fundido vermicular.

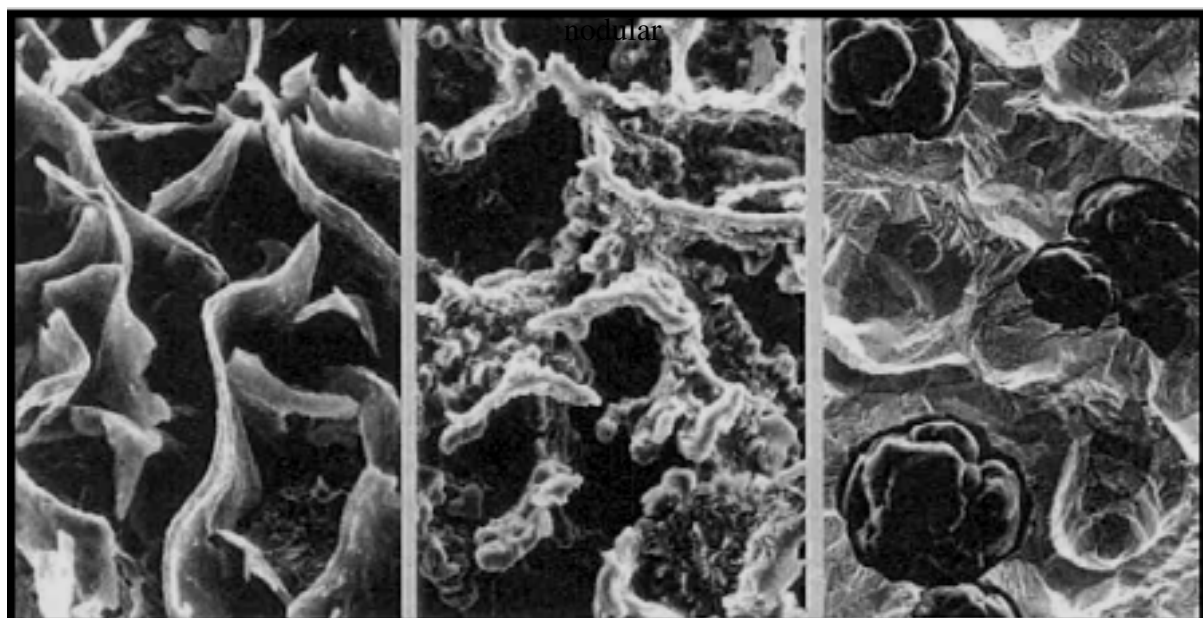
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estarão descritos a base dos conceitos, que irá servir de compreensão do contexto da pesquisa. Inicialmente são apresentados às categorias de ferro fundido mais comum e seu comportamento mecânico, processo de usinagem e ferramentas.

2.1 FERRO FUNDIDO

A fabricação do ferro fundido é classificada em: vermicular, cinzento, nodular, branco, maleável e austemperado. Os ferros fundidos apresentam composição química muito semelhante, contendo elementos de liga como 3% de carbono, 2,5% de silício e aproximadamente cerca de 93,8% de ferro, já o percentual restante são valores muito baixo de cada elemento, sendo considerados resíduo. Neste estudo vai ser dar ênfase nos três primeiros tipos de ferro fundido, desta forma as propriedades físicas e mecânicas são distintas a cada uma delas, conforme a diferenças entre morfologias das suas grafitas. Na Figura 1 podem-se observar essas desigualdades nas estruturas. (GUESSER, 2019; KOPYCIŃSKI *et al.*, 2012).

Figura 1 - Os Ferros fundidos e suas estruturas das grafitas : (a) cinzento (b) vermicular c)



(a)

(b)

(c)

Fonte: Kopyciński *et al.* (2012)

As grafitas do ferro fundido cinzento são apresentadas na forma lamelar, com superfícies lisas e apresentando cantos agudos. Essa estrutura forma uma rede quase contínua que são interconectadas e sem orientação preferencial. Confere uma alta condutividade térmica e gera uma excelente capacidade para amortecer as vibrações (DIAS; DINIZ, 2013).

Já no ferro fundido nodular, essas estruturas se apresentam na forma de nódulos, que se encontram dispersas na matriz e não são interconectadas. Quando comparado com o ferro fundido cinzento exibe uma menor concentração de tensões, são aumentada a tenacidade, resistência mecânica e ductilidade. Suas desvantagens devido os nódulos não ser interconectado são baixa condutividade térmica, possui baixa capacidade de amortecimento e a usinabilidade é prejudicada (GUZIK *et al.*, 2012; ROSA *et al.*, 2010).

Quanto ao ferro fundido vermicular, as suas estruturas são lamelas espessas e com superfície áspera e irregular e com cantos arredondados, interconectados, surgindo o nome de vermicular.

Esses cantos arredondados ajudam a diminuir os pontos de concentração de tensões e com a grafita interconectada ajuda a aumentar a transferência de calor e consequentemente aumenta a absorções de vibrações quando comparado com nodular. A morfologia da grafita confere uma ótima ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga térmica, resistência mecânica e absorção de vibração sendo uma opção que fica ente os cinzentos e nodulares como é observado na Quadro 1 (TOOPTONG, 2018; ROSA *et al.*, 2010)

Quadro 1 – Comparação das propriedades mecânicas e físicas entre os ferro fundido vermicular, cinzento e nodular

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	235	500	650
Módulo de elasticidade [GPa]	110	140	165
Resistência à fadiga [MPa]	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425
Energia Charpy- V [J]	50	100	30

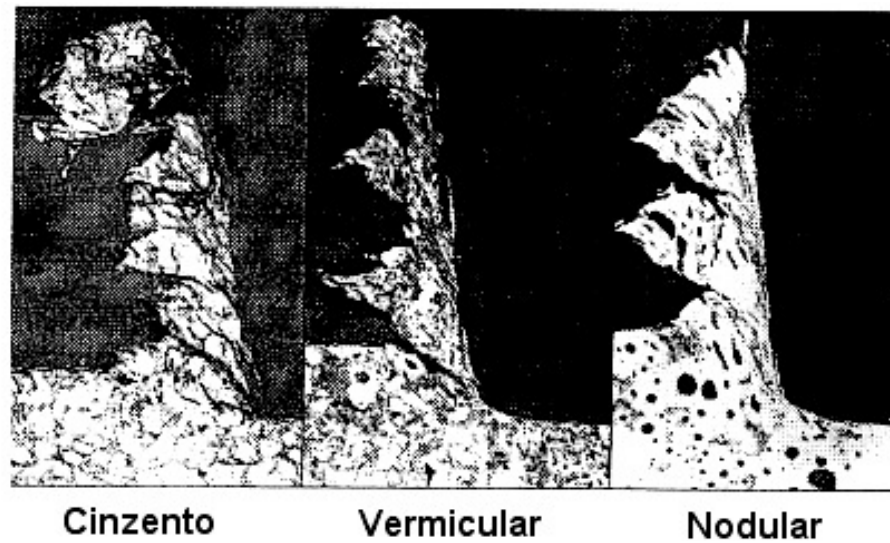
Fonte: Tooptong (2018) e ASM Handbook (2005).

Quando usina o ferro fundido, a forma da grafita exerce grande influencia no tipo e forma do cavaco. Para o cinzento, no decorrer da usinagem, quando a ferramenta toca a peça, ela gera uma compressão no material e juntamente com as grafitas que possuem lamelas afiadas. Dessa forma, gera concentração de tensão nas suas extremidades que são transmitidas para toda estrutura devido ao fato de elas serem interconectadas, gerando uma propagação de trincas à frente da aresta de corte. Quando a ferramenta realiza o avanço, esse resíduo de material é removido completamente com uma menor força de corte. Na maior parte do processo de usinagem, a ferramenta não fica em contato com o material, devido sempre uma parte entra em colapso e removida à frente da ferramenta, gerando crateras. Devido ocorrer essa propagação de trinca, são liberadas as grafitas que possibilitam a formação de uma película protetora na ferramenta aumentando a vida da mesma, já qualidade superficial da peça usinada é prejudicada (GHASEMI, *et al.*, 2016; GUESSER, 2019)

Quando analisa a usinagem do ferro fundido nodular, sua estrutura na forma de nódulos não interconectados, quando é tocada pela ferramenta sofre uma compressão que deforma toda a estrutura até ocorrer à ruptura e gera o cavaco. Este tipo de microestrutura permite ocorrer a deformação e o escoamento que o cinzento não exhibe durante a usinagem. Assim, ele apresenta um cavaco na forma contínuo sobre a aresta da ferramenta sendo muito equivalente ao cavaco de alguns aço (GHASEMI, *et al.*, 2016).

Já o cavaco do ferro fundido vermicular é serrilhado apresentando uma característica intermediária, sendo um pouco dúctil como visto no nodular e frágil como ocorre no cinzento. Durante sua usinagem a ferramenta gera compressão na estrutura, surgindo trincas através do plano da grafita que possui uma resistência menor aos esforços de corte, como as arestas das lamelas são arredondadas, o corte requer uma maior força quando comparado com cinzento. A formação do cavaco próxima a que ocorre na usinagem do nodular como é ilustrado na Figura 2 (GUESSER, 2019; DORÉ, 2007).

Figura 2 - Diferença na formação do cavaco no ferro fundido cinzento, vermicular e Nodular

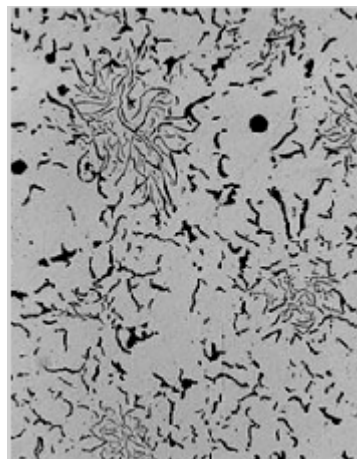


Fonte Doré (2007)

2.1.1 Ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular foi uma descoberta recente, na década de 40, durante testes em laboratório para aprimoramento na produção do nodular, com acréscimo dos elementos cério e magnésio, pode-se observar uma estrutura “*quasi-flake*” (quase lamelas) sendo semelhante a de um vermes, assim deu o nome de ferro fundido vermicular ou CGI – “*Compacted Graphite Iron*”, conforme é mostrado na Figura 3 (GUESSER ,2019).

Figura 3 - Micrografia do ferro fundido vermicular (ataque com Nital 2%)



Fonte: Guesser (2019)

Na década de 60 após vários estudos se descobriu que o ferro fundido vermicular poderia ser fabricado, controlando a formação da grafita nodular quando realiza a combinação da incorporação do titânio e magnésio em alto teor. O magnésio ajuda a inibir o crescimento da grafita forma lamelar e enquanto o titânio contribui para impede que os nódulos são gerado na estrutura (GUESSER, 2019).

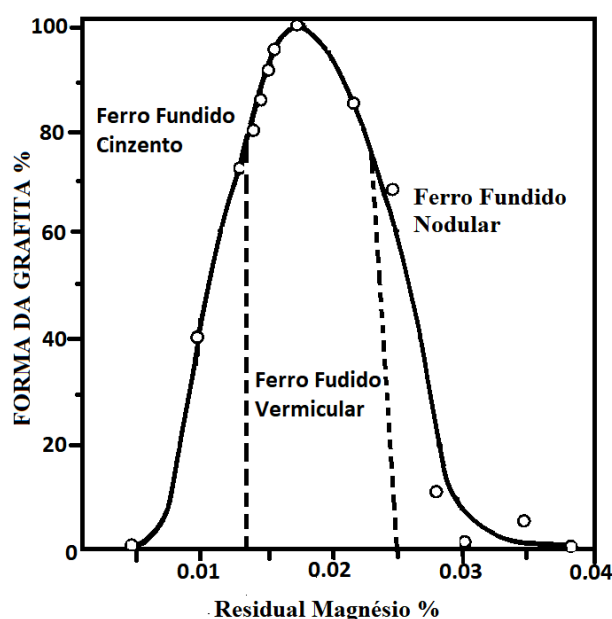
Somente nos anos 90 o ferro fundido vermicular começou a ser comercializado, devido a grande dificuldade da reprodução da morfologia da sua grafita obtida nos laboratórios de pesquisas dentro do ambiente industrial, por falta de habilidade e gerando alto custo na sua produção (RODRIGUES JÚNIOR, 2017).

Alguns métodos foram estudados e desenvolvidos, mas apenas dois tinham repetibilidade para utilização em escala industrial:

- Ferro fundido vermicular com elementos nodulizantes (magnésio ou cério);
- Ferro fundido vermicular com elementos nodulizantes (magnésio) e antinodulizantes (titânio).

Para fabricação do ferro fundido vermicular é necessário que se controle o percentual de magnésio, que promove a nodulização da grafita. Esses valores têm de ser residuais e devem variar de 0,013 a 0,025%. Essa quantidade é incapaz de produzir os nódulos na estrutura e satisfatório para garantir uma região estável de formação do ferro fundido vermicular, como é ilustrado na Figura 4 (RODRIGUES JÚNIOR, 2017; TOOPTONG, 2018).

Figura 4 - Forma da grafita em função da porcentagem de Mg



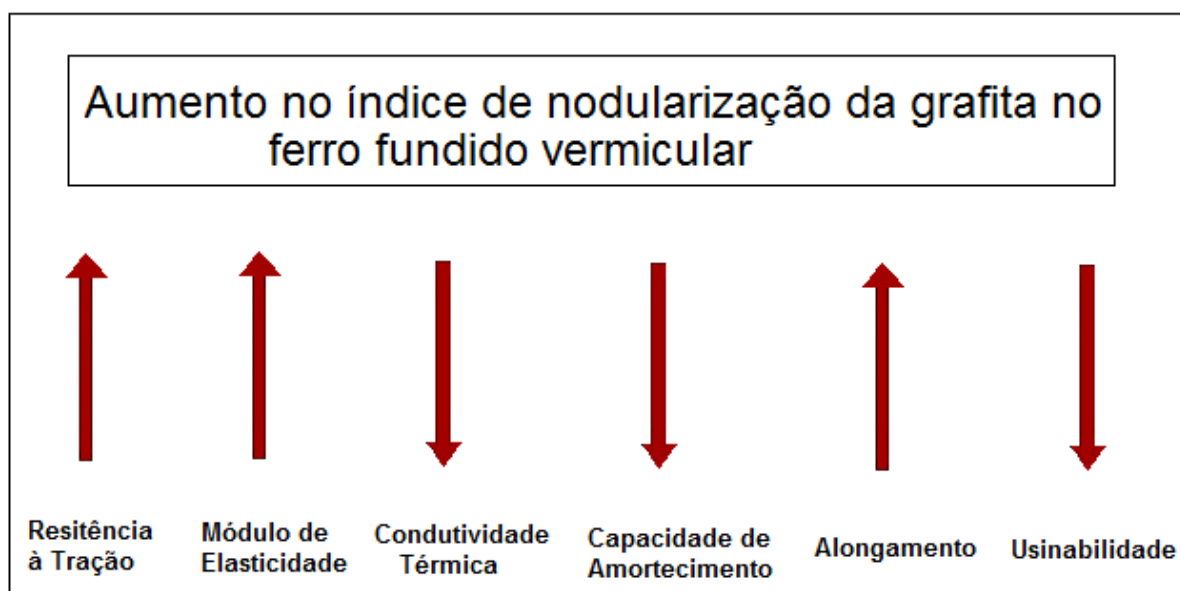
Fonte: Adaptado de Rodrigues Júnior (20017)

O método de obtenção do ferro fundido vermicular adiciona-se de 0,06 a 0,13% de titânio com o objetivo de ampliar os limites do magnésio residual para 0,030%, melhorando assim, a reprodutibilidade dos processos industriais (GUESSER, 2019; RODRIGUES JÚNIOR, 2017).

2.1.1.2 Classificação ferro fundido vermicular

Na fabricação do ferro fundido vermicular, em razão do processo ser complexo em algumas regiões da estrutura é possível ser verificado apresenta de algumas partículas de grafita nodular. Quando ocorre o aumento da presença de nódulo na estrutura, tem-se o aumento da força e a rigidez, acontece uma maior dificuldade pra usinar e diminuição na condutividade térmica. Por isso na fabricação de blocos e cabeçotes de motor de ferro fundido vermicular, o limite máximo de nodularidade admitido é de 20%. Na Figura 5 e o Quadro 2 pode observar as principais influência que a nodularização exerce nas propriedades mecânicas e físicas do vermicular (ISO 16112, 2017).

Figura 5 – Principias influência da nodularidade no ferro fundido vermicular



Fonte: Doré (2007)

Quadro 2 - Propriedades mecânicas do vermicular conforme % de nódulo

Propriedades [25 °C]					
	10	30	50	70	90
Resistência à Tração [Mpa]	450	520	590	640	700
Resistência ao Escoamento 0,2% [Mpa]	370	390	410	440	490
Limite de Fadiga [Mpa]	210	220	230	240	255
Módulo de Elasticidade [Gpa]	145	150	155	155	160
Alongamento %	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6
Expansão Térmica [$\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]	11,0	11,0	11,0	11,5	12,0
Condutividade Térmica [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]	36	33	31	30	28

Fonte: Doré (2007)

Segundo a ISO 16112 (2017), o ferro fundido vermicular é dividido em cinco classes, levando em conta o valor mínimo de limite de resistência à tração: ISO16112/JV/300/S, ISO16112/JV/350/S, ISO16112/JV/400/S, ISO16112/JV/ 450/S e ISO16112/JV/500/S, como é ilustrada no Quadro 3.

Quadro 3 - Classe de Ferro Fundido Vermicular Corpo de Prova Fundido em Separado

Classe ISO 16112	Limite resistência a tração Min. [Mpa]	Limite de escoamento Min [Mpa]	Alongamento Min [%]	Dureza HB30
JV-300/S	300	210	2,0	140 a 210
JV-350/S	350	245	1,5	160 a 220
JV-400/S	400	280	1,0	180 a 240
JV-450/S	450	315	1,0	200 a 260
JV-500/S	500	350	0,5	220 a 280

Fonte: ISO 16112 (2017)

2.1.1.3 Usinagem ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular, desde seu surgimento sempre teve a promessa de execução em diversas áreas da indústria, por estabelecer características mecânicas e elásticas que se apresentam entre o cinzento e o nodular, demonstrando ser ideal para a fabricação de blocos de motores e cabeçote (MASSIRER JUNIOR, GUESSER, 2011).

O mercado automotivo demonstra uma crescente tendência em que os blocos de motores a diesel, distribuidor de exaustão, disco de freio de carro, disco de freios para trens de alta velocidade, virabrequins e cabeçote serão fabricados em ferro fundido vermicular, ilustrada na Figura 06 (GUESSER, 2019; ROMANO,2003).

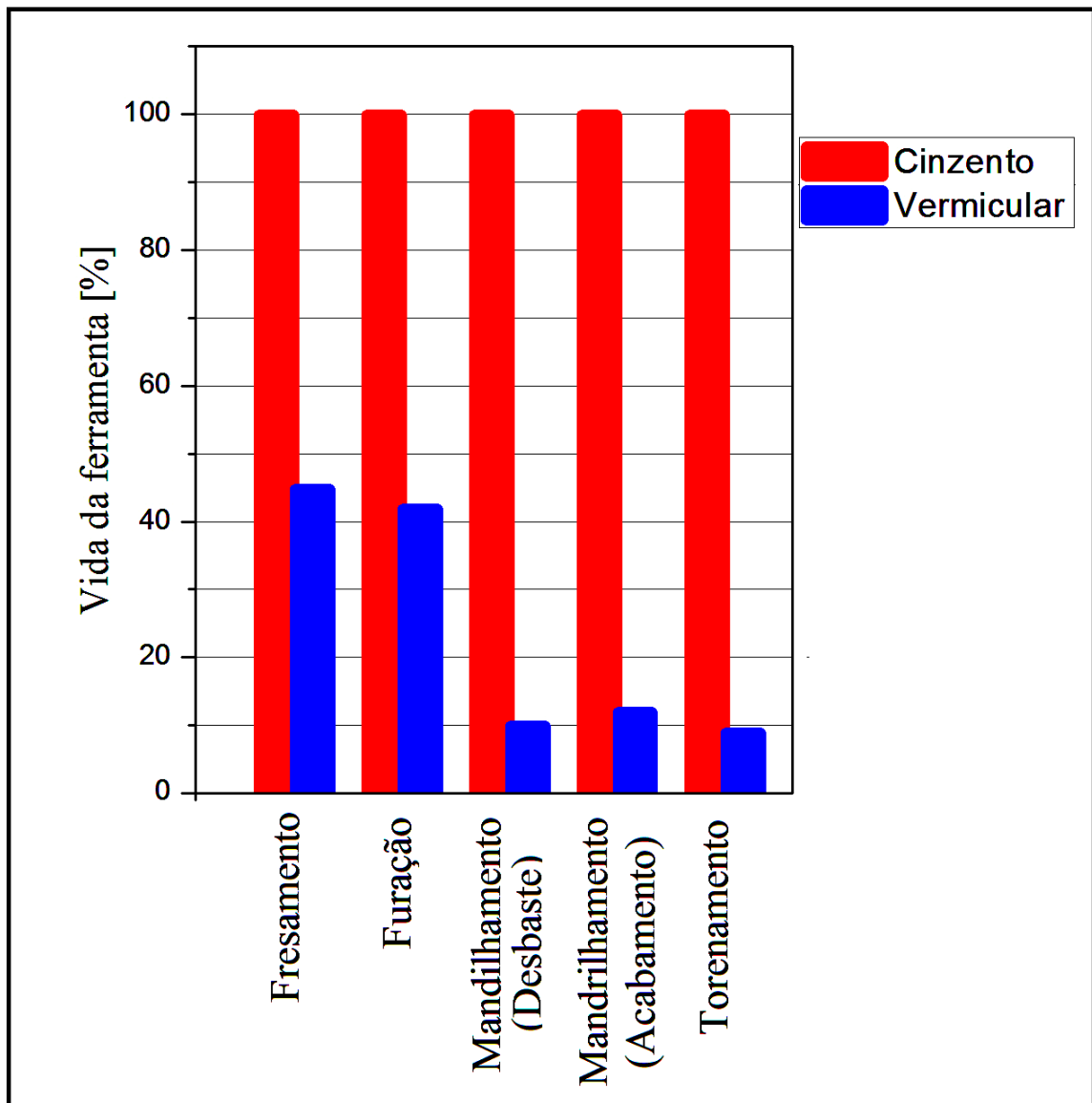
Figura 6 - Peças fabricadas com ferro fundido vermicular



Fonte: Guesser (2019) e Romano (2003)

A grande dificuldade para ampliar a utilização do ferro fundido vermicular em bloco de motores é sua baixa usinabilidade em processos de corte. Na Figura 7 exibe a comparação da vida de ferramentas no processo de usinagem entre o cinzento e CGI. A maior diferença de diminuição de vida estava nos processos de mandrilamento dos cilindros. Essa desigualdade pode ser conferida devido o ferro fundido vermicular apresentar maior resistência mecânica e não possuir presença de e sulfeto de manganês, que atua como lubrificante da ferramenta durante o processo de usinagem (GUESSER, 2019; NAYYAR *et al.*,2012).

Figura 7 - Comparação de Vida de Ferramentas na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento e CGI



Fonte: Nayyar *et al.*, (2012); Massirer Júnior, Guessier, (2011)

Para usinar ferro fundido vermicular os autores identificam a estabilidade química da ferramenta não é muito importante, porque o formato do cavaco é muito pequeno, o atrito com a saída da ferramenta é reduzido diminuindo o desgaste por difusão. Possibilitando o uso das cerâmicas à base de Si_3N_4 (Sialon) que apresentam baixa estabilidade química com o ferro. Porém, são mais resistentes do que as cerâmicas a base Al_2O_3 . Outras ferramentas utilizadas são as cerâmicas mistas, as de metal duro sem revestimento e com revestido com múltiplas camadas e pastilhas de Nitreto Cúbico de boro (CBN) (GABALDO *et al.*, 2010).

Os materiais cerâmicos têm certa vantagem sobre as ferramentas de metal duro por possui baixa condutividade térmica. Desta forma, diminui a quantidade de calor que flui para dentro dela e, portanto, torna as regiões da ferramenta próximas às interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta mais quentes. Outra propriedade típica da cerâmica é a baixa tenacidade, o que facilita a ocorrência de trincas e quebras (GABALDO *et al.*, 2010).

Segundo Gabaldo *et al.*, (2010) em estudo utilizando o processo de fresamento para usinar ferro fundido vermicular sem refrigeração, onde comparou o desempenho das ferramentas de metal duro código ISO ODMW060508 classe K15 e a cerâmica eram à base de Si_3N_4 (Sialon) com o código ISO ODHW060516 classe K20, utilizando profundidade de corte de 1mm e avanço por dente de 0,10mm valores fixo e variando a velocidade de corte em 350,420,680 e 850 m/min (critério para fim de vida da ferramenta $V_B = 0,3$ mm) medida da vida em volume de material removido e no Quadro 4 é observado as características do ferro fundido.

Quadro 4 Porcentagem de formas da grafita, fases presentes na matriz e dureza

Material	% CGI	% Nodular	Forma da Grafita	% Perlita	% Ferrita	Dureza <i>Brinell</i> media (carga 187,5 Kgf, esf. 2,5mm)
CGI	93- 94	6-7	III-IV	92	8	228

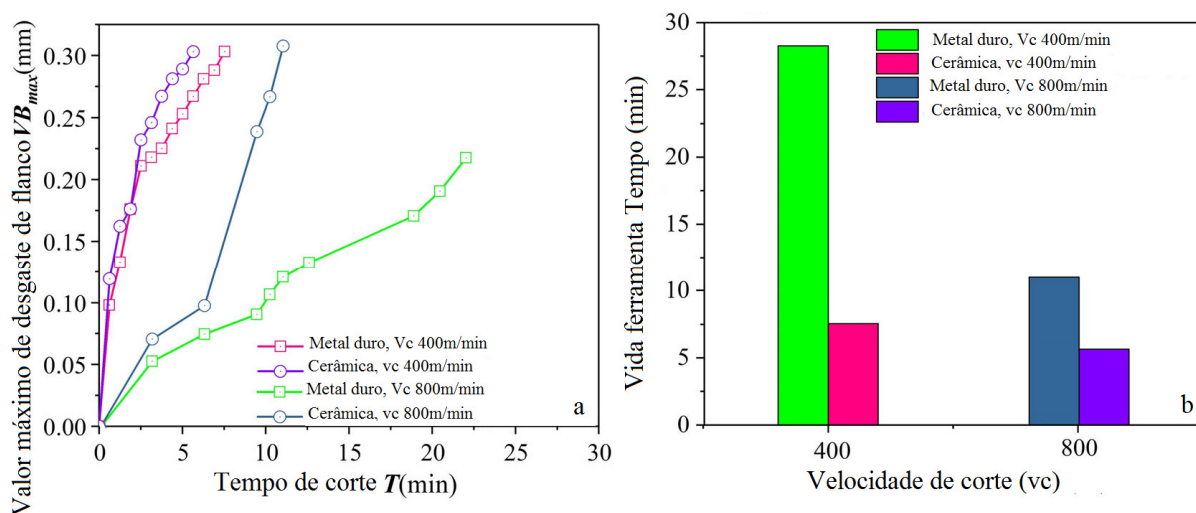
Fonte: Gabaldo *et al.*, (2010)

A ferramenta de metal duro na velocidade de corte até 420m/min, apresentou o mesmo volume de material removido. Com o aumento da mesma para 680 e 850 m/min ocorreu à tendência de decréscimo do volume de material removido. O mecanismo de desgaste da ferramenta se alterou com o aumento da velocidade de corte. Para velocidades de corte de até 420 m / min, o atrito foi o principal mecanismo e com o aumento das velocidades de corte, além de atrito, também foi verificado a presença de lascas e trincas de origem térmica. Já as ferramentas de cerâmicas as análises de mecanismo de desgaste indicaram que o principal mecanismo foi, provavelmente, a difusão. Esse mecanismo reduziu a vida útil da ferramenta de tal forma que ela foi ainda mais curta do que a obtida com ferramentas de metal duro (GABALDO *et al.*, 2010).

Segundo Niu *et al.* (2019) em estudo em fresamento de ferro fundido vermicular sem refrigeração, com ferramenta de metal duro código ISO HNGX 090520ML e ferramenta de cerâmica Sialon código ISO HNEN 0905 XNSN utilizando os seguintes parâmetros de

usinagem profundidade corte de 1mm e avanço por dente de 0,20mm valores fixo e variando a velocidade de corte em 400, e 800 m/min (critério para fim de vida da ferramenta $V_B = 0,3$ mm). Como pode ser visto na Figura 8

Figura 8 – a) Relação entre o tempo de corte e desgaste da ferramenta e b) comparação da vida



Fonte: Niu *et al.* (2019)

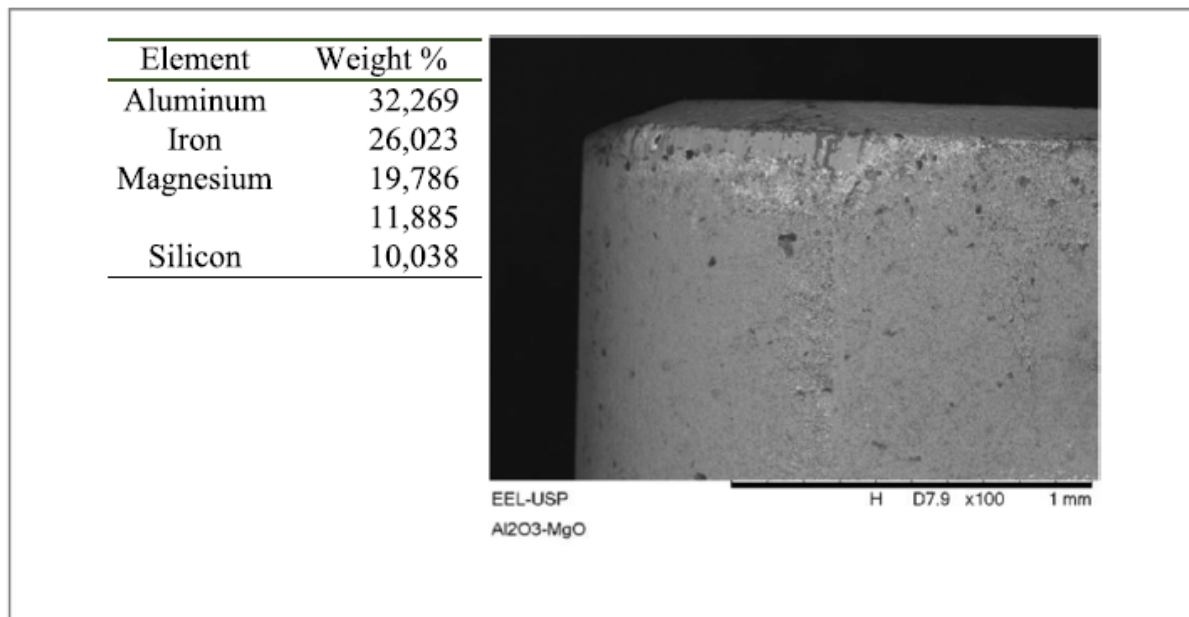
Como é observada na Figura 8 a vida da ferramenta foi muito afetado pelo aumento da velocidade de corte para ferramenta de metal duro. Enquanto, com um aumento na velocidade de corte, o desgaste das ferramentas cerâmicas tornou-se mais leve e a vida útil da ferramenta reduzido ligeiramente. A vida útil das ferramentas de metal duro pode ser quatro vezes ($v = 400$ m / min) ou duas vezes ($v = 800$ m / min) mais do que as ferramentas de cerâmica. Portanto, as ferramentas de metal duro são melhores do que ferramentas de cerâmica em termos de vida útil da ferramenta para realizar o processamento econômico (NIU *et al.*, 2019).

Na ferramenta de metal duro foi verificado nas velocidades de cortes testado que o mecanismo de desgaste predominante foi o lascamento, rachaduras com menor intensidade para a velocidade de 400m/min. Já a ferramenta cerâmica os mecanismos de desgastes foram à difusão e oxidação. Quando observado a qualidade superficial das peças usinadas a rugosidade das ferramentas cerâmica e de metal duro à diferença entre elas foi relativamente pequenas, com um valor máximo de $0,3 \mu\text{m}$ e $0,35 \mu\text{m}$, respectivamente, quando a velocidade de corte variou de 400 a 8000 m / min. A tensão residual de compressão na usinagem superfície do CGI, o que é útil para prevenir o crescimento de fissura por fadiga e aumento da fadiga força das peças, mostrou que esses dois tipos de ferramenta materiais podem atender

aos requisitos de qualidade do usinado superfície de CGI de usinagem de alta velocidade e cerâmica ferramenta era mais adequada para o fresamento de acabamento de alta velocidade de CGI do que a ferramenta de metal duro para obter uma superfície menor rugosidade e melhor qualidade de usinagem. (NIU *et al.*, 2019).

No estudo de Sousa *et al.* (2019) torneamento externo sem refrigeração do ferro fundido vermicular da classe Fv 450 utilizado na confecção de bloco de motor diesel utilizando a ferramenta cerâmica de Al_2O_3 dopado com óxido de magnésio código ISO SNMN 120408, com os seguinte parâmetros de usinagens, velocidade de corte de 200 e 500 m/min, profundidade de corte 0,5 mm e 1 mm e avanço de 0,1 e 0,3 volta/ mm. Na velocidade de corte de 200 m/min foi observado a adesão de material na ferramenta e comprovada com as imagem do microscópio de varredura onde foi verificado a presença de ferro na superfície da ferramenta, devido a alta ductilidade do ferro fundido vermicular para a velocidade de corte de 200 m/min favorece a adesão na superfície da ferramenta e a formação da aresta postiça como é visualizado na Figura 9 (SOUSA *et al.*, 2019).

Figura 9 – Imagem Microscópio de varredura ferramenta com a v_c 200m/min.



Fonte : Sousa *et al.*(2019).

A combinação de parâmetros de usinagem que demonstraram menor desgaste de flanco e maior vida da ferramenta foi velocidade de corte de 200 m/min, avanço 0,1 volta/min e profundidade de corte de 1mm. (SOUSA *et al.*, 2019).

Na velocidade de corte 200 m/min o desgaste predominante foi por adesão e formação de aresta postiça e na velocidade de corte 500 m/min o mecanismo de desgaste predominante foi de abrasão, devido a presença de microestruturas do ferro fundido vermicular possuir carbonetos complexo e serem ásperas, que torna o contato do cavaco e a ferramenta durante a usinagem são muito abrasivas(SOUSA *et al.*, 2019).

2.1.1.3.1 Efeito das variáveis metalúrgicas na usinabilidade

A usinabilidade do ferro fundido depende fortemente da forma, do tamanho, e da quantidade de grafita que constitui o provável acabamento da superfície que pode ser alcançado e exerce uma influência na força de corte. A existência de grafita na matriz acarreta uma característica de usinagem fácil, já a sua forma e quantidade produz o provável acabamento da superfície e a força de corte necessária em um processo de corte (NAYYAR *et al.*,2012; ROSA, 2009).

A mudança da grafita da forma lamelar para a vermicular altera o mecanismo de ruptura do cavaco, passando de frágil para dútil. A estrutura do ferro fundido vermicular não possibilita a clivagem e nem a propagação de trincas. Dessa forma, confere um maior desgaste da ferramenta durante a usinagem, de maneira a gerar uma maior resistência mecânica e tenacidade ao material (HECK *et al.*,2008; DORÉ, 2007).

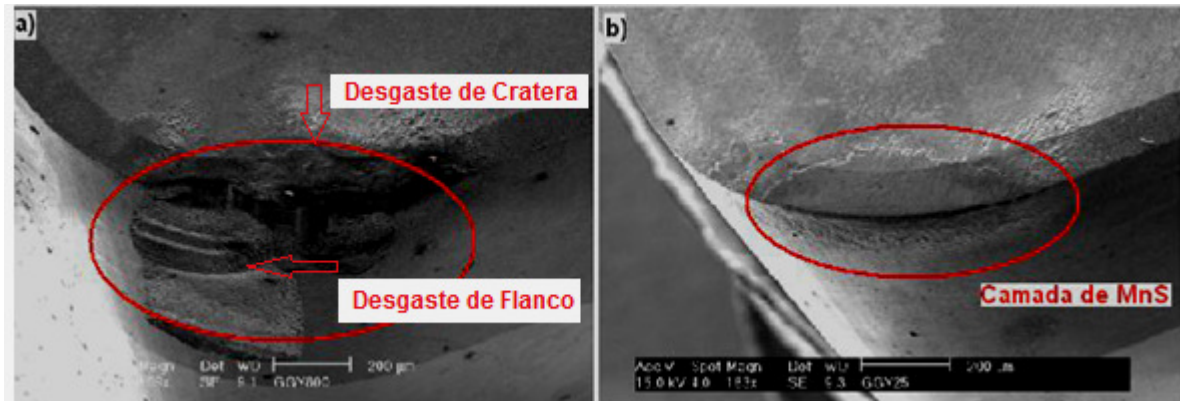
No processo de usinagem do ferro fundido vermicular, o cavaco permanece um maior tempo em contato com a ferramenta do que o cinzento. Dessa maneira, associando o coeficiente de atrito juntamente com a menor condutividade térmica, a temperatura da ferramenta sofre um acréscimo durante o corte quando é feita uma comparação com ferro fundido cinzento (HECK *et al.*,2008; DORÉ, 2007).

O ferro fundido cinzento possui uma camada protetora sobre a superfície que evita corrosão, difusão e atua como lubrificante sólido da ferramenta durante a usinagem. Ela é composta por sulfeto de manganês (MnS), que se forma da união do enxofre com o manganês (NGUYEN *et al.*, 2020; ROSA, 2009; HECK *et al.*,2008).

Já no ferro fundido vermicular, o enxofre é residual, por volta de 0,01%, sendo uma quantidade que chega ser dez vezes menor do que encontrado no ferro fundido cinzento e geralmente o magnésio é um forte formador de sulfeto, tem-se preferencialmente a formação de inclusões de sulfeto de magnésio (MgS), não havendo quantidades remanescentes para a formação da camada protetora de sulfeto de manganês. Durante a usinagem com ferramenta de Nitreto Cúbico de Boro (CBN) com os mesmos parâmetros de usinagem, o ferro fundido

vermicular apresentou desgaste de cratera e desgaste de flanco e o ferro fundido cinzento que possui a formação da camada de sulfeto de manganês ficou sem desgaste como é demonstrada na Figura 10 (NGUYEN *et al.*, 2020; NAYYAR *et al.*, 2012; ROSA, 2009).

Figura 10 – Usinagem ferramenta de CBN: a) Vermicular; b) Cinzento

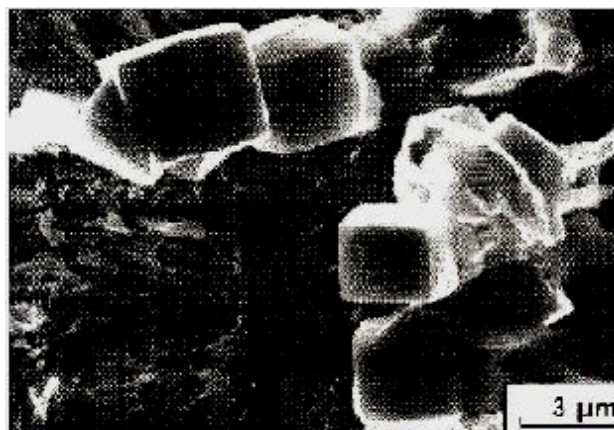


Fonte: Adaptado Doré (2007)

Segundo Nguyen et al. (2020) além da camada de sulfeto de magnésio que foram relatados nos estudos anteriores de o ferro fundido cinzento, foi verificado a presença da camada protetora de Al_2O_3 onde justifica o menor desgaste durante a usinagem de ferro fundido cinzento quando comparado com o ferro fundido vermicular. Essa camada fornece maior proteção ao desgaste.

A adição do titânio expande a resistência à degradação, porém reduz a usinabilidade da liga, a cada 0,01% de adição de titânio são formadas mais de 1000 inclusões de carbonetos e carbonitretos de titânio, que estarão agindo em cada milímetro quadrado da área de superfície usinada que estão ilustrados na Figura 11 (HENKE; LAMPIC, 2017; ROSA *et al.*, 2010).

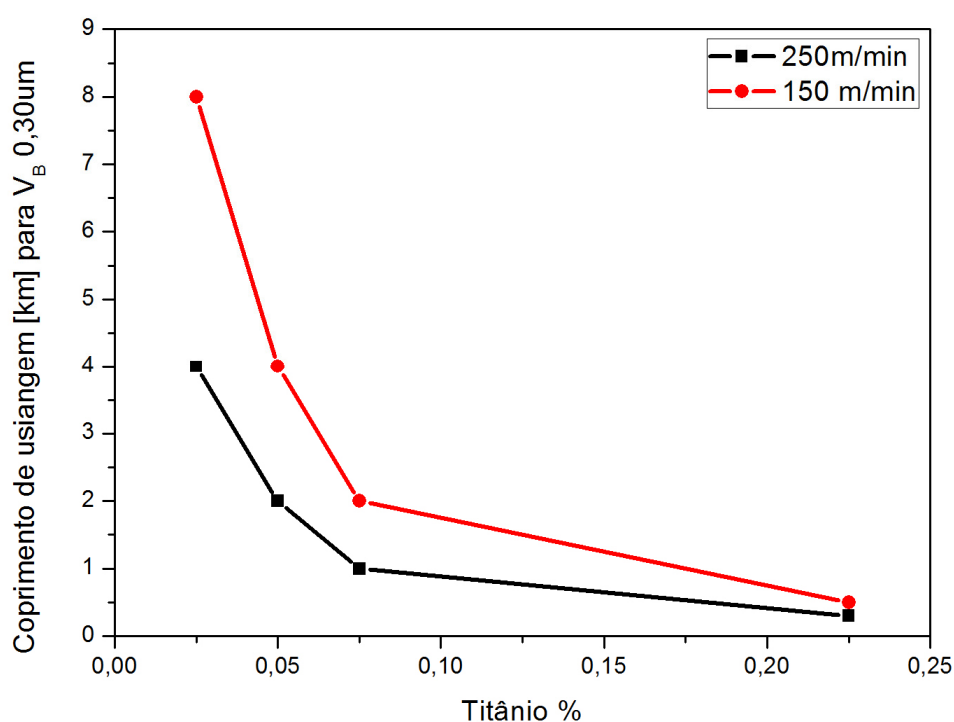
Figura 11 - Inclusões de carbonitretos cúbicos de titânio



Fonte Rosa (2009)

Segundo Henke e Lampic (2017), o acréscimo na intensidade de titânio de 0,01 para 0,02% é considerável para reduzir a vida da ferramenta aproximadamente 50%. Sendo ainda adicionadas as inclusões de carbonetos e carbonitretos que favorece o mecanismo de abrasão sobre o desgaste da ferramenta com é visto na Figura 12.

Figura 12 - Redução da Vida da Ferramenta de Metal Duro em Função do Aumento da Porcentagem de Titânio no Ferro Fundido Vermicular



Fonte Henke e Lampic (2017)

2.2 USINAGEM

Segundo Maia (2012), na indústria metal-mecânica, são utilizados vários e diferentes processos de modificações de metais em peças: metalurgia do pó, solda, fundição, ou usinagem. Para escolha do processo de fabricação alguns fatores devem ser considerados: material, forma e dimensão da peça, quantidade de peças a serem produzidos, tolerâncias e acabamento superficial requerido, além do custo total do processamento.

Nas operações que tem como objetivo de checar a forma e dimensões, a usinagem tem destaque. Em usinagem temos grandes números de operações e variedade de máquinas-ferramentas e ferramentas de corte disponíveis. A máquina-ferramenta pode dispor de uma ou mais ferramentas de corte e sendo a usinagem um dos métodos de fabricação mais

empregados nas indústrias: automotiva, naval, aeroespacial, petrolífera, construção civil e eletrônica (KONDO, 2018).

A usinagem está presente em alguma etapa dos produtos industrializados e está baseada em alguns estudos como, o atrito, deformação calor gerado no processo e nas propriedades dos materiais, (DINIZ *et al.*, 2013).

Nas indústrias Metal-Mecânica, grandes partes da riqueza mundial é representa na usinagem através do comércio de máquinas-ferramentas, para realização de furos, das engrenagens para transmissão de potência, dos componentes da indústria aeroespacial, dos pinos médico-odontológicos, das lentes de contatos extraoculares, das lentes de contatos intraoculares (LIMA, 2012).

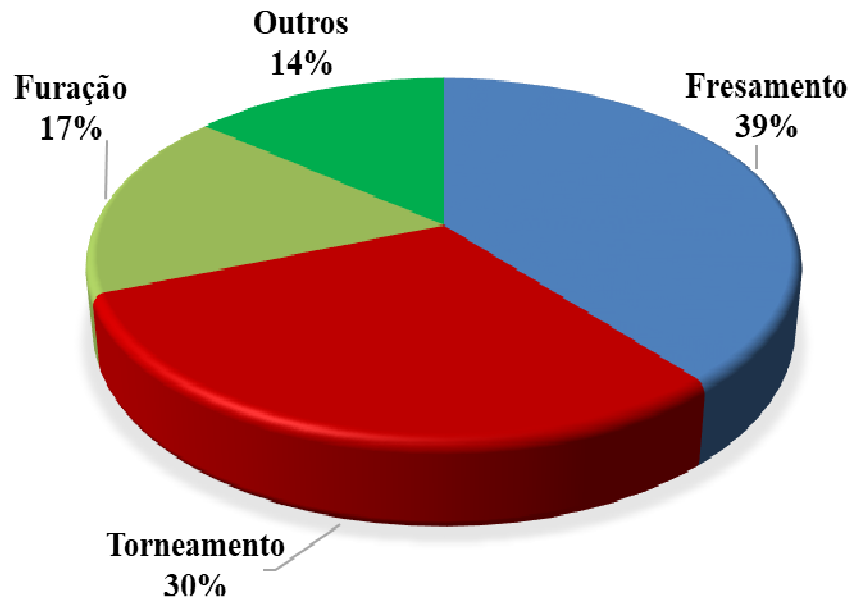
Na usinagem tem-se o desbaste, onde o objetivo principal é remoção de grande quantidade de material e depois a operação acabamento é retirado pouco material e tem o objetivo de obter da qualidade superficial final da peça (DINIZ *et al.*, 2013).

A ferramenta ou a peça que se está trabalhando tem de mover-se e este movimento será em linha reta (com movimento alternado para frente e para trás) ou em forma circular (KONDO, 2018).

Na indústria Manufatureira um dos objetivos permanente e a otimização de processos de usinagem, devido a competitividade exigida no mercado diante da globalização, possibilitando trazer bons resultados e executando a melhor exploração de todas as oportunidades. Já na usinagem, são observadas as possibilidades de otimização no processo do *set-up* da máquina-ferramenta de corte com maior durabilidade (tempo de vida) ou diminuição do tempo durante o próprio processo de usinagem (BOBZIN, 2017).

Segundo Bobzin (2017) as usinagens mundiais das indústrias estão concentradas em fresamento (39%), torneamento (30%), furação (17%) e outros (14%), na Figura 13 observa-se que os processos de fresamento e torneamento são os mais utilizados com 69%.

Figura 13 - Distribuição dos processos de usinagem no mundo



Fonte: Adaptado de Bobzin (2017).

2.2.1 Torneamento

Segundo Rosa (2009), o torneamento é um processo mecânico de corte contínuo, sendo a operação mais utilizada na indústria, por ser fácil e economicamente viável. A peça a ser usinada é fixada por placa lisa e arrastador, ou por placa de três ou quatro castanhas do torno e rotacionada, enquanto a ferramenta presa firmemente em uma porta ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar.

Segundo Diniz *et al* (2013) pode-se realizar torneamento longitudinal externo e interno, faceamento, torneamento de perfis, torneamento de roscas, torneamento de forma.

Neste trabalho, será utilizada a operação de torneamento longitudinal externa de acabamento, no qual a peça gira presa no eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta executa movimentos de desloca uma trajetória paralela à peça.

Os fatores que são independentes de material a ser usinado e ferramenta, que determina o resultado final do processo são os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

2.2.1.1 Parâmetros de cortes

Os parâmetros de corte do processo de torneamento externo são: velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte.

A **velocidade de corte (V_c)** é a frequência pela qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min (metros por minutos), demonstrada na Equação 1 (COSTA, 2016).

$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \quad (1)$$

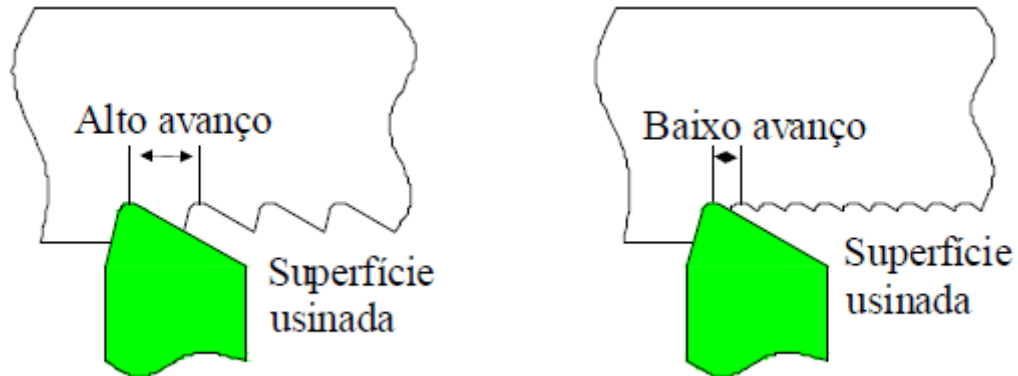
Onde: V_c = Velocidade de corte (m/min);

D = diâmetro da peça (mm);

n = RPM Rotação por minuto.

A **velocidade de avanço (f)** é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça expressa em mm/volta (milímetros por volta). O avanço deixa marcas na superfície da peça usinada (vales e picos), devido a esse fenômeno ele tem influência diretamente no acabamento, que é medida pela rugosidade da peça ilustrada na Figura 14.

Figura 14 - Resultado do avanço na rugosidade superficial usinada.



Fonte Costa (2016).

Segundo Costa (2016) quando a usinagem é realizada com avanço baixo, melhora o acabamento superficial da peça, as distâncias entre os picos são menores. Quando o avanço é alto, as distâncias entre os picos são maiores e o acabamento é afetado negativamente, conforme demonstrada na Equação 2 onde é feito o cálculo teórico da R_a .

$$R_a = f^2 / 18\sqrt{3}r_e \quad (2)$$

Onde: f = avanço (mm/volta)

$R\epsilon$ = raio de ponta da ferramenta (mm).

A **profundidade de corte (a_p)** é a medida que a ferramenta penetra perpendicular ao plano de trabalho, espessura ou profundidade de penetração, medida em mm. Ela tem relacionamento direto com a força de corte e potência consumida na máquina, quanto menor a profundidade de corte, menor a força de corte e potência consumida na máquina, processo estável e bom acabamento superficial sendo utilizado em operações de acabamento. Já no desbaste, são utilizadas maiores profundidades de corte, gerando maior esforço e potência consumida na máquina, pois o mesmo não necessita de uma boa qualidade superficial na peça e aumenta a produtividade do processo (COSTA, 2016).

Percurso de corte L_c [mm] é o espaço percorrido sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante segundo a direção de corte no torneamento conforme a Equação 3.

$$L_c = \Pi \cdot D \quad (3)$$

Onde : L_c = percurso de corte(mm)

D = diâmetro da peça.

2.2.2 Materiais para ferramentas de corte

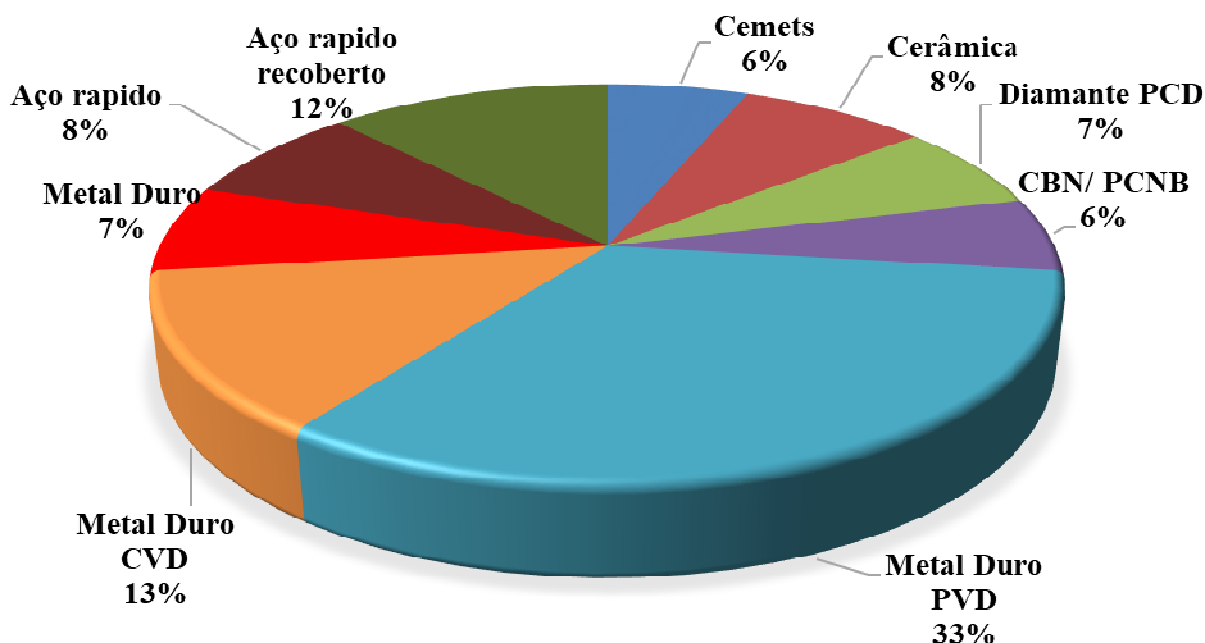
A área de materiais para ferramenta de corte desenvolve pesquisa que buscam continuamente desenvolver novos materiais ou melhorar as características dos já existentes no mercado atual. Essas características podem ser físicas, mecânicas e geométricas, como: aumentar a dureza a frio e a quente e resistência à degradação (MACHADO, *et al.* 2015).

Já os materiais que serão utilizados para a fabricação de ferramentas, frequentemente, o que se destaca em uma determinada propriedade é inferior nas outras, o que tem a necessidade que sempre buscar um equilíbrio entre as propriedades das ferramentas. Deste modo quando seleciona as características de uma ferramenta, deve levar em conta que ela exercerá influência nas trocas de ferramentas, escolhas das máquinas, tempos de fabricação, custo do operador. (DINIZ *et al.*, 2013).

Também na escolha da dureza e tenacidade têm que levar em conta que são duas propriedades antagônicas. No mercado hoje pode-se encontrar uma grande variedade de materiais para ferramentas como diamante, CBN, cerâmica, cermet, metal duro e aço rápido.

Dessa forma, verifica-se que 53% das ferramentas utilizadas em usinagem são de metal duro, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Mercado global de ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Bobzin (2017)

Na usinagem do ferro fundido, os materiais mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte são metal duro com revestimento de uma ou mais camadas por processo de CVD (*Chemical Vapour Deposition*) Deposição Química de Vapor e cerâmica. Essa ferramenta pode ser utilizada com valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte com valores altos aumentando a produtividade e diminuindo os custos operacionais, já que possui bons tempos de vida quando utilizado em condições normais de usinagem.

Por isso, o foco da revisão bibliográfica sobre os materiais para ferramentas de corte estará direcionado a esses dois tipos de materiais de ferramenta.

2.2.2.1 Metal duro

O metal duro foi desenvolvido e produzido em laboratório pela primeira vez na Alemanha, utilizando o pó de carboneto de tungstênio (WC) combinado com pó de cobalto (Co), a união desses dois elementos criou-se o material de ferramentas de corte. Após essa descoberta os alemães entenderam que esse material possuía excelentes propriedades como

resistência ao desgaste, dureza, e tenacidade, e batizaram como Widia, que seu significado em alemão é duro como diamante (SANTOS; SALES, 2007).

Para a fabricação do metal duro é utilizado o processo da metalurgia do pó, tendo em sua composição as partículas duras como os carbonetos de tungstênio, titânio e tântalo (WC, TiC, TaC), já o elemento ligante geralmente são o Cobalto, Níquel e Ferro (Co, Ni, Fe) que são pesados e sintetizados. Os ligantes são adicionado como a função de realizar a ligação entre os carbonetos que são duros e frágeis, obtendo material resistente e tenaz. Já os carbonetos tem a finalidade de conferir as propriedades como alta dureza a quente, sua elevada dureza, resistência ao desgaste e à compressão e permite que a capacidade de corte se mantenha até a temperatura da ordem de 1000°C (MACHADO *et al.*, 2015; YAN *et al.*, 2009; PINTO, 2008).

Nos processos de fabricação dos metais duros a porcentagem de cobalto, os carbonetos e o tamanho de grãos dos carbonetos são muito importantes para a definição das suas propriedades. Quando são aumentados os teores de cobalto, ocorre uma melhora na tenacidade, maior resistência a impactos, diminuindo a dureza, aumenta a resistência à ruptura transversal (THR) e ocorre a diminuição no módulo de elasticidade. Já o tamanho de grãos dos carbonetos, quanto mais refinado o tamanho gera uma melhora na tenacidade, ocorre um aumento na dureza média, mas as propriedades térmicas são afetadas negativamente, conforme ilustradas no Quadro 5 (KONDO, 2018).

Quadro 5 - Propriedade do metal duro com tamanho de grão normais (THM e THR) e com grãos ultrafinos (THM-F e THR-F)

	THM	THM-F	THR	THR-F
Densidade [g/cm ³]	14,9	14,8	14,6	14,4
Dureza [HV30]	1.600	1.800	1.450	1.500
Resistência à Ruptura Transversal [N/mm ²]	2.000	3.000	2.350	3.200
Resistência à compressão	5.400	6.000	5.000	5.300
Tenacidade à fratura K _{IC} [MPa K ^{1/2}]	9,6	10,8	12,0	13,8
Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	80	46	70	42
Coefficiente de expansão térmica [K ⁻¹]	5,5 10 ⁻⁶	6,2 10 ⁻⁶	5,6 10 ⁻⁶	6,7 10 ⁻⁶

Fonte: Kondo (2018)

O tamanho de grãos é classificado, em fino (0,8 a 1,3 μm), submicrométrico (0,5 a 0,8 μm), ultra-fino (0,2 a 0,5 μm) e nanométrico (menor que 0,2 μm). O Quadro 4 traz um comparativo quanto a diferença no tamanho de grãos nos metais duros (KONDO, 2018).

Esse material apresenta uma elevada dureza e tenacidade à fratura e um aumento na resistência ao desgaste, sendo utilizados em ferramentas de corte como as brocas para perfuração de poços petróleo. São amplamente utilizados, pois tem grande contribuição na diminuição dos custos e prolonga a vida útil das ferramentas quando são comparados com as ferramentas de aço rápido (EDWARD, 2008; GRZESIK, 2008).

Com o objetivo de obter uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas desses grupos convencionais, foram criados os metais-duros com a adição de elemento de liga, com o objetivo de obter uma melhoria na sua durabilidade.

São adicionados os elementos como: Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC) e Nitreto de Titânio (TiN), onde em cada um deles apresentam propriedades diferenciadas de dureza, resistência a abrasão, tenacidade e até mesmo na condutividade térmica e estabilidade química.

Desse elemento o TiC possui um coeficiente de atrito menor gerando menor o calor. Enquanto que o TaC e o de NbC possui uma maior tenacidade por possuir os grãos mais refinamento do que a matriz do metal duro, desta forma ocorre um aumento da resistência da aresta de corte. Já o TiN, ele possui uma maior estabilidade química quando comparado com o TiC, ocorrendo uma menor tendência à difusão na ferramenta (LIMA, 2012).

Um dos motivos que ajudou a ocorrer uma melhoria no desempenho e expressiva atenuação dos desgastes nas ferramentas de metal duro foi a evolução dos processos de revestimentos duros empregado sobre o substrato. Neste processo pode utilizar uma determinada propriedade de alguns materiais com alta dureza e estabilidade química, que podem ser depositada em camadas sobre matrizes de metal duro com propriedades intermediárias (MACHADO *et al.*, 2015).

Essas camadas podem gerar uma redução no coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, desta forma diminuindo o fator de recalque do cavaco e do calor gerado no flanco e na face da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015).

A fabricação de metal duro revestido representa de 80 a 90% de todas as pastilhas para ferramenta de corte. Esse sucesso como material da ferramenta se dá por sua combinação com infinita forma de combinação aliando a melhor resistência ao desgaste e tenacidade, além de possibilitar as conformidades com geometrias complexas (SANTOS e SALES, 2007).

A ferramenta de metal duro revestido pode combinar seu substrato com uma cobertura com fase cerâmica. Juntos, eles podem criar classe personalizada para determinadas aplicação específica de usinagem. Os mais comuns e principais processos de deposição de camada são:

- Cobertura CVD (*Chemical Vapour Deposition*) Deposição Química de Vapor é muito utilizado na cobertura de ferramentas de metal duro, esse processo possibilita uma boa difusão entre o revestimento e o substrato. O forno que é realizado o revestimento possui uma atmosfera protetora com o gás hidrogênio e o revestimento é adicionado ao metal duro através de gás, as temperaturas para ser realizado a deposição variam de 500 a 1100°C e com uma pressão ligeiramente negativa, tendo uma facilidade em regular e controlar a espessura da camadas de revestimentos depositadas sobre o substrato (DINIZ *et al.*, 2013).

- Cobertura PVD: (*Physical Vapour Deposition*) Deposição Física de Vapor são formadas em temperaturas relativamente baixas (450 – 500°C) demonstradas no Quadro 6 (DINIZ *et al.*, 2013).

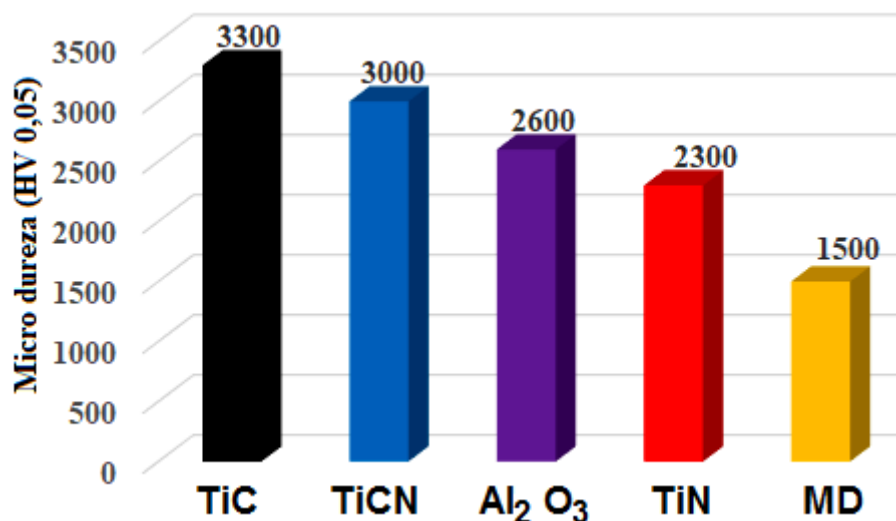
Quadro 6 - Ferramentas revestidas pelos processos PVD e CVD

	CVD- Deposição química de vapor	PVD- Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1000°C	Aproximadamente 500°C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas TiC-Tin, TiN-TiN-Tin, TiC- Al ₂ C ₃ , TiCN-Al ₂ O ₃	TiN, TiCN, TiAlN, TiCN
Principais aplicações	Torneamento e Madrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	Maior resistência ao desgaste e craterização; Aumento na vida da ferramenta	Substituí ferramenta sem revestimento: com mesma tenacidade, configuração de aresta e precisão; Reduzir APC; Aumento na vida da ferramenta.

Fonte: Kondo (2018)

Nos processo industriais os revestimentos que mais se destacam são: Carboneto de titânio (TiC,) Nitreto de titânio (TiN), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Carbonitreto de titânico (TiCN), revestido por WC/C e multicamadas. Cada um destes apresenta características próprias, dureza, como é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 – Micro dureza de do Metal duro e cada camada de revestimento



Fonte: Rosa (2009) e Tooptong (2018)

Para cada camada de revestimento possui uma propriedade e características que são:

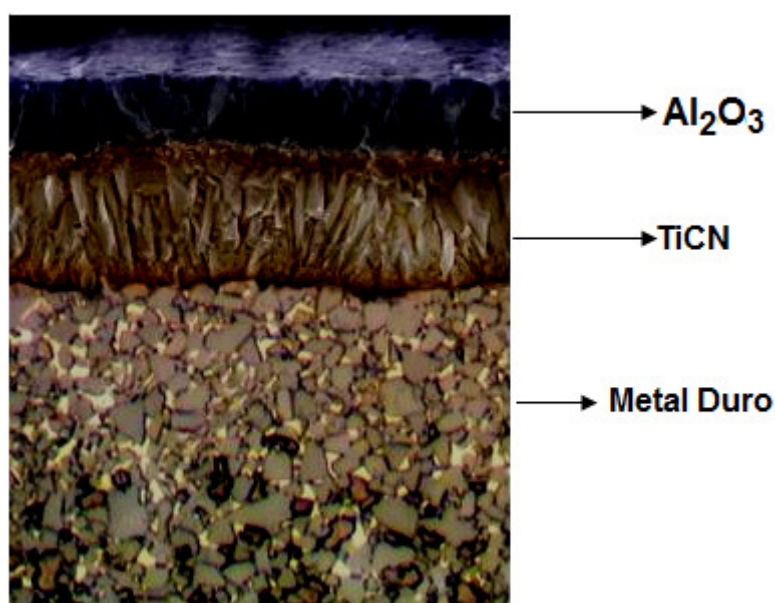
Carboneto de Titânio (TiC): Demonstra menor coeficiente de atrito e dilatação térmica, que geram uma diminuição na temperatura da aresta de corte, diminuindo a ocorrência de difusão. Quando se compara com o TiN, possui uma dureza elevada e maior resistência a abrasão (PINHEIRO, 2019).

Nitreto de Titânio (TiN): Suas ligações internas maior são maior que o Carboneto de titânio. Devido possuir uma maior estabilidade química, apresentando uma menor tendência à difusão quando é realizada a usinagem de aços (DINIZ *et al*, 2013).

Óxido de Alumínio (Al_2O_3): Possui uma elevada dureza a quente, boa resistência à oxidação e ações químicas apresentando uma excelente resistência ao desgaste de cratera. Sua maior desvantagem é a baixa resistência às variações de temperatura gerando trincas térmicas e grande fragilidade (LIMA, 2012).

Carbonitreto de Titânio (TiCN): Possui uma ótima resistência ao desgaste do flanco devido a presença do elemento carboneto de titânio e uma boa estabilidade química por conta do nitreto de titânio, apresentando uma boa resistência contra o desgaste de cratera e o de oxidação. Geralmente é utilizado na usinagem dos ferros fundidos (DINIZ *et al*, 2013). Na Figura 17 pode-se observar a pastilha de metal duro Tk1001 com duas camadas de deposição pelo processo CVD.

Figura 17 - Pastilha de metal duro e camadas revestidas por CVD



Fonte: Adaptado de Costa (2016)

2.2.2.2 Cerâmica

De acordo com Machado *et al.* (2015), as cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não metálicos, geralmente, na forma de óxidos, carbonetos e nitretos, que são prensados e sintetizados para obter os insertos.

Sua estrutura cristalina é mais complexa em relação aos metais devido este material ser composto por pelo menos dois elementos com ligação iônica ou covalente entre si. Estes elementos apresentam características de resistência ao desgaste, resistência à corrosão, inércia química, estabilidade em temperaturas acima de 1000 °C, leveza, resistência mecânica elevada e propriedades isolantes. Entretanto, apresentam como desvantagem a sua relativa fragilidade (ZHUANG *et al.*, 2015).

Segundo Guzik *et al.* (2013) as ferramentas de cerâmicas tem uma tendência de aumento no mercado, esta é justificada, pois essa atendem as exigências de precisão e com alta qualidade das superfícies usinadas, com uma vida da ferramenta bem longa e podendo realizar altas taxas de remoção quando se compara com o metal duro. Sua dureza pode chegar a mais de 1700 HV, desta forma possibilitando ser utilizada em usinagem de materiais como o ferro fundido vermicular.

De acordo com Zhuang *et al.* (2015), os materiais cerâmicos são os que possuem maior os maiores valores de dureza e temperaturas de fusão e tem sido utilizada com sucesso em vários países na usinagem de aços e ferros fundidos. Entre as cerâmicas estruturais pode se destacar as cerâmicas a base de alumina, ponto de fusão de 2054 °C, que apresenta uma granulometria com valores menor que 5 µm, sua densidade relativa acima de 98%, que são consideradas materiais avançados e com um baixo custo e um material que constitui uma tecnologia em processo de desenvolvido com grande base em vigentes aplicações com alto potencial e com crescimento promissor em diversas áreas.

Juntamente com a alumina inúmeras combinações e adições podem ser feitas, com a adição de óxido de magnésio (MgO), que tem a finalidade de realizar uma maior densificação e ajuda no refinamento dos grãos. Sua dureza à temperatura ambiente é muito similar ao de uma ferramenta metal duro com cobertura sendo de 1550 HV a 1700 HV. Já quando ela é submetida às altas temperaturas e superior a 1000°C mantém sua dureza e resistência à compressão apresentando como uma grande vantagem diante da ferramenta de metal duro.

Segundo Diniz *et al.* (2013), uma nova geração de cerâmicas estruturais para ferramentas de corte tem surgido graças a avanços nas tecnologias de processamento das cerâmicas avançadas permitindo obter propriedades superiores aos materiais tradicionalmente utilizados. Entre esses melhoramentos nas propriedades estão a tenacidade à fratura, a resistência ao choque térmico, a dureza elevada e a resistência ao desgaste, permitindo que estas cerâmicas pudessem ser utilizadas na usinagem de diversos materiais, tais como aços endurecidos, ferros fundidos, metais não ferrosos e ligas refratárias à base de níquel.

Rittidech *et al.* (2013) afirmam que apesar da variedade de propriedades exibidas pela alumina pura, sua utilização como ferramenta de corte, sob condições de trabalho com cargas mecânicas altas e choque térmico, é limitada devido a sua fragilidade. Uma alternativa para melhorar as propriedades da cerâmica de alumina pura é por meio da adição de quantidades pequenas de outros materiais (aditivos).

A inserção desses aditivos cria uma alteração na estrutura de defeitos do material como:

• **Óxido de magnésio (MgO):** Um dos mais eficientes aditivos encontrados para sinterização do óxido de alumínio, que previne o crescimento descontínuo dos grãos e permite que o Al_2O_3 seja sinterizado até próximo de sua densidade teórica (ALVES, 2018).

O efeito benéfico do MgO na sinterização da alumina, que em pequenos teores aumenta a taxa de sinterização devido a formação solução sólida pelo aumento da concentração dos defeitos pontuais. A densificação também é favorecida já que os coeficientes de auto-difusão são proporcionais à concentração e a mobilidade dos defeitos. Ocorre a diminuição da mobilidade dos contornos de grãos e no tamanho dos grãos de alumina sinterizada, mas é importante salientar, não inibe o crescimento normal dos grãos, ele inibe o crescimento descontínuo dos grãos (ALVES, 2018).

• **Óxido de Cromo (Cr_2O_3):** Na sinterização da alumina, adição de pequenos teores Cr_2O_3 , aumenta a taxa de sinterização devido à formação da solução sólida substitucional. Ocorre a mudança de cor da cerâmica de branca para vermelha, aumento da resistência mecânica e aumento da densificação devido aos coeficientes de auto-difusão que são proporcionais à concentração e à mobilidade dos defeitos. A mobilidade dos contornos de grãos e o tamanho dos grãos de alumina sinterizada são diminuídos, mas não inibe o crescimento normal dos grãos, ele inibe o crescimento descontínuo dos grãos (PICON *et al*, 2019).

2.3 FLUIDO DE CORTE

As atividades industriais geram umas mudanças significativas no ambiente. Com o aumento das exigências das normas ambientais impostas por uma legislação mais rigorosa fez com que a fabricação de muitos produtos fosse reconsiderada. Desta forma estão ocorrendo modificação do objetivo principal do sistema produtivo que visava aspectos econômicos, tecnológicos, e produtivos, tendo em vista o aspectos de âmbito de responsabilidade ambiental. Com a finalidade de potencializar a produtividade em usinagem, foi adicionado o uso de fluido de corte nos processos. Esse se tornou muito importância e em diversos processos fundamental para a obtenção da qualidade exigida nas peças produzidas. Porém, através de um exame total das operações de usinagem, considerando os aspectos ecológicos e humanos, verifica-se a existência de várias fontes agressoras tanto para o meio ambiente e como para o operador, entre elas de forma mais específica os fluidos de corte ou fluidos lubrificantes (ZEILMANN *et al*, 2008).

Os fluidos de corte têm como função introduzir uma melhoria no processo de usinagem conferindo melhor desempenho ao processo. Durante o processo de usinagem, se desenvolve uma grande quantidade de calor em função da energia gerada, pelo atrito entre a ferramenta, a peça e o cavaco. Assim para minimizar a dilatação da peça, os desgastes da ferramenta e remoção dos cavacos entre a peça e a ferramenta e para impedir quaisquer danos e marcas indesejáveis, principalmente na região de corte da peça acabada, utilizam-se fluídos de corte com ação lubrificante e refrigerante. Os fluídos com ação lubrificante, em geral, reduzem o calor na região usinada e os fluidos refrigerantes extraem grande parte da temperatura envolvida no processo. (ZEILMANN *et al.*, 2008; LONGHI *et al.*, 2016)

A tecnologia mais utilizada para a refrigeração e lubrificação durante o processo de usinagem é de abundância, em que uma grande quantidade de fluido de corte é adicionada de forma contínua na região a ser usinada. Esta técnica consome um grande volume de fluido de corte o que é ecologicamente inviável (LONGHI *et al.*, 2016).

Com o objetivo de reduzir o consumo dos fluidos de corte, novas técnicas de usinagem surgiram como a usinagem a seco e usinagem com mínima quantidade de fluido de corte que são importantes alternativas. Com a implantação desses processos são visíveis: gerando um menor impacto ambiental, risco de saúde por parte dos trabalhadores, economia na compra, manutenção e descarte do próprio fluido que pode chega a atingir 20% dos custos totais da usinagem. Por isso os fluidos podem representar sérios riscos para o meio ambiente e à saúde dos trabalhadores. Podendo ocorrer a destinação inadequada dos fluidos pode vir a causar poluição do ar, da água e do solo. Quando os operadores de máquinas tem contato prolongado com fluidos de corte pode causar doenças respiratórias, da pele e do sistema digestivo, conforme demonstrada na Figura 18 (BOSSARDI, 2008).

Figura 18 - Impactos ambientais dos fluidos de corte



Fonte : Zeilmann *et al.* (2008)

O fluido de corte utilizado em usinagem possui consumo anual mundial estimado em 1,25 bilhões de litros. Esse pode demonstrar o tamanho e a grandeza do potencial de diminuição dos custos e dos problemas ambientais e de saúde que pode ser alcançado através das estratégias de redução de utilização (ZEILMANN *et al.*, 2010).

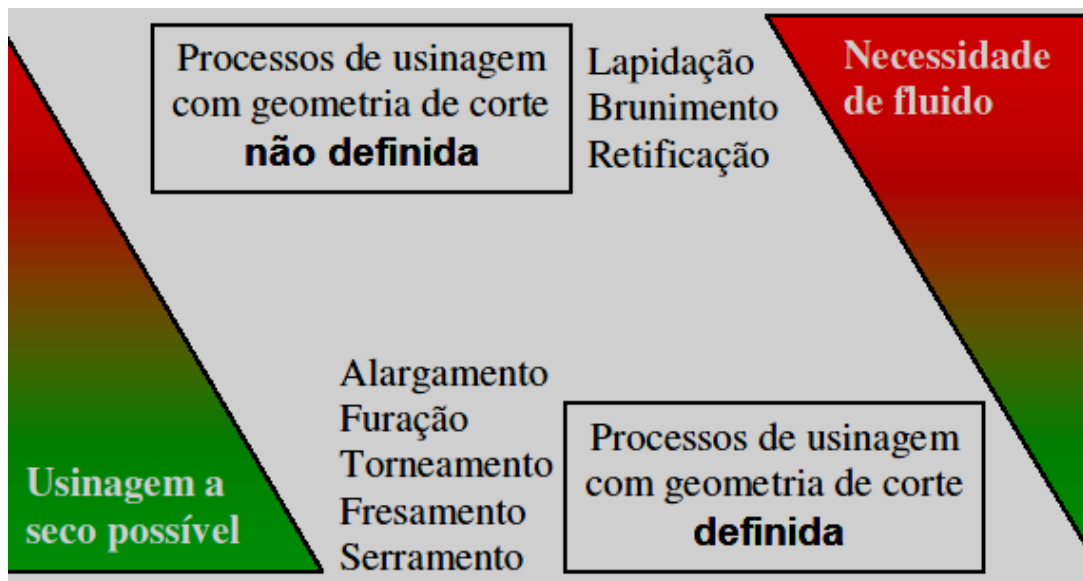
Apesar da insistente tentativas de eliminar completamente a utilização de fluidos de corte ainda em alguns casos é indispensável à utilização para o arrefecimento com o objetivo de aumentar as vidas de ferramentas economicamente viáveis e qualidades superficiais requeridas como na usinagem de materiais de difícil usinabilidade, como na fabricação de componentes que exigem elevada precisão dimensional.

Mesmo havendo uma necessidade de grandes mudanças para se trabalhar sem fluido de corte, a usinagem a seco é a tendência real na manufatura global. Deve-se realizar uma análise criteriosa dos mecanismos dos processos de corte, com objetivo de desenvolver um processo de usinagem a seco econômico e seguro. Desta forma tem necessidade de realizar uma adoção dessa tecnologia, como a construção de máquinas-ferramenta e seus equipamentos periféricos devem se levado em conta as consideração e os aspectos inerentes à nova tecnologia, mas essa implantação desta usinagem não consiste em simplesmente interromper a alimentação de

fluido. Deste modo, os fluidos tem importantes funções no processo, e sua extinção deve ser compensada pela adequação dos demais elementos do processo (ZEILMANN *et al.*, 2010).

A usinagem a seco é em geral aplicável aos processos caracterizados pela geometria de corte definida é ilustrada na Figura 19, como as operações de torneamento.

Figura 19 - Aplicabilidade da usinagem a seco



Fonte: Adaptado Zeilmann *et al.* (2010)

Desde que a usinagem a seco começou a ser estudada, houve alguns progressos e, atualmente, boa parte dos materiais já pode ser usinada nessa condição. No entanto, pesquisa realizada na Alemanha em 2006 constatou que a participação média da usinagem a seco nas indústrias era de apenas 12%. A pesquisa também apontou como principal obstáculo para a implantação da tecnologia, a insuficiência de conhecimentos por parte das empresas especialmente no que se refere aos efeitos da dilatação térmica da máquina e da peça (ZEILMANN *et al.*, 2010)

2.4 AVARIAS E DESGASTES DE FERRAMENTAS DE CORTE

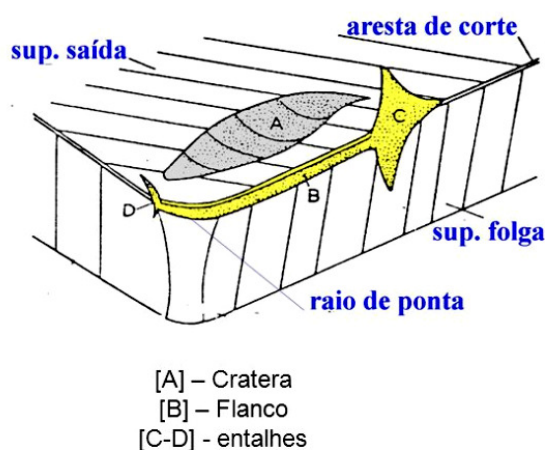
No processo de usinagem a substituição da ferramenta de corte pode ser por:

- Avarias ou falhas catastróficas, como quebra da ferramenta, lascamento e trincamento;
- Desgaste excessivo, onde as condições de corte ou a qualidade da peça usinada é comprometida.

Nos processos de corte interrompido são comuns ocorrer avarias e falhas catastróficas, como o fresamento, devido a ocorrência de choques térmicos e mecânicos envolvidos. Já nos processos de corte contínuo, como o torneamento, isso pode ocorrer devido às condições de corte que excedam as recomendadas, ou quando a ferramenta possua algum defeito de fabricação. No entanto o desgaste da ferramenta é observado e acompanhado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido, podendo ser acionado por vários mecanismos diferentes.

Esses desgastes são devidos em três tipos principais de desgaste de ferramenta: desgaste de entalhe, de cratera e de flanco como visto na Figura 20.

Figura 20 - Locais de ocorrência de desgastes



Fonte: Adaptado de Machado *et al* (2015)

2.4.1 Desgaste de flanco

O desgaste de flanco decorre da fricção (atrito) entre a peça e a ferramenta, ocorrendo na superfície de folga, provocando adesão e/ou abrasão, acentuadas devido o aumento da temperatura durante o processo, podendo levar a ocorrência de difusão, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas (LIMA, 2012; Sousa *et al.*, 2019)

Quando atinge a aresta principal de corte, gera um aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, gerando vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, onde afeta o controle dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, quando tem-se um desgaste excessivo resulta numa superfície mal-acabada e peças fora da especificação, pois exige maior potência de corte, por esse motivo é utilizado para determinar o fim de vida de uma ferramenta. Este desgaste não pode ser

evitado, contudo pode ser minimizada pela correta escolha das condições de corte, material e geometria da ferramenta (FERRARESI, 2014; MOTA, 2019).

Ao realizar o controle da vida de uma ferramenta, é feita a verificação e medição da largura da região do desgaste. Se desejar realizar as medições indiretamente, pode-se também conduzir a evolução desse desgaste utilizando o monitoramento das forças de corte e de avanço, da vibração da ferramenta e/ou da potência elétrica consumida pelo processo, no entanto o desgaste frontal afeta a superfície usinada, como também aumenta a área de contato ferramenta – peça desta forma ela eleva os níveis de força, vibração e potência consumida no processo (ALVES, 2018).

2.4.2 Desgaste de cratera

O desgaste de Cratera ocorre pelo motivo de existir uma interação química e a até mesmo pelo atrito que é gerado entre o contato do cavaco quente com o ângulo de saída da ferramenta, quando se aumenta a velocidade de corte essas condições são potencializadas. Devido à elevada velocidade de corte, aumenta o atrito e o calor gerado na ferramenta e pequenas substâncias são destacadas e se aderem no cavaco sendo conduzidas por ele, desta forma é produzido a cratera na face de saída da ferramenta (HECH *et al.*, 2008).

Para ocorrer este tipo de desgaste tem a necessidade de haver uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, sendo ativado sempre devidos as altas velocidades de corte, que conseqüentemente geram altas temperaturas, desta forma ativa o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à diminuição da resistência a abrasão resultada pela difusão, o desgaste abrasivo é beneficiado, tornando-se logo a forma da cratera decorrente do arranjo de tensões na superfície de saída da ferramenta. Esse tornasse com uma aparência de uma cratera alongada tendo as suas extremidades arredondadas, simultânea à aresta de corte (LIMA, 2012).

A aresta de corte pode ser danificada por ocorre excessivo desgaste de cratera, dificultando o fluxo adequado do cavaco deste modo ocorre um aumento o calor e a pressão sobre a ferramenta, podendo gerar uma fratura da aresta de corte. A utilização de camadas duras protetoras, particularmente as camadas de Al_2O_3 que se apresenta muito estável quimicamente e quando é utilizada uma de ferramenta com ângulo de saída positivo favorece a redução da pressão sobre a ferramenta deste modo o contato entre o cavaco e o inserto é minimizado. Além disso ocorre uma diminuição no desgaste de cratera KT (profundidade da cratera) e kM que é medido da posição da aresta até o centro da cratera. Devido existir uma

difficuldade em se medir os parâmetros de desgaste de cratera, faz com que ele seja apenas um indicador de evolução de desgaste, não sendo utilizado para determinar o fim de vida da ferramenta (LIMA, 2012; PINHEIRO, 2018).

2.4.3 Desgaste de entalhe

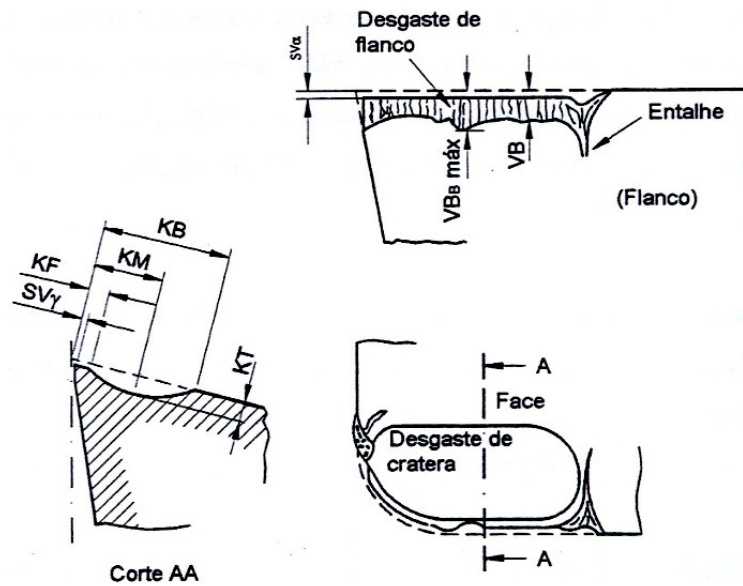
Desgaste de Entalhe ocorre na região de interface entre o contato peça/ferramenta/cavaco, no lado exposto da superfície de corte. A formação do entalhe é resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do cavaco, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. Na região de formação de entalhe a ferramenta de corte também é submetida à ação oxidante da atmosfera. O aumento progressivo do entalhe pode levar à quebra da ferramenta de corte, bem como a um pior acabamento superficial (LIMA, 2012; PINHEIRO, 2018).

2.4.4 Vida de ferramenta

Segundo NBR ISO 3685 (2017) são estabelecidos os critérios para determinar até onde uma ferramenta de corte pode ser útil e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, indicando o momento que a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída evitando falhas catastróficas ou até quebra da ferramenta. Para isso são realizados ensaios de usinabilidade para definir o período em que a mesma pode trabalhar, até que seja necessária a sua troca. Este tempo de usinagem é denominado de “tempo de vida da ferramenta de corte” (T), é definido através do tempo de trabalho necessário para que se apresente um defeito crítico.

Os critérios que devem ser utilizados a fim de verificar o desgaste da ferramenta são demonstrados na Figura 21:

Figura 21 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte



B- Largura Média de desgaste de flanco.

K_B - Largura da cratera.

K_M - Distância da Borda da ferramenta.

SV_α – Deslocamento lateral da aresta de corte na direção do flanco

V_{B máx}- Largura máxima de desgaste de Flanco.

K_F - Largura do lábio no desgaste de cratera.

K_T- Profundidade de cratera.

SV_γ – descolamento lateral aresta corte na direção da face.

Fonte: Adaptado de NBR ISO 3685 (2017).

Desgaste de flanco médio, $V_B = 0,3 \text{ mm}$

Desgaste de flanco máximo, $V_B \text{ Max} = 0,6 \text{ mm}$, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco

Profundidade da cratera, $K_T = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço)

Distância frontal entre cratera e flanco, $K_F = 0,02 \text{ mm}$

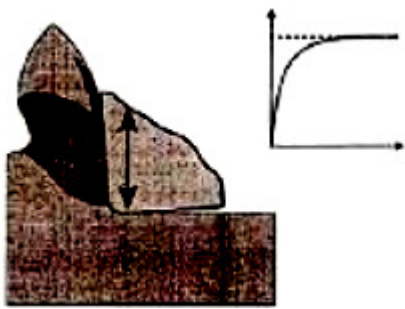
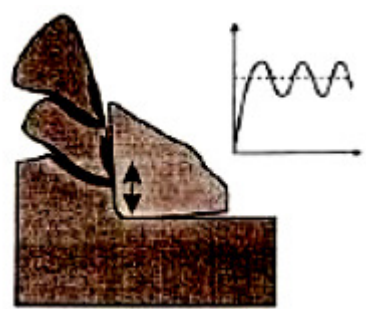
Falha catastrófica

Para ferramentas de aço rápido e de cerâmica, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos indicados para ferramentas de metal duro (NBR ISO 3685, 2017).

2.5 FORMAÇÃO DE CAVACO NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO

No processo de formação de cavaco na usinagem de ferro fundido nodular têm-se algumas particularidades que são muito próxima da usinagem do ferro fundido vermicular. A usinagem destes materiais precisa de maiores solicitações mecânicas e térmicas, quando comparado com a usinagem do aço. Porém, estas solicitações são distribuídas em uma pequena zona e oscila com a frequência da segmentação dos cavacos. Dessa forma, são apresentadas, na Figura 22, algumas características típicas da formação de cavaco na usinagem do aço e ferro fundido (TOOPTONG *et al.*, 2016; TELES, 2007).

Figura 22 - Comparação da formação de cavacos entre aços e ferros fundidos

Formação de Cavaco Contínuos	Formação de Cavaco Não-Contínuos
Típico para materiais dúcteis (aço) - Processo de cisalhamento contínuo. - Solicitação térmica e mecânica uniforme. - Transmissão de força através da zona de cisalhamento e distribuição sobre toda a zona de contato.	Típico para ferros fundidos com grafita nodular - Compressões descontínuas e processo de formação de trincas (grafita: defeito interno). - Reduzido, mas com solicitação mecânica oscilante. - Pouca transmissão de força através da zona de cisalhamento e, portanto, zona de contato do cavaco pequena.
	

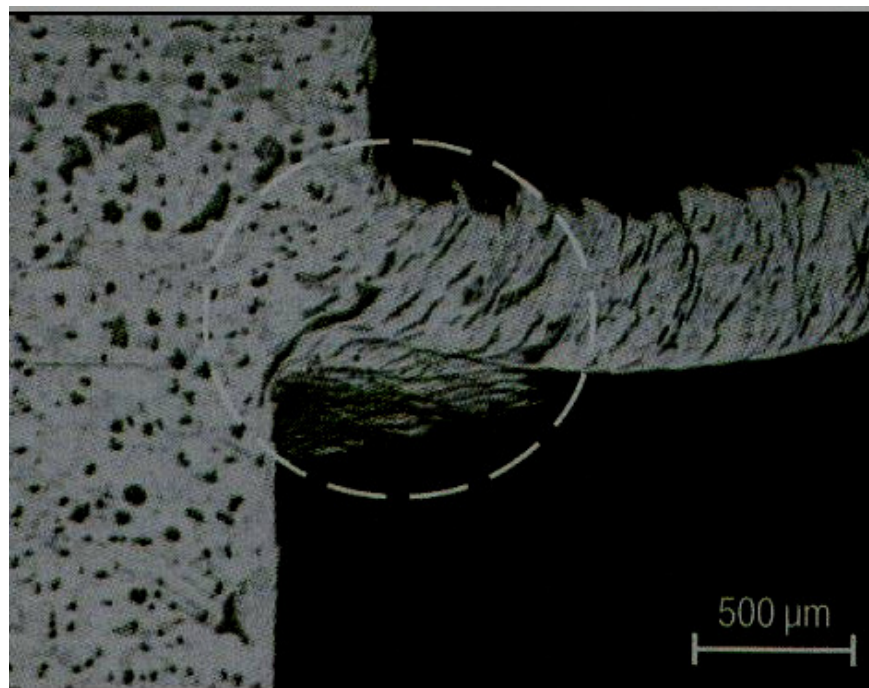
Fonte: Teles (2007)

Quando a usinagem ocorre normalmente, o processo de formação do cavaco são fases periódicas onde ocorre o primeiro a deformação do mesmo, recalque, posteriormente o deslizamento e ocorre à remoção do material. Para visualizar a formação do cavaco durante o processo de usinagem é utilizado com o auxílio do recurso da filmagem em câmera lenta, este

processo possui um custo muito elevado e possibilita somente a visualização das condições de deformação na região externa do cavaco (TOOPTONG *et al.*, 2016; TELES, 2007).

Segundo Teles (2007) utilizou-se uma filmagem com câmera lenta durante o processo de usinagem de ferro fundido nodular ferrítico, classificado pela norma DIN 1663 como GGG42, nos ensaios que foi utilizado a velocidades de corte de 40 m/min e verificou-se que apresentou uma deformação plástica dominante na interface e resulta do movimento de discordâncias e subsequente encruamento. Já na primeira camada de material que aderiu na superfície da ferramenta era encruada apresentando uma tensão de escoamento elevada, a deformação continua no metal próximo à aresta de corte, até se tornar extremamente encruado. Devido à ocorrência deste processo cíclico de deposição de camadas encruadas de material sobre a superfície da ferramenta, forma-se a aresta postiça de corte conforme Figura 23 (TOOPTONG *et al.*, 2016).

Figura 23 - Filmagem do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico



Fonte: Teles (2007)

Ao realizar os experimentos com velocidades de corte maiores, as arestas postiças de corte na interface cavaco-ferramenta desaparecem, dando lugar a formação de uma zona de fluxo continua de cavaco (TOOPTONG *et al.*, 2016).

2.6 TECNOLOGIA DE SUPERFÍCIE

A tecnologia de superfície é a área da engenharia que se dedica a realizar estudos com a finalidade de avaliar e descrever a superfície de um material. Desta forma a superfície é a lugar que limita a peça com o meio periférico e se associam as propriedades da textura (rugosidade, ondulação e marcas da ferramenta) (PINHEIRO, 2018).

Devido à ocorrência do aumento das exigências dos consumidores por produtos cada vez com melhor desempenho e confiabilidade, neste aspecto a qualidade da superfície das peças vem tendo aumento muito expressivo dentro do meio industrial. Já no processo de fabricação a tecnologia de superfície está muito presente para realizar a avaliação do desgaste de ferramenta e peça que estão em uso e as variações no material do componente, já que a superfície da peça exercerá grande influência na vida de um componente em funcionamento (KONDO, 2018).

2.6.1 Rugosidade

A rugosidade é definida por irregularidades finas que estão presente na superfície das peças, picos e vales, que são resultadas da ação inerente do processo de usinagem. Essas se divide em: rugosidade cinemática e de processo.

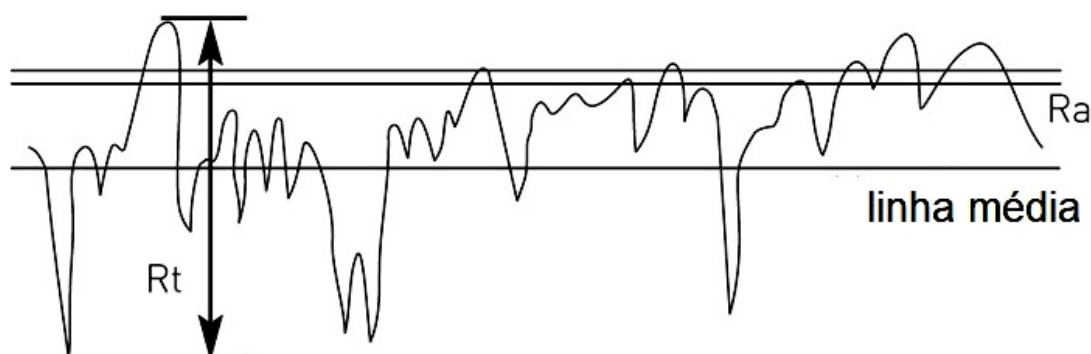
Na rugosidade cinemática está relacionada com a forma da quina da ferramenta e do movimento referente entre a peça e a ferramenta. Já no processo de torneamento, a principal influência é as forma de aresta de corte e o avanço (RENÓ, BORGES, GAUDÊNCIO, 2019).

Quanto à rugosidade de processo, suas causas estão relacionados aos fenômenos que acontecem na aresta de corte da ferramenta, deste modo é relacionado ao desempenho de cada material a ser usinado.

Para se realizar as medições de rugosidade da superfície, os parâmetros mais comum e mais utilizados são a R_a e R_t ilustrado.

A R_a , é obtido através da média aritmética dos valores absolutos entre os pico e vales encontrado no de rugosidade, dentro do percurso de medição (MACHADO *et al.*, 2009).

Já a R_t , profundidade total da rugosidade corresponde à distancia vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, não tendo nenhuma dependência com os valores de rugosidade parcial (MACHADO *et al.*, 2009). Observada na Figura 24.

Figura 24 - Rugosidade R_t e R_a 

Fonte: Adaptado de Renó; Borges; Gaudêncio (2019)

Na medição da rugosidade comprimento de amostragem, em inglês *cut-off*, (l_r), é um fator que exerce influência nos valores de rugosidade. Segundo ABNT NBR ISO 4288:2008 que define o perfil de rugosidade periódicos, para realizar a medição deve-se levar em conta a distância entre os sulcos deixados pelo avanço (f) durante a usinagem e valor da largura média de um elemento do perfil, RS_m , conforme pode-se observar no Quadro 7.

Quadro 7 – Relação entre o avanço comprimento da mostra nos perfis de rugosidade periódicos.

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

Fonte: Adaptado da ISO 4288 (2008)

2.7 AQUISIÇÃO DE DADOS DO TORNEAMENTO

De acordo com Kondo (2018), a otimização dos processos de usinagem desperta o interesse da indústria e da área acadêmica, juntamente com o sistema de monitoramento da usinagem como:

- Os diagnósticos das máquinas e seus desempenhos mostrando;
- Para as ferramentas, onde diz o seu alinhamento e as condições de afiação;
- Já para as peças, possibilita fazer as medições das rugosidade e verifica os danos térmicos;
- No processo, analisando o mecanismo de formação de cavacos, consumo de energia e monitoramento das temperaturas.

Assim, é possível ir aumentando a confiabilidade das máquinas, utilizando o sistema de monitoramento onde pode mostrar o nível crítico de desgaste ou falhas catastróficas que necessita a paralisação imediata da operação (KONDO, 2018).

De acordo com Schühli (2007), podem-se ter distintas formas de se realizar o monitoramento do processo de usinagem que são:

- O sensor: ele transforma a medição de sinais de radiação, mecânico, térmico, elétrico, magnético, químico, mecânica ou luminosa para uma forma onde o sistema possa realizar a leitura e realizar as interpretações necessário para operação;
- Processamento do sinal: é a filtragem utilizando uma transformação por equações matemática que processam o sinal analógico por amplificação e realiza a conversa para o sinal digital;
- Interpretação: há a necessidade dos valores que estão sendo medido serem relacionados através de modelos matemáticos com os objetos monitorados. Existe a necessidade dos valores que estão sendo recebido sejam comparados com as medições anteriores. Durante o monitoramento a saída do processo pode apresentar alguns problemas durante o processo;
- Saída: é a resposta que possui uma exatidão, confiabilidade, para a relação de entrada e saída.

Na sequência ira ser discutidos os sinais como de potência consumida , emissão acústica e vibração.

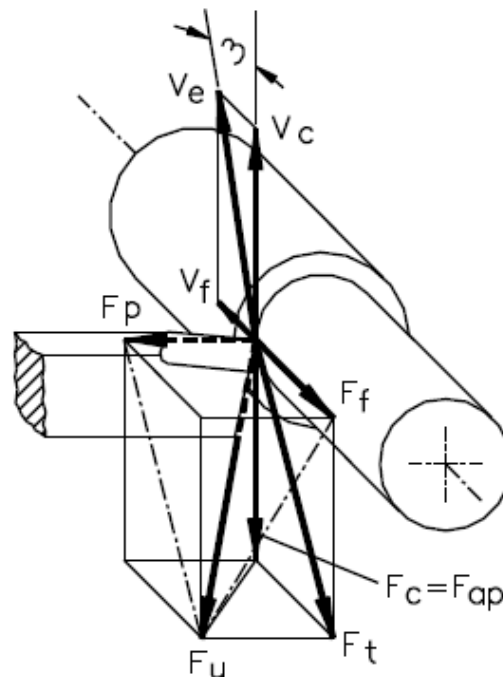
2.7.1 Força e potência em usinagem

Segundo Pinheiro (2018) e Kondo (2018), para a finalidade de calcular a potência necessária para obtenção de elementos de fixação e porta ferramenta rígido e livre de vibração durante o corte e o desgaste da ferramenta é necessário dominar a força atuante e suas componentes sobre a cunha de corte. No processo de torneamento a força de usinagem (F_U) é tridimensional e pode ser analisada em três componentes básicas que agem diretamente na cunha de corte são:

- Força de corte (F_c) projeção da F_U na direção de corte;
- Força passiva ou força de profundidade (F_p) força que age perpendicular ao plano de trabalho, não gerando potência de usinagem;
- Força de avanço (F_f) projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço;

Na Figura 25 pode-se visualizar a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f) e a força passiva ou de profundidade (F_p).

Figura 25 - Forças de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento



Tem-se então, de acordo com Machado *et al.* (2011), a potência de corte que é dada pela Equação 5.

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (5)$$

Onde: P_c = potência de corte (W)

V_c = velocidade de corte (m/min)

F_c = força de corte (N)

2.7.1.2 Medição da potência de corte

De acordo com Pinheiro (2018), medindo a variação da corrente e a tensão durante o processo de usinagem é possível medir experimentalmente a potência em usinagem. Para os motores que são trifásicos onde a de ligação das bobinas são em triângulo e a ligação da tensão em estrela, deve-se multiplicar os componentes de potência por $\sqrt{3}$. Deste modo, a potência aparente para motores trifásicos pode ser calculada pela Equação 6.

$$P_{ap\ 3F} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi \quad (6)$$

Onde : $P_{ap\ 3F}$ = potência aparente para motores trifásicos, em watts (W);

U = tensão das fases, em volts (V);

i = corrente de uma das fases, em ampères (A);

$\cos\phi$ = fator de potência (fornecida pelo fabricante do motor, utilizado na máquina).

Segundo Machado *et al.* (2015), para se fazer a medição da diferença de potencial é necessário um utilizar um voltímetro e para medição da corrente utiliza-se um amperímetros que é ligado em série com o circuito. Desta forma para realizar este tipo de procedimento tem necessidade de cortar os fios e pode causar interferência na parte elétrica da máquina. Para solucionar esse problema deve-se utilizar um sensor de Efeito Hall. Desta forma nesse sensor a tensão medida é proporcional à corrente que gerou e a razão entre elas é chamada Resistência de Hall, que é uma característica do material utilizado. Estes sensores são instalados externamente aos cabos elétricos sem que precisem ser feito corte dos mesmos.

2.7.2 Emissão acústica

De acordo com Alves (2018), a emissão acústica (EA) é determinada como existindo ondas de tensão elástica com alta amplitude e baixa frequência, criadas por atuações dinâmicas sobre os materiais, quando sujeito a um estímulo externo. Quando ocorre o processo de usinagem na geração do cavaco, verifica-se que existe um atrito entre ferramenta e peça ou o simples contato estabelece que aconteça a deformação. Podendo constituir uma quantidade de energia suficiente para gerar ondas de tensão que provocam mais movimentos sobre a superfície do mesmo, os quais se atenuam exponencialmente da superfície para o centro do material.

De acordo Kondo (2018), a emissão acústica é utilizada para realizar o controle da usinagem devido os limites de frequência que indicam o fenômeno, mesmo não possui um consenso da faixa trabalhada na literatura, verificando uma variação de 15 kHz a 1200 kHz, quando utiliza as frequências altas tornam o sinal insensível aos ruídos presentes nas máquinas, como rolamentos e vibrações.

A unidade de medida que é predominante utilizada em pesquisas que utilizam a emissão acústica é o valor quadrático médio RMS, *Root Mean Square*. Essa unidade é conhecida como valor eficaz, é uma medida estatística da relevância de uma quantidade variável de sinal de emissão acústica calculada pela média aritmética do quadrado dos valores puros da mesma, conforme Equação 7 (EUZEBIO, 2012).

(7)

$$E_{RMS} = \sqrt{1/\Delta t \int_{\Delta t} EA^2(t) dt}$$

Onde E_{RMS} é o valor médio quadrático de emissão acústica, Δt é o tempo Z integração e EA é o sinal puro de emissão acústica.

2.7.3 Vibração

De acordo com Pinheiro (2018), a vibração durante a usinagem ocorre por causa da máquina, suporte de ferramenta de corte e a peça de trabalho montada na fixação não ter o amortecimento correto durante o processo ou até mesmo o desgaste da peça do equipamento.

As vibrações podem causar interferência na rugosidade da peça, problemas na precisão das medidas, desgaste prematuro da ferramenta de corte e ruídos indesejáveis que prejudicam o ambiente de produção. No processo de usinagem, a ferramenta de corte sofre atrito do

cavaco e da peça e com o decorrer do tempo de corte ocorre o desgaste da ferramenta, o sinal de vibração apresenta alterações de frequência e intensidade (KONDO, 2018).

Para realizar as medições das vibrações é empregado um transdutores piezelétricos do tipo acelerômetro, saída em volts, especialmente quando a aquisição de sinais possui um frequências de 1 a 20 kHz. Esse controle que se baseados em sinais de vibração é curioso do ponto de vista para pesquisa, que ela varia com o desgaste ou quebra da ferramenta e também com a alteração nos parâmetros de usinagem (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

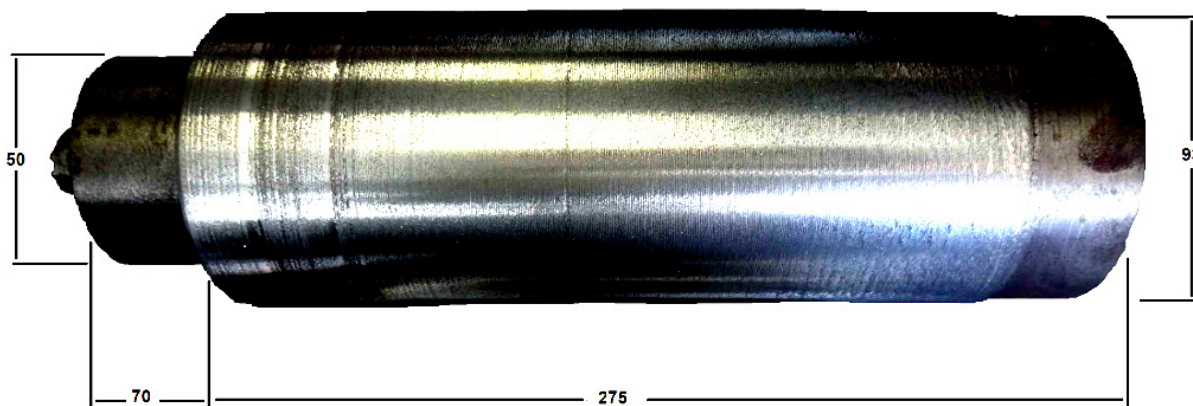
Esta seção foi subdividida em material da peça a ser usinado, composição química, dureza e microestrutura, centro de torneamento e aquisição de dados, ferramentas e parâmetros de usinagem controlados, obtenção da rugosidade, análise dos cavacos, planejamento experimental e ensaio de vida.

3.1 MATERIAL DA PEÇA A SER USINADA

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá.

O material utilizado foi um lingote cilíndrico de ferro fundido vermicular, fornecido pela empresa Tupi Fundição com as dimensões iniciais: Comprimento total de 345 mm e diâmetro de 93 mm. Para a preparação do corpo de prova para os ensaios foi realizado um rebaixo de 70 mm de comprimento com diâmetro de 50 mm com a finalidade de possibilitar a fixação da peça no Centro de Torneamento Romi e realizar os ensaios de usinagem como ilustra a Figura 26.

Figura 26 - Tarugo de ferro fundido vermicular (dimensões em mm)



Fonte: Produção do próprio autor.

A análise da composição química foi realizada na Universidade de São Paulo, na Escola de Engenharia de Lorena, no Laboratório de Caracterização Química por fluorescência de raios X, no equipamento Axios MAX, marca Panalytical e na Tabela 1 estão apresentados os valores.

Tabela 1 - Composição química do ferro fundido vermicular (expressos em percentual de massa)

C	Si	Cu	Al	Mn	Mo	Ni	S	Mg	Cr	Ti	P
3,460	2,359	0,713	0,004	0,322	0,003	0,016	0,009	0,03	0,019	0,013	0,008

Fonte: Produção do próprio autor

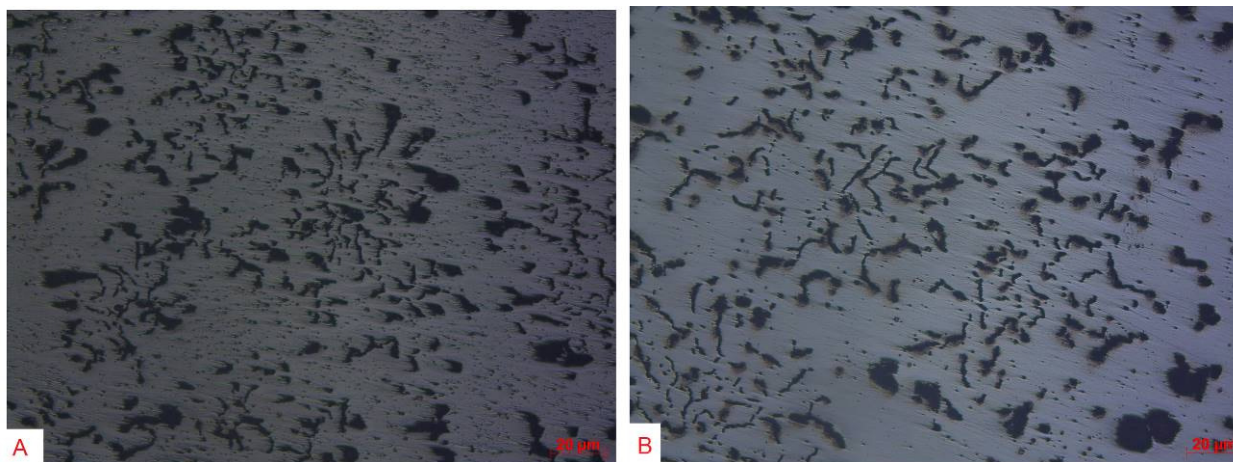
3.2 MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR

Na Figura 27, ao analisar as duas imagens é possível verificar a presença da grafita no formato vermicular e a presença de grafita em forma de nódulos. Dessa forma, analisou-se que a superfície apresentou valor médio de 15% e no centro 13% de estrutura de grafita nodular.

Segundo Guessser (2019) e Rodrigues Júnior (2017) a faixa de magnésio na liga deve variar de 0,013 a 0,025% que é insuficiente para formar ferro fundido vermicular. Com a adição de titânio de 0,06% a 0,13%, a faixa ampliava os limites da presença de magnésio residual para 0,03%. Conforme a análise química realizada, a composição química do Ti foi 0,013% e do Mg foi de 0,03%. Devido ao titânio estar com um valor baixo, favoreceu a formação das grafitas nodular sendo possível encontrar uma de 15 a 13% de estrutura nodular na matriz, junto com a estrutura vermicular.

A norma ISO 16112 (2017) prevê que na fabricação de ferro fundido vermicular devido a sua complexidade é aceitável de 0% a 20% de grafita nodular presente na matriz.

Figura 27 - Microestrutura do ferro fundido vermicular sem ataque (A) superfície e (B) centro

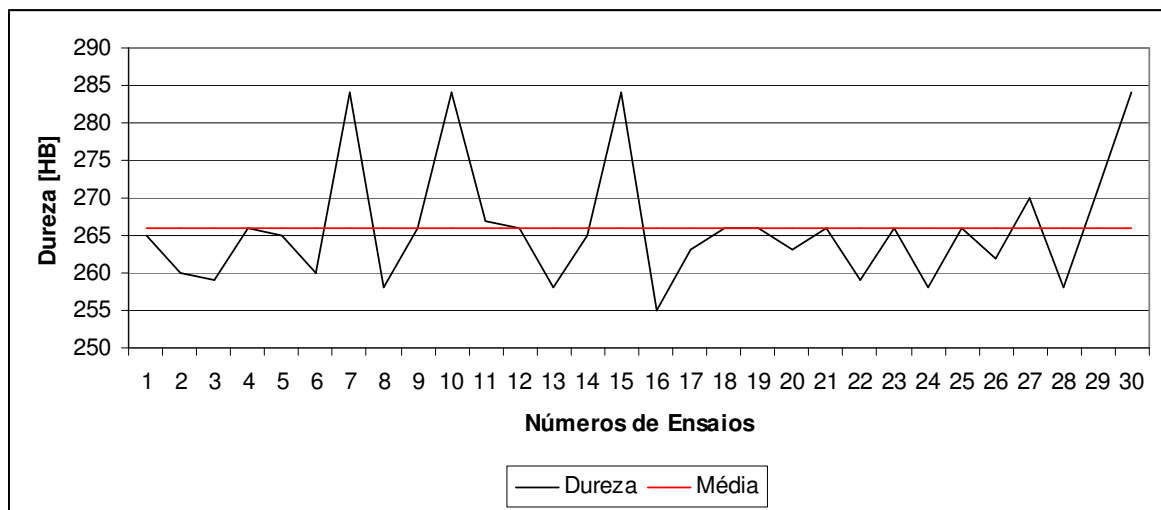


Fonte: Produção do próprio autor

3.3 ENSAIO DE DUREZA

Os valores de dureza *Brinell* médio encontrados para o ferro fundido vermicular ensaiado foi de 266 ± 8 HB valores de todos os ensaios pode ser observado na Figura 28, cujo valor convertido para dureza *Vickers* é de aproximadamente 280 HV, que conforme a Tabela 1 de Dore (2007), esse valor é semelhante ao ferro fundido nodular, como observado na microestrutura a presença de 13 a 15% de nódulos na estrutura do ferro fundido vermicular, modificando as propriedades mecânicas aumentando expressivamente o valor de dureza.

Figura 28 – Valores do ensaio de dureza *Brinell*.



Fonte: Produção do próprio autor

3.4 CENTRO DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a realização do torneamento externo foi utilizando o Centro de Torneamento Romi modelo GL240M, com potência de 15 kW (Figura 29A), com um sistema de aquisição de dados acoplado para captações em tempo real dos sinais, onde foi possível medir potência consumida, emissão acústica e vibração durante a usinagem do corpo de prova.

O sistema que realiza a comunicação dos sensores para o computador é composto de um módulo de canais da marca *National Instruments* modelo BNC-2120, acoplado a uma placa de aquisição de dados também da mesma marca ligada a um computador. Utilizando o software *LABVIEW®* da *National Instruments*, criou-se um programa supervisor, para verificar, capturar e gravar os dados emitidos durante o processo (Figura 29B). Os dados

obtidos e gravados durante os ensaios com o software *LABVIEW®*, foram então tratados através de programas desenvolvidos pelo autor no software *MATLAB® R2015b student* e gerado o valor médio de potência, Emissão Acústica e vibração para cada ensaio realizado.

Figura 29 - A) Centro de torneamento CNC marca *Romi* modelo GL240M B) sistema de aquisição de dados acoplado



Fonte: Produção do próprio autor

O sensor para captação dos dados de potência consumida utilizado foi um transdutor de corrente da marca *Lem* modelo AT 100 B10, ligado em uma das fases de entrada do motor do centro de torneamento responsável pelo movimento de rotação do eixo árvore e da peça. Ele envia sinal de tensão proporcional à corrente elétrica da entrada do motor para o módulo de canais, medindo de forma indireta a potência consumida para usinagem.

Para a obtenção do sinal de emissão acústica, foi utilizado um sensor R15α da marca *Physical Acoustic Corporation*, juntamente com o pré-amplificador modelo 1272, com saída RMS.

A medição da vibração foi feita por um sensor piezelétrico da marca *Vibro Control* modelo TV-100, com alcance de 25 mm/s em sinal RMS.

Para a transformação dos sinais nas grandezas requeridas: Os sinais de tensão U_{cc} correspondentes à potência, à emissão acústica e à vibração são convertidos através das Equações 8, 9 respectivamente, para os sinais nas unidades Watts (potência), Volts (emissão acústica) e mm/s (vibração);

$$PU = U_{cc} \cdot 10.220.0,79\sqrt{3} \quad (8)$$

$$\text{Vib} = U_{cc} \cdot 25/8 \quad (9)$$

Onde: PU = Potencia (w)

U_{cc} = tensão de saída do sensor respectivo (V)

Vib = Vibração (mm/s)

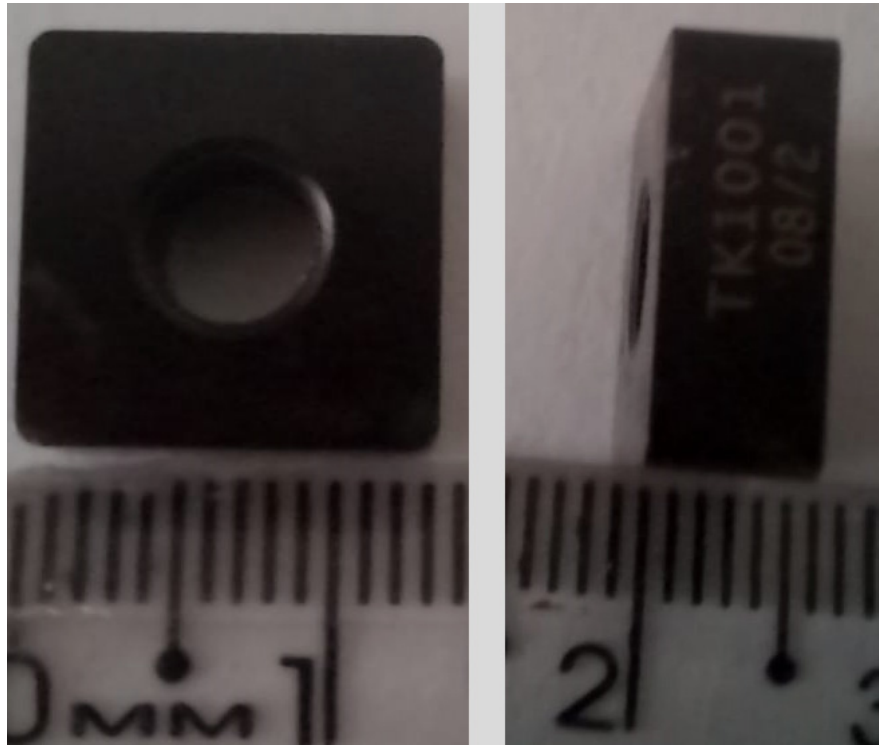
3.4 FERRAMENTAS

Neste trabalho analisou-se o desempenho de ferramentas cerâmicas experimentais ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) e ferramenta comercial de metal duro recoberta com duas camadas pelo processo CVD, que são apresentadas na sequência.

3.4.1 Ferramenta de metal duro

As ferramentas de Metal duro utilizadas foram produzidas e doadas pela empresa *Seco Tools* e são comerciais. O código da ferramenta utilizada é SNMA120408 com formato quadrado, neutra, 12,7X12,7X4,76 mm e raio de ponta de 0,8mm, com classe de cobertura CVD Tk1001. O substrato do metal duro é composto por (W,Co,Cr, C) é recoberta com duas camadas pelo processo CVD, sendo a primeira camada de Carbonitreto de titânio (TiCN) e a segunda camada recoberta com óxido de alumínio (Al_2O_3), que está ilustrada na Figura 30.

Figura 30 - Ferramenta metal duro Tk 1001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$)



Fonte: Produção do próprio autor

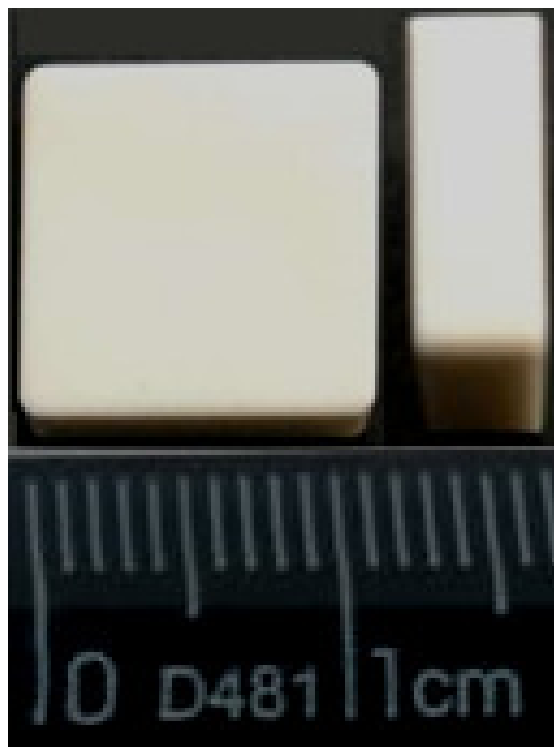
As propriedades físicas teóricas da ferramenta metal duro (MACHADO *et al.*, 2015):

- Microdureza Vickers HV = 20,60;
- Tenacidade à fratura por indentação = $9,60 \text{ MPa.m}^{1/2}$;
- Retração linear = 8,5 %

3.4.2 Ferramenta de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

As ferramentas de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, foram desenvolvidas em laboratório no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do câmpus UNESP Guaratinguetá, com 99,75% Al_2O_3 e 0,25% MgO (em peso) e densidade relativa igual 98,52%, retificados e lapidados pela empresa Mapal do Brasil na geometria final de 12,7 x 12,7 x 4,76 mm e com raio de ponta de 0,8 mm código SNMN120408 Figura 31, com chanfro na aresta de $10^\circ \times 0,2 \text{ mm}$.

Figura 31 - Ferramenta cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.



Fonte: Produção do próprio autor.

As propriedades físicas da ferramenta cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$:

- Microdureza Vickers HV = 19,28;
- Tenacidade à fratura por indentação = $4,60 \text{ MPa.m}^{1/2}$;
- Retração linear = 20 %

3.4.3 Ferramenta de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$

A Ferramenta Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$, com 99,% Al_2O_3 e 1% Cr_2O_3 (em peso), foi desenvolvida no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do câmpus UNESP Guaratinguetá, apresentando uma densidade relativa de 98,16% e foram retificados e lapidados pela empresa Mapal do Brasil no formato quadrado de 12,7 mm, com espessura de 4,7 mm, raio de ponta de 0,8 mm e com chanfro na aresta de $10^\circ \times 0,2 \text{ mm}$, código SNMN120408, conforme demonstrada na Figura 32.

Figura 32 - Ferramenta cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$



Fonte: Produção do próprio autor.

Com as propriedades físicas:

- Microdureza Vickers $H_v = 20,94$;
- Tenacidade a fratura por indentação $= 3,25 \text{ MPa.m}^{1/2}$;
- Retração linear $= 19,8 \%$

Para fixar as pastilhas cerâmicas e de metal duro ao centro de usinagem foi utilizado, o suporte da fabricante *SECO TOOLS* Capto B01T9032445, suporte de cunha-grampo que pode trabalhar com pastilha tipo S. O ângulo de posição (χ_r) das pastilhas no suporte é de 75° , ângulo de inclinação (λ_s) -6° e ângulo de saída (γ_0) -6° , para as ferramentas sem quebra-cavacos, demonstrado na Figura 33.

Figura 33 - Porta-ferramenta SECO TOOLS Capto B01T9032445.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.5 Parâmetros de Usinagem Controlados

Para verificar a eficiência de cada ferramenta, a cada passe, foi realizado o torneamento longitudinal externo, adotando o percurso de avanço fixo (L_f) de 65mm. Foi analisado o desgaste da aresta de corte (V_B) e optou-se por dividir esse valor pelo comprimento de corte, ou percurso de corte (L_c). Essa medida é importante, pois com a realização dos ensaios o diâmetro do corpo de prova diminuí, afetando diretamente o comprimento de corte de cada ensaio transformando em V_B por metro (V_B/m) (Equações 11 e 12). O V_B foi medido com auxílio do microscópio *MAHR* modelo *MarVision* MM200.

(11)

$$V_B/m = V_B/L_c$$

(12)

$$L_c = D \cdot \Pi \cdot L_f / 1000 \cdot f$$

Onde: D = diâmetro da peça em mm.

L_f = percurso de avanço em mm.

f = avanço em mm/volta.

L_c = percurso de corte dado em m.

Durante a usinagem do ferro fundido vermicular sem refrigeração, foram realizadas variações nos Parâmetros:

- Velocidade de avanço (f);
- Velocidade de corte (V_c);
- Profundidade de corte (a_p).

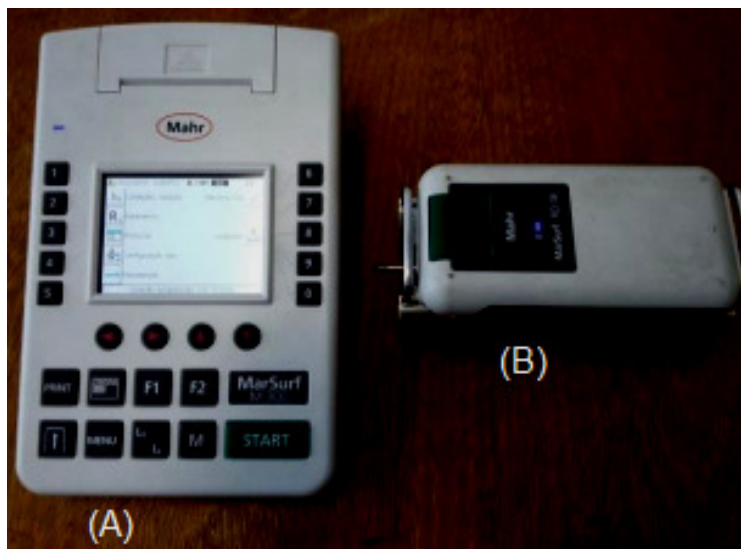
Assim, foi analisada a influência e contribuição de cada parâmetro no processo.

3.6 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Após cada passe de usinagem foi realizada a medição da rugosidade adotando a seguinte metodologia: as medições foram na direção perpendicular ao avanço da ferramenta, realizou-se 3 medições em pontos aleatórios sempre girando a peça em sentido horário em 120° do ponto anterior da medição. Conforme a Norma ABN NBR ISSO 4288:2008 o comprimento do *cut-off* foi de 0,8 mm para os avanços de 0,2 mm/volta e 0,25 mm para os avanços 0,05 mm/volta.

Adotou-se a média dos valores da R_a e a média dos valores da R_t . Utilizou-se o rugosímetro marca *Mahr* modelo *Marsurf* M300 + RD18, ilustrada na Figura 34.

Figura 34 - Rugosímetro portátil da marca *Mahr* modelo (a) *MarSurf* M300; (b) *MarSurf* RD



Fonte: Produção do próprio autor

3.7 ANÁLISE DOS TIPOS E FORMAS DOS CAVADOS

Os cavacos gerados durante a usinagem foram recolhidos e guardados com objetivo de analisar o formato e a morfologia. A análise foi realizada com auxílio do estereoscópio marca *Olympus* modelo SZ61, do laboratório de Metalografia da FATEC de Pindamonhangaba.

3.8 PROJETO DE EXPERIMENTO

Foi utilizado projeto de experimento fatorial completo 2^3 e com quatro réplicas no ponto central, com dois níveis e três variáveis, totalizando 12 experimentos para as ferramentas:

- Metal duro Tk 1001 (TiCN + Al_2O_3);
- Cerâmica Al_2O_3 + MgO;
- Cerâmica Al_2O_3 + Cr_2O_3

As variáveis controláveis do processo foram os parâmetros de usinagem:

- Velocidade de corte,
- Profundidade de corte
- Avanço,

As variáveis respostas utilizadas foram:

- Rugosidade Média R_a ;

- V_B/m ;
- Vibração;
- Potência;
- Emissão Acústica;

Para definir nível baixo e alto de cada parâmetro de usinagem, considerou-se que se tratava de torneamento de acabamento e optou-se o nível alto para a profundidade (A_p) de 1mm e o nível baixo de 0,25 mm. Para a velocidade de corte (V_c) o nível alto foi de 400 m/min e o nível baixo de 100 m/min, já para o avanço (f) nível alto foi de 0,2 mm/volta e nível baixo de 0,05 mm/volta, visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis e níveis do projeto de experimento

Variáveis	Níveis		
	Baixo	Alto	Ponto central
Velocidade de Corte V_C [m/min]	100	400	250
Profundidade A_p [mm]	0,25	1,00	0,625
Avanço f [mm/volta]	0,05	0,20	0,125

Fonte: Produção do próprio autor

Com auxílio do programa *Minitab* 17, foi possível compilar os dados e gerar a matriz de experimento com 12 ensaios, para cada ferramenta, sendo possível realizar os testes iniciais com as ferramentas metal duro Tk1001 (TiCN + Al_2O_3), cerâmica Al_2O_3 + MgO e cerâmica Al_2O_3 + Cr_2O_3 .

Após realizar os ensaios foi possível obter as melhores combinações para cada ferramenta, sendo levada em consideração a menor condição para cada variável resposta.

3.9 ENSAIOS DE VIDA

Com as combinações das melhores condições de cada parâmetro, foram realizados os ensaios de vida para o cálculo do comprimento total usinado e tempo de vida para cada uma das ferramentas testadas, com a finalidade de verificar o desempenho de usinagem de cada uma.

O ensaio de vida consistiu em usinar uma distância (L_f) de 65 mm de comprimento da peça, retirar as ferramentas do centro de torneamento, levá-las até o microscópio e realizar a

medição dos desgastes de flanco V_{BB} . A condição que limita o fim da vida das ferramentas é o valor de $V_B = 0,3$ mm. A cada passe foi realizado a medição da rugosidade em três pontos, com o objetivo de investigar as progressões das variáveis rugosidades R_a e R_t e potência de usinagem, com o aumento do desgaste das ferramentas.

3.10 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA

Após realizar todos os ensaios de usinagem, foi realizado um seccionamento no topo do lingote utilizando a serra hidráulica marca Franho modelo S900 Gk1, cuja amostra retirada tinha diâmetro de 75 mm por 5mm de largura (Figura 35A) e depois dividido ao meio conforme ilustrado na Figura 35B.

Figura 35 - Corte da amostra A) primeiro corte B) diâmetro dividido ao meio.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com a metade da amostra foi feita a preparação metalográfica com sequência de lixa: 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 e 2000 *Mesh* e polimento com alumina de $0,3\ \mu\text{m}$ e Sílica de $0,05\ \mu\text{m}$. O processo de lixamento e polimento foi realizado na Politriz/ Lixadeira Metalográfica Circular de diâmetro de 200 mm Manual da marca *Arotec* modelo *Aropol 2V* do laboratório de Metalografia da Fatec de Pindamonhangaba.

Também foi realizada imagem da amostra com aumento de 100x sem ataque químico e na superfície próxima ao local onde ocorreu a usinagem e no centro da amostra, com o objetivo de verificar a diferença de microestrutura, foi feito com auxílio do microscópio *Zeeis Axion* no laboratório de Metalografia da Fatec Pindamonhangaba.

Para quantificar os vermículos e nódulos na estrutura, analisou-se a região da superfície fazendo uma varredura de imagem ao redor do diâmetro, com 50 campos de imagem capturados com ampliação de 100x no sentido horário do diâmetro e a mesma metodologia foi reproduzida no centro da amostra gerando mais 50 campos desta região.

3.11 ENSAIO DE DUREZA

Após analisar a microestrutura da amostra, realizou-se o ensaio de dureza *Brinell* com carga de 187,5 kgf utilizando esfera de diâmetro 2,5 mm, com objetivo de fazer uma varredura em toda superfície da amostra. Ao total foram realizados 30 ensaios com distância de 2 mm entre cada calota impressa. Foi utilizado o durômetro *RASN* Analógico da marca *Panantec* (Figura 35) do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Fatec Pindamonhangaba. Para ser feito conversão da dureza *Brinell* para dureza *Vickers*, a escala de dureza *Brinell* foi dividida pelo fator de conversão 0,95.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico serão apresentadas as discussões e os resultados obtidos do projeto de experimento da usinagem por Torneamento do ferro fundido vermicular, com ferramentas experimentais de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e comercial de metal duro Tk1001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) revestido pelo processo de recobrimento CVD, análise dos cavacos gerados, avaliação das condições de cada ferramenta após as usinagens, verificação da microestrutura formada no ferro fundido vermicular e sua dureza.

4.1 PROJETO DE EXPERIMENTO

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

4.1.1 Ferramenta de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

Na Tabela 3 são apresentados os resultados médios para as variáveis respostas, referente ao planejamento experimental apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de experimentos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$

Nº exp.	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	V_B/m	R_a médio (μm)	R_t médio (μm)	Emissão Acústica média (V)	Potência média (W)	Vibração média (mm/s)
1	100	0,2	1	0,0011	5,80	17,81	0,03	3753,65	0,09
2	400	0,05	0,25	0,0001	0,54	6,54	0,32	309,32	3,11
3	400	0,05	1	0,0004	0,83	10,58	0,02	1520,44	0,08
4	100	0,2	0,25	0,0008	3,25	13,42	0,31	2228,77	7,03
5	250	0,125	0,625	0,0014	0,88	8,63	0,34	1640,91	8,69
6	400	0,2	1	0,0016	3,74	11,25	0,02	4466,21	0,08
7	100	0,05	0,25	0,0002	0,98	8,01	0,28	924,65	3,48
8	100	0,05	1	0,0006	0,92	12,85	0,05	1997,69	0,85
9	250	0,125	0,625	0,0014	0,84	8,87	0,32	1415,62	7,62
10	400	0,2	0,25	0,0007	1,63	13,27	0,31	892,55	7,49
11	250	0,125	0,625	0,0019	0,88	6,56	0,32	1551,33	8,18
12	250	0,125	0,625	0,0015	0,90	8,79	0,32	1554,69	8,55

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se pelos valores destacados na Tabela 3, que os melhores resultados gerais, para a foram: $R_a = 0,54 \mu\text{m}$, $R_t = 6,54\mu\text{m}$, potência consumida do motor = 309,32 W, vibração = 0,08mm/s, emissão acústica = 0,02 V em V_B/m e desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte (desgaste específico) = 0,0001 mm/m. Observa-se que a maior parte dos melhores resultados, foram obtidos com velocidade de 400 m/min, velocidade de avanço de 0,05 mm/volta e profundidade de corte de 0,25 mm indicando que as melhores combinações das variáveis de entrada em um primeiro momento estão na velocidade de corte de 400 m/min e avanço de 0,05 mm/volta e na profundidade entre 1 e 0,25 mm.

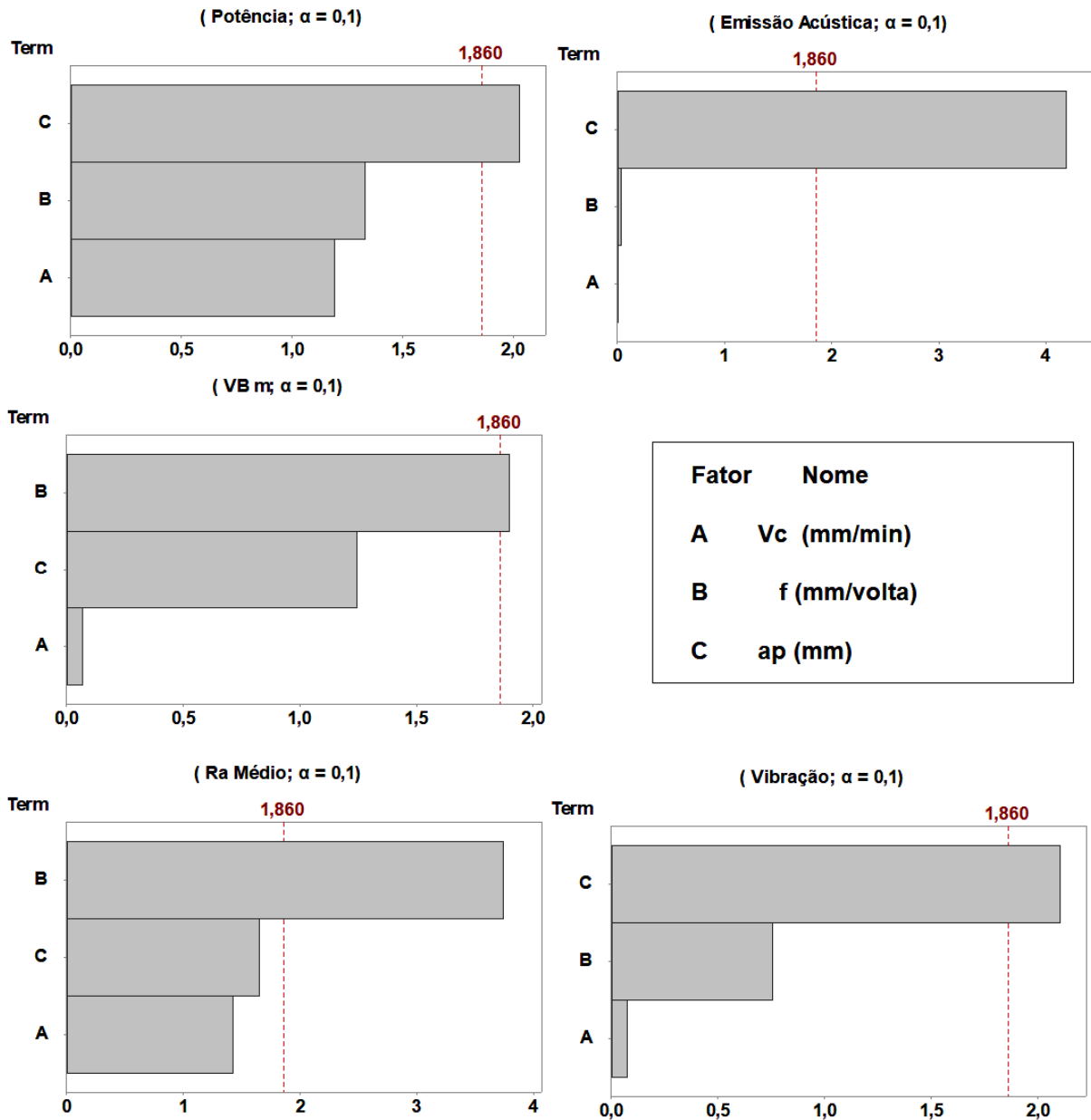
Para analisar as variáveis respostas, deve-se verificar qual fator ou os fatores que exercem maior influência em cada variável resposta. Na Figura 35, os fatores que exercem influência na variável resposta ultrapassa a linha tracejada vermelha do valor de confiabilidade do experimento.

Ainda na Figura 36 pode-se observar qual o fator que mais influencia na variável resposta:

- R_a médio com 90% de confiabilidade, o fator que gera maior influência foi o avanço;
- V_B/m com 90% de confiabilidade o fator que gera maior influência foi o avanço;
- Emissão Acústica com 90% de confiabilidade, o fator que gera maior influência foi profundidade de corte;
- Potência com confiabilidade de 90%, o fator que gera maior influência foi à profundidade de corte;
- Vibração com 90% de confiabilidade, o fator que mais influencia foi à profundidade de corte.

Os fatores que exercem influência no processo de usinagem para a ferramenta cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ são: a profundidade de corte e avanço a velocidade de corte não possui influência.

Figura 36 - Pareto dos fatores de maior influência par ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$

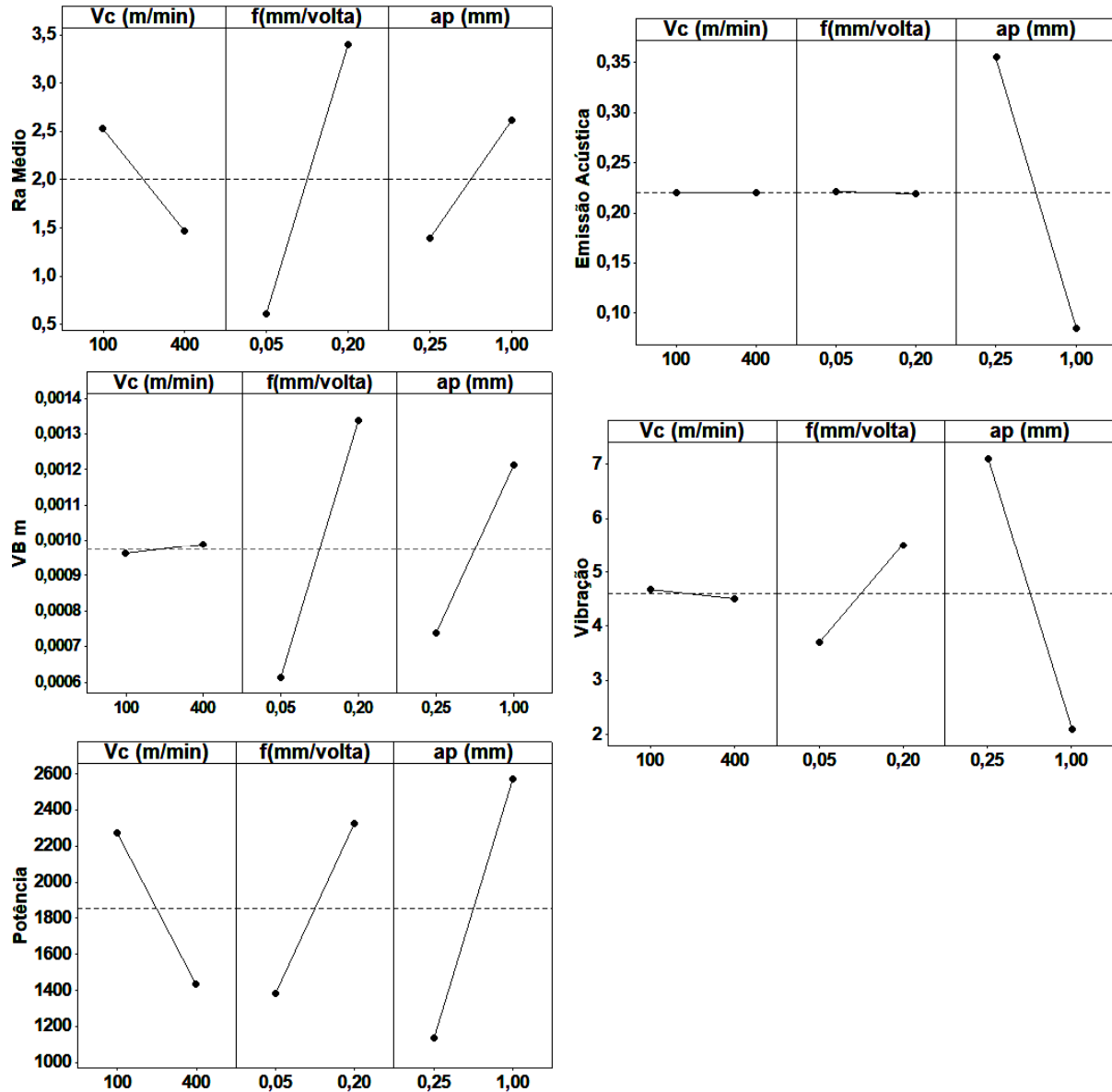


Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 37 apresentam os níveis alto e baixo de cada variável de entrada e sua influência exercida em cada variável resposta.

Ao observar a Figura 37 a velocidade de corte de 400 m/min é a que apresenta menor valor para quase todas as variáveis respostas com exceção do V_B/m , Emissão Acústica e Vibração que são valores estáveis nas duas condições.

Figura 37 - Efeitos para as variáveis respostas para $Al_2O_3 + MgO$



Fonte: Produção do próprio autor

Como citado por Akkus; Yaka, (2020) quando ocorre o aumento da velocidade de corte, os valores de rotação são aumentados e o valor do avanço que estão estáveis são reduzidos, assim os valores da rugosidade são reduzidos, potência do motor, emissão acústica e vibração. Com o aumento da velocidade de corte aumenta a taxa de remoção promovendo um aumento de desgaste de flanco, que é atenuado por se aumentar a rotação que diminui o contato da peça ferramenta e favorece o menor atrito e maior dispersão do calor gerado na ferramenta de corte.

Já na profundidade de corte as variáveis Vibração e Emissão Acústica têm situação contrária às outras variáveis respostas. Quanto maior o aumento da profundidade de corte, menores valores de Vibração e Emissão Acústica. No caso das ferramentas cerâmicas que possuem um preparo de aresta diferente, com chanfro, maiores profundidades permitiram uma maior ancoragem da ferramenta, diminuindo as Vibrações e Emissão Acústica.

Ao analisar as Figuras 36 e 37, cada variável resposta levando em conta os fatores que exercem influência a melhor condição para cada variável resposta é o menor valor possível para cada variável, desta forma na estatística se diz que a condição que é favorável é “menor melhor” verifica-se para a variável velocidade de corte, (V_c) as variáveis respostas R_a e potência consumida do motor são as apresentam maior amplitudes, essa variável não exerce influencia a melhor condição é o nível alto com V_c 400 m/min em favorece a maior remoção de material.

No fator avanço (f) a variável resposta V_B/m e R_a são as que apresentam maior valor de amplitudes, para se obter o menor valor de V_B/m e R_a deve ser colocar no nível baixo a variável avanço de 0,05 mm/volta e todas as variáveis apresentam diminuição. Devido a diminuição no do avanço proporciona o aumento da pressão específica, aumentando a força de corte e diminui a área da seção de corte devido ao avanço influenciar muito mais no decréscimo da força de corte e conseqüentemente obtêm-se o decréscimo de todos os valores das variáveis respostas. Ainda é possível observar na Figura 37, que ao aumentar a velocidade de avanço, ocorreu um aumento acentuado da rugosidade R_a . De acordo com Pinheiro (2018) as alturas dos picos e vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço, conforme se pode observar pelas Equações (4) e (5), do subitem 2.4.1.

Já no fator Profundidade de corte (a_p) que é influencia diretamente a Potência e Emissão Acústica como foi observado na Figura 37, para obter menor valor para essas variáveis é necessário optar em nível colocar a variável profundidade de corte em nível baixo que é a_p 0,25 mm. Quanto menor sua amplitude da profundidade de corte, ocorre a diminuição da área da seção de corte, apesar do decréscimo dessa variável, praticamente não altera o valor da pressão específica de corte. Entretanto como se tratam de baixos valores de a_p a força de corte irá diminuir proporcionalmente devido a menor área da seção do cavaco ocasionando um aumento na emissão acústica e na vibração (ALVES, 2018).

4.1.2 Ferramenta de cerâmica $Al_2O_3 + Cr_2O_3$

Ao analisar a Tabela 4, relativo aos resultados para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$, os melhores resultados foram: $V_B/m = 0,0003 \text{ mm/m}$, $R_a = 0,64 \text{ }\mu\text{m}$, $R_t = 5,95 \text{ }\mu\text{m}$, Emissão Acústica = 0,03 V, Potência consumida = 406,39 W e Vibração = 3,23 mm/s,

Observa-se que as maiores partes dos melhores resultados foram obtidas com velocidade de 400 m/min, avanço de 0,05 mm/ volta e profundidade de corte de 0,25 mm indicando que as melhores combinações das variáveis de entrada em um primeiro momento estão na velocidade de corte de 400 m/min a 100 m/min, avanço de 0,05 mm/volta e na profundidade de 0,25 mm.

Tabela 4 - Matriz de experimentos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Cr}_2\text{O}_3$

Nº exp.	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	V_B/m	R_a médio (μm)	R_t médio (μm)	Emissão Acústica média (V)	Potência média (W)	Vibração média (mm/s)
1	100	0,2	1	0,0016	2,17	11,80	0,32	4051,19	17,39
2	400	0,05	0,25	0,0005	1,02	6,71	0,32	406,39	3,23
3	400	0,05	1	0,0005	0,64	5,95	0,33	1853,18	5,14
4	100	0,2	0,25	0,0003	2,37	11,71	0,28	1649,18	6,86
5	250	0,125	0,625	0,0016	0,84	9,55	0,33	2445,60	9,10
6	400	0,2	1	0,0018	1,84	12,71	0,33	790,12	15,55
7	100	0,05	0,25	0,0007	0,99	8,54	0,29	1159,88	4,03
8	100	0,05	1	0,0006	1,48	8,77	0,29	2275,15	6,00
9	250	0,125	0,625	0,0023	0,87	9,11	0,32	2093,07	9,69
10	400	0,2	0,25	0,0023	1,67	8,30	0,33	738,89	7,48
11	250	0,125	0,625	0,0015	0,83	7,90	0,30	1944,95	9,307
12	250	0,125	0,625	0,0018	0,88	8,92	0,29	1725,07	8,008

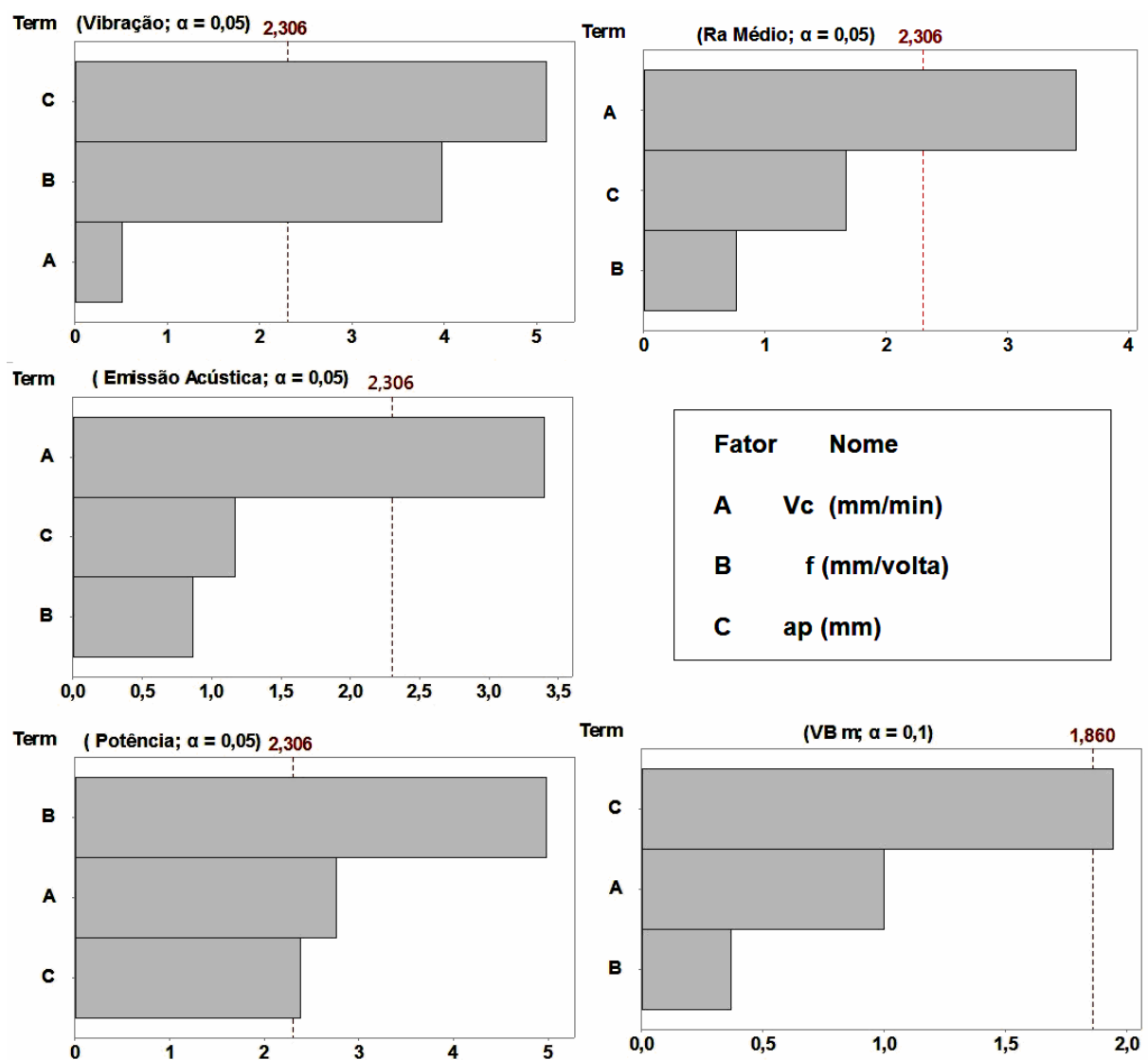
Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 38 pode-se observar qual o fator que exerce maior influência nas variáveis respostas:

- R_a médio com confiabilidade de 95%, o fator que exerce maior influência foi a velocidade de corte;
- V_B/m com confiabilidade de 90% o fator profundidade de corte exerce maior influência.

- Emissão Acústica com confiabilidade de 95%, o fator que exerce maior influência foi a velocidade de corte.
- Vibração com confiabilidade de 95% sofreu maior influência pelos fatores profundidade de corte e avanço
- Potência com confiabilidade de 95%, os fatores que exercem maior influência são: avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

Figura 38 - Fatores de maior influência par ferramenta de $Al_2O_3Cr_2O_3$

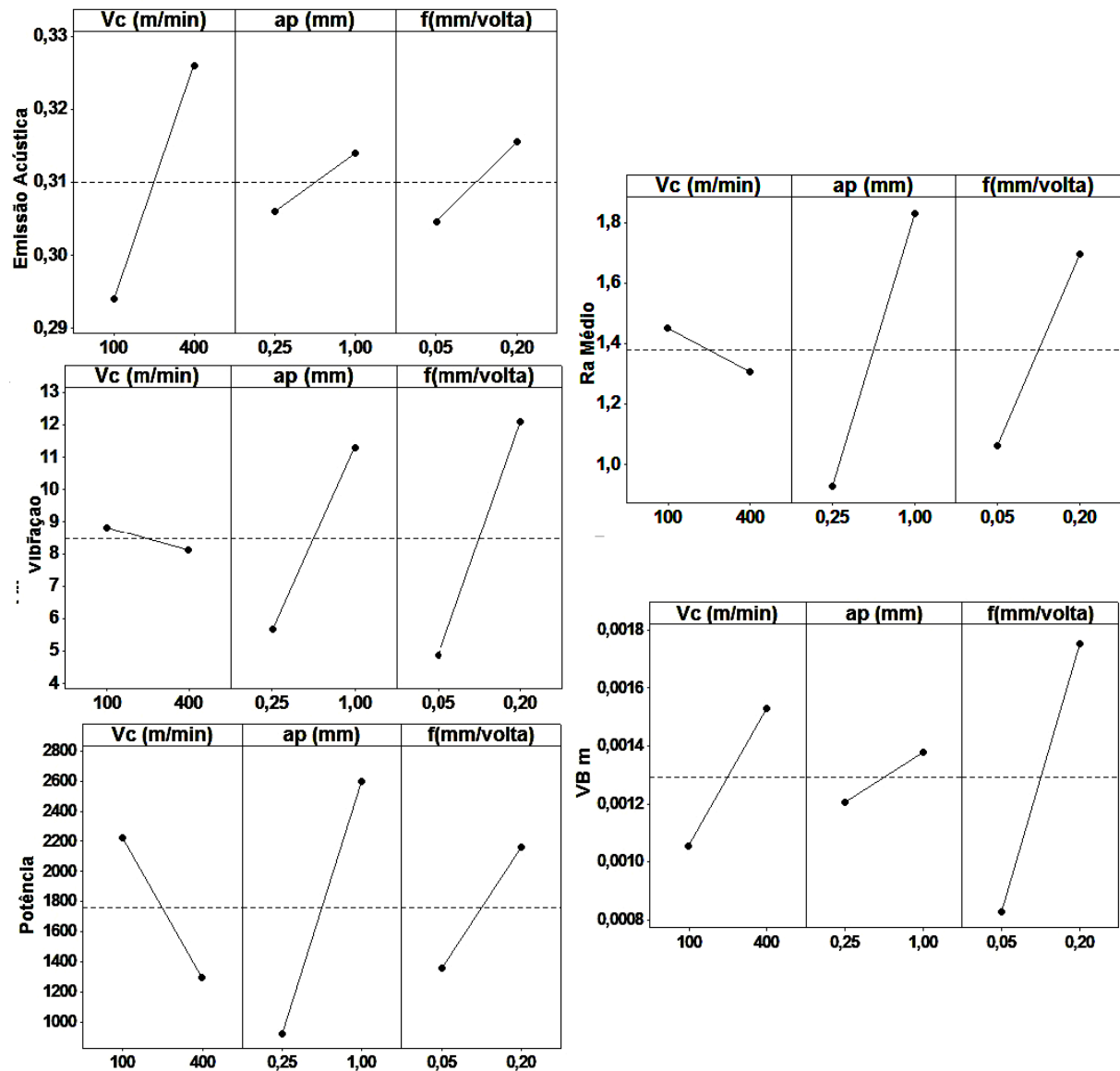


Fonte: Produção do próprio autor

Observar-se na Figura 39, para a ferramenta de corte $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ a velocidade de corte exerce influencia direta na variável resposta R_a media quando ocorre o acréscimo de

velocidade de corte as variáveis R_a apresenta redução como já foi discutido anteriormente. A variável resposta R_a foi escolhida para ser ajustado o fator velocidade de corte no nível alto 400 m/min.

Figura 39 - Efeitos principais das variáveis respostas para $Al_2O_3 + Cr_2O_3$



Fonte: Produção do próprio autor

O fator profundidade de corte influencia as variáveis respostas Potência, Vibrações e V_B/m para se obter os menor valores para essa variáveis resposta deve ajustar para nível baixo a_p de 0,25 mm, todas as outras variáveis respostas são favorecidas.

Quando é analisado o fator avanço, as variáveis que são influenciadas são Potência e Vibração para obter-se os menores valores para as duas variáveis deve-se optar pelo o nível baixo avanço de 0,05 mm/volta e é mais adequado para todas as variáveis respostas.

O acréscimo do avanço proporciona a diminuição da pressão específica, diminuindo a força de corte e aumentando a área da seção de corte devido ao avanço influenciar muito mais no acréscimo da força de corte e consequentemente obtêm-se o acréscimo dos valores das variáveis. Já para a profundidade de corte, observa-se que quanto maior sua amplitude, também devido ao aumento da área da seção de corte, apesar do acréscimo do ap praticamente não altera o valor da pressão específica de corte. Entretanto como se tratam de baixos valores de ap a força de corte irá aumentar proporcionalmente elevando devido a maior área da seção do cavaco (ALVES, 2018).

4.1.3 Ferramenta metal duro Tk1001 (TiCN + Al₂O₃)

Ao observar a Tabela 5, com resultados para ferramenta de Metal Duro Tk1001 (TiCN + Al₂O₃), os melhores resultados foram: para o $V_B/m = 0,0001$ mm/m, $R_a = 0,64$ μ m, $R_t = 6,25$ μ m, emissão acústica = 0,028 V potência consumida = 322,16 W e vibração = 3,06 mm/s.

Tabela 5 - Matriz de experimentos para ferramenta metal duro Tk1001 (TiCN Al₂O₃)

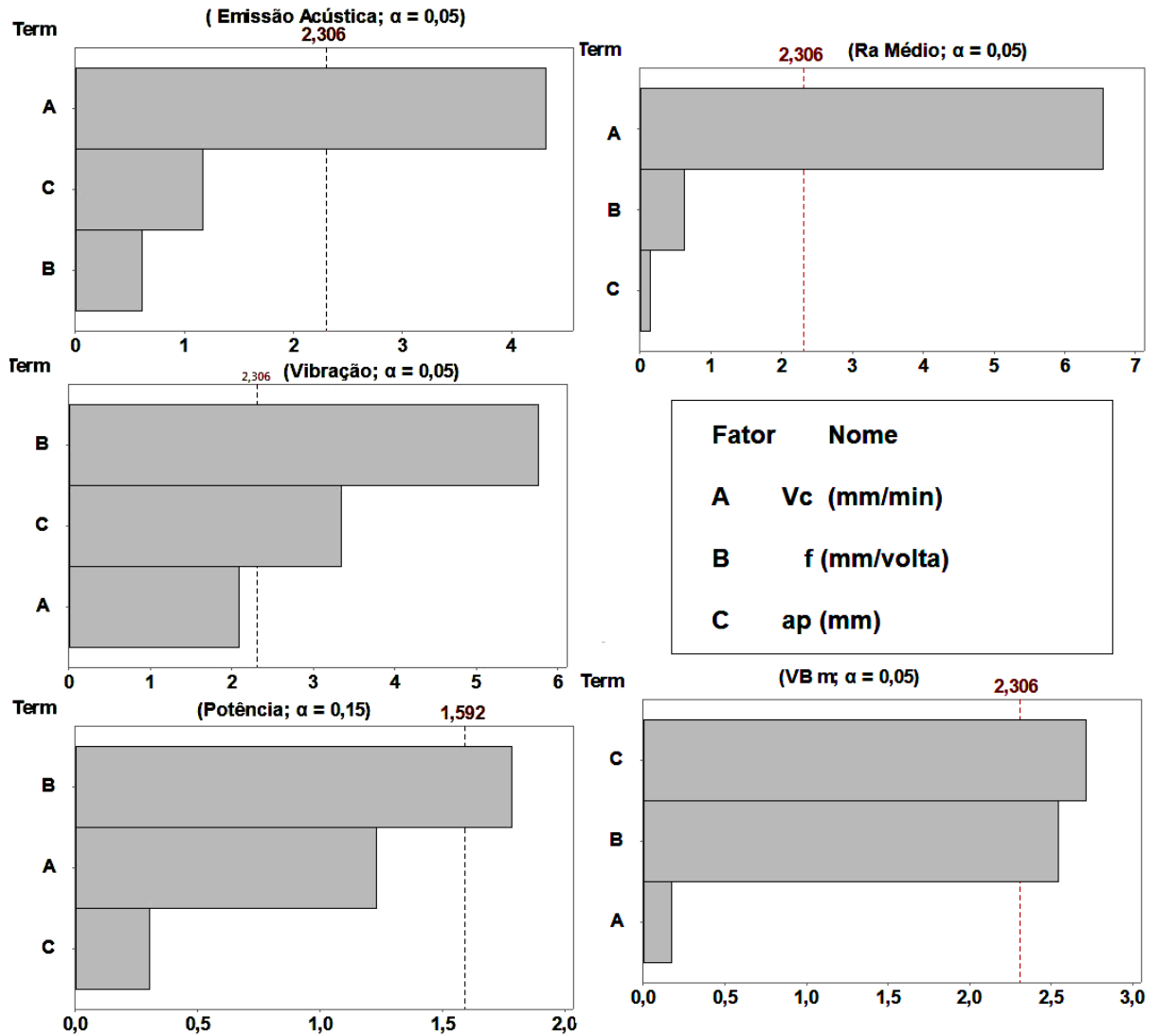
Nº exp.	V _c (m/min)	f (mm/volta)	a _p (mm)	V _B /m	R _a médio (μ m)	R _t médio (μ m)	Emissão Acústica média (V)	Potência média (W)	Vibração média (mm/s)
1	100	0,2	1	0,0023	1,93	8,32	0,30	3614,11	17,28
2	400	0,05	0,25	0,0001	0,67	6,25	0,32	445,58	3,30
3	400	0,05	1	0,0009	0,65	6,69	0,33	1547,32	4,83
4	100	0,2	0,25	0,0003	1,97	10,63	0,29	1904,77	9,32
5	250	0,125	0,625	0,0004	0,80	9,88	0,33	1751,43	8,07
6	400	0,2	1	0,0011	1,71	8,73	0,33	2057,68	10,78
7	100	0,05	0,25	0,0002	0,66	8,55	0,29	322,16	3,06
8	100	0,05	1	0,0003	0,64	8,72	0,28	1687,79	5,65
9	250	0,125	0,625	0,0005	0,77	9,67	0,32	1846,09	9,47
10	400	0,2	0,25	0,0008	1,73	10,07	0,31	4149,27	6,95
11	250	0,125	0,625	0,0005	0,86	9,72	0,31	1593,18	8,47
12	250	0,125	0,625	0,0006	0,87	9,99	0,30	1604,94	8,18

Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 40 pode-se observar qual o fator que exerce maior influência nas variáveis respostas:

- R_a médio com confiabilidade de 95%, o fator que exercer maior influência foi o avanço;
- V_B/m com confiabilidade de 95% os fatores que mais influenciam são profundidade de corte e o avanço.
- Emissão Acústica com confiabilidade de 95%, o fator que exerce maior influência foi a velocidade de corte.
- Potência com confiabilidade de 95% sofre maior influência pelos fatores avanço e pela interação dos fatores profundidade de corte com velocidade de corte;
- Vibração com confiabilidade de 95%, os fatores que exercem maiores influências são: avanço e profundidade de corte.

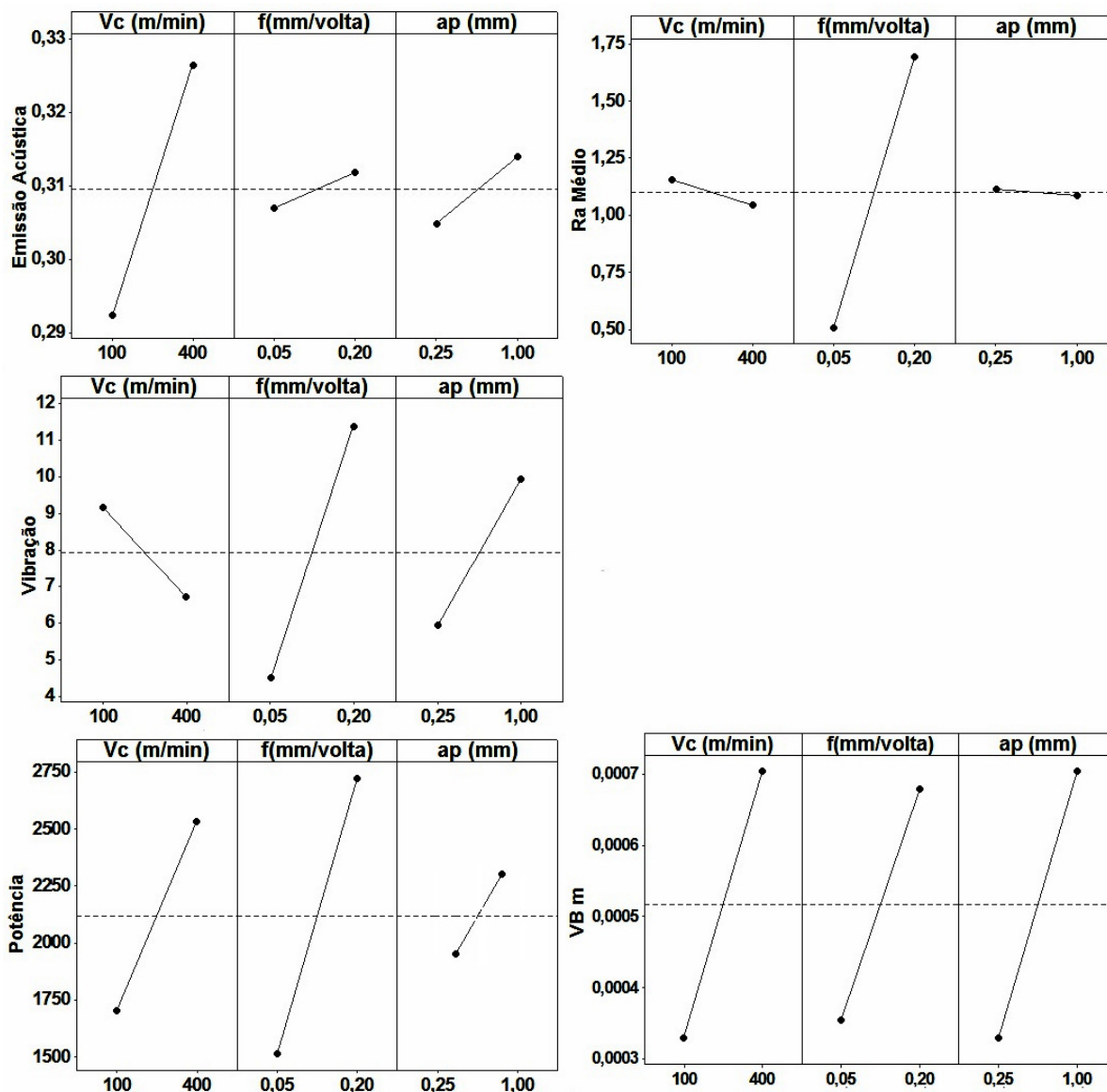
Figura 40 - Fatores de maior influência par ferramenta de metal duro Tk1000 (TiCN Al₂O₃)



Fonte: Produção do próprio autor

Ao analisar as Figuras 40 e 41, para a R_a média a melhor condição é a velocidade de corte no nível alto 400 m/min e a Emissão Acústica no nível baixo 100 m/min. Com acréscimo da velocidade de corte o ocorre aumento na temperatura e o aumento do desgaste de flanco da ferramenta que é refletido no aumento dos valores medidos na emissão acústica (EUZEBIO, 2012). Como para o estudo a R_a média é a variável que deve estar privilegiada na melhor condição, foi escolhido para ser ajustado o fator em nível alto 400 m/min.

Figura 41 - Efeitos das variáveis respostas para ferramenta MD



Fonte: Produção do próprio autor

O fator profundidade de corte influencia as variáveis respostas Vibração e V_B/m quando se aumenta a profundidade ocorre aumento nas duas variáveis respostas, para obter o menor valor para essa variável deve ajustar para o nível baixo 0,25 mm, todas as outras variáveis respostas são favorecidas.

O fator avanço exerce influência nas variáveis V_B/m e Vibração e a melhor condição para as duas é o nível baixo 0,05 mm/volta que é mais adequado para todas as variáveis respostas.

Após analisar cada ferramenta na condição “menor melhor” pode-se verificar que todas as ferramentas apresentaram os melhores resultados para os mesmos parâmetros de usinagem.

Deste modo é possível realizar o teste de vida das ferramentas nas mesmas condições, de velocidade corte, avanço e profundidade, conforme descrito na Tabela 6

Tabela 6 - Melhores condições de usinagem para as ferramentas

	V_B /m	R_a Médio	R_t Médio	Emissão (V)	Potência (W)	Vibração (mm/s)
Ferramenta $Al_2O_3 + MgO$						
V_c 400 m/min	0,0001	0,54	6,54	0,32	309,32	3,11
Ferramenta $Al_2O_3 + Cr_2O_3$						
f 0,05 mm/volta	0,0005	0,64	5,95	0,32	406,39	3,23
Ferramenta metal DuroTk1001 ($TiCN + Al_2O_3$)						
a_p 0,25mm	0,0001	0,67	6,25	0,32	445,58	3,30

Fonte: Produção do próprio autor

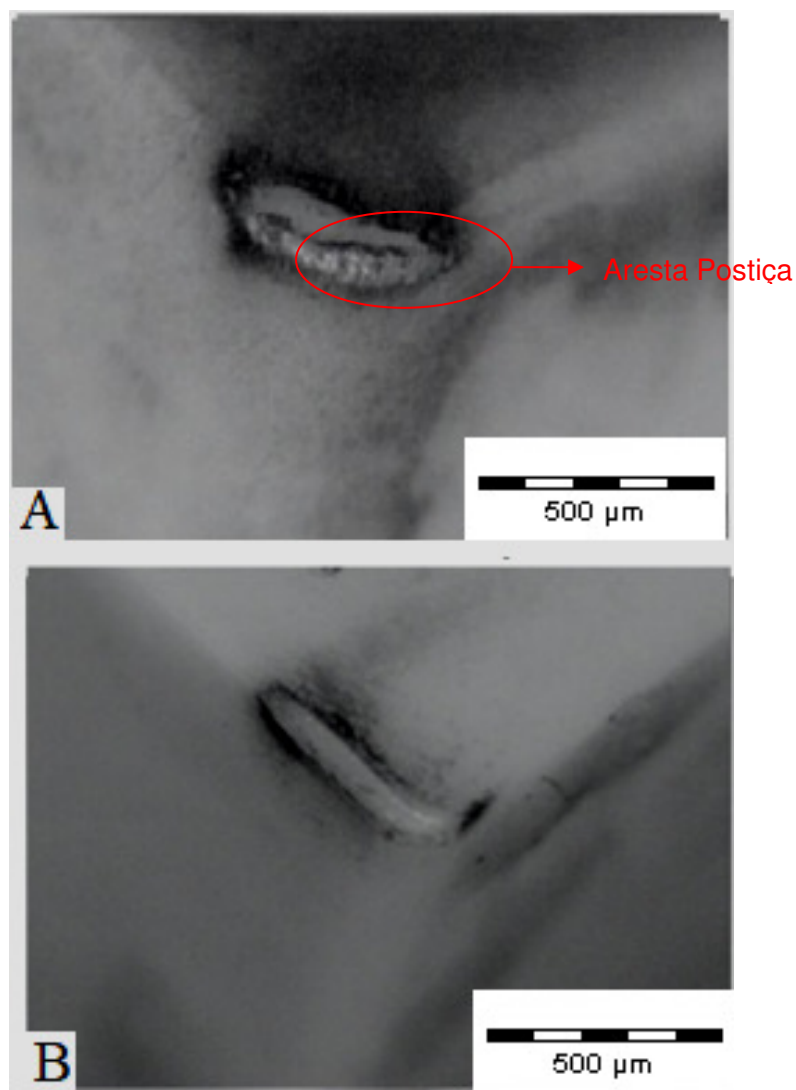
Observando as seis variáveis respostas da Tabela 6 é possível afirmar que a ferramenta de $Al_2O_3 + MgO$ e metal duro Tk1001 ($TiCN + Al_2O_3$) apresentaram um V_B/m com valores iguais e a ferramenta de $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ apresentou um desgaste de 5 vezes maior, comparada com as duas ferramentas anteriores. As rugosidades das três ferramentas apresentaram valores compatíveis com retificação conforme está apresentado no Quadro 01, o melhor R_a e R_t foi da ferramenta $Al_2O_3 + MgO$ sendo 16% melhor que a ferramenta $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ e 19% melhor que o metal duro Tk1001 ($TiCN + Al_2O_3$). O menor valor de potência é visto na ferramenta $Al_2O_3 + MgO$ sendo 24% melhor que a ferramenta $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ e 31% melhor que o metal duro Tk1001 ($TiCN + Al_2O_3$) e a emissão acústica e vibração foi igual para as três ferramentas.

Segundo a norma ISO 16112 (2017) e Quadro 1, esse ferro fundido vermicular pode ser classificado como JV-500/S atendendo os requisitos para fabricação de cabeçote de motor a diesel.

4.4 DESGASTE DA FERRAMENTA E ESTUDO DO CAVACO GERADO NA USINAGEM

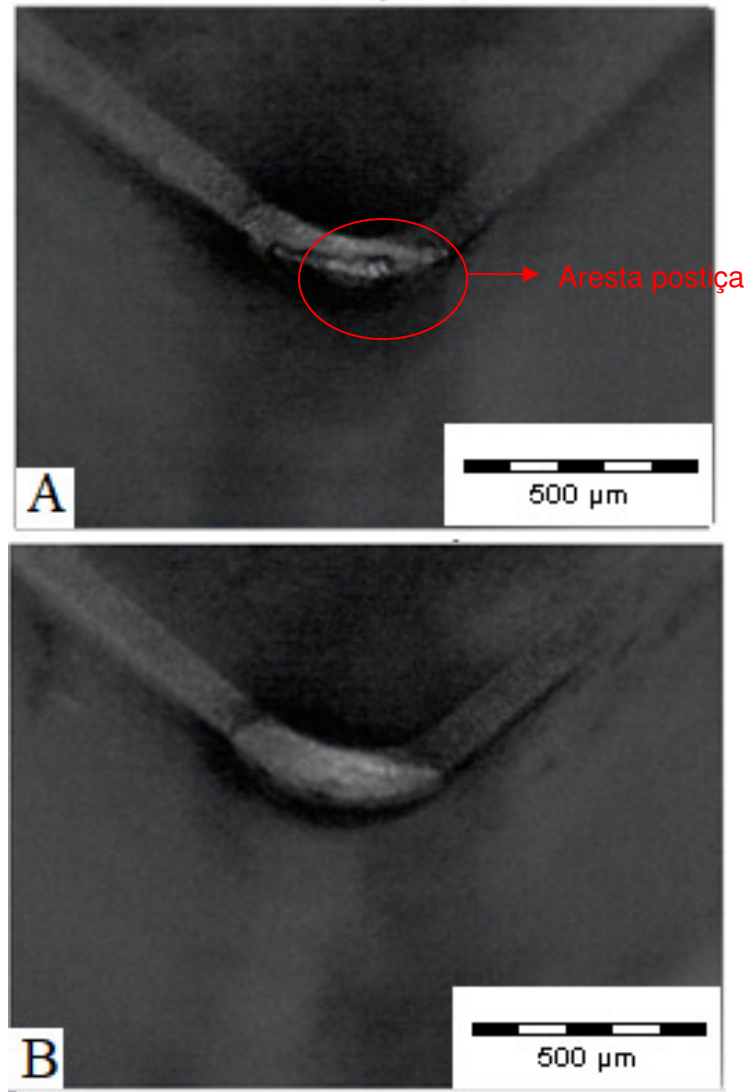
Nas Figuras 42 a 44 pode-se observar que para a velocidade de corte de 100 m/min, a interface ferramenta-cavaco gerou aresta de corte postíça e aderência indicando que a velocidade de corte está baixa e houve deformação plástica dominante na interface resulta do movimento de discordâncias e subsequente encruamento através do processo cíclico de deposição de camadas encruadas de material sobre a face da ferramenta como observado em trabalho similar de (TELES, 2007).

Figura 42 – Ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (A) v_c 100, f 0,2, a_p 0,25 (B) v_c 400, f 0,2, a_p 0,25



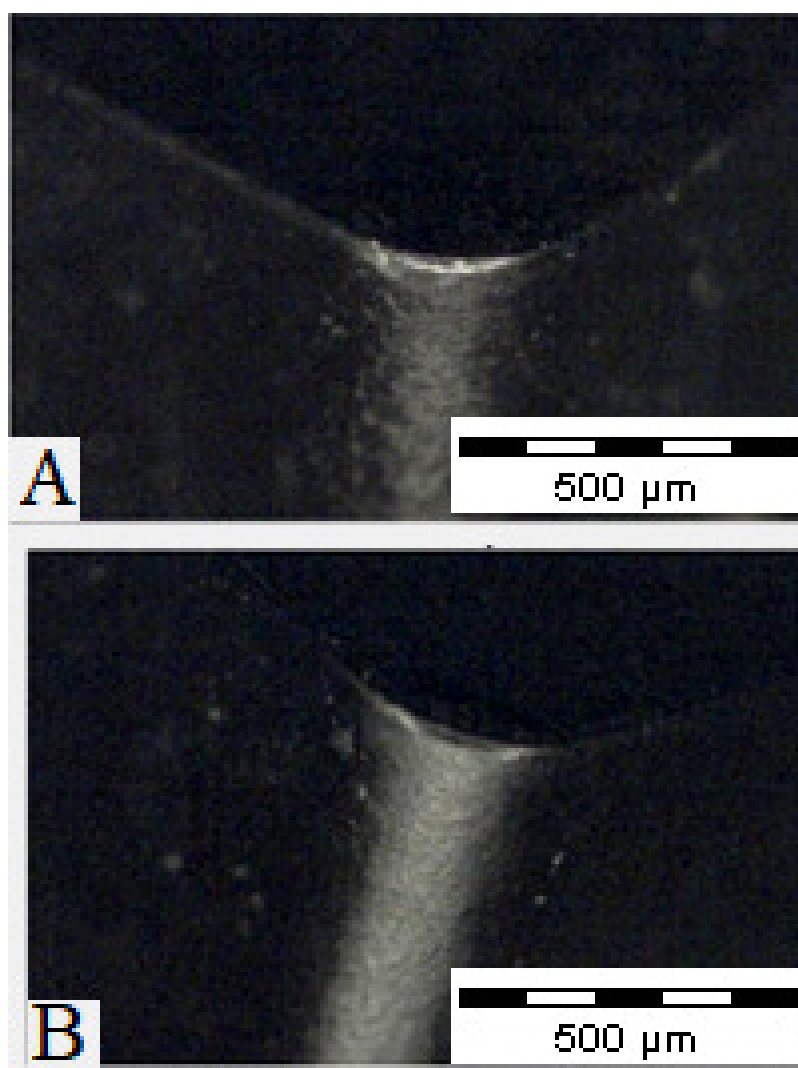
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43 - Ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (A) v_c 100, f 0,2, a_p 0,25 (B) v_c 400, f 0,2, a_p 0,25



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 44 - Ferramenta metal duro Tk1001($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) (A) v_c 100, f 0,2, a_p 0,25
(B) v_c 400, f 0,2, a_p ,25



Fonte: Produção do próprio autor

Quando o ensaio foi realizado com a velocidade de corte de 400 m/min a aresta de corte postiça não ocorreu, mostrando que houve um melhor fluxo entre a interface ferramenta-cavaco como também verificado por Teles (2007) na usinagem do ferro fundido nodular.

Analisando as Tabelas de 4 a 6 e as Figuras 43 e 44 em conjunto é possível verificar que os maiores valores de rugosidade e desgaste de aresta são atribuídos à velocidade de corte 100 m/min, em que foi verificado aderência de material nas ferramentas de cerâmica de

$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ dificultando a usinagem e sendo refletido na qualidade superficial da peça, quando ocorre o aumento da velocidade para 400 m/min, a aderência de material na ferramenta cessa e a qualidade superficial do material melhora. É possível observar que em todas as ferramentas ocorreu o desgaste de flanco, na ferramenta de metal duro é a que apresenta o menor desgaste.

Na Figura 45 (A) (B) (C) são apresentados os cavacos resultantes do torneamento do ferro fundido vermicular para as ferramentas: Cerâmica Al_2O_3 dopadas com MgO, Cerâmica Al_2O_3 dopadas com Cr_2O_3 e metal duro Tk1001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$).

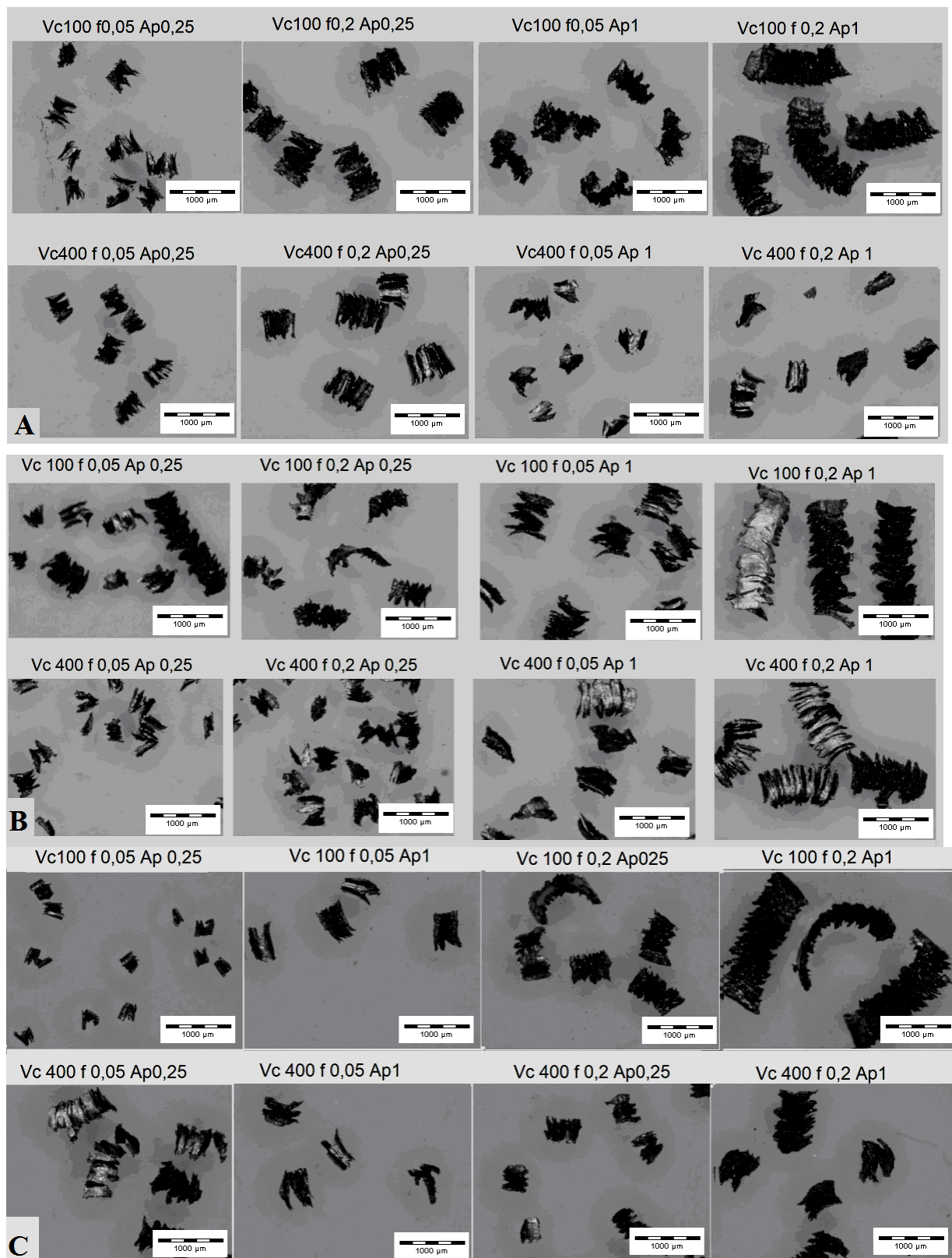
Segundo Diniz *et al.* (2008) na usinagem, a formação do cavaco é influenciada pelo calor gerado, esforços de corte e desgaste da ferramenta. A análise dos cavacos e estudo do seu processo de formação é muito importante, já que está diretamente ligada a aspectos de segurança do operador e qualidade superficial final da peça.

Percebe-se que o formato do cavaco gerado para os três tipos de ferramentas ilustradas na Figura 45 (A) (B) (C), conforme a Norma ABNT ISO 3685 (2016), foram cavacos tipo cisalhados ou lamelar e forma vírgula curtos, como observado em trabalhos similares por Doré (2007) e Silva (2008).

As formações de cavaco com a velocidade de corte de 100 m/min possuem uma maior soldagem e aumento das partículas do cavaco devido à aderência dos cavacos na face de corte, formando aresta postiça e aumentando a temperatura durante a usinagem, facilitando a soldagem dos cavacos. Já na velocidade corte de 400 m/min os cavacos são de menores tamanhos por possuir um fluxo contínuo durante a usinagem e uma menor temperatura ocasionando menor fusão dos cavacos.

Segundo Machado e Silva (2004), o aumento da profundidade de corte diminui a espessura do cavaco e aumenta o raio de curvatura do cavaco, tornando mais flexível e mais difícil de quebrar. Esse processo de aumento dos cavacos com a profundidade de corte é verificado com todas as ferramentas e evidenciada na velocidade de corte de 100 m/min.

Figura 45 - Cavaco (A) ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (B) ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e (C) ferramenta metal duro Tk10001 ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$)



Fonte: Produção do próprio autor

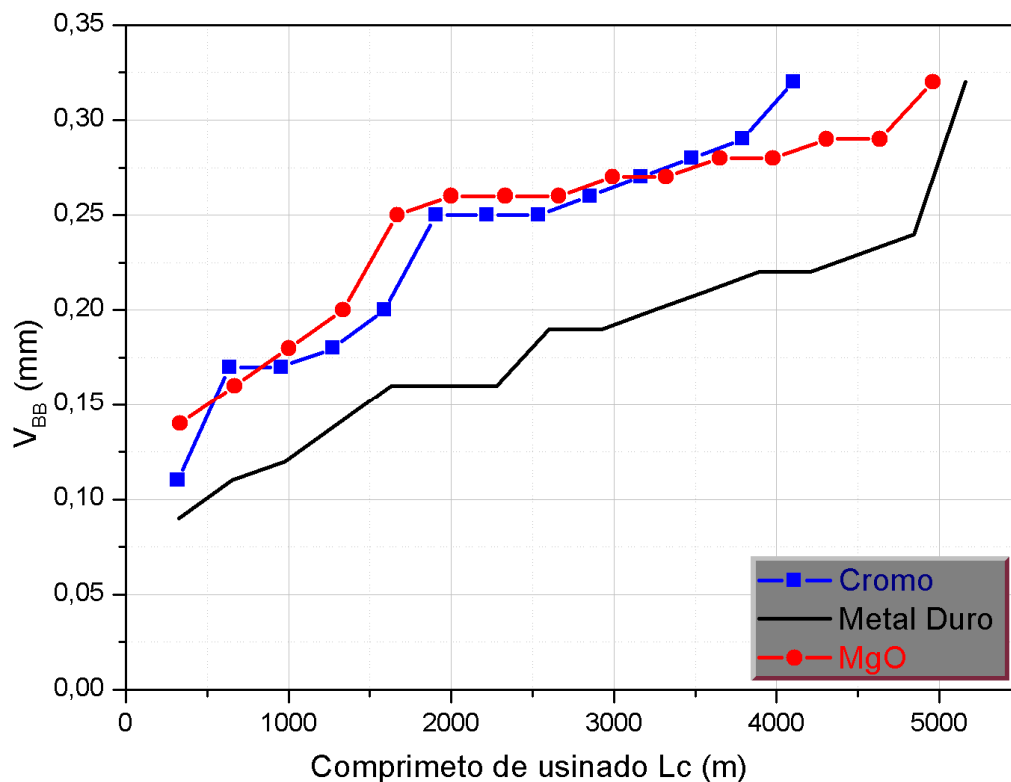
4.5 ENSAIOS DE VIDA PARA AS FERRAMENTAS DE METAL DURO E CERÂMICA

Os ensaios de vida foram realizados para as ferramentas Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e Metal duro Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$, com as melhores condições de cada parâmetro de usinagem de cada as quais foram :

- $V_c = 400 \text{ m/min}$;
- $a_p = 0,25 \text{ mm}$;
- $f = 0,05 \text{ mm/volta}$;

O comprimento de corte total usinado pela ferramenta é o comprimento torneado até a pastilha atingir o limite de desgaste de flanco de $V_B = 0,30 \text{ mm}$ conforme ilustrada na Figura 46.

Figura 46 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Corte Desgaste de Flanco em Função do Comprimento Usinado



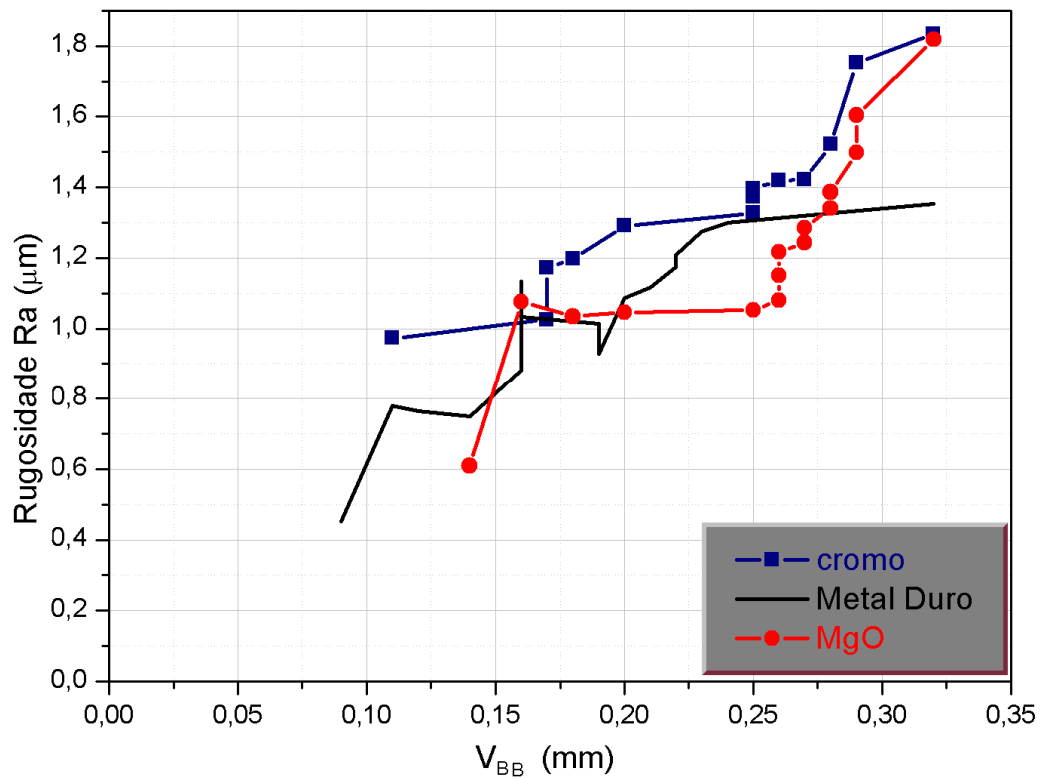
Fonte: Produção do próprio autor

Comparando-se os desempenhos das ferramentas do ponto de vista do fator vida, todas as ferramentas apresentaram o três estágio de desgaste, sendo o primeiro estágio onde ocorre a acomodação da cunha de corte que inicia no comprimento 0 e vai até 2000 m para ambas as ferramentas, com o início do segundo estágio o desgaste é brando e constante a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ que é a ferramenta que possui menor ductilidade é que entra no estágio 3 primeiro próximo de 3800 m devido a sua baixa ductilidade é a que apresenta maior taxa de desgaste. Já ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ apresenta o desgaste intermediário e entra no terceiro estágio próximo de 4500 m. A ferramenta de metal duro é a que apresenta menor desgaste das ferramentas devido possuir menor tenacidade poder absorver os impactos gerado durante a usinagem (MACHADO *et al.* 2015).

Segundo Tooptong; Park; Kwon, (2018) a microestrutura do ferro fundido vermicular é muito abrasivas e apresenta carbonetos complexo que o tornam uma usinagem interrompida que favorece as ferramentas que tem mais ductilidade, como é o caso da ferramenta de metal duro Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ que apresentou um comprimento de 5km que foi a ferramenta que teve o melhor desempenho entre as ferramentas testadas, já as ferramentas de Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ com um comprimento de 4,7 km e a ferramenta Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ com comprimento de 3,9 km.

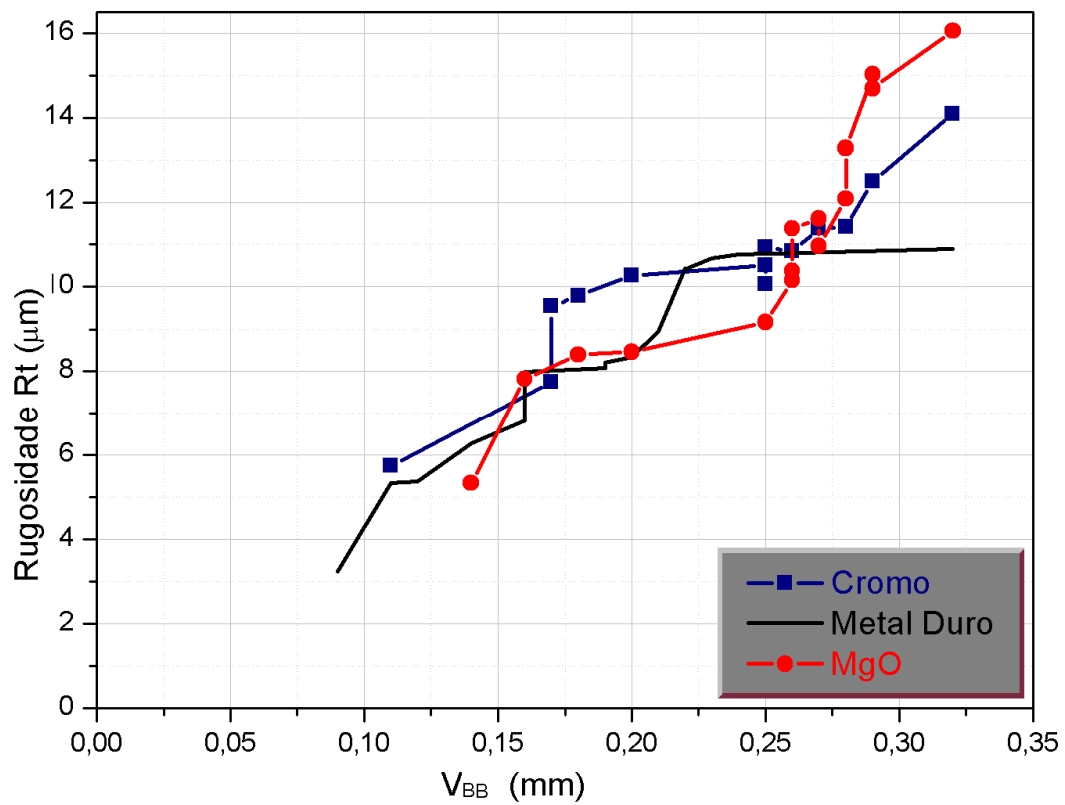
Nas Figuras 47 e 48 se encontram, respectivamente, os valores das rugosidades R_a e R_t com relação ao desgaste de flanco das ferramentas, ensaios de vida com a ferramenta de metal duro Tk10001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$, inicia-se com o menor valor de rugosidade R_a 0,45 μm e R_t 3 μm e com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta tem-se uma estabilidade entre o V_{BB} 0,15 e 0,20 mm com R_a 1 μm e R_t 8 μm , no fim de vida ocorre uma estabilidade na rugosidade R_a 1,35 μm e R_t 11 μm . A ferramenta de Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ inicia-se com o valor de rugosidade R_a 0,6 μm e R_t 5 μm ocorre um aumento abrupto para próximo de R_a 1,1 μm e R_t 9 μm e fica estável até o V_{BB} 0,25 mm e apresenta um crescimento linear até o fim de vida chegando ao R_a 01,7 μm e R_t 15 μm . Já a ferramenta Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ foi a que apresentou os maiores valores de rugosidades, iniciando-se em R_a 1 μm e R_t 6 μm , apresentou um crescimento linear até aproximadamente V_{BB} 0,20 mm e o valor de rugosidade ficou estável entre o V_{BB} 0,20 e 0,25 mm de R_a 1,3 μm e R_t 10,1 μm e depois ocorre um crescimento linear até o fim de vida chegando a uma rugosidade R_a 1,8 μm e R_t 13 μm .

Figura 47 - Progressão da Rugosidade R_a com Aumento do Desgaste da Ferramenta.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 48- Evolução da Rugosidade R_t com Aumento do Desgaste da Ferramenta

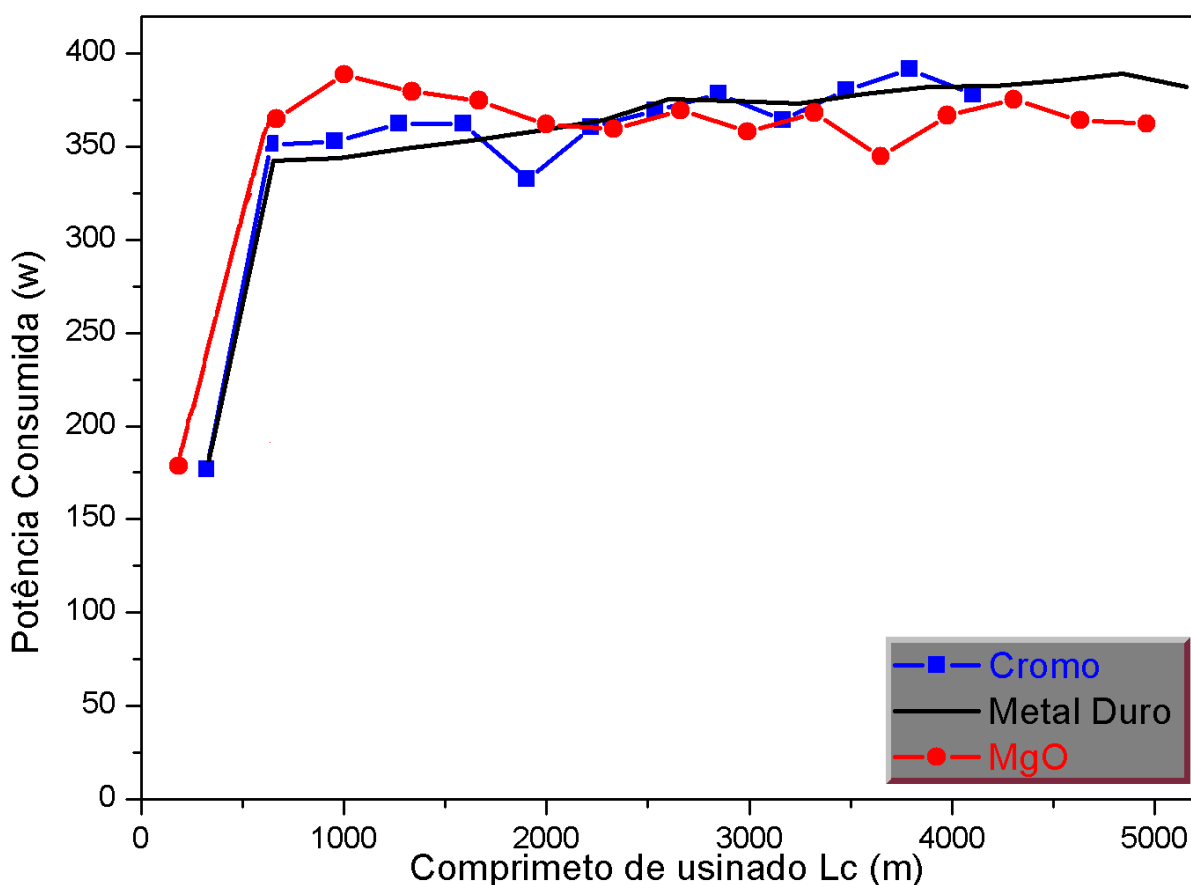


Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 49 é possível observar a variação dos valores de potência consumida para cada ferramenta ensaiada e analisar seus comportamentos. Para todas as ferramentas é possível ver que ocorre o mesmo comportamento, com a potência iniciando em próximo do 175W e sobe de forma abrupta por se tratar da região primeiro estágio de desgaste da ferramenta, onde ocorre a acomodação da cunha de corte que inicia no para ambas as ferramentas e depois os aumentos de potência é mais estável (MACHADO *et al.* 2015).

A ferramenta de metal duro Tk1001 TiCN + Al₂O₃, na fase inicial, apresenta o crescimento linear e contínuo, se mantém estável até o fim de vida da ferramenta. Isso ocorre pois a tenacidade dessa ferramenta é muito alta consegue absorver todos os impactos e vibrações que são geradas durante a usinagem (YAN *et al.*, 2009)

Figura 49 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão da Potência em Função do Cumprimento Usinado

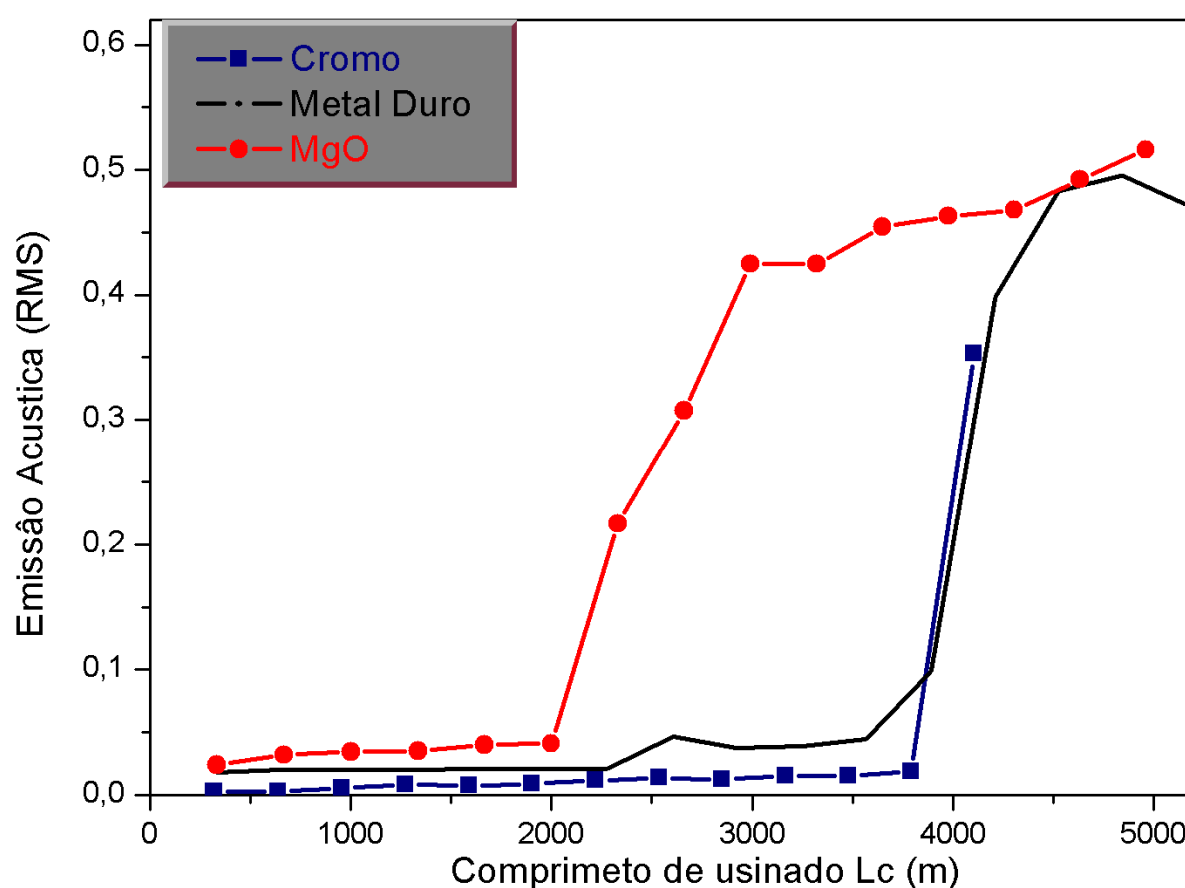


Fonte: Produção do próprio autor

Já as duas ferramentas Cerâmicas apresentam bastante oscilação no valor da potência consumida em todo o processo, devido possuir baixa tenacidade e essas oscilações se dão devido a pequenas trincas e fissura que ocorre durante o processo de usinagem do ferro fundido vermicular que é muito abrasivo e se assemelha a usinagem interrompida e havendo maior solicitação da ferramenta (ZHUANG *et al.*, 2015).

Na Figura 50 é possível analisar a variação dos valores de Emissão Acústica para cada ferramenta ensaiada e verificar seus comportamentos.

Figura 50 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão Emissão Acústica em Função do Comprimento Usinado



Fonte: Produção do próprio autor

As três ferramentas apresentaram um valor constante próximo de 0,03 V até o comprimento usinado de 2000 metros, a ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ teve seu valor de Emissão Acústica acrescido para aproximadamente 0,45 V e teve um crescimento linear até o fim da vida atingindo o maior valor. Indica que essa ferramenta foi a que mais sofreu desgaste

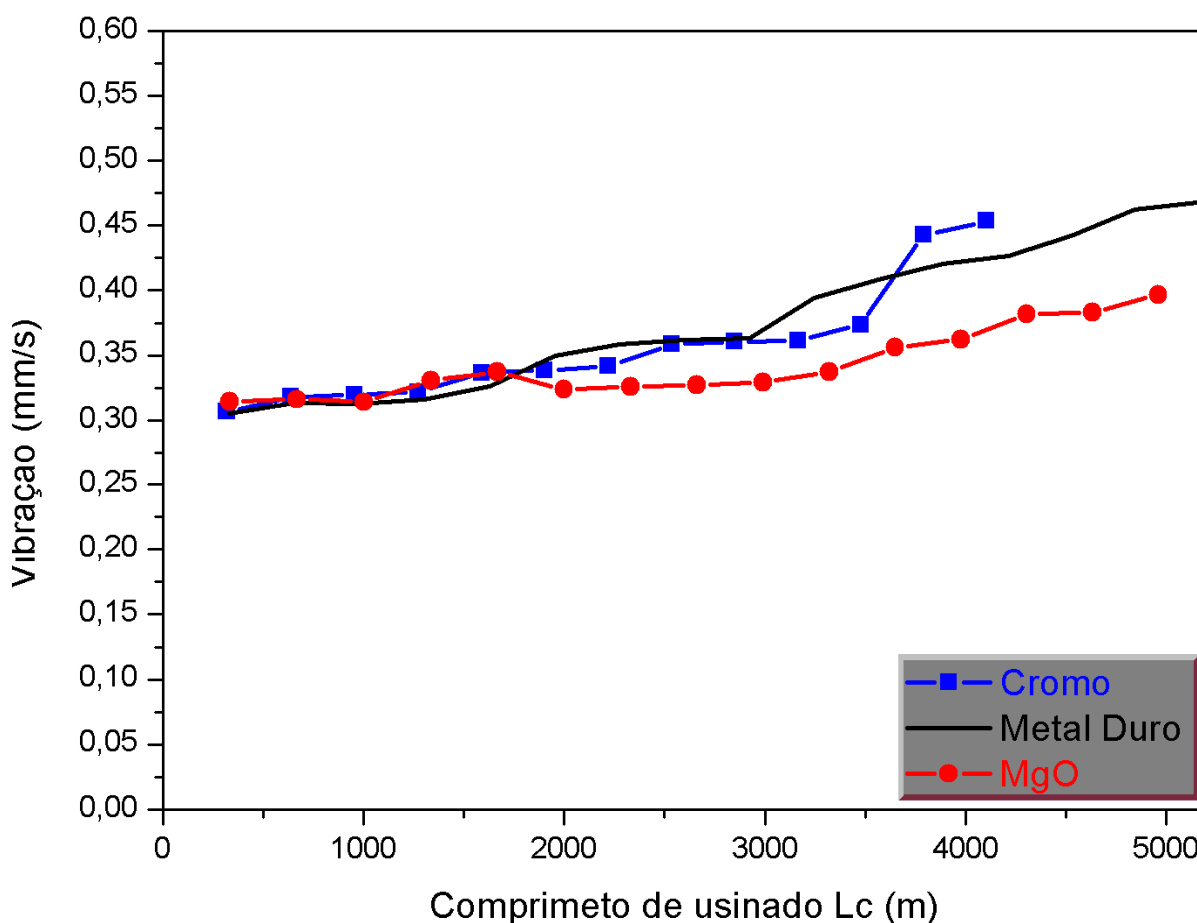
durante a o processo de usinagem, pois como é observado por Alves (2018) o atrito e desgaste aumenta os valores de Emissão Acústica.

As ferramentas de metal duro Tk10001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ e Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ apresentam comportamento muito semelhantes até o comprimento usinado de 3800 metros, em que ocorreu um aumento rápido da Emissão Acústica indicando que ocorreu um alguma coisa com as duas fermentas podendo ser um lascamento ou possível quebra da mesma (KONDOR, 2018).

Na Figura 51 é possível analisar a variação dos valores de vibração para cada ferramenta ensaiada e verificar seu comportamento

As três ferramentas apresentaram valores de vibração com pouca oscilação que demonstra que a peça usinada e o ferramental são bem rígidos atenuando a vibração durante o processo de usinagem.

Figura 51 - Ensaio de Vida das Ferramentas de Progressão da Vibração em Função do Comprimento Usinado



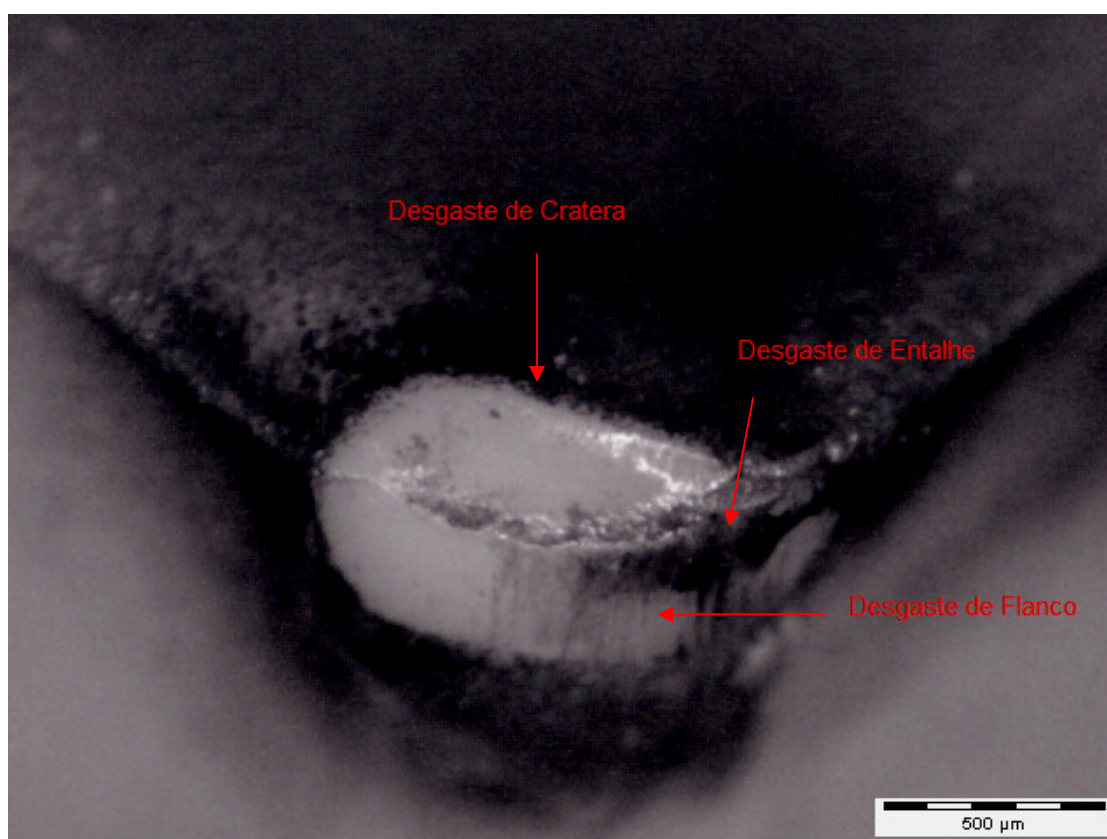
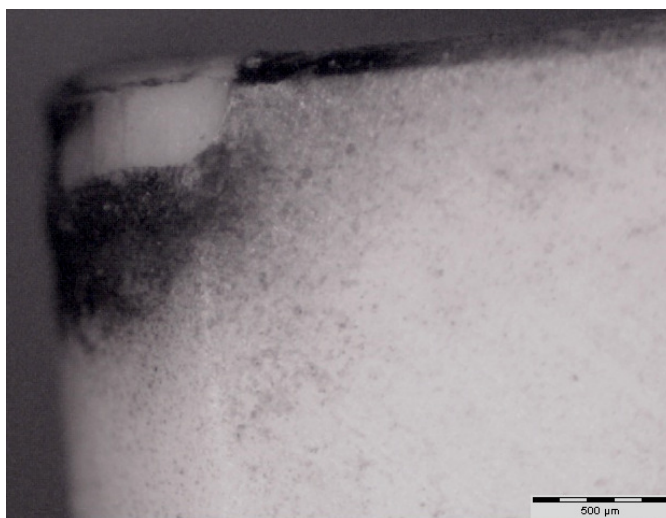
A ferramenta de metal duro Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$, apresentou uma vibração com progressão linear proveniente do desgaste da ferramenta que variou de aproximadamente 0,325 a 0,425 mm/s. Já a ferramenta Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi a que apresentou menor oscilação nos valores de vibração durante todo o ensaio de vida iniciando com valor aproximado de 0,325 mm/s e terminando o ensaio de vida como valor de 0,350mm/s demonstrando que o desgaste da ferramenta afeta muito pouco a vibração para essa ferramenta .

O comportamento da ferramenta de Cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ foi o mais diferenciado das três ferramentas, inicia-se com valor igual as outras de aproximadamente 0,325 mm/s e tendo pequenas variações até chegar no comprimento usinado de 3500 metros onde ocorre um crescimento abrupto da vibração para o valor aproximado de 0,45mm/s ocorrendo o fim de vida da ferramenta, ao observar a Figura 53 o desgaste de flanco parte de um valor aproximado de 0,28 mm para 0,325 mm neste comprimento usinado gerando o aumento de vibração devido ao desgaste.

4.5.1 Análise dos desgastes das ferramentas após ensaio de vida

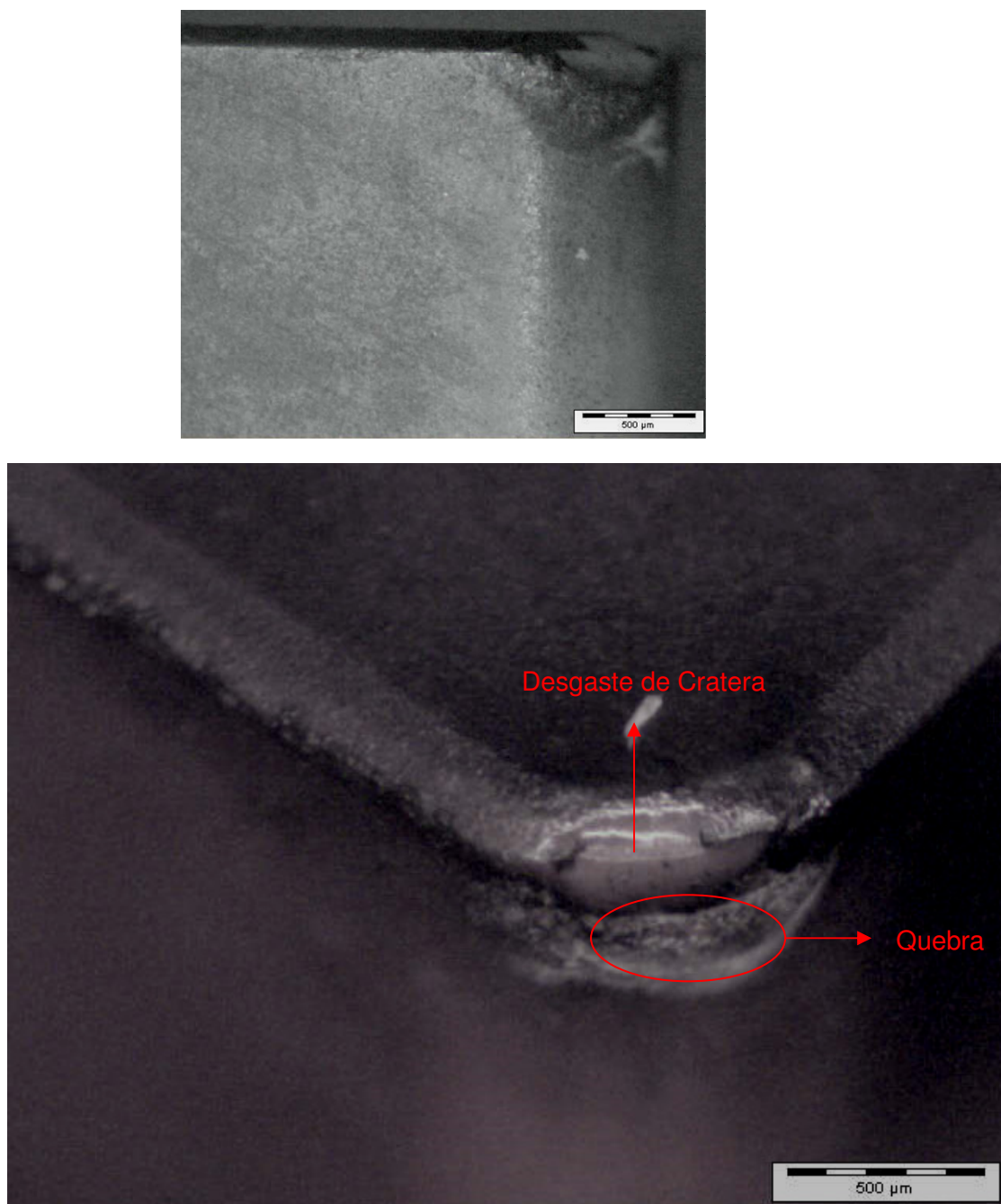
Após todas as ferramentas atingir o fim de vida onde V_B acima de 0,3 mm critério adotado para fim do ensaio de vida, elas foram levadas ao estereoscópio do Laboratório de Metalografia da FATEC Pindamonhangaba, onde realizou-se imagem com ampliação de 30x e foi possível verificar os desgastes que as ferramentas sofreram para usinar o ferro fundido vermicular com velocidade de corte de 400 m/mi, avanço de 0,05 mm/volta e profundidade de corte de 0,25mm se são demonstradas nas Figuras 52 a 54.

Figura 52 - Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta
Cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$



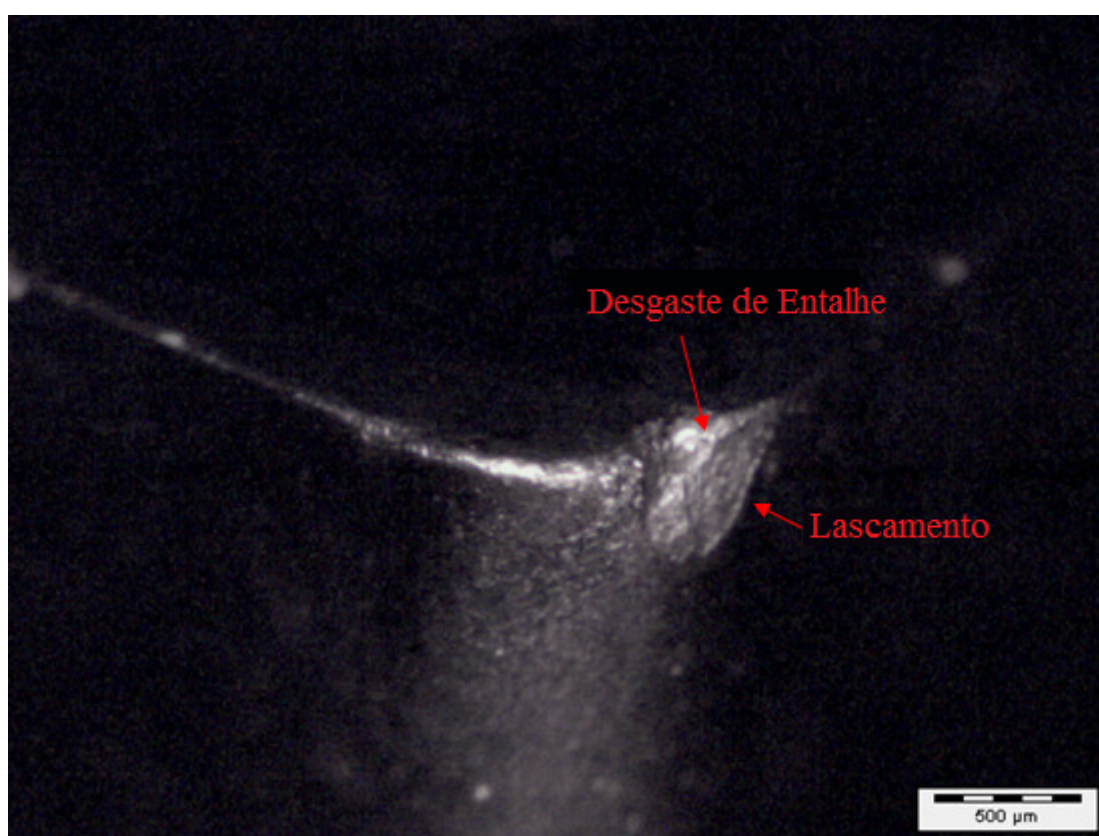
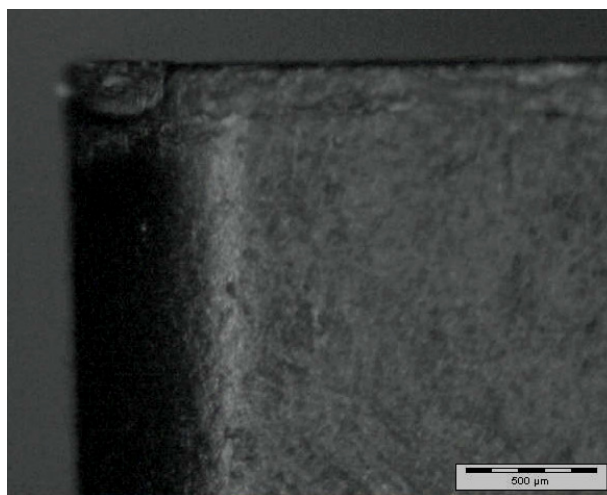
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 53 – Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta
Cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 54 - Desgastes das Arestas de Corte no Final do Ensaio de Vida para a Ferramenta
Metal Duro Tk1000 TiCN + Al₂O₃



Fonte: Produção do próprio autor

Ao observar as Figuras 51 a 54 todas as ferramentas apresentaram desgaste de entalhe.

A Ferramenta Cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ foi a que apresentou maior desgaste das três ferramentas, pois além do desgaste de entalhe é possível observar o desgaste de flanco, desgaste de cratera, devido a usinagem do ferro fundido vermicular, o cavaco permanece sempre em contato com a ferramenta, aumentando o de coeficiente de atrito e por possuir baixa condutividade térmica, a temperatura da ferramenta aumenta durante o corte favorecendo o desgaste de flanco e de cratera e a formação do entalhe é resultado do atrito do cavaco com ferramenta dos veios de vermículos ou partículas duras como titânio e carboneto presente no ferro fundido, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento como foi observado por Sousa *et al.* (2019)

Na ferramenta Cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ é possível verificar o desgaste de flanco e na aresta frontal uma quebra proveniente de um desgaste de cratera excessivo proveniente do atrito e altas temperaturas envolvidas na operação de corte o mecanismo de desgaste foi o de atrito e difusão como observado por Niu *et al.* (2019).

Como observado por Niu *et al.* (2019) na ferramenta metal duro Tk1001 $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ observa-se desgaste de flanco e trincas que geram lascamento da ferramenta, devido altas temperaturas envolvidas na operação de corte, por causa do atrito do cavaco e a peça durante o processo de usinagem.

5 CONCLUSÃO

Com planejamento experimental completo, foi possível encontrar a melhor combinação entre os parâmetros de usinagem para cada ferramenta, que foi V_c 400 m/min, f 0,05 mm/volt e a_p 0,25 mm.

Percebe-se que o formato do cavaco gerado para os três tipos de ferramentas, foram cavacos tipo cisalhados ou lamelar e forma de vírgula curto.

Na velocidade de corte de 100 m/min foi observado o aumento das partículas do cavaco devido à aderência dos cavacos na face de corte formando aresta postiça e aumentando a temperatura durante a usinagem, apresentando maiores valores de rugosidade e desgaste de aresta das ferramentas cerâmicas de $Al_2O_3 + MgO$ e $Al_2O_3 + Cr_2O_3$.

Em todas as ferramentas foram observadas que ocorreu o desgaste de flanco, a ferramenta de metal duro a que apresentou microtrincas e lascamento. Já a ferramenta de cerâmica de $Al_2O_3 + MgO$ apresentou desgaste de cratera e entalha devido a mesma ter sofrido atrito do cavaco durante a usinagem. E a ferramenta de cerâmica $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ sofreu uma quebra proveniente de um desgaste de cratera excessivo proveniente do atrito e altas temperaturas envolvidas na operação de corte o mecanismo de desgaste foi o de atrito e difusão.

A ferramenta de metal duro obteve um comprimento de corte 6 % superior à ferramenta cerâmica de $Al_2O_3 + MgO$ e 22% em relação à ferramenta cerâmica $Al_2O_3 + Cr_2O_3$.

Metal duro apresentou uma rugosidade máxima, R_a 1,35 μ m. A utilização das ferramentas de cerâmicas, mostra-se promissora, até o V_{BB} 0,275 mm acabamentos com R_a 1,30 μ m.

A ferramenta de metal duro apresentou o melhor desempenho das ferramentas analisadas, devido possuir a dupla camada de revestimento que ajudou na usinagem do ferro fundido vermicular.

O aumento de velocidade de corte de 100 m/min para 400 m/min a maior velocidade favoreceu as ferramentas de cerâmicas, pois a velocidade menor apresentou aresta postiça e ocorreu perda de qualidade superficial das peças.

A ferramenta de metal duro com revestimento ($TiCN + Al_2O_3$) das ferramentas testadas no ensaio de foi a que apresentou menor desgaste, justamente por possuir as duplas camadas protetora e por ser a ferramenta que possuía a menor tenacidade.

5.1 INDICAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Usinar ferro fundido Cinzento com os mesmos parâmetros utilizados neste trabalho e comparar os resultados.
- Realizar ensaios com os mesmos parâmetros de avanço (f) e profundidade de corte (a_p) e aumentar a velocidade corte (V_c).
- Realizar ensaios de vida com os mesmos parâmetros avanço (f) e profundidade de corte (a_p) e velocidade de corte (V_c) incluindo os critérios de medição de R_a limitando-se em $1,3 \mu\text{m}$ que é aceitável para retificação.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. S. **Análise do processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido através de ferramentas cerâmicas de $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3+\text{mgO}$ experimentais.** 2018. 125 f. Tese (Livre-Docente em Usinagem dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.
- AKKUS, H.; YAKA, H. Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy. **Journal of the International Measurement Confederation**, London, v.167, set. 2020.
- BAGETTI, J. H. **Análise da usinabilidade, deformação e temperatura no fresamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 413 p.
- BOSSARDI, J. C. S. **Análise comparativa dos meios lubri- efrigerantes na furação do ferro fundido vermicular com brocas helicoidais de metal-duro revestidas com tiain.** 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Amsterdam, v. 18, p. 1-9, ago. 2017.
- COSTA, A. F. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620.** 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- DIAS, L. R. M.; DINIZ, A. E. Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 35, p. 17-29, 2013.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8.ed. São Paulo: Artiber Editora, 2013. 244 p.
- DORÉ C. **Influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular.** 2007. 213f. Dissertação de Mestrado Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- EDWARDS, E. R. **Estudo da formação de interface de boreto para a deposição de diamante cvd sobre carboneto de tungstênio.** 2008. 103 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais INPE, São José dos Campos, 2008.

EUZEBIO, C. D. G. **Uma Contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana.** 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. 671 p.

FIRKA, D. Statistical, technical and sociological dimensions of design of experiments. **The TQM Journal**, Howard House, v. 23, n. 4, p. 435–445, 2011.

GABALDO, S. *et al.* of carbide and ceramic tools in the milling of compact graphite iron – CGI. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Rio de Janeiro, v. 32, n. 5, p. 511- 517, December-Special Issue 2010.

GHASEMI, R. *et al.* Mechanical properties of solid solution-strengthened CGI. **International Journal of Cast Metals Research**, Londres, v. 29, n. 1-2, p. 98-105, fev. 2016.

GÓMEZ, M. P. *et al.* Assessment of cutting tool condition by acoustic emission. **Procedia Materials Science**, Amsterdam, p.321–328, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812812000442>. Acesso em: 4 jun. 2018.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** 2 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2019.

GUZIK, E. *et al.* The structure and mechanical properties of pearlitic-ferritic vermicular cast iron. **Archives of Foundry Engineering**, Szczecin, v. 12, n. 1, p. 33–36, 1 jan. 2012.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials:** theory, modelling, and applications. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. 608 p.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials.** Elsevier, Amsterdam, 2008. 478 p.

HECK, M. *et al.* Analytical investigations concerning the wear behaviour of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, Darmstadt, v. 26, n. 3, p. 197-206, Mai. 2008.

HENKEL, H ; LAMPIC, M. Os estágios de desenvolvimento de um bloco de motor em ferro fundido vermicular. **Fundição e Serviço**. São Paulo, Aranda, ano 27, n.291, p.18-25, mar. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16112:2017:** compacted (vermicular) graphite cast irons – classification. 2. ed. Technical Committee ISO/TC 25 Cast irons and pig irons, 2017. 24 p.

KONDO, M.Y. **Análise e otimização do processo de torneamento da superliga VAT 32 com ferramentas de corte experimentais e comerciais.** 2018. 198 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

KOPYCIŃSKI, D. *et al.* Preparation vermicular graphite in thin and thick wall iron castings. **Archives of Foundry Engineering**, Szczecin, v. 12, n. 2, p. 41–44, 1 jan. 2012.

LIMA, F. F. **Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do Inconel751 e Inconel 718**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

LONGHI, M. *et al.* Geração de resíduos em processos de usinagem. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE*, 5., 2016, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, 2016.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos metais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. 408 p.

MASSIRER JUNIOR, E.; GUESSER, W. L. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furação. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul, 2011.

MALAKIZADIA, A. *et al.* Effects of workpiece microstructure, mechanical properties and machining conditions on tool wear when milling compacted graphite iron. **International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, Amsterdam, v. 410-411, p. 190 – 201, 2018.

MOCELLIN, F. **Desenvolvimento de tecnologia para brunimento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular**. 2007. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MOTA, P. R. **Estudo do processo de rosqueamento com macho de corte de metal duro em ferro fundido vermicular**. 2019. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8.ed. Arizona: John wiley & Sons.Ic. 2012.

NAVES, V. T. G. **Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e vermicular classe 350 no fresamento frontal em altas velocidades de corte**. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

NAYYAR, V. *et al.* An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations. **Jounal Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 1, p. 488-493, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 3685: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. 61p, Rio de Janeiro:11/2017-Publicada edição.

NGUYEN, D. *et al.* Formation mechanism of alumina layer in protecting cubic boron nitride inserts in turning cast irons. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 153, jun. 2020.

NIU, J. *et al.* Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Amsterdam, v. 103, p. 4123-4134, maio 2019.

NOBAHAR, A.; MOJIB, S.; MOHARRAMI, M. Combined use of design of experiment and dynamic building simulation in assessment of energy efficiency in tropical residential buildings. **Energy & Buildings**, London, v. 86, p. 525–533, 2015.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S. Analysis of acoustic emission signals and surface integrity in the high-speed turning of Inconel 718. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, Amsterdam, v. 226, n. 1, p. 3–27, 2012. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405411407656>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PICON, F. C. *et al.* Síntese de pigmentos de Al_2O_3 dopado com cromo. *In:* Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBCIMAT Natal, 2002, Natal. **Anais [...]**. Natsl, 2002. Disponível em: <https://www.ipen.br/bibliote> ca/cd/ cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc109-090.pdf . Acesso em: 29 nov. 2019.

PINHEIRO, C. **Avaliação da usinagem do Inconel 718 via metodologia de Taguchi**, 2018. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

PINTO, G. B. **Análise do efeito do tempo de MAE no tamanho de cristalito e microdeformação da rede cristalina do WC-Co**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

RELKAR, A. S.; NANDURKAR, K. N. Optimizing & analysing overall equipment effectiveness through design of experiments. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 38, p. 2973–2980, 2012.

RENÓ, T. L.; BORGES JÚNIOR, C. G. D.; GAUDÊNCIO, J. H. D. Otimização da rugosidade de um processo de torneamento: uma variável de qualidade. *In:* SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMEP, 2017, Joinville. **Anais [...]**. Joinville: UDESC/UNIVILLE, 2017. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/5simep/42977>. Acesso em: 29 nov. 2019.

RITTIDECH, A.; SOMRIT, R.; TUNKASIRI, T. Effect of Y_2O_3 on structural and mechanical properties of Al_2O_3 - ZrO_2 ceramics. **Ceramics International**, Amsterdam, v. 39, p. S433-S436, 2013.

RODRIGUES JÚNIOR, T. A fabricação do ferro fundido vermicular. **Fundição e Serviço**, São Paulo, Aranda, ano 27, n. 293, p. 26-33, maio 2017.

ROMANO, S. J. **Comparação de desempenho dos sistemas de freio de atrito tipo sapatilha-disco e sapata-roda para veículos ferroviários de carga**. 2003. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ROSA, S.N. **Influência do teor titânio no torneamento de ferro fundido vermicular**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ROSA, S. N. *et al.* 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- 240, jul./set. 2010.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos metais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SCHÜHLI, L. A. **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A Review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 61, p. 27–47, 2012. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>. Acesso em: 20 fev. 2019.

SILVA, J. A. **Análise térmica na solidificação de ferros fundidos cinzentos hipoeutéticos**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SILVA, M. A. **Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço abnt 1045 e do ferro fundido nodular**. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SILVA, M. B. *et al.* Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron. **An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, Amsterdam, v. 271, p. 2426 – 2432, 2011.

SOUSA, T.A. *et al.* Investigation of the performance of ceramic tools of alumina doped with magnesium oxide in the dry machining of compacted graphite iron. **Materials Research Express**, London, v. 6, n. 4, p.12, 2019.

TELES, J. M. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro**. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2007.

TOOPTONG, S.; PARK, K-H.; KWON P. A Comparative investigation on flank wear when turning three cast irons. **Tribology International**, Amsterdam, v. 120, p. 127–139, 2018.

TOOPTONG, S.; PARK, K-H.; LEE, S.; KWON P. A. A preliminary machinability study of flake and compacted graphite irons with multilayer coated and uncoated carbide inserts. **Journal Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 5, p. 644–657, 2016.

WANG, B.; LIU, Z. Acoustic emission signal analysis during chip formation process in high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy and Inconel 718 SUPERALLOY. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 27, p. 114–125, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517300750?via%3Dihub>> Acesso em: 4 jun. 2018.

XAVIER, F. A. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas na usinagem dos ferros fundidos vermicular e cinzento**. 2013. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

YAN, J.; MURAKAMI, Y.; DAVIM, J. P. Tool design, tool wear and tool life. In: CHENG, K. **Machining dynamics: fundamentals. applications and practices**. London: Springer, 2009. cap. 5, p. 117-150.

ZEILMANN, R. P. *et al.* Relação equilibrada entre processos de usinagem com fluidos de corte e meio ambiente. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2008, Bento Gonçalves. **Anais[.]**. Bento Gonçalves, out. 2008.

ZEILMANN, R. P. *et al.* Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2., 2010, Bento Gonçalves. **Anais[.]**. Bento Gonçalves, 2010.

ZHUANG, K. *et al.* Employing preheating and cooling-assisted technologies in machining of Inconel 718 with ceramic cutting tools: towards reducing tool wear and improving surface integrity. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Amsterdam, n. 80, n. 9–12, p. 1815–1822, 2015.