

RAFAEL CANTELLI TOSIM

**Estudo da influência do ferro fundido vermicular com ferramenta cerâmica analisando
potência de corte, vibração, emissão acústica e rugosidade**

Rafael Cantelli Tosim

**Estudo da influência do ferro fundido vermicular com ferramenta cerâmica analisando
potência de corte, vibração, emissão acústica e rugosidade**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais .

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

T714e	<p>Tosim, Rafael Cantelli</p> <p>Estudo da influência do ferro fundido vermicular com ferramenta cerâmica analisando potência de corte, vibração, emissão acústica e rugosidade / Rafael Cantelli Tosim. – Guaratinguetá, 2018. 70 f : il. Bibliografia: f. 68-70</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza</p> <p>1. Usinagem. 2. Ferro fundido 3. Ferramentas de corte 4. Cerâmica (Tecnologia) I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.9</p>
-------	--

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


RAFAEL CANTELLI TOSIM

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS "

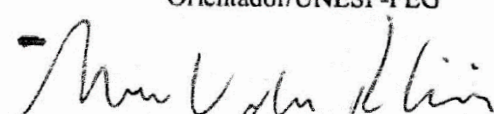
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Profº Dr. MIGUEL ÁNGEL RAMÍREZ GIL
Coordenador

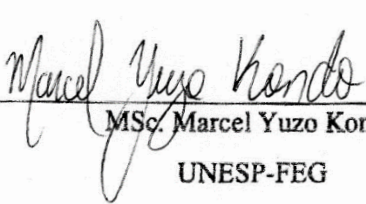
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
UNESP-FEG



MSc. Marcel Yuzo Kondo
UNESP-FEG

Dezembro , 2017

DADOS CURRICULARES

RAFAEL CANTELLI TOSIM

NASCIMENTO 17.10.1992 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Newton Cesar de Avila Tosim
Celeste Cantelli Tosim

2011 / 2017 Engenharia de Materiais
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus. Agradeço pelas nossas vidas, nossa inteligência, nossos esforços, nossas famílias e amigos; Ao meu orientador, Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza que nos deu a oportunidade de realizar o trabalho em algo de grande importância; Aos meus pais Newton e Celeste que me apoiaram, incentivaram e não mediram esforços para que eu alcançasse meu objetivo; À República Toa Toa, que me acolheu e me fez crescer tornando os anos da faculdade como os melhores anos de minha vida.

“Todos os problemas do mundo poderiam ser resolvidos facilmente se os homens estivessem dispostos a pensar.”

Thomas J. Watson

RESUMO

A usinagem é um dos processos mais importantes para indústrias metal mecânica. Os processos de usinagem envolvem grandes quantidades de variáveis que interferem nos resultados obtidos. Entre as variáveis, os parâmetros de corte são definidos os mais influentes na vida da ferramenta, sendo definidas como variáveis de entrada que tem como base o material da peça e ferramenta. Mesmo sendo pré- definidos pelos fabricantes de ferramentas, estes apresentam influência nas forças de corte, vibrações e emissão acústica, que tem como consequência variações nos desgastes e avarias das ferramentas, acabamento das peças, custos e tempos de usinagem. Todas essas informações são importantes no uso de ferramentas cerâmicas que constituem uma tecnologia em processo de amadurecimento para aplicações em ligas resistentes ao calor. O crescente desenvolvimento de ferramentas de corte de materiais cerâmicos pode ser a solução na usinagem de novos materiais, como ferros fundidos, superligas de níquel, aços endurecidos entre outros. Para alcançar tal objetivo é importante o estudo neste seguimento, com destaque ao controle e comparação nos processos de usinagem das variáveis implícitas do processo. Em recentes trabalhos obtiveram-se avanços no desenvolvimento de novas ferramentas de corte com importantes melhorias de suas propriedades e/ou com propriedades únicas. Os avanços alcançados neste segmento têm possibilitado a diversificação de aplicações em diversos materiais, possibilitando perspectivas de aplicações futuras como spin-off. Este trabalho tem como objetivo aplicação da ferramenta à base de Al_2O_3 desenvolvida com tecnologia nacional no torneamento do ferro fundido vermicular sem o uso de fluido de corte, e análise da influência da força de corte no desgaste da ferramenta cerâmica. Foram utilizados 6 diferentes grupos de parâmetros, onde cada grupo contém uma réplica do ensaio. As ferramentas foram fotografadas por uma lupa da marca ZEISS para análises. Na análise final, o desgaste de avaria foi mais comum na maioria das condições, e, foi possível observar a potência sendo dependente dos parâmetros V_c e f , tanto individualmente quanto na interação dos dois parâmetros. Novos estudos microestruturais devem ser feitos para relacionar a presença de grafita nas emissões acústicas, e vibrações no momento da usinagem da amostra.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Ferro fundido vermicular. Ferramenta cerâmica. Vibrações e Acabamento superficial.

ABSTRACT

Machining is one of the most important processes for metalworking industries. Machining processes involve large quantities of variables that interfere with the results obtained. As variables, the cut-off parameter is defined as the tool's life-span, being defined as input variables and as the base material of the part and tool. Although these tooling parameters are influenced by the cutting forces, vibrations, acoustic emissions and temperature, this is due to variations in the types of wear and damage of the tools, surface finishing of parts, costs and machining times. All the information is important when using ceramic tools that constitute a technology in the maturation process for applications in heat resistant alloys. The growth and applications of cutting tools for ceramic materials can be a solution in the machining of new materials such as cast iron, nickel superalloys, hardened steels among others. To achieve the goal of great importance related study, to this follow-up, with emphasis on the control and compared in the machining processes of the implicit variables of the process. In recent works with advanced authors not developed in new cutting tools with important improvements of their properties and / or with unique properties. The advances achieved in the segment have enabled the diversification of applications in several materials, making possible the application of future applications as spin-off. The objective of this work is to apply the Al₂O₃ based tool developed with national technology without turning vermiculite (CGI) without the use of cutting fluid and analysis of the influence of shearing force without wear of the ceramic tool. Six different groups of parameters were used, where each group contains a replica of the assay. As tools were photographed by a ZEISS magnifying glass and analyzed for material wear. In the final analysis, failure wear was more common in most conditions, and as well as to observe the power being dependent on the parameters V_c and f, both individually and in the interaction of the two. New microstructural studies should be done to relate a presence of graphite in the acoustic emissions, and vibrations at the moment of the machining of the sample.

KEYWORDS: Machining. Compacted graphite iron. Ceramic tool. Vibrations and Surface finish.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Ferro fundido branco (glóbulos de perlita em um fundo de cementita)	16
Figura 2	Ferro fundido cinzento do tipo hipoeutético, mostrando os constituintes perlita, ferrita e veios de grafita.	17
Figura 3	Ferro fundido mesclado.....	17
Figura 4	Ferro fundido maleável. Nódulos de grafita distribuídos em matriz ferríticas. . .	18
Figura 5	Ferro Fundido nodular com nódulos de grafita.	18
Figura 6	Ferro Fundido Vermicular.....	18
Figura 7	Matriz perlítica do ferro fundido vermicular a) 500 vezes de aumento; b) 1000 vezes de aumento.....	19
Figura 8	Resultados de usinagem de blocos de motores em linhas contínuas.....	20
Figura 9	Cabeçote de cilindro.....	21
Figura 10	Características das ferramentas de diferentes materiais.....	24
Figura 11	Formas comuns de insertos e comportamento de algumas características.	25
Figura 12	Geometrias comuns de aresta de corte de insertos.....	26
Figura 13	Geometrias comuns de aresta de corte de insertos.....	28
Figura 14	Amostra de tarugo utilizada no estudo.....	31
Figura 15	Torno modelo ROMI GL240M localizado no DMT.....	32
Figura 16	Rugosímetro marca MAHR MARSURF M300 + Rb18.....	33
Figura 17	Pastilha Cerâmica	33
Figura 18	Pontos de interação na análise de emissão acústica.....	35
Figura 19	Efeitos principais para emissão acústica.....	36
Figura 20	Pontos de interação na análise de potência.....	36
Figura 21	Efeitos principais para potência.....	37
Figura 22	Pontos de interação na análise de vibração.....	37
Figura 23	Efeitos principais para vibração.....	38
Figura 24	Pontos de interação na análise de rugosidade R_a	39
Figura 25	Efeitos principais para rugosidade R_a	39
Figura 26	Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 300\text{m/min}$, $f= 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$	40
Figura 27	Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 400\text{m/min}$, $f= 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$	40
Figura 28	Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 500\text{m/min}$, $f= 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$	41
Figura 29	Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 300\text{m/min}$, $f= 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$	41
Figura 30	Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 400\text{m/min}$, $f= 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$	42

Figura 31 Cavacos gerados com parâmetros $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	42
Figura 32 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 300\text{ m/min}$, $f = 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	43
Figura 33 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 400\text{ m/min}$, $f = 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	43
Figura 34 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 500\text{ m/min}$, $f = 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	44
Figura 35 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 300\text{ m/min}$, $f = 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	44
Figura 36 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 400\text{ m/min}$, $f = 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	45
Figura 36 Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 500\text{ m/min}$, $f = 0.3\text{mm/rot}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns.	19
Tabela 2 – Métodos de Emissão Direta.	28
Tabela 3 – Métodos de Emissão Indireta.....	28
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no trabalho.....	31
Tabela 5 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na emissão acústica do processo de usinagem.	34
Tabela 6 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na potência do processo de usinagem.	34
Tabela 7 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na vibração do processo de usinagem.	35
Tabela 8 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na rugosidade do processo de usinagem.	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	FERROS FUNDIDOS	16
2.1.1	Tipos de ferros fundidos	16
2.1.2	Ferro Fundido Vermicular	19
2.1.3	Aplicações do ferro fundido vermicular	20
2.2	USINAGEM	21
2.2.1	Torneamento	21
2.2.2	Usinagem a seco	22
2.3	FERRAMENTAS DE CORTE	23
2.3.1	Ferramentas cerâmicas	24
2.3.2	Ferramenta cerâmica à base de Alumina.....	24
2.3.3	Geometria das ferramentas	25
2.4	DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	26
2.4.1	Mecanismo de desgaste das ferramentas de corte	27
2.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	28
2.5.1	Monitoramento Direto e Indireto.....	28
2.5.1.1	Acabamento da superfície usinada	28
2.5.1.2	Vibração	29
2.5.1.3	Emissão Acústica.....	29
2.5.2	Visualização de sinais	29
2.5.2.1	Matlab.....	29
2.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	29
2.6.1	Análise variância (ANOVA).....	30
2.6.2	Minitab	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.2	Materiais Utilizados.....	32
3.2.1	Equipamentos e Ferramentas Utilizados.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	EMISSÃO ACÚSTICA, POTÊNCIA E VIBRAÇÃO	34

4.2	RUGOSIDADE	38
4.3	TIPOS E FORMAS DE CAVACO.....	40
4.4	DESGASTE DA FERRAMENTA.....	41
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O elemento químico Ferro (Fe) é o elemento com a mais rica história dentre todos da tabela periódica. Em épocas remotas, o ferro fora mais valioso que o ouro, sendo o metal mais utilizado pela nobreza. No século X a.C, o ferro passou a ser utilizado em lugar do bronze, provavelmente devido à escassez do elemento estanho (uma das matérias primas do bronze). Acompanhando essa substituição do bronze pelo ferro, o processo de carburação foi descoberto, em que consiste adição do carbono ao ferro, resultando em um produto mais resistente do que outros materiais utilizados na época. O ferro fundido levou ainda um tempo maior para ser produzido na Europa, pois, sabemos hoje, que a temperatura necessária era difícil de ser obtida. Algumas amostras foram obtidas na Suécia, tornando então esse processo logo conhecido em toda Europa. Ainda na Idade Média e até o final do século XIX muitos países europeus ainda empregavam o método do carvão vegetal na obtenção do aço (mistura entre ferro e carbono). Esse procedimento é hoje realizado em altos fornos, processo que possibilita um maior rendimento e baixa consideravelmente os custos do processo. As primeiras definições dos ferros fundidos eram baseadas em seu aspecto de fratura. Ferros cinzentos e Ferros brancos foram assim designados devido ao aspecto que suas superfícies apresentavam (acinzentada ou clara e cristalina, respectivamente). Com o avanço de formas de caracterização, neste caso, a metalografia, seguido de um aperfeiçoamento nos conhecimentos sobre metalurgia, outras classificações surgiram baseadas em suas microestruturas. Devido às aplicações em que os ferros fundidos estão sendo submetidos, esses materiais vêm sendo introduzidos nos processos de usinagem, envolvendo máquinas de alta precisão, evoluindo gradativamente esse processo. Foi durante o período da Revolução Industrial que surgiram as primeiras máquinas de usinar, deixando o processo todo mais produtivo e rápido. Os processos de usinagem apresentam importantes aplicações tecnológicas que visam conferir forma e acabamento a uma peça de acordo com a especificação do projeto. Em todo o processo de usinagem existe a formação de cavaco, que consiste em uma quantidade do material usinado retirada da peça pela ferramenta. Esse material retirado pode servir para ser estudado e gerar novas aplicações e desenvolvimento de novas tecnologias para as diferentes ferramentas de corte. Além da escolha do material constituinte da ferramenta de corte, outro ponto importante a ser considerado é a geometria da mesma. A geometria é um aspecto importantíssimo a ser avaliado antes de iniciar qualquer processo, pois com ela pode afetar diretamente aspectos como a formação do cavaco, a vida da ferramenta e também sua produtividade. Se a geometria não for a ideal para a finalidade escolhida, muitas adversidades

podem aparecer e não se obterá sucesso ao final do processo. Outra característica que deve ser avaliada na ferramenta é o seu desgaste, que impactam diretamente no processo de usinagem como um todo. Embora que seja um tema frequentemente discutido em artigos acadêmicos, congressos, etc., ainda não é considerado um assunto dominado. O complexo entendimento sobre o desgaste das ferramentas de corte ainda dificulta a aceitação de uma única teoria que possa explicar totalmente esse fenômeno. Porém, é de conhecimento geral que o desgaste envolve um conjunto de fenômenos, seja ele físico, químico e também termomecânicos. O mesmo pode ser identificado como o efeito do contato entre o material a ser usinado e o material que compões a ferramenta. Os mecanismos de desgaste mais conhecidos nas literaturas são o desgaste por abrasão mecânica, difusão, adesão, oxidação, entre outros. Alguns aspectos influenciam a ocorrência de desgastes na ferramenta, como por exemplo, a temperatura e a velocidade de corte do material. Pesquisas recentes estão demonstrando um grande interesse no desenvolvimento de novas ferramentas que possam agir na usinagem de ferros fundidos. Muitas dessas ferramentas são ferramentas cerâmicas que, devido à sua alta resistência à abrasão e dureza à quente, podem atingir resultados animadores para as equipes de pesquisas envolvidas nessa área. Ainda existem muitos desafios, porém, podem revolucionar os estudos sobre usinagem caso sejam bem sucedidas. Neste trabalho, foi utilizada a ferramenta cerâmica à base de Alumina (Al_2O_3) com adição de Óxido de Magnésio (MgO). Essa ferramenta tem uma característica importante que, devido à adição desse último elemento, inibem o crescimento de grão no material. Somando as propriedades destes dois elementos em uma pastilha cerâmica, os resultados podem ser surpreendentemente úteis e animadores para ir cada vez mais afundo no desenvolvimentos que ajudem na ciência da usinagem.

1.1 OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo aplicar uma ferramenta cerâmica à base de Alumina com adição de óxido de magnésio no torneamento do ferro fundido vermicular sem o uso de fluido de corte, analisando o desgaste da ferramenta e relacionando-o com parâmetros como potência de corte, vibração, emissão acústica e rugosidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

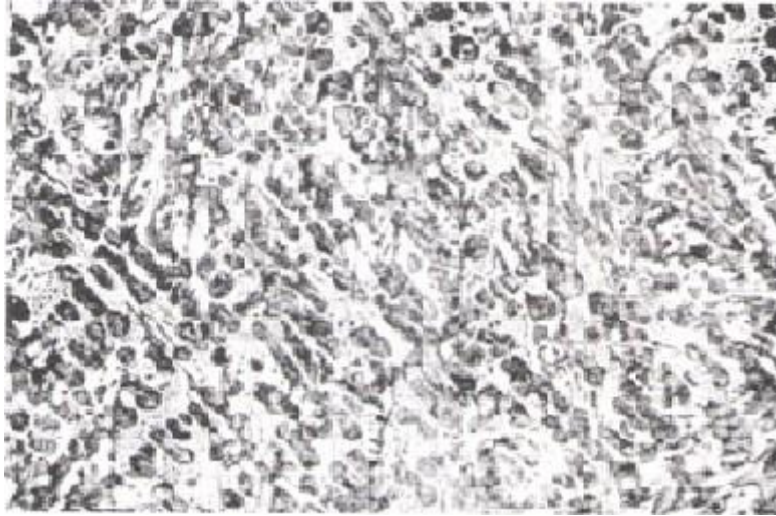
2.1 FERROS FUNDIDOS

O ferro fundido representa uma família de ligas ferrosas, geralmente consideradas como ligas a base de ferro-carbono que se solidificam através de soluções eutéicas contendo, em algumas situações, outros elementos químicos como Si, Mn, P, S (SERBINI, EDSON M., 2005). Diferem-se principalmente por seus aspectos microestruturais que são controlados pela composição química e/ou por seus processos de fabricação, variando propriedades como resistência, ductilidade e módulo de elasticidade. São fundamentalmente importantes para a indústria (TELES, J. M., 2007).

2.1.1 Tipos de ferros fundidos

Eles são classificados principalmente em seis tipos: ferro fundido branco, ferro fundido cinzento, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular. Possuem características distintas sendo utilizados em diferentes aplicações. Ferro fundido branco, apresentado na figura 1, possui uma baixa concentração de silício, portanto, o carbono se apresenta com forma de Fe_3C (cementita) em quase toda a sua estrutura. Possui uma alta dureza e uma baixa ductilidade. Sua denominação “branca”, pois apresenta essa coloração em seus pontos de fratura.

Figura 1 – Ferro fundido branco (glóbulos de perlita em um fundo de cementita)



Fonte: Adaptado de Infomet. (2017).

Na figura 2 observa-se o ferro fundido cinzento possui uma grande concentração de silício, proporcionando uma formação de carbono livre na forma de veios grafiticos. Possui uma resistência a tração variando de 100 a 400 Mpa e uma boa usinabilidade. Sua nomenclatura também se dá ao fato de possuir uma coloração cinzenta em suas regiões de fratura.

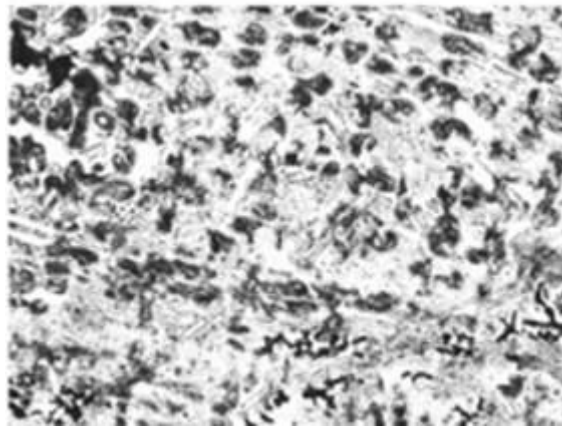
Ferro fundido mesclado, visto na figura 3, possui características dos ferros fundidos brancos e cinzentos, oriundas da solidificação. Sua coloração nos pontos de fratura é cinza-claro, indicando uma situação intermediária entre o branco e a cinza.

Figura 2 – Ferro fundido cinzento do tipo hipoeutético, mostrando os constituintes perlita, ferrita e veios de grafita.



Fonte: Adaptado de Infomet. (2017).

Figura 3 – Ferro fundido mesclado



Fonte: Adaptado de Infomet. (2017)

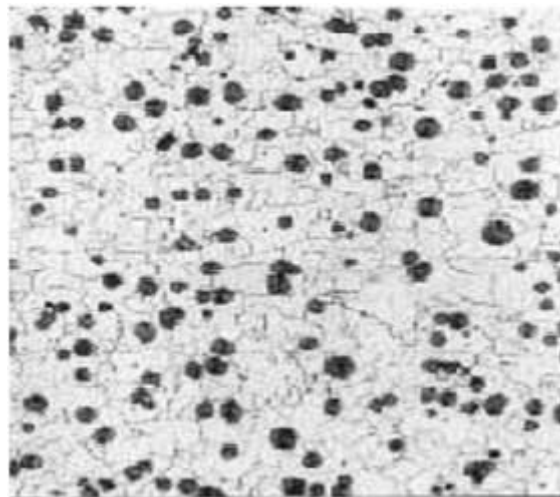
Na figura 4 se pode observar o ferro fundido maleável é obtido a partir do ferro fundido branco através do tratamento térmico de maleabilização (decomposição da cementita em grafita e austenita). Possui uma melhor usinabilidade do que os ferros brancos e cinzentos além de outros aços. São superiores também em relação à ductilidade quando comparado ao ferro cinzento.

O ferro fundido nodular, como na figura 5, tem como característica a presença de carbono livre na forma de nódulos grafiticos, que são distribuídos em matrizes ferríticas, perlíticas ou ferrítica-perlítica. Suas características mecânicas variam de acordo com suas

matrizes (ductilidade aliada com elevados limites de resistência à tração). Essa combinação de qualidades faz com que esse tipo de ferro fundido seja procurado em larga escala para a utilização em engrenagens, válvulas, carcaças, substituindo principalmente o ferro fundido cinzento e o ferro fundido maleável nessas aplicações.

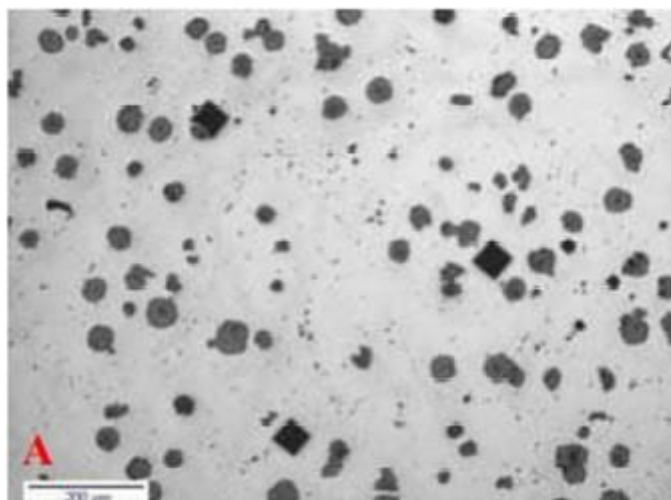
Na figura 6 está ilustrado o ferro fundido vermicular, que apresenta também carbono em forma de grafita, muitas vezes como estrias ou vermes. Essa forma vermicular é apresentada quando, em sua composição, apresenta componentes como o Mg, impedindo a formação de nódulos. Possui uma resistência mecânica maior do que o ferro fundido cinzento e uma ductilidade aceitável. Possui uma alta condutibilidade térmica podendo ser usados em elevadas temperaturas (VIDAL, DOUGLAS F., 2013).

Figura 4 – Ferro fundido maleável. Nódulos de grafita distribuídos em matriz ferríticas.



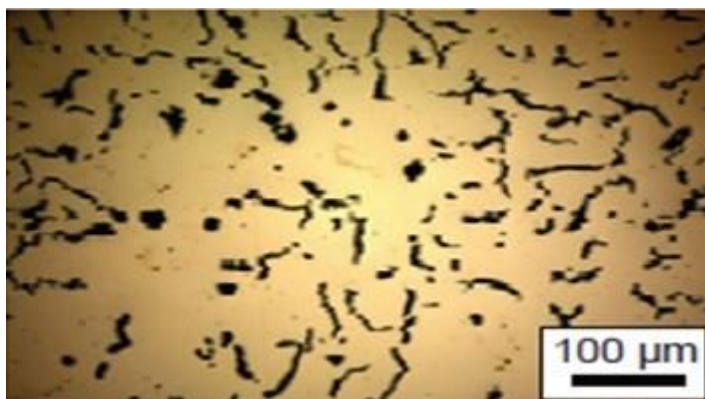
Fonte: Adaptado de Infomet. (2017)

Figura 5 – Ferro Fundido nodular com nódulos de grafita..



Fonte: Adaptado de Francklin, Alexandre R. (2009).

Figura 6 – Ferro Fundido Vermicular.



Fonte: Adaptado de Varun,N. et al (2012).

Na tabela 1, se pode observar a porcentagem de composição química de alguns elementos como, por exemplo, o carbono, silício e o enxofre, nos diferentes tipos de ferros fundidos existentes. Cada elemento adicionado pode alterar a característica do material estudado.

Tabela 1 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns

Tipo	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9 0,06-0,20	0,25-0,8	0,06-0,20	
Maleável	2,2-2,9	0,9-1,9 0,02-0,20	0,15-1,20	0,02-0,20	
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0 0,02-1,00	0,20-1,00	0,02-0,25	
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8 0,01-1,00	0,10-1,00	0,01-0,03	
Vermicular	2,5-4,0	1,0-3,0 0,01-1,00	0,20-1,00	0,01-0,03	

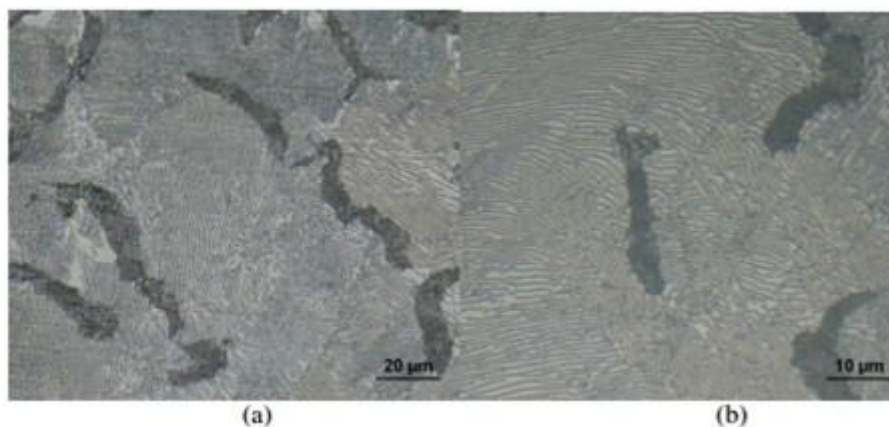
Fonte: Adaptado de Infomet. (2017)

Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular, também conhecido como CGI (Compacted Graphite Iron) se apresenta em uma matriz perlítica ou ainda ferrítico/perlítica. Durante a fabricação do ferro fundido nodular, ocorreu um erro na composição química do material, produzindo uma microestrutura aonde a grafita se apresentava em formas de vermes ao invés da forma

esférica, cuja era esperada como resultado da fabricação. Suas características, principalmente suas propriedades mecânicas só foram realmente definidas em 1965, ano em quem o CGI foi patenteado.

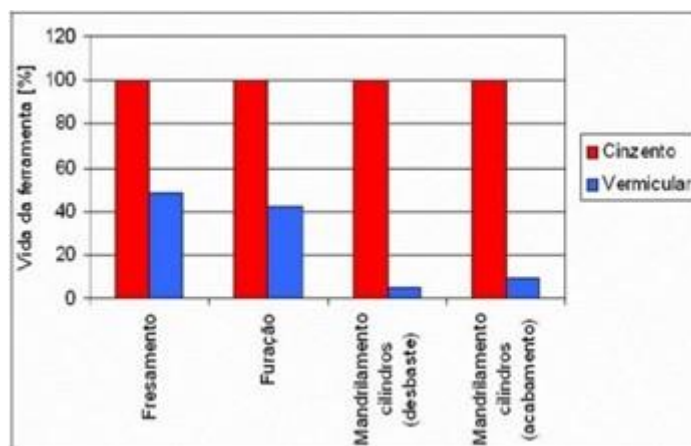
Figura 7 – Matriz perlítica do ferro fundido vermicular a) 500 vezes de aumento; b) 1000 vezes de aumento.



Fonte: Junior, E. Massirer; Guesser; W. Luiz (2011).

Muitas indústrias automotivas visam a utilização desse material devido às combinações de propriedades de outros ferros fundidos que ele apresenta. Uma mistura de propriedades térmicas do ferro fundido lamelar, por exemplo, com uma boa resistência mecânica oriunda do ferro fundido cinzento. Quando o assunto a se tratar é a usinabilidade do CGI, o mesmo deixa a desejar, pois possui uma baixa usinabilidade comparado ao ferro fundido cinzento. Essa baixa usinabilidade é a principal restrição na utilização do CGI para uma produção em grande escala. (V. V. de Oliveira, P. A. de C. Beltrão, G. Pintaude. 2010). As primeiras tentativas de usinagem do CGI foram blocos de motores nos quais foram utilizadas as mesmas tecnologias usadas no ferro fundido cinzento. O resultado foi uma diferença enorme entre o rendimento e o número de peças usinadas. Quando a operação foi de furação, a vida da ferramenta na usinagem do CGI foi apenas quarenta por cento do valor alcançado na furação do ferro fundido cinzento, como visto na figura 8 (JUNIOR; GUESSER, 2011).

Figura 8 – Resultados de usinagem de blocos de motores em linhas contínuas.



Fonte: Junior, E. Massirer; Guesser; W. Luiz. (2011).

2.1.2 Aplicações do ferro fundido vermicular

Seguindo o conhecimento de PAIVA (2009), as aplicações do ferro fundido vermicular são consideradas amplas, devido às suas características específicas que, quando comparadas a outros materiais, apresentam vantagens tanto economicamente quanto tecnologicamente. Comparando o ferro fundido vermicular com outros tipos de ferro fundido por exemplo o ferro fundido cinzento e o nodular, o vermicular também apresenta vantagens econômicas. Muito utilizado na indústria, o ferro fundido vermicular tem como exemplo de aplicações:

- Lingoteiras (com uma vida até 70 por cento maior comparado ao cinzento);
- Bloco de motores;
- Cabeçote de motores;
- Discos de freio;
- Tubos;
- Pistões;
- Engrenagens.

A justificativa de o ferro fundido vermicular aparecer como um bom substituto para aplicações de motores, por exemplo, é que além de possuir propriedades de condutividade e de amortecimento semelhantes ao cinzento, tem propriedades mecânicas superiores, permitindo a fabricação de motores de melhor desempenho e menor peso.

Figura 9 – Cabeçote de cilindro.



Fonte: Tupy (2014).

2.2 USINAGEM

A usinagem compreende o processo de desbaste mecânico que visa dar forma a uma peça, seja ela metálica ou não, esse material chamamos de matéria-prima, cujo nome nas indústrias pode ser trocado por matéria bruta. Usinagem é a operação que gera cavaco após a obtenção de forma, dimensão e acabamento, sendo esse cavaco uma quantidade do material retirado da peça pela ferramenta que apresenta uma forma geométrica irregular (MACHADO et al.,2009). Esse processo, de acordo com Childs et al.(2000), é o mais aplicado na indústria mecânica para a obtenção de peças metálicas. Isso porque, é o processo em que se pode obter a peça final de diversas formas e também por causa de sua precisão dimensional, podendo ser alterada de acordo com as necessidades.

2.2.1 Torneamento

Torneamento é um dos processos mecânicos de usinagem mais utilizados. Ele é o processo em que se fabricam peças de diferentes dimensões e geometrias. Trata-se de um processo onde se obtém superfícies de revolução por meio de uma ferramenta de corte (ASM METALS HANDBOOK, 1989). Para isso ocorrer, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina enquanto a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar como eixo referido. Existem várias operações possíveis de se realizar em um torno. Adaptado de Cervini (2009), encontramos:

- Faceamento: O movimento do avanço da ferramenta se dá no sentido normal ao eixo de rotação da peça;
- Sangramento: Movimento no mesmo sentido que o faceamento, porém é utilizado para

separar o material de uma peça;

- Torneamento longitudinal: Também conhecido como cilindragem, onde se obtém uma peça, de formato cilíndrico, coaxial ao centro de rotação. Nessa operação há a diminuição do diâmetro da peça;
- Torneamento de rosca: Como o nome indica, é o método mais usado para produzir roscas. Podem ser roscas internas ou externas, com diferentes padrões;
- Recartilamento: A peça que é submetida a essa operação, tem como resultado em sua superfície uma série de estrias. A ferramenta penetra o material mediante grande pressão.

Em relação à trajetória, o torneamento pode ser dividido em dois: Torneamento retilíneo e torneamento curvilíneo. Os mesmos podem ser subdivididos, segundo Ferraresi (1970):

- Torneamento Retilíneo: É o processo no qual a ferramenta se desloca a partir de uma trajetória retilínea.;
- Torneamento Cilíndrico: A ferramenta se desloca em uma trajetória paralela ao eixo principal. Pode ser interno ou externo;
- Torneamento Cônico: A ferramenta se desloca em uma trajetória inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina;
- Torneamento Radial: A ferramenta se desloca em uma trajetória perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina;
- Perfilamento: A ferramenta segue uma trajetória radial ou axial, visando a obtenção de uma forma definida, determinado previamente pelo perfil da máquina;
- Torneamento Curvilíneo: É o processo no qual a ferramenta se desloca a partir de uma trajetória curvilínea. Quanto à finalidade do mesmo, ainda podem ser classificados como torneamento de desbaste (precede o acabamento) ou torneamento de acabamento (obter dimensões finais na peça);

Como o processo de torneamento transforma a geometria de um material ou reduz o diâmetro de uma peça, por exemplo, existe a remoção de certa quantidade de material, diminuindo a quantidade do mesmo em relação à sua composição antes da peça ser submetida ao processo. Isso é calculado e chamado de TRM (taxa de remoção do material), onde se mede a taxa de volume de material removida por unidade de tempo ($TRM = A_p \times V_c \times f$).

2.2.2 Usinagem a seco

A utilização de fluido de corte já é conhecida há muito tempo na usinagem de materiais. Eles foram introduzidos na usinagem para potencializar a produtividade, se tornando essenciais na obtenção de peças com alta qualidade. São ditas como suas funções principais a redução da geração de calor agindo no atrito entre a ferramenta e o cavaco minimizando os esforços de corte, atuar como líquido lubrificante, dando um melhor acabamento para a superfície do material e também transportar o cavaco para fora da região de corte. (TELES,2007). Existem alguns fatores que influenciam na escolha de uma usinagem com a ausência de fluidos de corte. Os principais motivos que levam à essa escolha são:

- Reduzir significativamente os custos causados pela compra dos fluidos;
- Evitar preocupações com sua destinação final, pois descartes indevidos podem refletir em problemas ambientais com emissão de poluentes na água, solo e ar. (ZEILMANN,2008);

Porém, não é somente sobre a ausência de fluido de corte que a usinagem a seco se trata. Além disso, é necessário um estudo de todo processo produtivo para ter certeza de que as condições obtidas dos processos são viáveis para as devidas aplicações.

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

No processo de usinabilidade de um material, a função da ferramenta é retirar material da peça usinada até que ela se transforme no objetivo final (levando em consideração tamanho, espessura e geometria pré-definidas antes do processo de usinagem). Para isso, a ferramenta de corte deve ter uma maior dureza do que o material a ser usinado. Temos que ressaltar que uma ferramenta de corte tem uma vida útil limitada, sendo definida como o tempo em que a mesma trabalha até perder sua função, ou seja, sua capacidade de corte (BORNHOLD et al., 2011). As ferramentas de corte devem ser sucintamente analisadas antes de serem escolhidas para participarem do processo de usinagem. Segundo Ferraresi (1970), o desgaste da ferramenta de corte se deve a mais de um fator, como por exemplo, a remoção de cavacos, a velocidade de corte, o material utilizado para a criação dessa ferramenta, a dureza do material a ser usinado, entre outros. Existem diversos tipos de materiais usados como ferramentas de corte para usinagem. Dentre vários podemos citar:

- Aço-ferramenta: Sua utilização ainda se dá devido ao custo do material. Porém, perde

sua dureza quando submetido a altas temperaturas (superior a 250°C);

- Aço-rápido: A temperatura deste material tem limite entre 520°C e 600°C. Quando feito de Cobalto, é denominado aço superrápido;

- Metal Duro: Sua característica principal é a elevada dureza e elevada resistência ao desgaste.

- Ligas Fundidas: A partir da composição de Tungstênio, Vanádio e Cromo. Possui elevada resistência a quente (trabalha entre 700°C e 800°C) e possui uma qualidade intermediária entre aço rápido e metal duro;

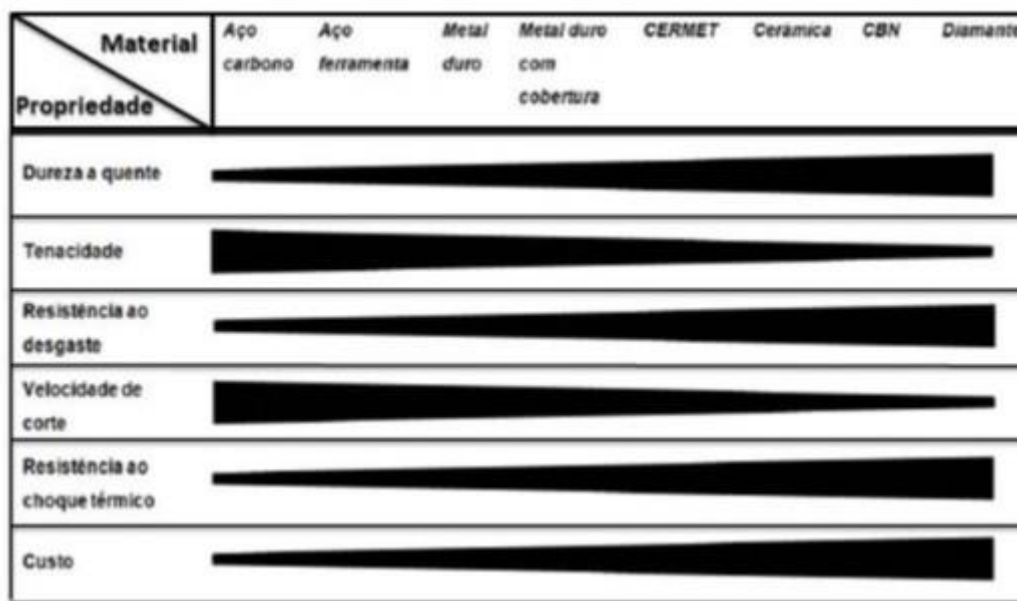
- Cermet: Trata-se de um composto formado por metal e cerâmica. O Cermet é à base de titânio. Possui uma boa resistência à corrosão, resistência a altas temperaturas e elevada estabilidade química (oriunda do material cerâmico);

- Cerâmica: Alta dureza à quente é sua principal característica (1600°C). Além disso, a não reação química, uma maior vida útil, uma alta velocidade de corte são alguns das vantagens dessas ferramentas. A cerâmica deve ser usada em usinagem a seco para evitar choques térmicos;

- Diamante: São os materiais que apresentam maior dureza, empregados normalmente em usinagem de ligas de metais, latão, bronze, borracha, vidro, plástico, entre outros. É altamente recomendado, também, para usinagem onde são exigidas ferramentas com alta dureza, como furação de poços de petróleo, por exemplo.

A figura 10 mostra algumas características das ferramentas em relação aos materiais que elas são compostas.

Figura 10 – Características das ferramentas de diferentes materiais.



Fonte: Cervelin (2009).

2.3.1 Ferramentas cerâmicas

Segundo Machado (2009), as ferramentas de corte cerâmicas são empregadas desde o início do século XX, porém foi somente em meados de 1950 que ferramentas à base de Al_2O_3 entraram no mercado. Esse material é procurado como ferramenta de corte principalmente para a usinagem de materiais altamente endurecidos e de superligas. Como ferramenta de corte, as cerâmicas apresentam qualidades como alta dureza a quente, permitindo altas velocidades de cortes; elevada estabilidade química, não havendo oxidações; alta resistência à compressão e baixo coeficiente de atrito. Já as desvantagens de se utilizar a ferramenta de corte com material cerâmico são alta fragilidade e também uma baixa condutibilidade térmica (XAVIER, 2013). Com o passar dos anos, diversas pesquisas são feitas para desenvolver novas tecnologias e melhorias para as ferramentas cerâmicas de corte. Hoje em dia as ferramentas mais utilizadas são ferramentas à base de Al_2O_3 , $Al_2O_3 + TiC$, CBN, entre outras. Segundo Sousa, (2013), a que mais está em destaque é a Al_2O_3 , para usinagem de ferros fundidos.

2.3.2 Ferramenta cerâmica à base de Alumina

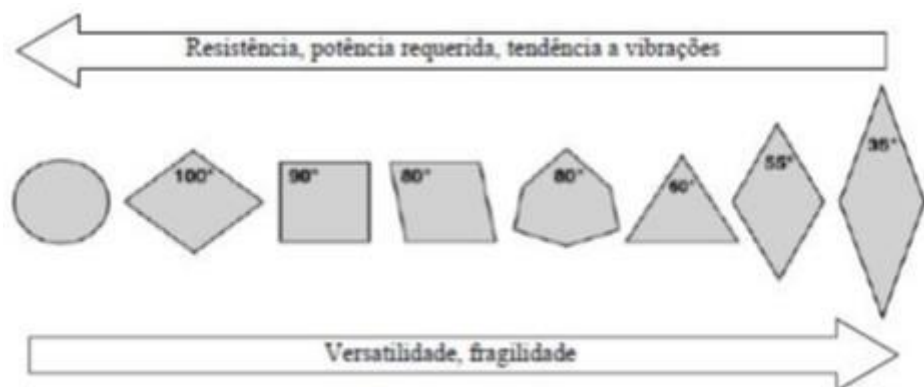
Este é o material cerâmico mais utilizado na prática de usinagem. Ferramentas à base de

Alumina tem alta resistência à abrasão e dureza à quente. Esse material também é quimicamente mais estável do que alguns aços rápidos. Essas características fazem com que eles possuam uma menor tendência de aderir durante o processamento de metais e também uma menor tendência de formar uma aresta postiça. O resultado disso é um bom acabamento superficial e uma alta precisão dimensional em aços de usinagem (SOUSA, 2013). Uma grande desvantagem deste material é sua baixa condutividade térmica, pois isso o torna susceptível ao choque térmico, que, em altas velocidades de corte se tornam cada vez mais ocorrentes. Uma ação comum nos dias de hoje é acrescentar MgO para inibir o crescimento do grão. Outros elementos são adicionados para elevar a resistência mecânica, como por exemplo, óxido de cromo, níquel e titânio. São bastante utilizados por apresentarem alta dureza e estabilidade química (SANTOS, 2007). As cerâmicas mistas além de serem mais duras e mais resistentes ao choque térmico também podem manter a sua maior dureza em altas temperaturas, tornando-se mais úteis na usinagem de aços mais duros e de ferro fundido. Pesquisas sobre esses materiais à base de alumina são primeiramente focadas na adição de uma ou mais fases de reforço para melhorar suas propriedades mecânicas. Fases de reforço podem ser, por exemplo, TiC, TiN, TiB₂, as partículas de SiC, whiskers SiC, B₄C, ZrO₂, WC, (W, Ti) C, de Ti (C, N), Cr₃C₂, CBN, SiCp, SiCw, entre outros (SOUSA, 2013).

2.3.3 Geometria das ferramentas

Existem duas definições para ferramentas de corte. Monocortante – quando exibem apenas uma aresta de corte – ou multicortante – apresentando mais de uma aresta. Segundo Rodrigues (2005), a geometria é uma variável muito importante na usinagem de materiais. Dentro da geometria há diversos elementos que podem ser variados para aperfeiçoar o desempenho da ferramenta, por exemplo, o raio de ponta, o ângulo de folga, quebra cavaco, entre outros. Existem também diversas formas de insertos. A aresta de corte de insertos pode apresentar variações como exemplificadas nas figuras 11 e 12.

Figura 11 – Formas comuns de insertos e comportamento de algumas características.



Fonte: Groover (2002).

O ângulo de saída impacta na potência e força de corte, no acabamento superficial e no calor produzido. Segundo Rodrigues (2005), ângulos de saída muito positivos diminuem a energia de corte e a geração de calor. O ângulo de inclinação tem a finalidade de tanto como controlar a direção de saída do cavaco quanto proteger a aresta da ferramenta contra impactos, diminuindo assim a vibração gerada pelo processo de usinagem. Já o ângulo de posição tem a função de distribuir as tensões de corte e contribuir para a diminuição de ruídos de vibração. Diversos estudos sobre otimização de geometria de corte estão sendo realizados, principalmente em operações de fresamento, torneamento e furação. Uma simples alteração na aresta cortante pode elevar a resistência do material da ferramenta de corte, aumentando a vida útil e o acabamento superficial. Segundo Darvim (2008), existem variáveis que podem ser afetadas drasticamente pela geometria de corte da ferramenta. A formação de cavaco, produtividade da usinagem, direção de forças de corte, a vida da ferramenta e a qualidade final do processo são fatores suscetíveis à variação. Ultimamente, os fabricantes de ferramentas tem preparado a aresta de corte implantando três pequenas alterações, que são elas: raio da aresta, chanfro de aresta e aresta chanfrada com raio. A característica primária do raio de aresta é aumentar a resistência mecânica da própria aresta de corte, variando de centésimos a décimos de milímetros. Este tipo de geometria gera micro alterações estruturais, dependendo do material e da dimensão do raio, na superfície da peça conhecida como camada branca e chega a produzir maiores tensões residuais de compressão, aderentes à integridade superficial do componente trabalhado. O chanfro de aresta constitui outro elemento de suma importância para a geometria, visto que afeta diretamente o fortalecimento da aresta, diminuindo as

ocorrências de falha prematura, melhora na distribuição de tensão e eficácia da dissipação de calor. (RODRIGUES, 2005).

Figura 12 – Geometrias comuns de aresta de corte de insertos.



Fonte: Groover (2002).

2.4 DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Os esforços mecânicos como, por exemplo, atritos de peça com ferramenta, cavaco e ferramenta, e vibrações do conjunto máquina – ferramenta acarreta em uma série de desgastes, que resultam em uma diminuição da vida da ferramenta, podendo ser por lascamento da aresta ou quebra da ferramenta de corte (CORRÊA, 1996). Existem basicamente dois grupos de falhas em ferramentas de corte: As falhas contínuas que são geradas a partir do desgaste do flanco e de cratera de ferramenta. E as falhas aleatórias que são relacionadas a diversas razões como, por exemplo, choque mecânico e/ou térmico, variações no material da peça, etc. (WEINGAERTNER, 2002). A identificação da causa da falha é de difícil visibilidade, visto que além desses grupos de falhas citadas, existem mecanismos de desgastes simples como abrasão, adesão, difusão, entre outros que podem realizar uma interação com os outros grupos. O processo de desgaste da ferramenta de corte, geralmente ocorre em combinação com o modo dominante de desgaste, dependendo das condições de usinagem, do material da peça e também da geometria da ferramenta (DIMLA, 2000; DEVILLEZ et al., 2003). As propriedades do material dificilmente irão satisfazer todas as necessidades e condições fornecidas aos mesmos. Neste caso, revestimentos ajudam a elevar a dureza superficial de uma ferramenta, diminuindo assim o desgaste abrasivo. O revestimento impede, através de uma barreira química, a interação entre o material da peça e o material da ferramenta, reduzindo o desgaste da mesma. A maioria dos revestimentos possui

uma alta lubricidade, fator que é responsável em reduzir o atrito entre ferramenta e peça, reduzindo também a temperatura de corte (GU et al., 1999). Os mecanismos de desgaste são influenciados pelo revestimento, pois os mesmos retardam o desgaste de cratera e de flanco em ferramentas com menor resistência ao desgaste. Os modos de desgaste mudam com a composição do conjunto ferramenta-peça e geometria da aresta de corte em resposta às solicitações térmicas e mecânicas provocadas pelos fatores impostos pela velocidade de corte e avanço, bem como de outros parâmetros da geometria de corte.

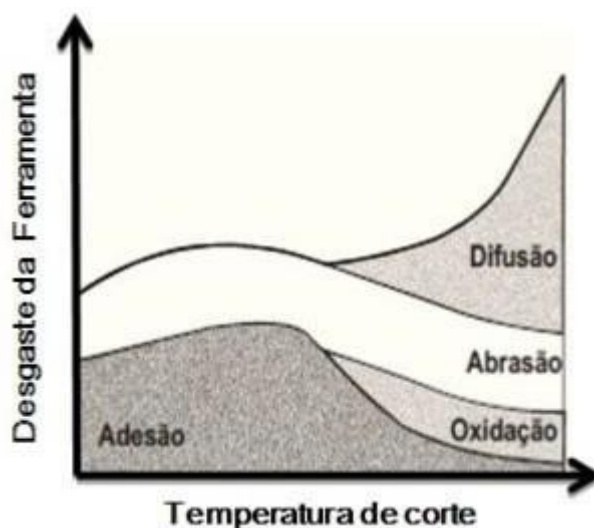
2.4.1 Mecanismo de desgaste das ferramentas de corte

Entre os diversos mecanismos de desgaste os mais comuns são desgastes por abrasão mecânica, difusão, oxidação, adesão, lascamento, entre outros. O desgaste por abrasão é considerado um dos principais, pois é influenciado da temperatura que causa diminuição da dureza da ferramenta. Em materiais para ferramenta de corte, a resistência à abrasão possui uma relação muito forte com a dureza dos mesmos. Essa abrasão pode ocasionar desgastes de flanco. Estes por sua vez, levam a deterioração da superfície da peça, alterando também a dimensão da mesma (SANDVIK, 2005). O desgaste por difusão ocorre por causa da elevada temperatura na região de ação (corte entre o cavaco e a ferramenta). Já o desgaste por adesão acontece pela aderência do material da peça sobre a ferramenta. Este mecanismo de aderência ajuda na formação da aresta de corte, porém, essa aresta não necessariamente aparece em todas as situações onde ocorre o desgaste por adesão (DINIZ et al., 2000). Existe outro desgaste, o desgaste de cratera que, ainda segundo Diniz et al. (2006), ocorre pelo atrito entre ferramenta e o cavaco na superfície de saída da ferramenta. Geralmente esse tipo de desgaste não é encontrado nos processos de torneamento, visto que é resultado típico de material usinado, da geometria do cavaco, parâmetros de corte, tipo de ferramenta, etc. O aumento progressivo do desgaste de cratera acarreta na quebra da ferramenta. Outro tipo muito comum de desgaste de ferramenta é o lascamento, onde ocorre a retirada brusca de partículas maiores. Este tipo ocorre geralmente em materiais mais frágeis ou quando não existe quase reforço na aresta da ferramenta. (DINIZ et al., 2000). Todos os mecanismos citados são muito dependentes da temperatura de corte ou também de algum parâmetro que possa influenciar, por exemplo, a velocidade de corte da peça. Quando se trata de temperaturas mais amenas, desgastes por abrasão e adesão são os principais a serem considerados. Na figura 13 se pode observar os tipos de desgaste em função da temperatura, que é fator crucial para o desgaste total da ferramenta.

Outro mecanismo de falha em ferramentas de corte é o desgaste por deformação plástica

da aresta de corte. A deformação plástica da aresta de corte tende a ocorrer nas velocidades mais altas e em materiais de maior dificuldade de usinagem. Em materiais cerâmicos usados como ferramenta de corte, a causa determinante da falha antecipada da ferramenta é devido a essa deformação plástica. Mudanças nos ângulos de saída e de folga de ferramenta são normais quando ocorre esse tipo de deformação, resultando em uma aceleração da taxa de desgaste da ferramenta. No estágio final da deformação plástica, se pode visualizar lascamentos e quebra de aresta de corte (ASTAKHOV, 2006).

Figura 13 – Geometrias comuns de aresta de corte de insertos.



Fonte: Adaptado de Komanduri (1997).

2.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

2.5.1 Monitoramento Direto e Indireto

Existem dois tipos de monitoramento do processo de usinagem, sendo independente ou dependente do tempo de execução. O primeiro método é chamado de método direto, onde o processo é interrompido e os valores então quantificados. O segundo é classificado como método indireto, onde o monitoramento é realizado durante a execução do processo, avaliando uma grandeza física que pode ser correlacionada com o desgaste de uma ferramenta, por exemplo. As tabelas 2 e 3 mostram os principais tipos de monitoramento, o tipo de medição que é realizada e qual sensor/transdutor utilizado na mesma:

Tabela 2 – Métodos de emissão direta

Procedimento	Medição	Transdutor/Sensor
Óptico	Contorno ou posição da aresta de corte;	Sensor de fibra óptica
Tamanho da peça	Dimensão da peça	Micrômetros; Ultrassom

fonte: Adaptado de (SOUZA, 2015).

Tabela 3 – Métodos de emissão indireta

Procedimento	Medição	Transdutor/Sensor
Emissão Acústica	Ondas de formação plástica;	Transdutor piezelétrico
Vibração	Oscilações da ferramenta e/ou suporte	Acelerômetro piezelétrico
Potência	Potência consumida no motor (avanço)	Amperímetro; Sensor

fonte: Adaptado de (SOUZA, 2015).

2.5.1.1 Acabamento da superfície usinada

Segundo SOUZA (2015), o acabamento da superfície gerada é medido, em geral, indiretamente com o auxílio de um Rugosímetro. Existem diversos parâmetros de usinagem que podem ser utilizados, porém os mais vistos em literaturas são a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t), onde representam, respectivamente, a média aritmética dos valores obtidos dentro de um certo comprimento L de medição e a soma do pico mais alto e do vale mais profundo em um comprimento de medição L .

2.5.1.2 Vibração

Durante um processo de usinagem, vibrações são obtidas devido ao atrito entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça usinada. É possível que existam alterações na frequência e na intensidade dessas vibrações resultantes do tempo de corte e do desgaste da ferramenta. Um exemplo é quando ocorre uma avaria, um pico de sinal RMS é detectado em um intervalo de tempo (SOUZA, 2015).

2.5.1.3 Emissão Acústica

Emissão Acústica (EA) ocorre quando grande quantidade de energia de deformação é liberada dentro do material, gerando tensões elásticas. Isso é o resultado de rearranjos dentro da estrutura cristalina, como por exemplo, deslizamento da fronteira de grãos, movimento de discordâncias e fraturas. Esses sinais são convertidos, em geral, por transdutores piezelétricos. Dados experimentais revelam que a emissão acústica depende do material que está sendo usinado, pois os materiais possuem resistências ao cisalhamento diferentes. Um dos maiores problemas na aplicação da emissão acústica é a interpretação e análise dos sinais emitidos. Um sinal pode conter muitas frequências, e não pode ser explicitamente descrito por relações matemáticas (KANNATEY-ASIBU, et al., 1981).

2.5.2 Visualização de sinais

Após realizar o processo de usinagem e coletar dados de potência, vibração e emissão acústica através dos transdutores, foi necessário realizar a visualização dos sinais emitidos em todo o processo. Existem alguns softwares responsáveis por fazer essa visualização, auxiliando, facilitando e reduzindo erros nas coletas realizadas.

2.5.2.1 Matlab

O MATLAB é um software onde é possível processar sinais, em um intervalo pré-determinado. Nele é possível enxergar, a partir de um número N de amostras, tanto a média dos valores dos parâmetros, quanto os valores máximos de cada um. Ele atua em na linguagem MATLAB, permite a resolução de muitos problemas como processamento de sinais, construção de gráficos, cálculo numérico, entre outras funções. Uma outra vantagem de utilizar o MATLAB é que ele dispensa uso de itens como alocação de memória, variáveis, utilização de ponteiros, etc.

2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Análises estatísticas são, basicamente, utilizadas para a coleta, interpretação e análise de dados para melhor compreender as situações de onde foram retirados. Na usinagem as análises estatísticas são comuns quanto se trata de parâmetros de medições como potência,

vibrações e emissão acústica, velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Uma das funções dessas análises é entender como esses parâmetros trabalham, se há interações entre eles ou se são influentes em resultados.

2.6.1 Análise variância (ANOVA)

A análise de variância avalia a importância de um ou mais fatores, comparando média de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. A ANOVA trabalha com hipóteses. Uma vez que o seu valor crítico p associado à estatística for menor que o nível de significância previamente determinado, pode-se concluir que a hipótese está rejeitada. A ANOVA é muito importante quando se trata de usinagem, pois se aplica a mesma à fim de entender quão significante são os parâmetros e as interações entre os mesmos.

2.6.2 Minitab

O MINITAB é um software utilizado para fins estatísticos, onde, ao introduzir os dados coletados e os parâmetros que se quer analisar, podem-se retirar muitas informações estatísticas, como por exemplo, análises de variância, podendo plotar gráficos de efeitos principais como também gráfico de interações entre parâmetros. Na engenharia, mais especificamente em usinagem, esses gráficos realizados pelo software tem uma grande importância para demonstrar os sinais que foram coletados durante o processo e visualizados em softwares que realizam esse tipo de transformação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizou-se o processo de usinagem por torneamento cilíndrico com o ferro fundido vermicular. Foi utilizada uma amostra em formato de tarugo e, o corpo de prova da mesma possuía 295 mm de comprimento e 89 mm de diâmetro, conforme mostra a figura 14:

Figura 14 – Amostra de tarugo utilizada no estudo.



Fonte: Autor

O cilindro foi dividido em quatro seções, cada uma com 73,75mm. Como foi feito seis parâmetros diferentes com duplicata, cada seção foi usinada 3 vezes. Os ensaios foram realizados com pastilhas cerâmicas à base de alumina (Al_2O_3) com adição de óxido de magnésio (MgO). O processo foi realizado em seis parâmetros distintos descritos na tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no trabalho

Tipo de Parâmetro	Vc (m/min)	F (mm/rot)	Ap (mm)
1	300	0,2	0,5
2	400	0,2	0,5
3	500	0,2	0,5
4	300	0,3	0,5
5	400	0,3	0,5
6	500	0,3	0,5

Fonte: Autor.

Através de estudos da literatura de ferramentas cerâmicas, é de conhecimento que esse material deve ser usado em altas velocidades. Isso explica, de fato, a escolha dos parâmetros de corte iniciais para este trabalho. Após cada etapa de usinagem, com seus respectivos parâmetros, o cavaco foi coletado para uma análise posterior sobre o comportamento dos mesmos. Cada aresta da ferramenta cerâmica foi utilizada uma única vez e identificada para que a análise de desgaste da mesma seja feita de acordo com o parâmetro de análise. Devido às características do material cerâmico, os procedimentos mencionados na tabela um foram realizados em condições a seco, ou seja, sem o uso de fluido de corte. Após a usinagem do material, foi avaliada a rugosidade do mesmo, através de três medições de cada parâmetro para cálculo da rugosidade Ra (μm) e três medições para o cálculo da rugosidade Rt (μm). Entre cada medição a amostra era rotacionada em 120° para obter a rugosidade a partir da superfície ainda não avaliada. Utilizando programas digitais (Matlab e Minitab), foi possível fazer análises sobre as influências no processo de usinagem através da potência, vibração e emissão acústica na hora em que a ferramenta entrava em contato com a amostra.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Equipamentos e Ferramentas Utilizados

Na figura 15 pode-se observar o centro de torneamento utilizado na usinagem do ferro fundido vermicular. Este centro de torneamento está localizado no departamento de materiais e tecnologia na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP)

Figura 15 – Torno modelo ROMI GL240M localizado no DMT



Fonte: Autor

Lupa Zeiss utilizado para a posterior análise das condições finais da ferramenta e dos cavacos originados no processo. Na figura 16 está ilustrado o Rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18 usado para análise da rugosidade da superfície da amostra usinada

Ferramentas de corte cerâmica a base de alumina (Al_2O_3) com adição de MgO (como observado na figura 17), obtidas pela nossa equipe de pesquisa. São ferramentas de forma cúbica onde apresentam alta dureza e resistência à abrasão.

Figura 16 – Rugosímetro marca MAHR MARSURF M300 + Rb18



Fonte: Autor

Figura 17 – Pastilha Cerâmica



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EMISSÃO ACÚSTICA, POTÊNCIA E VIBRAÇÃO

Durante a usinagem do ferro fundido vermicular com a ferramenta cerâmica de Alumina com adição de Óxido de Magnésio, foram medidas a potência, vibração e emissões acústicas resultantes do processo de usinagem. Após a filtragem, eliminação de pontos considerados não consequentes do contato amostra-ferramenta, foram criados gráficos através dos softwares Minitab e Matlab, e, com o auxílio de análises estatísticas, observou-se a influência destes parâmetros nas análises do desgaste da ferramenta. A Tabela 5 mostra a análise estatística de variância com valor crítico (alfa) de 5%, da influência dos parâmetros V_c e f para a emissão acústica encontrada. Percebe-se que há influência dos parâmetros tanto individualmente quanto em uma interação entre ambos.

Tabela 5 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na emissão acústica do processo de usinagem

Fonte		DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo		5	0,000352	0,00007	10,14	0,007
	Linear	3	0,000276	0,00092	13,23	0,005
	V_c	2	0,000165	0,000165	23,79	0,003
	f	1	0,00011	0,00005	7,95	0,021
2 - Interações		2	0,000077	0,000038	5,51	0,044
	V_c*f	2	0,000077	0,000038	5,51	0,044
	Erro	6	0,000042	0,000007		
	Total	11	0,00394			

fonte: Autor.

A tabela 6 mostra a análise estatística de variância com valor crítico de 5%, da influência dos parâmetros V_c e f para a potência encontrada. Percebe-se que não há influência dos parâmetros individualmente e também influência quando analisada uma interação entre a velocidade de corte e o avanço.

Tabela 6 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na potência do processo de usinagem.

Fonte			DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo		5	1225400	245080	1,67	0,273	
	Linear		3	1208875	402958	1,67	0,135
		V_c	2	954469	477235	3,26	0,11
		f	1	254406	254406	1,74	0,236
2 - Interações			2	16524	8262	0,06	0,946
		V_c*f	2	16524	8262	0,06	0,946
	Erro		6	878862	146477		
	Total		11	2104262			

Fonte: Autor

A Tabela 7 mostra a análise estatística de variância com valor crítico de 5%, da influência dos parâmetros V_c e f para a vibração encontrada. Percebe-se que há influência dos parâmetros tanto individualmente quanto em uma interação entre ambos.

Tabela 7 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na vibração do processo de usinagem.

Fonte			DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo			5	83,85	16,67	15,25	0,002
	Linear		3	65,017	21,672	19,82	0,002
		V_c	2	49,675	24,837	22,72	0,002
		f	1	15,342	15,342	14,03	0,01
2 - Interações			2	18,333	9,166	8,38	0,018
		V_c*f	2	18,333	9,166	8,38	0,018
	Erro		6	6,561	1,093		
	Total		11	89,911			

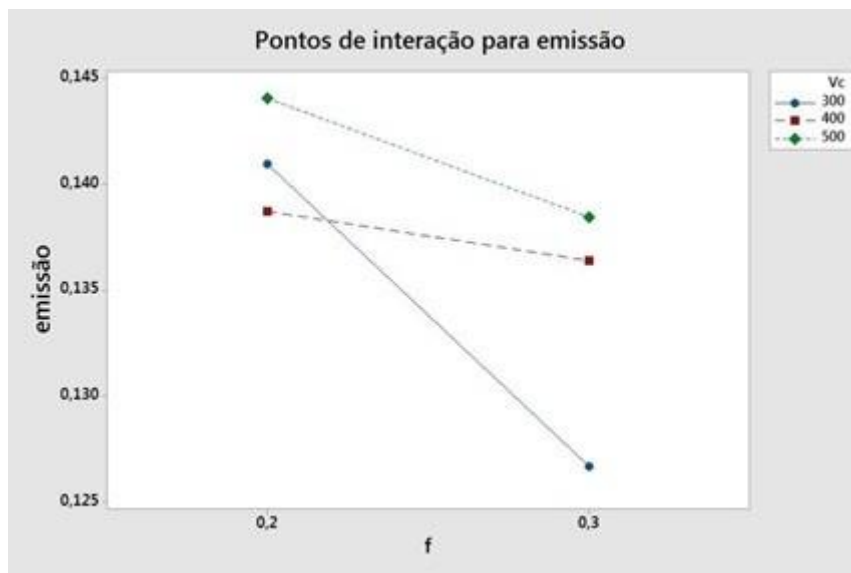
Fonte: Autor

Para obter os resultados dos três parâmetros observados nesse trabalho, uma taxa de aquisição de dados foi definida. Em cada lado da ferramenta utilizado para a usinagem, foram

recolhidos mais de quatro mil pontos para detectar os parâmetros de vibração, potência e emissão acústica. Após isso, uma plotagem foi realizada gerando gráficos desses três parâmetros para cada amostra.

A figura 18 mostra a interação dos parâmetros de velocidade de corte utilizados para gerar a emissão acústica nos ensaios, comparando-as com o avanço utilizado em cada momento da usinagem. Percebe-se que houve uma alta variância na emissão acústica quando se alterou o avanço f utilizado quando a V_c era 300m/min. Considerando que o quanto maior o avanço, menor a emissão acústica, conclui-se que essa análise segue o padrão e que, o alto valor de emissão acústica para $f = 0,2$ mm/rot deve-se à uma reestruturação do arranjo cristalino do material usinado.

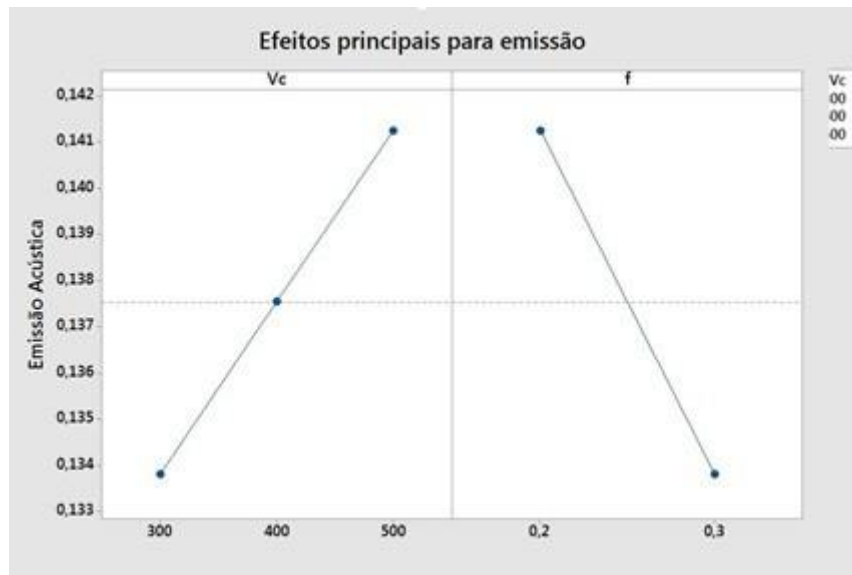
Figura 18 – Pontos de interação na análise de emissão acústica.



Fonte: Minitab (2017).

Um outro gráfico foi plotado, exibido abaixo na figura 19, onde pode ser observado os efeitos principais que cada parâmetro teve no resultado de emissão acústica recolhido. Observa-se que, o ensaio segue a literatura, mostrando que quanto maior a velocidade de corte (V_c), maior a emissão acústica. O inverso se encontra para o avanço (f).

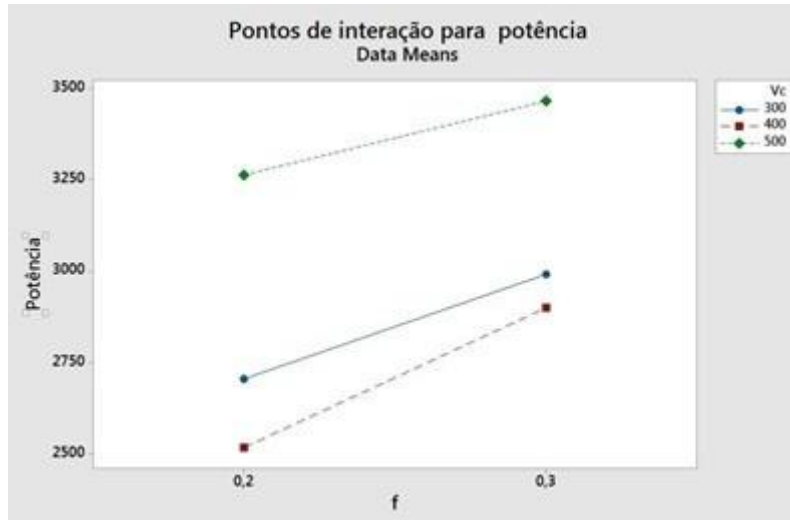
Figura 19 – Efeitos principais para emissão acústica.



Fonte: Minitab (2017).

A figura 20 mostra a interação dos parâmetros de velocidade de corte utilizados para gerar a potência nos ensaios, comparando-as com o avanço utilizado em cada momento da usinagem. Percebe-se que nos três parâmetros de velocidade utilizados, o maior avanço gerou a maior potência, seguindo a literatura. Porém, as potências encontradas utilizando a Vc 400m/min foram inferiores que as encontradas com Vc= 300m/min. Isso deve ser estudado mais a fundo pois é provável que alguma interferência pode ter causado tal evento, como por exemplo, alguma parte do material usinado que possuía uma maior dureza, exigindo uma demanda maior de potência do torno.

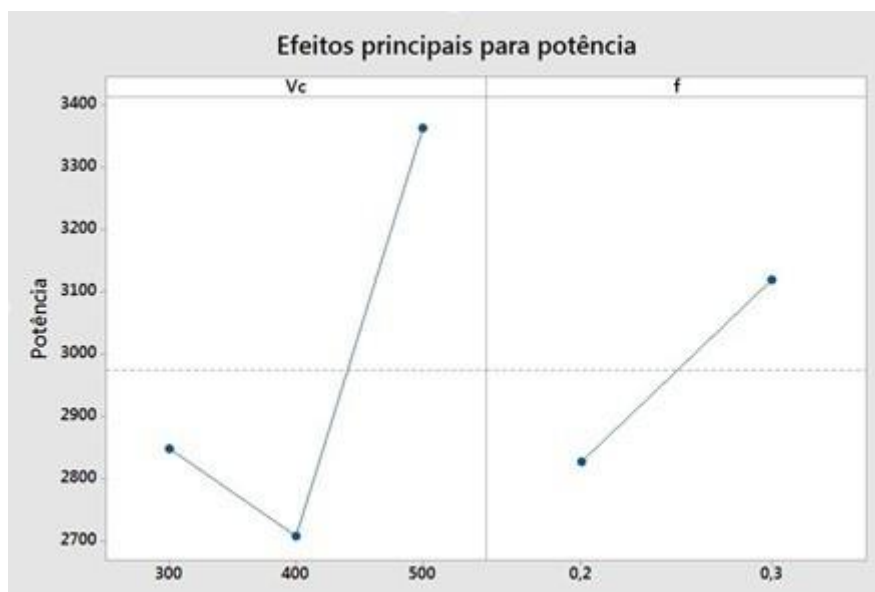
Figura 20 – Pontos de interação na análise de potência.



Fonte: Minitab (2017).

O outro gráfico plotado, exibido abaixo na figura 21, mostra que nem todos os parâmetros utilizados para colher os dados de potência seguiram a literatura. A velocidade de corte $V_c=400\text{m/min}$ apresentou comportamento diferente como dito anteriormente. Já o parâmetro avanço (f) seguiu a ordem crescente como dizem as pesquisas (quanto maior o avanço, maior a potência).

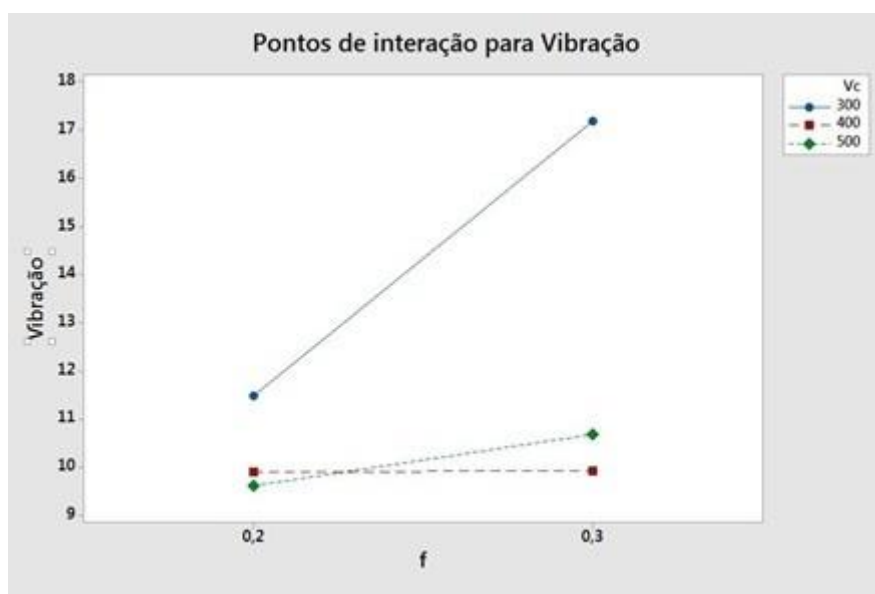
Figura 21 – Efeitos principais para potência.



Fonte: Minitab (2017).

A figura 22 mostra a interação dos parâmetros de velocidade de corte utilizados para gerar a vibração nos ensaios, comparando-as com o avanço utilizado em cada momento da usinagem. Percebe-se que em 2 dos três parâmetros de velocidade de corte utilizados, a vibração com $f=0,3\text{mm/rot}$ foi maior que utilizando $f=0,2\text{mm/rot}$. Isso deve-se ao desgaste da ferramenta utilizada. Maiores diferenças entre as vibrações podem ser resultantes de avarias nas ferramentas, ou também, cavacos que não saíram da superfície do tarugo usinado.

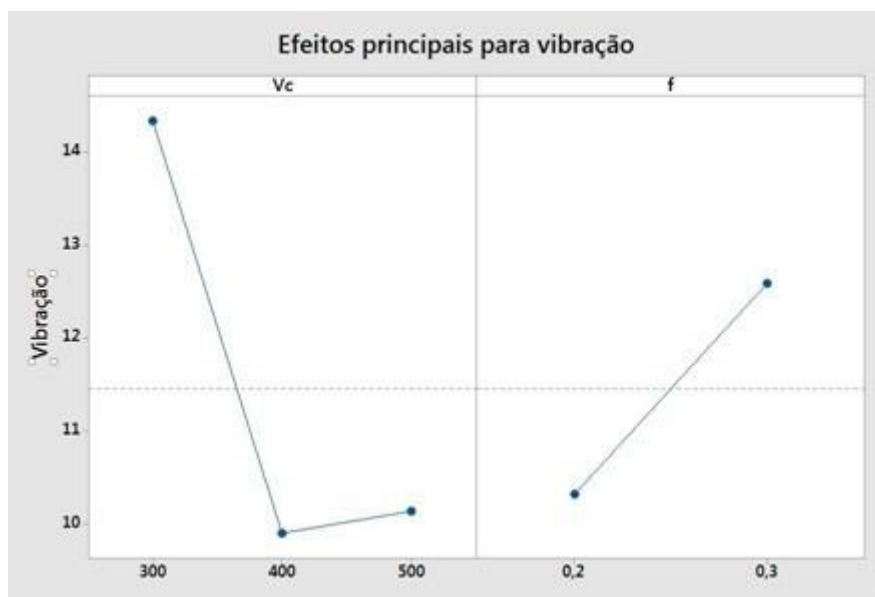
Figura 22 – Pontos de interação na análise de vibração.



Fonte: Minitab (2017).

O outro gráfico plotado, exibido abaixo na figura 23, mostra que nem todos os parâmetros utilizados para colher os dados de potência seguiram a literatura. A velocidade de corte $Vc=400\text{m/min}$ apresentou comportamento diferente como dito anteriormente (quanto maior a velocidade de corte, menor a vibração). No caso, ela apresentou uma vibração maior que a velocidade de 500m/min . Já o parâmetro avanço (f) seguiu a ordem crescente como dizem as pesquisas (quanto maior o avanço, maior a potência).

Figura 23 – Efeitos principais para vibração.



Fonte: Minitab (2017).

4.2 RUGOSIDADE

A tabela abaixo mostra os resultados encontrados emitidos pelo Rugosímetro. Foram encontradas medidas consideradas, na literatura, levando em consideração os parâmetros utilizados. Por serem parâmetros próximos, grandes diferenças na análise de desgaste não foram obtidas. Por outro lado, podemos identificar a causa de vibrações maiores quando usada a $V_c = 400 \text{ m/min}$, visto que a rugosidade R_a neste parâmetro é maior.

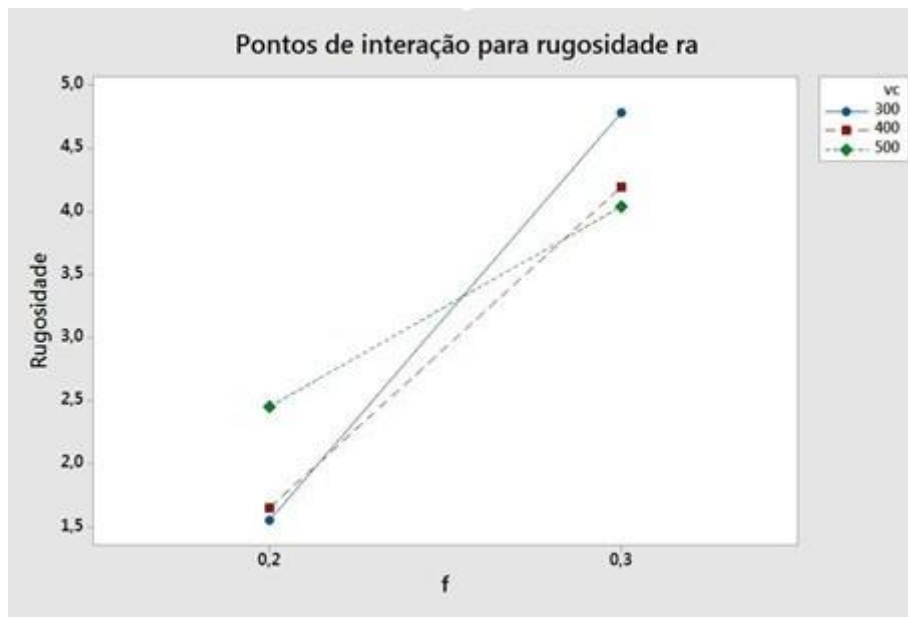
Tabela 8 – Análise estatística de variância para análise de parâmetros na rugosidade do processo de usinagem.

Condição	V_c (m/min)	f (mm/rot)	A_p (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)
1	300	0,2	0,5	1,427/1,592/1,488	8,521/10,62/9,906
2	400	0,2	0,5	1,842/1,792/1,829	14,97/15,95/12,82
3	500	0,2	0,5	2,729/2,607/2,645	21,80/19,61/20,85
4	300	0,3	0,5	4,160/4,112/4,220	30,83/37,22/35,21
5	400	0,3	0,5	4,207/4,385/4,414	30,97/33,48/38,22
6	500	0,3	0,5	4,044/3,391/3,992	25,28/28,17/21,76

Fonte: Autor.

Na figura 24, pode-se perceber que a rugosidade segue um padrão de crescimento conforme o aumento de velocidade de corte e avanço. Porém, também podemos ver a condição 5 mostrada na tabela acima que foge do padrão, provavelmente por alguma avaria na ferramenta, ou algum cavaco na superfície do material usinado.

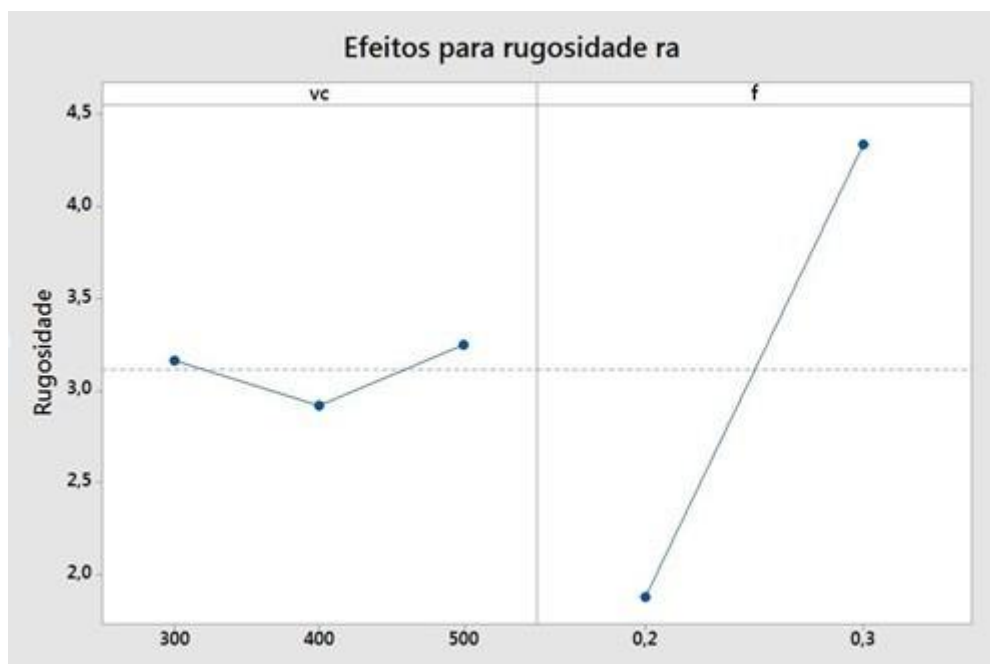
Figura 24 – Pontos de interação na análise de rugosidade R_a .



Fonte: Minitab (2017).

Na figura 25 comprova-se o desvio do padrão que a literatura mostra quando o assunto é rugosidade. O que deveria ser um avanço crescente da rugosidade conforme a velocidade de corte aumentasse, neste caso, a proporção não é respeitada.

Figura 25 – Efeitos principais para rugosidade Ra.

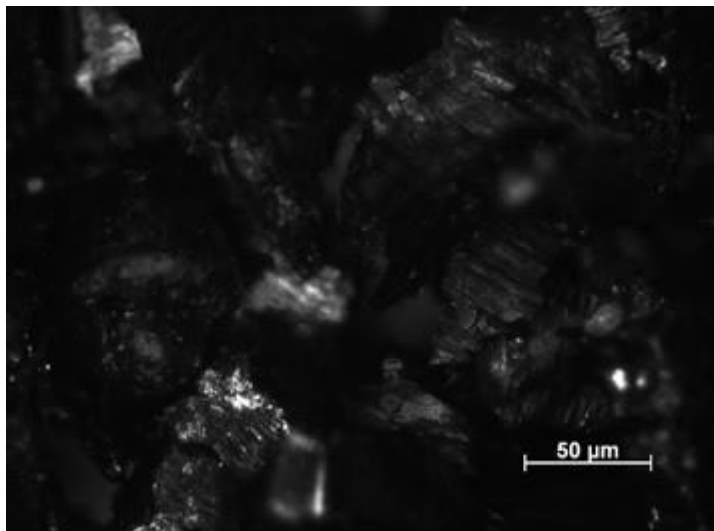


Fonte: Minitab (2017).

4.3 TIPOS E FORMAS DE CAVACO

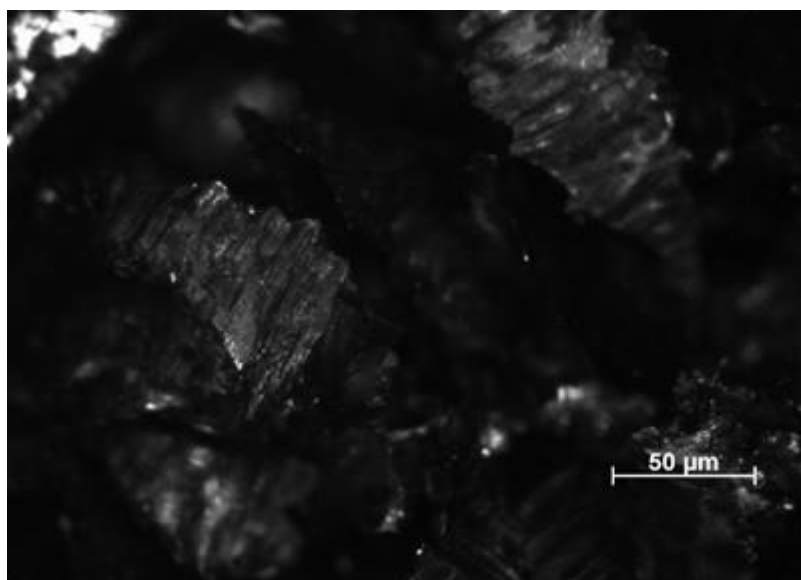
Os tipos e as formas de cavaco obtidas foram analisados através de uma lupa da marca Zeiss. As figuras mostradas foram feitas com uma lente objetiva de 5x. Pode ser observado que a usinagem do ferro fundido gerou cavacos descontínuos, provocando uma descontinuidade na microestrutura. Nas figuras 26 à 31 é possível notar o tipo de cavaco que foi formado, sem nenhuma diferença em relação ao tipo do mesmo. Todos os cavacos gerados foram considerados descontínuos. Isso se deve ao tipo de material usinado, pela sua microestrutura e pelo contato ferramenta/amostra.

Figura 26 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 300\text{m/min}$, $f= 0.2\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$



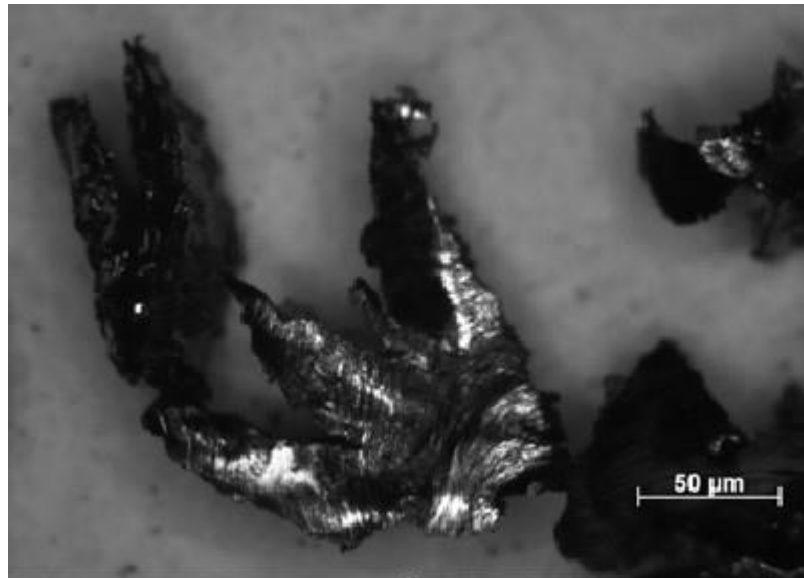
Fonte: Autor

Figura 27 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 400\text{ m/min}$, $f=0.2\text{mm/rot}$ e $a_p= 0.5\text{mm}$



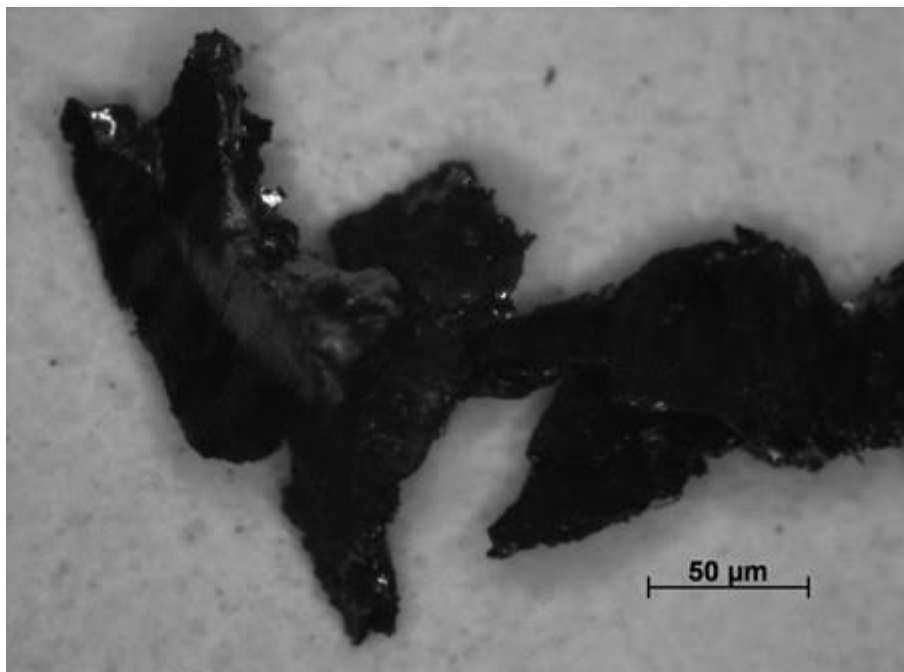
Fonte: Autor

Figura 28 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c = 500$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm



Fonte: Autor

Figura 29 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c = 300$ m/min, $f = 0.3$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm

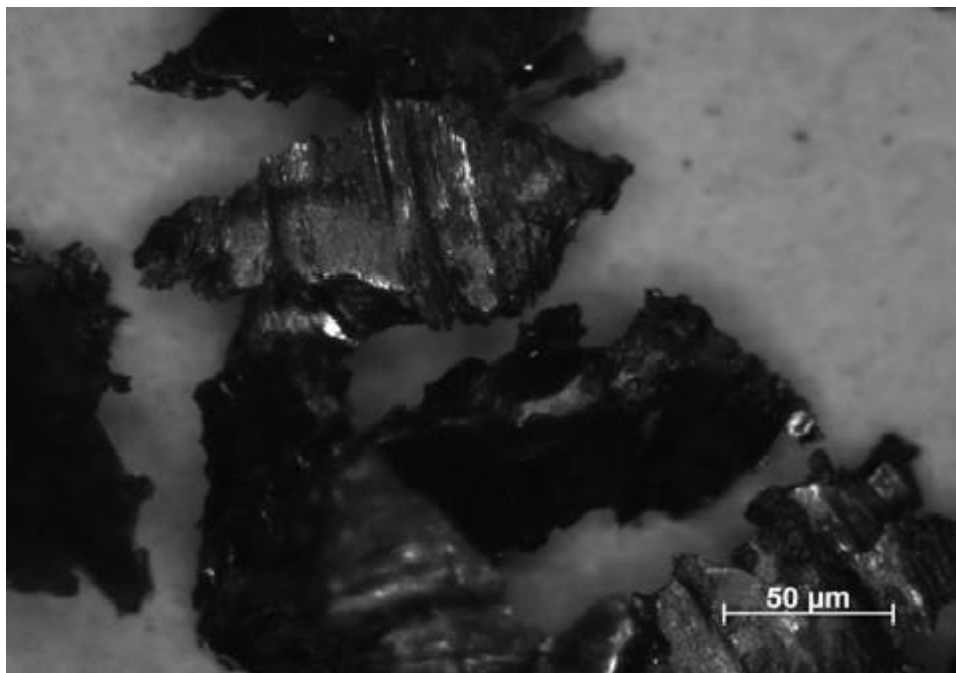


Fonte: Autor

4.4 DESGASTE DA FERRAMENTA

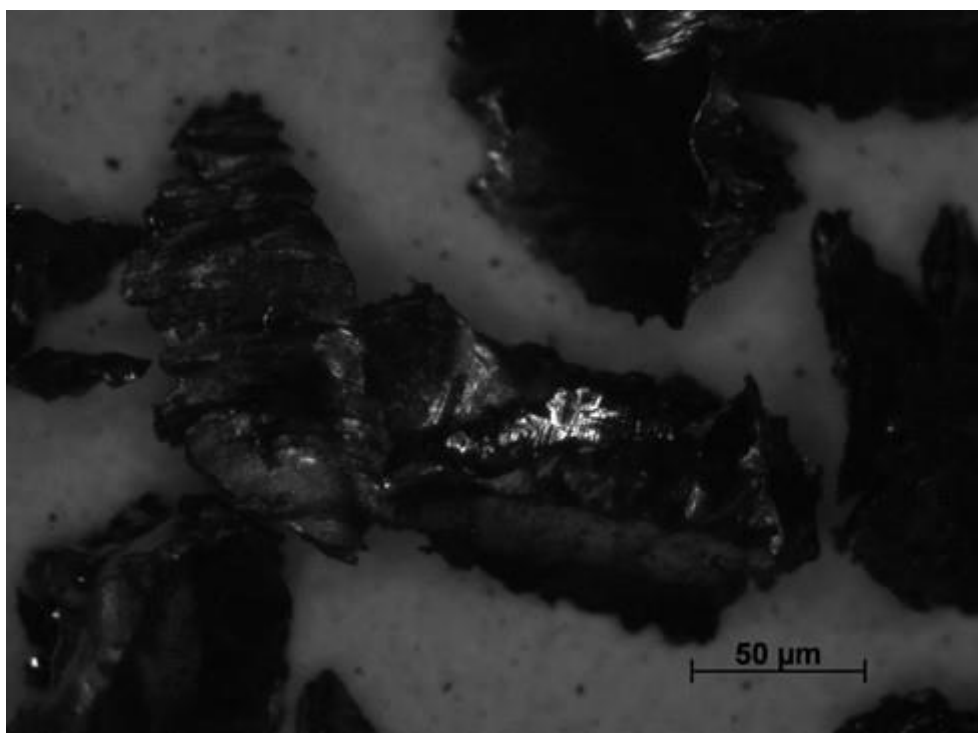
Colocando as ferramentas cerâmicas sobre uma resina para melhor posicionamento, foi possível realizar as análises e construir imagens através de uma lupa da marca Zeiss. As figuras 32 à 37 mostram as ferramentas analisadas com os respectivos parâmetros utilizados e as avarias nas mesmas. O mais observado foi desgaste de flanco, porém em alguns casos um desgaste de avaria por lascamento também foi detectado. Na figura 32 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c = 300$ m/min, $f=0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm. É possível notar um desgaste de flanco na ferramenta e uma avaria por lascamento na aresta direita da ferramenta.

Figura 30 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 400$ m/min, $f=0.3$ mm/rot e $a_p= 0.5$ mm



Fonte: Autor

Figura 31 – Cavacos gerados com parâmetros $V_c= 500$ m/min, $f=0.3$ mm/rot e $a_p= 0.5$ mm

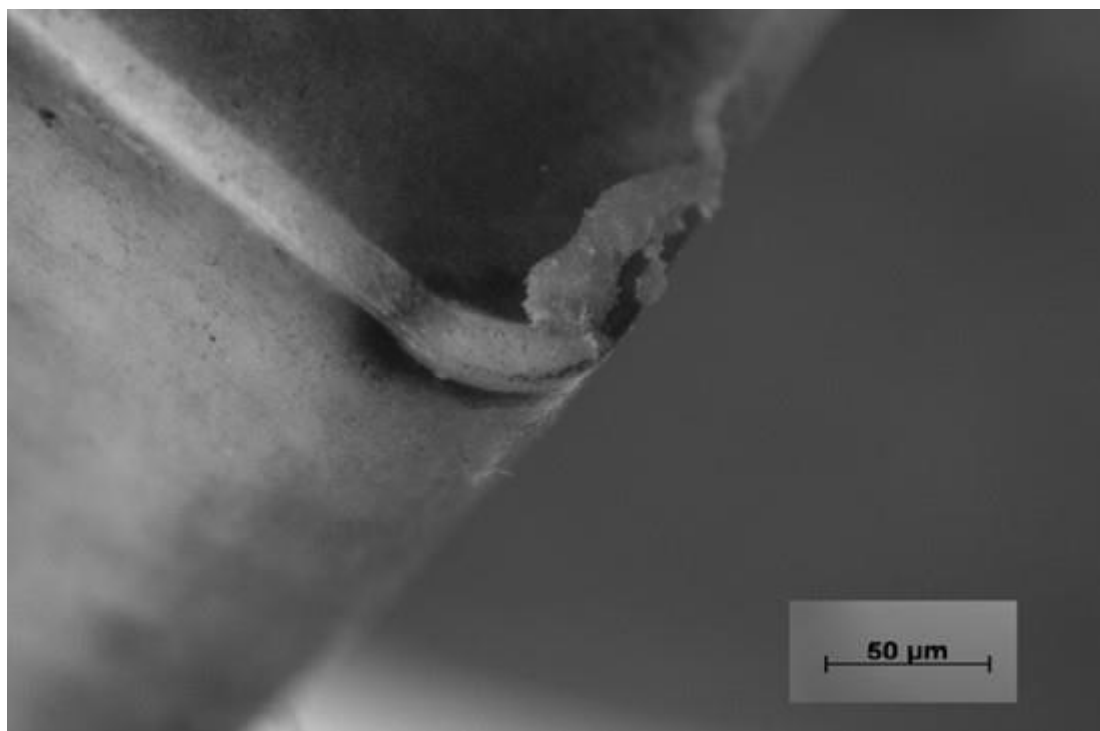


Fonte: Autor

A figura 33 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c = 400$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm. É possível notar um desgaste de flanco na aresta da ferramenta e um pequeno lascamento na aresta esquerda.

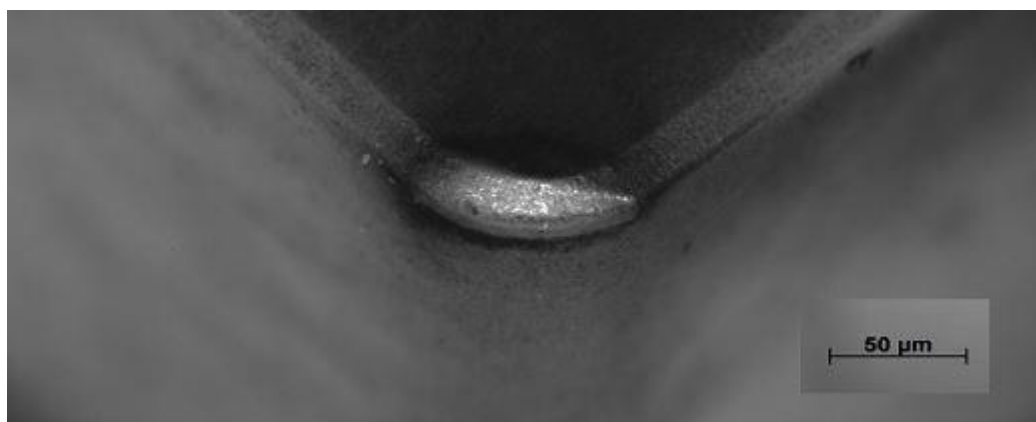
Na figura 34 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c = 500$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm. É possível notar um desgaste de flanco na aresta da ferramenta.

Figura 32 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 300$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm



Fonte: Autor

Figura 33 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 400$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm.



fonte:Autor

Na figura 35 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c = 300$ m/min, $f=0.3$ mm/rot e $a_p= 0.5$ mm. É possível notar um desgaste de flanco na aresta da ferramenta.

Na figura 36 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c= 400$ m/min, $f=0.3$ mm/rot e $a_p= 0.5$ mm. O desgaste de flanco é predominantemente visível aresta da ferramenta.

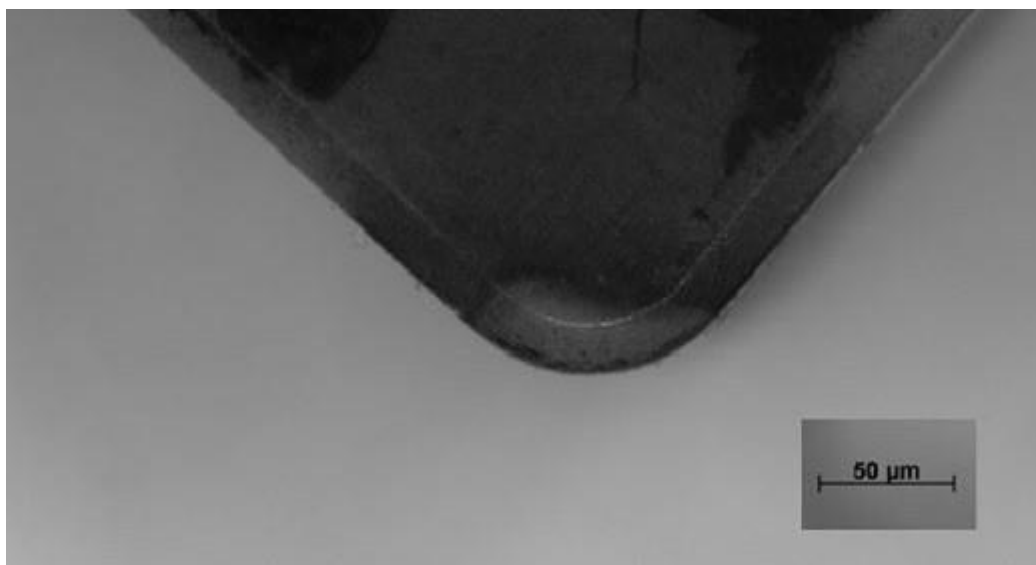
Na figura 37 é referente à deterioração da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c= 500$ m/min, $f=0.3$ mm/rot e $a_p= 0.5$ mm. É possível notar um desgaste de flanco nas arestas e também lascamento na aresta esquerda da ferramenta.

Figura 34 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 500$ m/min, $f = 0.2$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm.



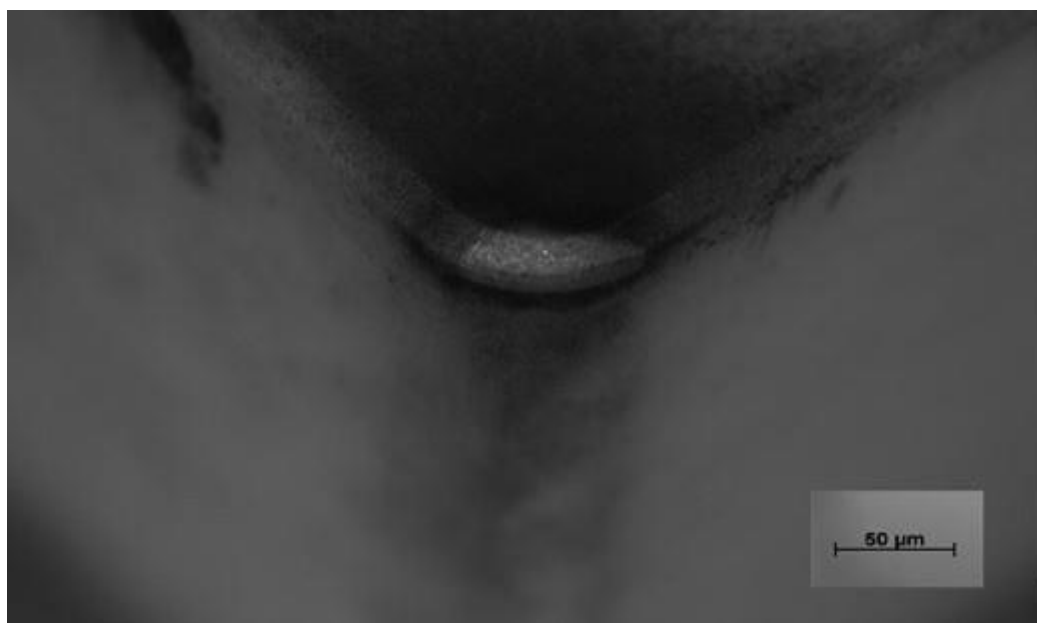
Fonte: Autor

Figura 35 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 300$ m/min, $f = 0.3$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm



Fonte: Autor

Figura 36 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 400$ m/min, $f = 0.3$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm



Fonte: Autor

Figura 37 – Deterioração causada pelos parâmetros $V_c = 500$ m/min, $f = 0.3$ mm/rot e $a_p = 0.5$ mm



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os parâmetros de corte são grandes influentes na hora de realizar um ensaio de usinagem. Em relação ao desgaste na ferramenta, as seis combinações de parâmetros apresentaram desgastes de flancos e de avaria, esta última com maior frequência, pois se trata de uma ferramenta cerâmica que apresenta elevada dureza e baixa tenacidade. Porém, por se tratarem de parâmetros aproximados, não foram identificadas grandes diferenças entre as arestas das amostras. Em relação aos cavacos formados, conclui-se que se trata de cavacos fragmentados, sem diferenças impactantes entre si, devido às características do material usinado. As análises estatísticas concluíram que, entre os três parâmetros analisados (Emissão acústica, vibração e potência) somente no último não foram detectados a influência da força de corte e do avanço tanto individualmente quanto na interação entre eles. Ao analisar a rugosidade medida, os resultados esperados da rugosidade média R_a não obtiveram uma grande variação dentro dos parâmetros, porém, uma maior rugosidade R_a encontrada quando $V_c = 400\text{m/min}$ explica o porquê de uma vibração fora do padrão foi encontrada. Essa rugosidade diferenciada pode ter sido resultado de cavacos na superfície ou avarias tanto na ferramenta quanto na amostra usinada. Quanto à rugosidade R_t , que mede a distância do pico mais alto e o vale mais profundo, o mesmo foi observado (nenhuma variação dentro das 3 medições de cada parâmetro) porém um aumento gradual que ocorreu junto com o aumento dos parâmetros de velocidade de corte e avanço. Ao realizar este estudo, podemos perceber que uma análise microestrutural mais elaborada poderia ser de extrema utilidade nos resultados obtidos e suas justificativas. O uso do microscópio eletrônico de varredura adicionaria muitas informações que possam sanar todas as dúvidas sobre quaisquer desvios de comportamentos padrões que fogem da literatura.

REFERÊNCIAS

- ASTAKHOV, V.P. **Tribology of metal cutting**. Great Britain: Elsevier, 2006. 426 p.
- CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- CHILDS, T. et al. **Metal machining: theory and applications**. London: Arnold, 2000. 411 p.
- CORRÊA, M. **Um estudo comparativo do comportamento das afiações cônicas e cônica radial em brocas helicoidais de aço rápido**. 1996. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- DIMLA, E.; LISTER, P. M. On-line metal cutting tool condition monitoring I: force and vibration analyses International. **Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v.40, abr. 2000.
- DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 255 p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1970. v.1.
- FRANCKLIN, A. R. **Um breve estudo sobre ferro fundido nodular**. 2009. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Tecnólogo em Produção Siderúrgica) – Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2009.
- GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, process and systems**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Willey and Sons, 2002. 1024 p.
- GU. J. et al. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, Laussane. v.225-229, n.1, p.273-284, abr. 1999.
- JOSEPH. R. D. **ASM metals handbook: machining processes**. Local: ASM International, 1989. v. 16.
- KANNATEY- ASIBU, E.; DORNFELD, D. A. Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. **Journal of Engineering for Industry**, v.103, p. 330-340, aug. 1981.
- MACHADO, A. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 384 p.
- MINITAB 17. **Software Estatístico**. Disponível em: < <http://www.minitab.com> >. Acesso em: 27 nov. 2017.

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

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, sistemas de fixação**. Sandviken: AB Sandvik Coromant, 2005. 600 p.

SANTOS, S. C. **Aspecto tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Ed.Artiliber, 2007. p. 100-101,109.

SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SOUSA, L. F. **Estudo da viabilidade da ferramenta cerâmica alumina e ítria (YAG) desenvolvida na usinagem do ferro fundido nodular**, 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

SOUZA, A.J. **Monitoramento de processos de usinagem**. Porto alegre: UFRGS, 2015. (apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS)

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

VIDAL, D. F. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2013.

WINGAERTNER, W. L.; SOUZA. A. J. Aplicação de um sistema de monitoramento inteligente no diagnóstico de falhas em ferramentas de corte: uma abordagem teórica. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., João Pessoa, 2002. **Anais...** João Pessoa, ago. 2002.

XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84763/195361.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 nov. 2016.