

**PEDRO AUGUSTO CASTILHO DICKFELDT**

**Avaliação de estudos preliminares da ferramenta de corte redonda  
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  no torneamento do ferro fundido nodular**

**Pedro Augusto Castilho Dickfeldt**

**Avaliação de estudos preliminares da ferramenta de corte redonda  
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  no torneamento do ferro fundido nodular**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia 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.

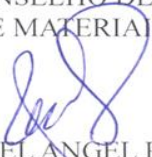
Orientador: Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza



**PEDRO AUGUSTO CASTILHO DICKFELDT**

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

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

  
Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
MSc. MARCELO ANTUNES DE PAULA  
UNESP-FEG

  
MSc. TAISE AZEVEDO DE SOUZA  
UNESP-FEG

Novembro de 2019



## AGRADECIMENTOS

Em especial agradeço aos meus pais *Ernesto Pedro* e *Rosemeire*, à minha família, pela semente que plantaram e por todo amor usado para regar esta árvore que cresce mais a cada dia, com a intenção de deixar os melhores frutos ao nosso querido mundo. Muito grato por tê-los ao meu lado, meus companheiros de jornada.

Agradeço muito ao meu orientador, *Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza* por toda ajuda desde o início do projeto, dentro e fora do laboratório. Agradeço por ter me acolhido em um dos momentos de maior dificuldade em minha vida, tendo toda paciência necessária e por ter me tratado, em primeiro lugar, como um ser humano.

Sou grato ao *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves*, que não só deu suporte durante as últimas etapas deste trabalho, mas humildemente, dedicou parte do seu tempo a uma troca de informações e conhecimento, contribuindo para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Agradeço ao coordenador do curso de Engenharia de Materiais *Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil*, também por ter me ajudado nesta fase mostrando tamanha compreensão e oferecendo apoio não só como docente, mas como um amigo.

Agradeço a toda equipe do laboratório, pelo auxílio técnico e teórico, pela troca de conhecimento e companheirismo nas últimas horas em que passei dentro desta faculdade, contribuindo para meu sentimento de satisfação em ter feito parte do campus de Guaratinguetá.

Sou eternamente grato à Universidade Estadual Paulista, a todos os seus funcionários, alunos, docentes e amigos que fizeram parte desta incrível jornada. Eternamente grato por terem contribuído para minha formação como ser humano, desde os momentos de lazer (INTERUNESP) que me mostraram a dimensão desta família, até os colegas mais distantes que, ainda que por um instante, cruzaram meu caminho.

Por último, agradeço à família que me acolheu durante este nobre capítulo da vida. Aprendi muito com cada um dos meus irmãos de república, que me trouxeram as mais diversas vivências, os mais variados questionamentos, confortos e desconfortos, ajudando na construção, tijolo por tijolo, deste muro do saber. À minha república, gratidão por ajudar a me conhecer melhor, por me fazer uma pessoa melhor.

Gratidão, universo.

“Feliz aquele que vence o egoísmo, alcança a paz, encontra a verdade. A verdade liberta-nos do mal; não há no mundo libertador igual. Confia na verdade, mesmo que não sejas capazes de compreendê-la, mesmo que no começo vos pareça amarga a sua doçura.”

Buda

## RESUMO

Os processos de usinagem apresentam grande importância na indústria metal mecânica, sendo um dos processos mais populares e importantes na fabricação de produtos manufaturados. Diversos estudos são realizados a fim de otimizar cada vez mais os processos de usinagem, visando objetivos como a diminuição do tempo de operação, aumento da vida útil da ferramenta, e consequentemente redução de custos, além de melhorar a qualidade no acabamento das peças produzidas e redução do impacto ambiental. Um dos avanços importantes dentro da usinagem foi a evolução dos materiais empregados na manufatura das ferramentas de corte, com destaque para os materiais cerâmicos. Estes permitem uma operação de usinagem em temperaturas mais elevadas se comparado às ferramentas de metal, com maior resistência ao desgaste possibilitando trabalhar com uma gama maior de materiais, incluindo os ferros fundidos, superligas de níquel entre outros. São diversas variáveis envolvidas nos processos de usinagem, sendo os parâmetros de corte as mais influentes. A base para a escolha destes parâmetros são os materiais que compõem a peça e a ferramenta, e ainda que haja recomendações por parte do fabricante é possível otimizar estes critérios, que influenciam nas forças de corte e vibrações podendo evitar ainda mais os desgastes e avarias provocados na ferramenta. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de uma ferramenta de corte redonda experimental à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com adição de MgO no processo de torneamento do ferro fundido nodular, sem uso do fluido de corte utilizando velocidades de corte ( $V_c$ ) de 400, 500, 600 e 700 m/min., avanços ( $f$ ) de 0,3 e 0,5 mm/rot e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,25mm. Os resultados demonstraram que a ferramenta tem potencial para usinar o material utilizado no experimento, considerando os parâmetros  $V_c$  de 700m/min e  $f$  de 0,5mm/rot como ideais para um aumento da vida da mesma, condições em que ocorreu o menor desgaste. Com  $V_c = 600\text{m/min}$  e  $f = 0,5\text{mm/rot}$  obteve-se os menores valores de rugosidade, sendo  $R_t = 4,535\mu\text{m}$  e  $R_a = 0,503\mu\text{m}$ , caracterizando um acabamento de retificação e caracterizando estas condições como ideais para gerar melhor acabamento na superfície da peça. Esses resultados são promissores para aplicações em usinagem de materiais endurecidos e ferros fundidos em alta velocidade de corte, promovendo redução de custo no processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ferramentas de corte de materiais cerâmicos. Indústria automotiva. Ferros fundidos. Usinagem a seco. Inovações.

## ABSTRACT

Machining processes are of great importance in the metalworking industry, being one of the most popular and important processes in the manufacture of fabricated products. Several studies are carried out with the objective of increasingly optimizing the machining processes, the objectives as the reduction of the operation time, the increase of the tool life, and consequently the cost reduction, besides improving the quality in the finishing of the tools. parts produced and environmental impact reduction. One of the important advances in machining was the evolution of the materials used in the manufacture of cutting tools, especially the ceramic materials. These use a higher temperature machining operation compared to higher strength metal tools and using a wider range of materials including cast irons, nickel superalloys and more. There are several variables used in machining processes, being the most influential cutting parameters. The basis for choosing these parameters is the materials that make up the part and the tool, and there are those that can be used by the manufacturer, which can optimize these items, which influence the cutting forces and vibrations that can be further used by tool wear and damage. The aim of this work was to evaluate the performance of an alumina-based experimental round cutting tool ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) with the addition of MgO in the nodular cast iron turning process without cutting fluid using cutting ( $V_c$ ) 400, 500, 600 and 700 m/min., Feeds ( $f$ ) 0.3 and 0,5 mm/rev and depth of cut ( $a_p$ ) 0,25mm. The results showed that a tool has the potential to use material used in the experiment, considering the  $V_c$  values of 700m/min and  $f$  of 0,5mm/rot as ideal for an increase in its life, conditions in which it occurred or less wear. With  $V_c = 600\text{m/min}$  and  $f=0,5\text{mm/rot}$  the lowest roughness values are used, being  $R_t = 4,535\mu\text{m}$  and  $R_a = 0,503\mu\text{m}$ , characterizing a grinding finish and characterizing these conditions as ideal to improve the decoration of the piece. . These results are promising for applications in heavy duty materials and cast iron at high cutting speeds, promoting cost savings in the process.

**KEYWORDS:** Ceramic cutting tools. Automotive industry. Cast irons. Dry machining. Innovations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Percentual de Si e C para classes de Fofó e Aço.....                                                                                                 | 15 |
| Figura 2 - Diagrama metaestável Fe-C-Si para 2,3% de Silício na composição.....                                                                                 | 16 |
| Figura 3 - a) Grafita lamelar (fofo cinzento); b) Grafita vermicular; c) Grafita nodular. Imagens geradas por MEV após ataque químico profundo.....             | 17 |
| Figura 4 - Micrografias dos diferentes tipos de ferros fundidos.....                                                                                            | 18 |
| Figura 5 - Microestrutura de ferro fundido maleável preto ferrítico. 200X.....                                                                                  | 18 |
| Figura 6 - Tipos de matriz metálica em ferros fundidos. Ferrita(a-100x) e Perlita(b-1000x)...                                                                   | 19 |
| Figura 7 - Propriedades de ferros fundidos nodulares.....                                                                                                       | 10 |
| Figura 8 - Modificação da microestrutura pela variação na composição química.....                                                                               | 21 |
| Figura 9 - Microestruturas de ferro fundido nodular, sem ataque (a) e com ataque (b) (matriz perlítico/ferrítica). 400x.....                                    | 21 |
| Figura 10 - Microestrutura do ferro fundido nodular austemperado. Nódulo de grafita, matriz de ausferrita 1.000x.....                                           | 22 |
| Figura 11 - Propriedades de ferros fundidos nodulares austemperados.....                                                                                        | 22 |
| Figura 12 - Cubo de roda em fofo nodular austemperado (à esquerda), com projeto 2% mais leve que em alumínio (à direita).....                                   | 23 |
| Figura 13 - Micrografia de um ferro fundido nodular mostrando nódulos de grafita atuando como barreiras para a propagação de trincas.....                       | 23 |
| Figura 14 - Peças em ferro fundido nodular: a) Manga de ponta de eixo; b) suporte de freio; c) placa de apoio ferroviária; d) cubo de roda.....                 | 24 |
| Figura 15 - Diagrama de fases do sistema MgO-Al.....                                                                                                            | 28 |
| Figura 16 - Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.....                                                                                 | 37 |
| Figura 18 - Desgaste do entalhe de gume primário (a) e secundário (b) na ferramenta cerâmica Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> com V <sub>c</sub> de 240m/min..... | 41 |
| Figura 19 - Imagens MEV das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular austemperado. (a) G2 e (b) G3.....                                      | 42 |
| Figura 20 – Representação do corpo de prova utilizado no experimento.....                                                                                       | 43 |
| Figura 21 - Centro de torneamento modelo ROMI GL240M situado no DMT, FEG-UNESP...                                                                               | 45 |
| Figura 22 - Rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18.....                                                                                           | 45 |
| Figura 23 - Ferramentas de corte redondas de geometria RNGN120400-T0220 de acordo com a norma ISO1832.....                                                      | 46 |
| Figura 24 - Suporte para fixação da ferramenta.....                                                                                                             | 46 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 - Sensor de transdução de corrente da marca LEM, modelo AT 100 B10.....                                       | 47 |
| Figura 26 - Sistema de captação da emissão acústica da marca Physical Acoustics Corporation.....                        | 48 |
| Figura 27 - Sensor de vibração marca Vibro Control, modelo TV-100.....                                                  | 49 |
| Figura 28 - Microscópio Zeiss modelo Stemi 20003.....                                                                   | 49 |
| Figura 29 - Microscópio Mar Vision MM2003.....                                                                          | 50 |
| Figura 30 - Relação entre $V_c$ , $f$ e $V_B$ .....                                                                     | 51 |
| Figura 31 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=700\text{m/min}$ , $f=0,5\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ .... | 52 |
| Figura 32 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=400\text{m/min}$ , $f=0,5\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ ...  | 53 |
| Figura 33 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=400\text{m/min}$ , $f=0,3\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ .... | 53 |
| Figura 34 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=500\text{m/min}$ , $f=0,3\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ .... | 54 |
| Figura 35 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=500\text{m/min}$ , $f=0,5\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ ...  | 54 |
| Figura 36 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=600\text{m/min}$ , $f=0,3\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ ...  | 55 |
| Figura 37 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=600\text{m/min}$ , $f=0,5\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ ...  | 55 |
| Figura 38 - Desgaste ocorrido na ferramenta com $V_c=700\text{m/min}$ , $f=0,3\text{mm/rot}$ , $a_p=0,25\text{mm}$ ...  | 56 |
| Figura 39 - Principais efeitos para Rugosidade média ( $R_a$ ).....                                                     | 58 |
| Figura 40 - Principais efeitos para Rugosidade total ( $R_t$ ).....                                                     | 58 |
| Figura 41 - Principais efeitos para Potência.....                                                                       | 59 |
| Figura 42 - Principais efeitos para Vibração.....                                                                       | 60 |
| Figura 43 - Principais efeitos para Emissão acústica.....                                                               | 61 |
| Quadro 1 - Propriedades gerais da alumina.....                                                                          | 27 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processo de torneamento.....                                                  | 44 |
| Tabela 2 - Propriedades da ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ utilizada no trabalho.....               | 46 |
| Tabela 3 - Relação entre parâmetros de usinagem utilizados e os dados coletados durante e após o experimento..... | 57 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                |                                                |
|--------------------------------|------------------------------------------------|
| ABNT                           | Associação Brasileira de Normas Técnicas       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de alumínio (alumina)                    |
| AlTiN                          | Nitreto de alumínio-titânio                    |
| APC                            | Aresta postiça de corte                        |
| ASTM                           | American Society for Testing and Materials     |
| CBN                            | Nitreto cúbico de Boro                         |
| Co                             | Cobalto                                        |
| CVD                            | Chemical Vapor Deposition                      |
| G2 e G3                        | Grupos de ferros fundidos                      |
| HRC                            | Hardness Rockwell C (escala de dureza)         |
| HV                             | Hardness Vickers (escala de dureza)            |
| ISO                            | International Organization for Standardization |
| MEV                            | Microscopia eletrônica de Varredura            |
| mm/rot                         | Milímetros por rotação (unidade de avanço)     |
| Mo                             | Molibdênio                                     |
| NbC                            | Carbeto de Níbio                               |
| Ni                             | Níquel                                         |
| PCBN                           | Nitreto cúbico de Boro policristalino          |
| PCD                            | Diamante policristalino                        |
| PVD                            | Physical Vapor Deposition                      |
| RMS                            | Unidade de potência                            |
| RNGN120400-T0220               | Especificação da geometria da ferramenta       |
| Rpm                            | Rotações por minuto                            |
| R <sub>t</sub>                 | Rugosidade total                               |
| Si                             | Silício                                        |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Nitreto de Silício                             |
| SiC                            | Carbeto de Silício                             |
| TaC                            | Carbeto de Tântalo                             |
| TiAlN                          | Nitreto de Titânio-Alumínio                    |
| TiC                            | Carbeto de Titânio                             |
| TiCN                           | Nitreto de Titânio-Carbono                     |
| TiN                            | Nitreto de Titânio                             |
| WC                             | Carbeto de Tungstênio                          |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Óxido de Ítrio                                 |
| ZrO <sub>2</sub>               | Óxido de Zircônio                              |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                                |
|----------|--------------------------------|
| $U_f$    | Tensão de uma fase             |
| $VB$     | Desgaste da ferramenta         |
| $V_c$    | Velocidade de corte            |
| $V_{cc}$ | Tensão de corrente contínua    |
| $R_t$    | Rugosidade total               |
| $R_a$    | Rugosidade média               |
| $P_c$    | Potência consumida             |
| $K_{IC}$ | Tenacidade à fratura           |
| $L_c$    | Comprimento de corte           |
| $I$      | Corrente alternada             |
| $f$      | Avanço (parâmetro de usinagem) |
| $F_p$    | Fator de potência              |
| $a_p$    | Profundidade de corte          |

## SUMÁRIO

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                          | <b>13</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                | <b>15</b> |
| 2.1      | FERROS FUNDIDOS.....                                             | 15        |
| 2.1.1    | <b>Ferro Fundido Nodular e Aplicações.....</b>                   | <b>20</b> |
| 2.2      | MATERIAIS CERÂMICOS AVANÇADOS .....                              | 24        |
| 2.3      | APLICAÇÕES DE MATERIAIS CERÂMICOS À BASE DE $Al_2O_3$ .....      | 25        |
| 2.3.1    | <b>Diagrama de Fases de <math>Al_2O_3</math> .....</b>           | <b>27</b> |
| 2.4      | USINAGEM.....                                                    | 28        |
| 2.4.1    | <b>Usinagem por torneamento .....</b>                            | <b>29</b> |
| 2.4.2    | <b>Usinagem sem fluido de corte.....</b>                         | <b>30</b> |
| 2.5      | MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE.....                          | 31        |
| 2.5.1    | <b>Ferramentas de Aço Rápido .....</b>                           | <b>31</b> |
| 2.5.2    | <b>Ferramentas de Metal Duro.....</b>                            | <b>32</b> |
| 2.5.3    | <b>Ferramentas de Materiais Super Duros.....</b>                 | <b>34</b> |
| 2.5.4    | <b>Ferramentas de Cermets.....</b>                               | <b>36</b> |
| 2.5.5    | <b>Ferramentas de corte de materiais cerâmicos.....</b>          | <b>37</b> |
| 2.5.5.1  | <i>Ferramentas cerâmicas à base de <math>Al_2O_3</math>.....</i> | <i>38</i> |
| 2.6      | TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTE.....                              | 39        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                 | <b>43</b> |
| 3.1      | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....                                   | 43        |
| 3.2      | EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....                                     | 44        |
| 3.2.1    | <b>Equipamentos e ferramentas de corte utilizados.....</b>       | <b>44</b> |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                              | <b>51</b> |
| 4.1      | ANÁLISE DOS DESGASTES DE FLANCO E VELOCIDADE DE CORTE.....       | 51        |
| 4.1.1    | <b>Análise dos tipos de desgastes.....</b>                       | <b>52</b> |
| 4.2      | AVALIAÇÃO DAS RUGOSIDADES MÉDIA ( $R_a$ ) E TOTAL ( $R_t$ )..... | 56        |
| 4.3      | POTÊNCIA DE CORTE.....                                           | 59        |
| 4.4      | VIBRAÇÕES.....                                                   | 60        |
| 4.5      | EMIÇÃO ACÚSTICA.....                                             | 61        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                            | <b>63</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                         | <b>64</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nos países industrializados os processos de fabricação representam um terço do PIB (KALPAKJIAN, 1985).

Difícilmente encontra-se um produto o qual, durante sua fabricação, não passou por um processo de usinagem em algum instante, ainda que de maneira indireta. A usinagem permite a obtenção de produtos com as mais variadas geometrias, além de uma elevada precisão em termos de aspectos dimensionais e acabamentos superficiais, particularidades que muitas vezes dificultam sua substituição por outros processos de fabricação (WALKER, 2000). Contudo, a usinagem ainda pode apresentar alguns desafios, como por exemplo a velocidade de produção, e assim qualquer melhoria pode ser relevante. Outra questão seria o uso de maquinários e ferramentas de custo elevado, além da mão de obra técnica especializada. Dados mostram que os gastos anuais direcionados à mão de obra nos Estados Unidos são estimados em U\$300 bilhões, somado a U\$7,5 bilhões direcionados aos maquinários e U\$2,5 bilhões de materiais “consumíveis” (ferramentas de corte e fluidos de corte) (Trent e Wright, 2000).

De acordo com Shaw (1984), pode-se avaliar a importância dos processos de fabricação através do custo envolvido nos mesmos. Os processos de usinagem eram considerados os mais importantes para a economia, com uma estimativa de custos de 10% do PIB americano, considerando apenas a primeira metade da década de 80. Segundo Trent (1984), os processos de usinagem são os mais recorrentes na indústria metal mecânica com valores de custos relacionados maiores que 15% da quantia total dos produtos manufaturados, considerando todos os países industrializados.

Dentro da usinagem existem diversos estudos sobre os materiais, visando a utilização tanto na produção de peças como de ferramentas. O termo “usinabilidade” refere-se à capacidade de um material em ser usinado de acordo com determinados critérios, e os critérios mais utilizados como parâmetro são a vida da ferramenta, potência e força de corte, e a rugosidade das peças produzidas (Ferraresi, 1970; Shaw, 1984; Stemmer, 1995).

São inúmeras as variáveis influentes em um processo de usinagem, o que exige um conhecimento pleno sobre o material a ser trabalhado, pois este pode apresentar boa usinabilidade em determinadas condições e comportar-se de maneira diferente em outras, por exemplo. Assim, reforça-se a importância sobre os estudos constantes envolvendo os materiais dentro da área de usinagem, de maneira que as tecnologias permaneçam em avanço contínuo.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma ferramenta de corte redonda à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dopada com óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) no processo de torneamento do ferro fundido nodular. Primeiramente, o propósito é verificar a viabilidade de trabalhar com este material utilizando tal ferramenta dentro de determinadas condições tidas como base a partir da literatura, e assim, consequentemente buscar parâmetros de usinagem que possam otimizar o processo de torneamento deste material.

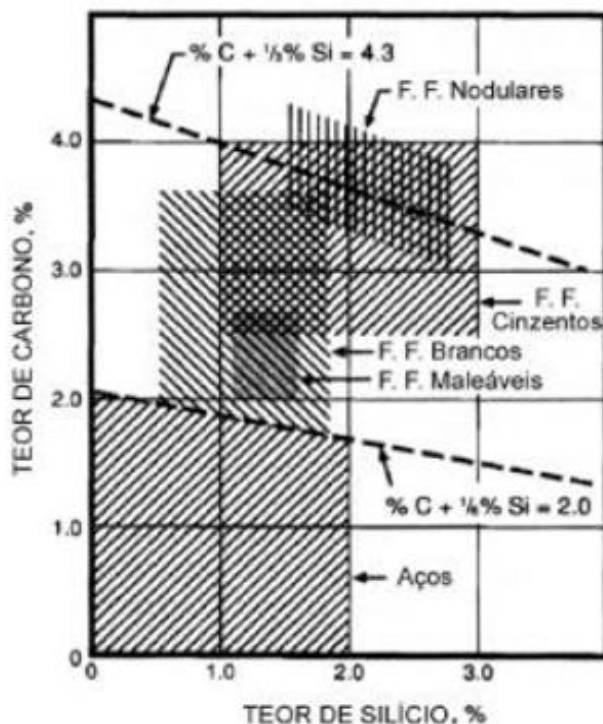
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FERROS FUNDIDOS

Ferro Fundido (também chamado por Fofo) é o nome dado a uma classe de ligas metálicas, cuja composição consiste basicamente nos elementos ferro-carbono-silício, e o teor de carbono encontra-se acima de 2,0% geralmente. E graças a este teor de carbono, relativamente alto se comparado aos aços, parte do mesmo não pode ser retido em solução sólida, na austenita, apresentando-se parcialmente livre na maioria dos casos, em forma de grafita. Esta classe de materiais é bastante utilizada dentro da indústria, e pode apresentar diversas características de acordo com os elementos de liga presentes na composição, ou então do tratamento térmico ao qual se submete o material. (CHIAVERINI, 1990).

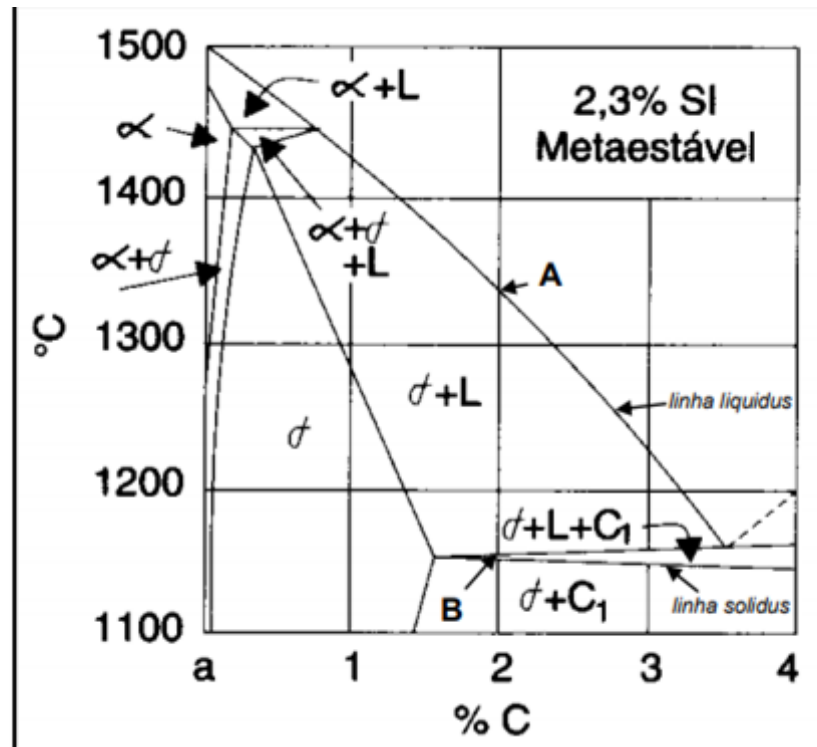
Na Figura 1 são ilustrados alguns tipos de ferros fundidos de acordo com a variação de carbono e silício na composição:

Figura 1 - Percentual de Si e C para classes de Fofo e Aço



Fonte: QIT - Fer et Titane Inc. (1990).

Figura 2 - Diagrama metaestável Fe-C-Si para 2,3% de Silício na composição

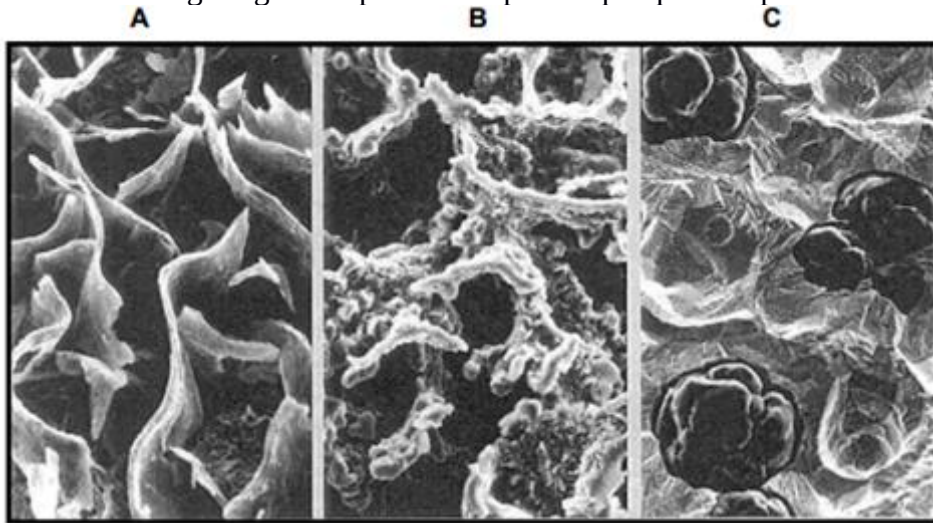


Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996).

A grafita presente nos ferros fundidos é um elemento microestrutural de baixa dureza, se comparado a elementos como a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), por exemplo, também presente em algumas ligas desta classe. Tal característica pode proporcionar ao material uma boa usinabilidade, pois atua como um lubrificante da ferramenta utilizada, além de que a presença da grafita significa descontinuidades na microestrutura, fazendo com que o cavaco se rompa em pequenos segmentos (BOEHS, 2000).

De acordo com GUESSER (2019), a morfologia da grafita impacta diretamente nas propriedades mecânicas do material. O formato nodular ou esférico da grafita acarreta em uma maior distribuição de tensões se comparado ao formato de veios. Contudo, o formato de veios pode proporcionar propriedades positivas como boa usinabilidade, condutividade térmica e o amortecimento de vibrações. Na Figura 3 são apresentadas algumas morfologias da grafita:

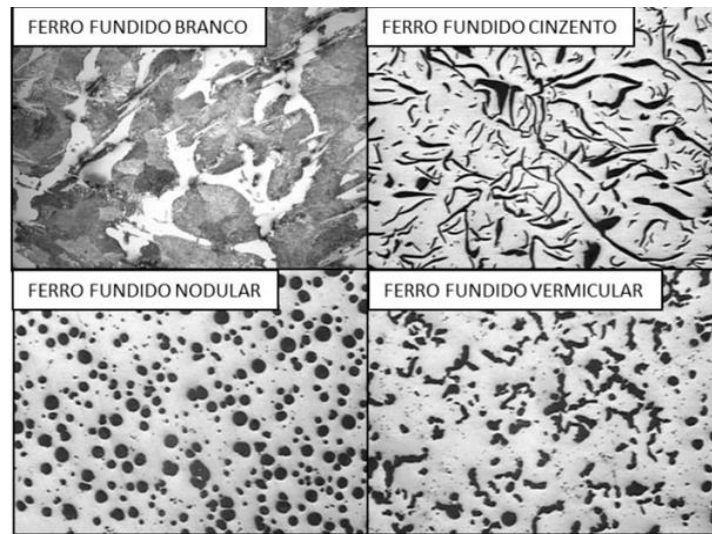
Figura 3 - a) Grafita lamelar (fofo cinzento); b) Grafita vermicular; c) Grafita nodular.  
Imagens geradas por MEV após ataque químico profundo.



Fonte: Marquard et al (1998).

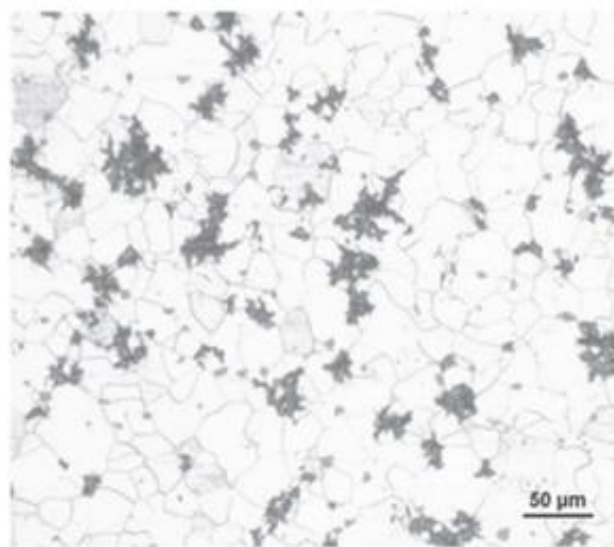
A classificação dos fofo's pode ocorrer em função do formato da grafita (vermicular, nodular), da aparência da fratura (branco, cinzento) ou de uma propriedade mecânica significativa (ductilidade). No ferro fundido branco todo o carbono apresenta-se na forma de carbonetos, não havendo grafita. No cinzento esta apresenta-se em formato de veios. Estes veios de grafita, por proporcionarem ao material uma boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações, faz com que esta classe de material tenha aplicação em peças que estarão sujeitas a fadigas térmicas e oscilações mecânicas, por exemplo, blocos de motor e discos de freio, além de estar presente na confecção de bases de máquinas. Esta última classe apresenta uma faixa de valores entre 100 e 400 MPa para resistência mecânica, e um baixo alongamento (GUESSER, 2019). Micrografias de diferentes ferros fundidos são ilustradas nas Figuras 4 e 5:

Figura 4 - Micrografias dos diferentes tipos de ferros fundidos.



Fonte: Adaptado de METALAB (2008).

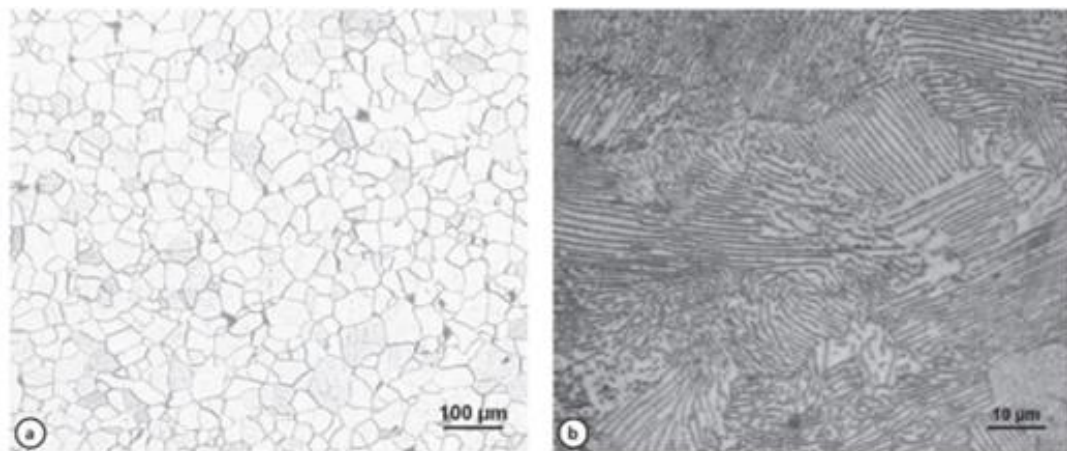
Figura 5 - Microestrutura de ferro fundido maleável preto ferrítico. 200x



Fonte: Guessser (2019).

A matriz da liga também pode se apresentar sob diferentes formas, de acordo com o microconstituente predominante. Por exemplo, a ferrita, que apresenta uma resistência mecânica não tão alta, mas possui boa tenacidade e ductilidade. Também pode ser constituída pela perlita, um microconstituente que proporciona ao material maiores valores de resistência mecânica e menor ductilidade. É possível ainda a obtenção de outras classes de ferro fundido a partir da combinação entre estes dois microconstituintes na matriz, apresentando propriedades intermediárias, direcionadas para cada tipo de aplicação (GUESSER, 2019). Na Figura 6 são apresentadas diferentes matrizes metálicas para ferros fundidos:

Figura 6 - Tipos de matriz metálica em ferros fundidos. Ferrita (a-100x) e Perlita (b-1.000x)



Fonte: Adaptado de Guesser (2019).

Na Figura 6 a) pode-se observar uma matriz composta por ferrita, um microconstituente de baixa resistência mecânica e que proporciona ductilidade ao material. Na Figura 6 b) tem-se uma matriz perlítica, que apresenta elevada resistência mecânica e baixa ductilidade.

De acordo com Guesser (2019), martensita revenida ou ausferrita também são possíveis na composição da matriz, possibilitando ao material alcançar valores mais elevados de resistência mecânica. Os fofos nodulares de matriz ferrítica apresentam valores entre 380 e 450MPa para limite de resistência mecânica e de 10 a 22% de alongamento, enquanto nodulares de matriz perlítica podem alcançar até 900MPa em limite de resistência mecânica, e alongamento de 2%.

Os fofos maleáveis surgiram como uma primeira família de ferros fundidos a apresentarem ductibilidade considerável. Podem ser obtidos a partir de tratamento térmico, por grafitação (fofo maleável preto) ou descarbonetação (maleável branco). Os maleáveis brancos possuem baixo teor de carbono na camada descarbonetada, o que proporciona a estes materiais uma boa soldabilidade. Os maleáveis pretos apresentam a grafita em forma de agregados, e sua matriz pode ser ferrítica, perlítica ou de martensita revenida, com uma faixa de valores entre 300 e 700MPa para o limite de resistência mecânica, e alongamento entre 12 e 2%. Tanto os fofos maleáveis brancos como os pretos, de matriz ferrítica, aparecem significativamente em aplicações como conexões para transporte de fluidos no Brasil e Europa. Contudo, os fofos maleáveis foram substituídos em grande parte por fofos nodulares, graças a ganhos técnicos e econômicos (GUESSER, 2019).

Os fofo's vermiculares correspondem a uma família recente dos ferros fundidos, e como o nome diz, apresentam a grafita em forma de vermes, e sua matriz pode ser ferrítica, perlítica ou uma mistura entre estes microconstituintes. As propriedades variam entre as dos fofo's cinzentos e os nodulares, e aplicações clássicas destes materiais são blocos de motores a diesel e coletores de exaustão (GUESSER, 2019)

### 2.1.1 Ferro fundido nodular e aplicações

Apresentando diversas variações de propriedades, a classe dos fofo's nodulares conquistaram espaço na engenharia, substituindo materiais como fofo cinzento, maleável, aços fundidos e forjados e até mesmo estruturas soldadas. Na Figura 7 pode-se observar algumas classes de ferro fundido nodular e a oscilação entre as propriedades:

Figura 7 - Propriedades de ferros fundidos nodulares

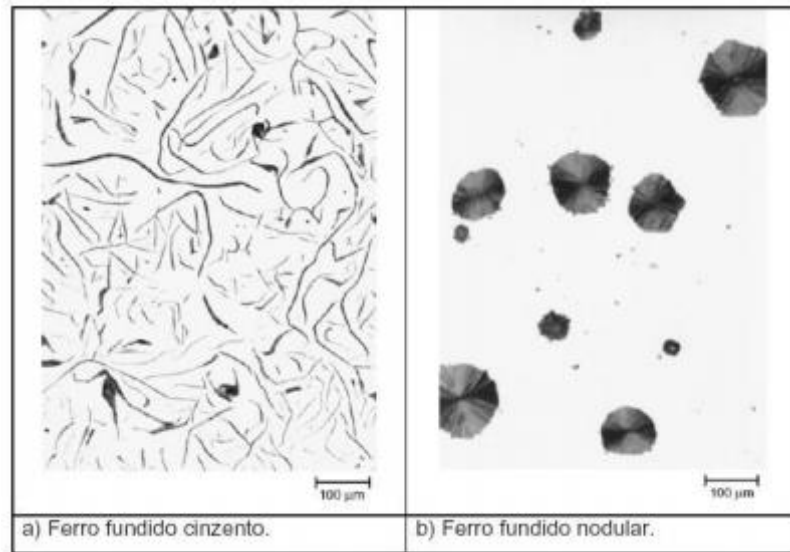
| FE 38017                                      | FE 42012 | FE 50007 | FE 60003 | FE 70002 | FE 80002 | FE 90002 |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Limite de Resistência, Limite de Escoamento → |          |          |          |          |          |          |
| ← Alongamento                                 |          |          |          |          |          |          |
| Limite de Fadiga →                            |          |          |          |          |          |          |
| ← Resistência ao impacto                      |          |          |          |          |          |          |
| Dureza →                                      |          |          |          |          |          |          |
| Resistência ao desgaste →                     |          |          |          |          |          |          |
| ← Usinabilidade                               |          |          |          |          |          |          |
| Resposta a têmpera superficial →              |          |          |          |          |          |          |
| ← Custo →                                     |          |          |          |          |          |          |

Fonte: Guesser (2019).

A análise da Figura 7 ocorre com base na variação da intensidade da propriedade de acordo com a classe de fofo nodular, de maneira que torna-se mais intensa conforme o sentido da seta indicada.

Na Figura 8 pode-se observar a modificação de uma microestrutura de ferro fundido através da variação da composição química, alterando sobretudo a morfologia da grafita:

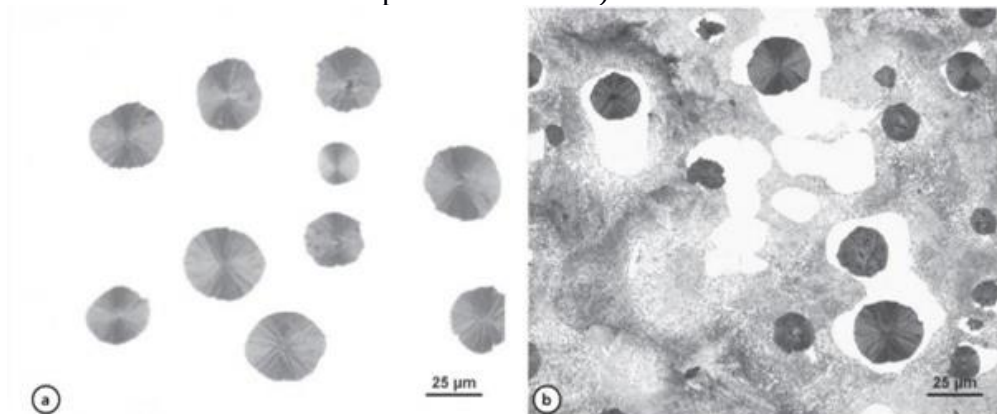
Figura 8 - Modificação da microestrutura pela variação na composição química.



Fonte: ASM Metals Handbook (2004).

Na Figura 9 são apresentadas microestruturas de fofo's nodulares em diferentes matrizes:

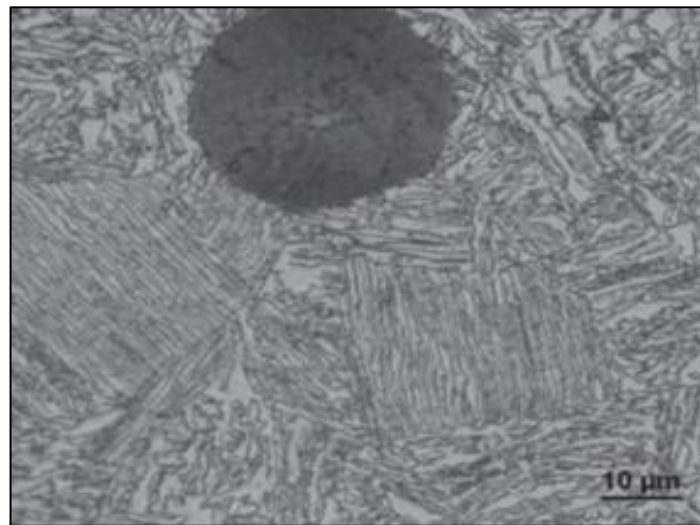
Figura 9 - Microestruturas de ferro fundido nodular, sem ataque (a) e com ataque (b) (matriz perlítico/ferrítica). 400x



Fonte: Guessier (2019).

Os fofo's nodulares austemperados apresentam, como o próprio nome já diz, matriz de ausferrita, obtido a partir de um tratamento térmico de austêmpera. Sua microestrutura é ilustrada na Figura 10:

Figura 10 - Microestrutura do ferro fundido nodular austemperado. Nódulo de grafita, matriz de ausferrita 1.000x



Fonte: Guessser (2019).

De acordo com Guessser (2019) estes materiais alcançam valores de resistência mecânica entre 850 e 1300MPa, além de boa ductibilidade (alongamento entre 10 e 2%). Na Figura 11 são ilustradas algumas famílias dos fofo's nodulares austemperados e variação entre as propriedades:

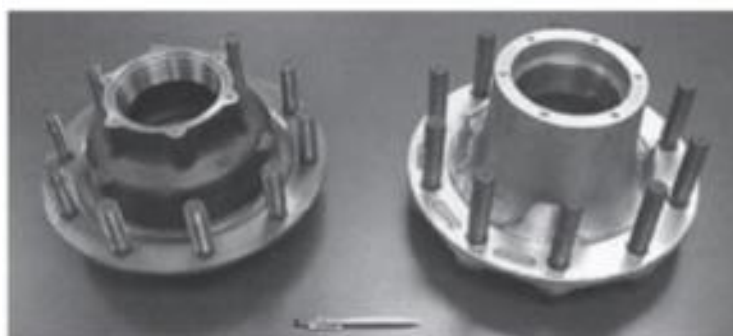
Figura 11 - Propriedades de ferros fundidos nodulares austemperados

| FE 85010                                      | FE 100005 | FE 120002 | FE 1300 |
|-----------------------------------------------|-----------|-----------|---------|
| Limite de Resistência, Limite de Escoamento → |           |           |         |
| ← Alongamento                                 |           |           |         |
| Dureza →                                      |           |           |         |
| ← Resistência ao impacto                      |           |           |         |
| Resistência ao desgaste →                     |           |           |         |
| ← Usinabilidade                               |           |           |         |

Fonte: Guessser (2019).

Na Figura 12 pode-se observar uma aplicação do fofo nodular austemperado:

Figura 12 - Cubo de roda em fofo nodular austemperado (à esquerda), com projeto 2% mais leve que em alumínio (à direita)

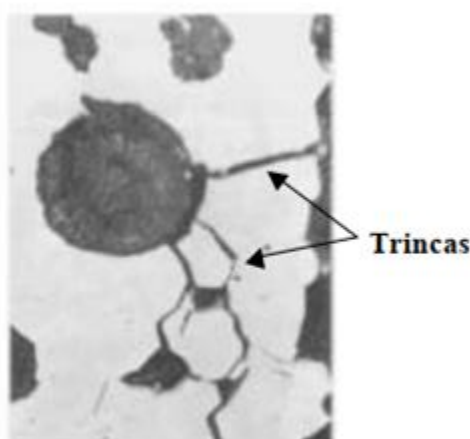


Fonte: Guesser (2019).

Há também os fofo's *nodulares Si/Mo*, que são ligados estes dois elementos e os fofo's *austeníticos*, ligados ao Ni. Estas subclasses são aplicadas dentro da indústria automobilística na manufatura de componentes sujeitos a elevadas temperaturas e ciclagem térmica, como coletores de exaustão e estruturas de turbocompressores (GUESSER, 2019).

Segundo TRUDEL e GAGNÉ (1997), os nódulos ainda agem como inibidores de trinca. E quando comparado ao cinzento, o fofo nodular demonstra maior sensibilidade aos elementos de liga adicionados na composição. No fofo cinzento os veios de grafita são o elemento com menor resistência, já nos fofo's nodulares são os defeitos, causados geralmente por materiais da carga metálica, reforçando a importância do controle de qualidade durante a seleção dos materiais. Na Figura 13 pode-se observar a barragem na propagação de trincas oferecida por um nódulo de grafita :

Figura 13 - Micrografia de um ferro fundido nodular mostrando nódulos de grafita atuando como barreiras para a propagação de trincas



Fonte: QIT-Fer et Titane Inc. (1990).

Quanto às aplicações do ferro fundido nodular, este pode ser encontrado em peças do segmento automotivo, construção civil, industrial, agrícola, entre outros. Na Figura 14, algumas aplicações deste material:

Figura 14 - Peças em ferro fundido nodular: a) Manga de ponta de eixo; b) suporte de freio; c) placa de apoio ferroviária; d) cubo de roda.



Fonte: Guessier (2019).

## 2.2 MATERIAIS CERÂMICOS AVANÇADOS

Diferente das cerâmicas tradicionais, as cerâmicas avançadas são obtidas a partir de uma matéria-prima de elevada pureza. A matéria-prima pode ser a mesma que dá origem às tradicionais, mas passa por um processo mais refinado na hora de realizar o controle de qualidade. Assim tem-se materiais com elevado desempenho e propriedades elétricas, magnéticas, ópticas ou químicas, específicas, estando atrelado à tecnologia de ponta. Estes materiais de engenharia podem ser aplicados na área de biomateriais, fabricação de fibras ópticas, sensores, sistemas eletrônicos, e diversas outras áreas (HENCH, 2013).

Ao contrário dos metais, os materiais cerâmicos apresentam elevada dureza mesmo sob altas temperaturas e baixa deformação plástica, e esta geralmente antecede a formação de trincas ou até mesmo de ruptura, ocorrendo uma fratura catastrófica, sem previsão. Esta baixa deformação plástica está associada não só ao tipo de ligação química (iônica e/ou covalente), mas à estrutura cristalina. O arranjo atômico não é tão simétrico igual aos dos metais, apresentando poucos planos de deslizamento e dificultando a movimentação das discordâncias (OIKAWA, *et. al.*, 2011; ORÉFICE, *et. al.*, 2008).

A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) está entre os materiais cerâmicos mais estudados e utilizados em função estrutural. Possui elevada resistência ao desgaste, uma dureza considerável ( $\sim 2,4\text{GPa}$  –

Vickers), baixo peso específico ( $3,99\text{g/cm}^3$ ) e seu ponto de fusão é próximo de  $2.070^\circ\text{C}$ , além de que sua matéria-prima é facilmente encontrada e em grande volume (KUMAR *et. al.*, 2004; WEFERS, 1987). A relação entre os tamanhos dos íons do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  proporciona um número de coordenação igual a 6, resultando em uma estrutura hexagonal compacta. E normalmente esta estrutura acaba sendo estável, graças à distância mínima entre os cátions que acaba sendo relativamente grande (VAN VLACK, 1973).

A bauxita é o principal minério do qual se extrai o alumínio, onde também são encontrados silicatos de alumínio, óxido de ferro, dióxido de titânio e outras impurezas em concentrações menores. Neste processo de extração, a primeira etapa consiste na purificação da bauxita, transformando-a em óxido de alumínio ou alumina, como também é conhecido, por meio do chamado processo Bayer. Em um segundo processo, chamado de Hall-Heroult, ocorre a transformação deste óxido de alumínio em alumínio metálico (SANTOS, 2007; CHIANG *et. al.*, 1997; HART, 1990; GITZEN, 1970).

Com relação à estrutura química, os materiais cerâmicos são compostos inorgânicos, formados por ligações iônicas e/ou covalentes, onde não ocorre a presença de elétrons livres como nas ligações metálicas. Tal fato explica estes materiais não serem bons condutores térmicos/elétricos naturalmente. Lembrando que estes podem adquirir diversas propriedades de acordo com o processamento e tecnologia utilizados (PEZZOTI; YAMAMOTO, 2014).

### 2.3 APLICAÇÕES DE MATERIAIS CERÂMICOS À BASE DE $\text{Al}_2\text{O}_3$

Os biomateriais correspondem a uma área da tecnologia em que os materiais cerâmicos têm grande importância e podem atuar em diferentes aplicações. São classificados de acordo com o tipo de interação entre o material e o tecido em contato. A alumina entra nessa classificação como um material bioinerte, pois preserva suas propriedades físicas e mecânicas ao serem utilizadas como um implante, além de não causarem reações por parte dos tecidos e assim é tolerada pelo organismo. Além das ligações químicas, a alta proporção de átomos de oxigênio também contribui para que a alumina seja um material inerte. É estável mesmo em meios mais agressivos quimicamente, como fluidos fisiológicos ou meios corrosivos (PEZZOTI; YAMAMOTO, 2014).

A alumina é bastante utilizada na fabricação de acetábulos e cabeças femorais, elementos para cirurgias onde deseja-se realizar a substituição, remodelagem ou realinhamento de uma articulação no quadril, com o objetivo de restaurar a mobilidade e a capacidade funcional de uma articulação danificada. Neste processo de fabricação estes dois elementos podem passar

juntos pela etapa de polimento e serem utilizados como par, assim ocorre uma diminuição do coeficiente de atrito da junta, chegando quase ao de uma junta normal. O desgaste entre estes elementos de alumina, dentro das condições citadas, chega a ser dez vezes menor que elementos de metal-polietileno, por exemplo. Dentro dos biomateriais a alumina ainda é muito utilizada na fabricação de próteses de joelho, elementos para reconstrução maxilo-facial, implantes dentários, parafusos para serem alojados em ossos, próteses de córnea e elementos substitutos para segmentos ósseos (HENCH; BEST, 2013).

Na confecção de implantes, a alumina policristalina de alta densidade( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é a mais utilizada. Propriedades como a resistência mecânica, tenacidade e resistência a esforços de fadiga deste material estão inteiramente ligados ao tamanho de grãos e ao grau de pureza. Para evitar o crescimento dos grãos durante o processo de sinterização ou queima, é comum a adição de MgO em quantidades menores a 0,5%. Com um valor médio de tamanho acima de 17 $\mu$ m os grãos de alumina interferem consideravelmente nas propriedades, podendo causar uma redução da resistência mecânica em até 20%. Entretanto, grãos com tamanho médio inferior a 4 $\mu$ m e pureza acima de 99,7% proporcionam, ainda, boa resistência à flexão e à compressão (HENCH, BEST, 2013; PEZZOTI, YAMAMOTO, 2014). Com processamentos refinados e de alto controle, é possível fabricar ainda, a alumina monocristalina. Esta pode superar a alumina policristalina em três vezes sua resistência mecânica, pois a ausência de defeitos dificulta o deslizamento dos planos atômicos. Por apresentar uma boa estética, foi muito utilizada no fabrico de próteses e coroas dentárias, mas sua resistência mecânica elevada, por outro lado, proporciona ao material certa fragilidade, uma resistência ao impacto não tão boa para tais aplicações, fazendo com que o uso deste material na produção destes elementos viesse a diminuir consideravelmente. A alumina monocristalina é utilizada atualmente como braquetes de aparelhos dentários, por apresentar sobretudo um excelente acabamento de superfície polida, mas pode apresentar algumas desvantagens, como desconfortos ao paciente devido a uma fricção elevada, ou maior chance de fraturar por ser um material mais frágil que as ligas metálicas (utilizadas durante muito tempo nesta aplicação) (PIMENTEL, *et. al.*, 2013).

Uma outra aplicação para a alumina é a fabricação de membranas. Elementos filtrantes, porosos, que agem como uma barreira seletiva, utilizados na separação de fases (ZAWRAH *et al.*, 2014). Podem ser utilizadas tanto para separar partículas como na fragmentação de moléculas de massas molares variadas (MEDEIROS *et. al.*, 2013). As membranas em geral, realizam trabalho em temperatura ambiente e não dependem de produtos químicos e podem ainda separar fases em estados diferentes de matéria, por exemplo, separar líquidos de gases, (Zawrah *et al.*, 2014). O princípio de funcionamento consiste basicamente na permeabilidade

seletiva, onde as moléculas ou partículas menores que os poros passam pela membrana e as de tamanho maior ficam retidas, semelhante a uma peneiração. Ou ainda, estas partículas são retidas devido a forças de repulsão presentes na superfície da membrana. (LIRA *et al.*, 2009). O uso da alumina na fabricação destes elementos traz algumas vantagens, como a alta estabilidade química e a temperaturas elevadas, possibilitando o uso de agentes químicos agressivos e calor durante os processos de limpeza. (FORTULAN *et al.*, 2006). Suportam produtos como ácidos e solventes, e possuem vida muito maior se comparado com materiais orgânicos ou poliméricos (GOEI; LIM, 2014).

A alumina utilizada na fabricação de refratários, na maioria das vezes deve ser processada de maneira que se obtenha grãos de tamanho grande e com elevada porosidade, para que o material seja resistente a choques térmicos e possua baixa condutividade térmica/elétrica (DÖRRE; HÜBNER, 1984).

No Quadro 1 são apresentadas algumas propriedades do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :

Quadro 1 – Propriedades gerais da alumina

| <i>Propriedades</i>                                                                               | <i>Intervalo de valores</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Densidade relativa (<math>\text{g/cm}^3</math>)</i>                                            | <i>3,4 – 3,7</i>            |
| <i>Coeficiente de expansão térmica (<math>\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}</math>)</i> | <i>7,5-8,5</i>              |
| <i>Resistência à compressão (MPa)</i>                                                             | <i>1000-2800</i>            |
| <i>Resistência à tração (MPa)</i>                                                                 | <i>140-170</i>              |
| <i>Resistência à flexão (MPa)</i>                                                                 | <i>280-420</i>              |
| <i>Tenacidade à fratura (<math>\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}</math>)</i>                        | <i>3-4</i>                  |
| <i>Módulo elástico (GPa)</i>                                                                      | <i>350-400</i>              |
| <i>Módulo de cisalhamento (GPa)</i>                                                               | <i>140-160</i>              |
| <i>Microdureza (<math>\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}</math>)</i>                                  | <i>1400-1800</i>            |

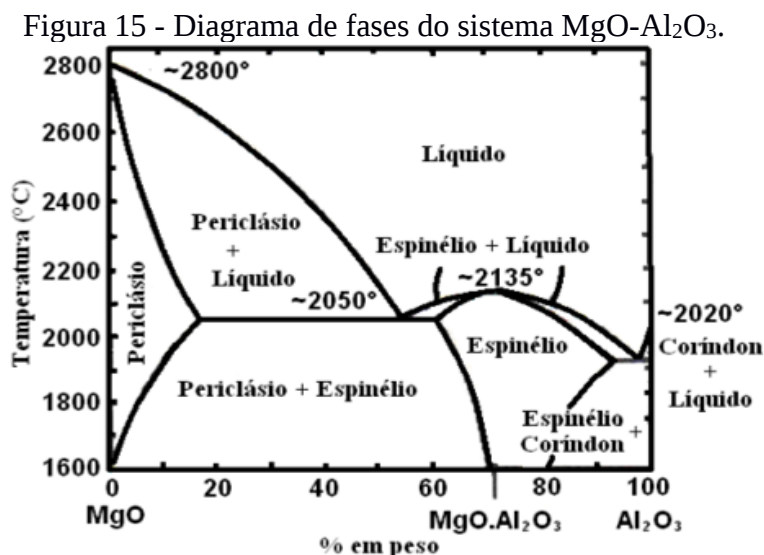
Fonte: Adaptado de Heimann (2010).

### 2.3.1 Diagrama de fases do $\text{Al}_2\text{O}_3$

De acordo com Gomes (1995), a alumina pode apresentar-se sob duas estruturas cristalinas diferentes, graças à variação nos arranjos atômicos. A  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  é uma fase estável termodinamicamente, com dureza e estabilidade química elevadas, sendo bastante utilizada em aplicações estruturais e de refratários. A  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , oposto da primeira, possui alta superfície

específica (unidade de área por peso), o que torna seu uso mais vantajoso em aplicações como catalisadores e agentes de adsorção de metais pesados, por exemplo. É uma fase meta estável.

Na Figura 15 é ilustrado o diagrama de fases do sistema MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



Fonte: Zhang, Lee (2004).

## 2.4 USINAGEM

A usinagem dos materiais é uma área da mecânica que representa os processos de fabricação onde os formatos e dimensões de um produto são obtidos através da remoção de material, o cavaco. Muitos dos produtos compostos de materiais metálicos passam, em alguma etapa de sua fabricação, por processos de usinagem. Por exemplo, quando é necessária uma melhoria no acabamento superficial, ajustes na geometria ou em tolerâncias dimensionais. Durante um processo de usinagem ocorrem deformações no material e geração de calor na área do corte, podendo ocasionar algumas mudanças na estrutura do material (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2014; MACHADO et al., 2014).

Em um processo de usinagem, é necessário o conhecimento de cada um dos parâmetros básicos, sendo eles o avanço, velocidade de corte e profundidade. O avanço remete à quantidade de material removida em cada revolução da peça ou ferramenta. A velocidade de corte indica a velocidade de rotação relativa entre peça e ferramenta. A profundidade indica quanto a ferramenta está entrando na peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2018).

Um conceito bastante importante na área de usinagem é a usinabilidade. É basicamente definida como a dificuldade que um material apresenta ao ser usinado. Segundo Weingaertner

et al. (1994), analisa-se a usinabilidade de metais levando em consideração alguns critérios, sendo eles: a qualidade da superfície usinada, os tipos de cavacos formados, o tempo de vida da ferramenta e as forças de corte. Assim, a usinabilidade mostra-se fortemente ligada aos fatores produtividade e custo de produção, pois pode afetar a qualidade final do produto, a frequência de setups para troca de ferramenta, etc. Tem-se então, uma certa preocupação não só com as propriedades físicas ou mecânicas do material a se trabalhar, mas também com seu comportamento durante o processo de fabricação do produto, como ele reage a determinado processo quando submetido a determinadas condições de manufatura, envolvendo parâmetros de processo, tipo de máquina e ferramenta.

#### **2.4.1 Usinagem por Torneamento**

O torneamento é um tipo de processo de usinagem onde é possível a fabricação de produtos cilíndricos e cônicos, com uma ferramenta de uma única ponta. É um dos processos mais facilmente encontrados na indústria, pela ampla gama de produtos que se fazem necessários em diversas áreas e com diversas finalidades. Assim, muitas pesquisas na área são voltadas a este tipo de processo, fazendo com que esteja em contínua evolução tecnológica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2018).

É um processo mecânico de corte, em que a peça efetua o movimento de rotação em torno de seu eixo longitudinal, enquanto a ferramenta se desloca simultaneamente, podendo ser em relação ao eixo longitudinal da peça ou transversal, ou até mesmo uma combinação dos dois movimentos, no caso de perfis cônicos ou com raiados (FERRARESI, 1970).

De acordo com Ferraresi (1970), ainda podemos classificar o torneamento de acordo com a trajetória da ferramenta, podendo ser um torneamento retilíneo ou curvilíneo, e em seguida podemos subdividir em outras classes. No torneamento Retilíneo o deslocamento da ferramenta ocorre em trajetória retilínea. Neste trabalho realizou-se um torneamento retilíneo cilíndrico externo, em que ocorre o deslocamento da ferramenta no sentido longitudinal ao eixo da peça, paralelo a ela e pela parte externa.

Pode-se ainda variar as condições em que é realizada uma operação de torneamento ou outro tipo de usinagem, quanto ao uso de fluido refrigerante e/ou lubrificante. Duas técnicas vêm sendo utilizadas com frequência, o corte a seco (não há fluido de corte durante a operação) e o corte com mínima quantidade de fluido (MQF), em que uma quantidade baixa de fluido de corte é aplicada com o auxílio de um fluxo de ar comprimido (DINIZ, MARCONDES, COPPINI; 2014).

### 2.4.2 Usinagem sem fluido de corte

Dentro dos processos de usinagem tem-se como objetivos a redução de custos, aumento da produtividade e melhoria na qualidade dos produtos fabricados. Com velocidades de corte mais elevadas é possível obter um aumento na produtividade, desde que não comprometam a vida da ferramenta, não aumente o volume de peças sucateadas e o tempo ocioso de máquina-ferramenta (KURAM et al, 2013).

Nem todos os materiais apresentam boa usinabilidade. Algumas ligas como as superligas resistentes ao calor, com aplicações dentro da indústria aeronáutica, apresentam dificuldades para serem usinadas, e o uso de fluidos refrigerantes são recorrentes nestes casos. Porém, o fator refrigeração pode ocasionar em elevados gastos que são somados ao processo de usinagem, visto que sua obtenção, manuseio, descarte e limpeza dos produtos após o corte podem gerar um custo quatro vezes maior que o custo de uma ferramenta de corte utilizada no processo. Para reduzir o custo de produção e os danos ambientais, fabricantes da indústria aeronáutica visam a utilização de processos de usinagem a seco a fim de eliminar os fluidos de corte ou então minimizar ao máximo o uso destes (DEVILLEZ et al, 2007).

Alguns fluidos de corte podem contaminar o solo e recursos hídricos, pois apresentam componentes como hidrocarbonetos aromáticos e metais pesados como o chumbo. Para que estes danos ambientais não ocorram, um descarte correto é exigido às empresas de manufatura, elevando assim os custos de produção (TAZEHKANDI et al, 2014). Os fluidos de corte podem gerar sobretudo danos à saúde humana. Já foi provado cientificamente que uma exposição prolongada dos operadores a estes compostos pode acarretar em doenças de pele e problemas respiratórios (OZCELIK et al, 2013).

Em um processo de usinagem a seco é necessário avaliar os materiais envolvidos. A ferramenta de corte deve manter suas propriedades sob temperaturas elevadas, propriedades estas que devem ser superiores às do material da peça usinada. Um certo acúmulo de calor na interface entre peça e ferramenta por determinado tempo também pode ser prejudicial aos materiais envolvidos (LANNA et. al., 2004).

## 2.5 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

Nesta seção são abordados os materiais utilizados na fabricação das ferramentas de corte que irão atuar em diferentes ramos da manufatura.

De acordo com a norma ABNT NBR 6175 de 1979, uma ferramenta utilizada em um processo de usinagem possui arestas de corte, e sua função consiste na remoção de material (em forma de cavaco), e para a evasão do material retirado é necessária uma superfície de saída na ferramenta.

Um dos fatores que influencia diretamente no desempenho de uma ferramenta de corte é a sua geometria. Uma geometria inadequada leva a maiores forças de corte em um processo de torneamento, maior consumo de energia e taxa de desgaste mais elevada na ferramenta. Assim, além de um consumo energético mais elevado, pode vir a gerar um aumento na rugosidade da superfície da peça usinada, afetando negativamente no caso de uma montagem eixo-bucha ou manivela-pistão, por exemplo (HARISHA, S. K. et. al, 2017).

A vida da ferramenta é o período em que ela trabalha sem que ocorra uma falha, por exemplo um lascamento, ou que possa trabalhar sem danificar a peça. Assim, a qualidade das peças produzidas e a produtividade dos processos de usinagem dependem da vida da ferramenta, e uma falha inesperada na ferramenta pode ocasionar um tempo de inatividade considerável e até mesmo a parada na linha de produção (WIKLUND, 1998).

De acordo com suas propriedades termo-físicas e mecânicas, estes materiais são classificados em cinco grupos: aços rápidos, carbonetos de tungstênio sinterizados (metal duro), cermets (composto formado por metal e partículas cerâmicas), cerâmicas, Nitreto cúbico de boro (CBN), Nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) e Diamante policristalino (PCD) (GRZESIK, 2017).

### 2.5.1 Ferramentas de Aço Rápido

As ferramentas de aço rápido são utilizadas com grande frequência na indústria metal mecânica, devido a sua facilidade de revestimento e por possuir elevada tenacidade à fratura. Entretanto, suas aplicações são restritas em materiais que requerem ferramentas com elevada dureza, resistência a abrasão e resistência sob altas temperaturas. Normalmente estas ferramentas são substituídas por ferramentas de metal duro (DINIZ, 2014). Portanto, recentemente com a evolução científica, está sendo possível a utilização destas ferramentas na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas. Pode ser observado em recentes trabalhos a

usinagem da superliga Ti-6Al-4V pelo processo de torneamento com mudanças de textura em sua superfície, onde a ferramenta de aço rápido texturizada apresentou redução de forças de corte e menor desgaste comparada à não texturizada (SAWANT, JAIN, PALANI; 2018 ).

### 2.5.2 Ferramentas de Metal Duro

O metal duro apresenta alta resistência a compressão e elevados valores de dureza. Trata-se de um composto formado por partículas duras de carbonetos de metais, refratários, sinterizados com um ou mais metais da família do ferro (ferro, níquel, cobalto). É produzido através de processos de metalurgia do pó (DINIZ et al., 2014).

Uma liga composta por carboneto de tungstênio em matriz de cobalto (WC + Co) foi desenvolvida na Alemanha, e mostrou-se eficiente para usinagem de ferros fundidos. Já na usinagem de aços apresentou desgastes de cratera na superfície de saída da ferramenta de corte. Então, com o objetivo de aumentar sua resistência foram adicionados outros carbonetos ao material, tais como o carbeto de titânio (TiC), carbeto de nióbio (NbC) e/ou carbeto de tântalo (TaC). Estes carbonetos apresentam dureza e resistência ao desgaste abrasivo superiores ao WC, além de uma maior estabilidade química, minimizando as ocorrências de difusão (MACHADO et al, 2015).

Estudos recentes testaram outros tipos de reforço na matriz das ferramentas de corte de carbeto de tungstênio. Realizou-se um trabalho em que foi sinterizada uma ferramenta de corte de WC-10Ni3Al e testada no torneamento da liga Ti6Al4V, comparando-se os resultados com o torneamento da mesma liga utilizando uma ferramenta de corte de WC-Co. Foram analisados os desgastes das superfícies de saída e de flanco, e verificou-se que a ferramenta de corte WC-10Ni3Al apresentou menores danos sob temperaturas elevadas, em comparação com a ferramenta de WC-Co (LIU et al, 2019).

Um outro recurso na busca pela otimização das propriedades destes materiais é o revestimento das ferramentas de corte. O objetivo é elevar a resistência ao desgaste da camada superior da ferramenta, onde ocorre o contato desta com a peça e o cavaco, e assim diminuir os esforços de corte e prolongar sua vida.

Há dois métodos comuns para a aplicação destes revestimentos nas ferramentas de metal duro. Um deles é o CVD (*Chemical Vapor Deposition* – Deposição Química de Vapor) onde o revestimento surge a partir de uma reação química entre um composto e o substrato. Dentre estas reações podem estar presente hidrólises, nitretação, carbonização, oxidação, redução ou até mesmo decomposição térmica. É possível a aplicação de várias camadas de revestimento e

a espessura total varia entre 2 e 12µm. E conforme aumenta-se esta espessura a resistência ao desgaste também aumenta, e a tenacidade da ferramenta de corte diminui. Revestimentos comuns neste método são Nitreto de Titânio (TiN), Carbonitreto de Titânio (TiCN), Carbetto de Titânio (TiC) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Dentre estes revestimentos o TiC é o que apresenta maior dureza (3200 HV), conferindo à ferramenta uma maior resistência ao desgaste de flanco. Contudo, a formação de uma camada de composição  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  (camada “eta”) pode acarretar no surgimento de microlascas e levar à quebra de ferramenta. Como solução pode-se utilizar o revestimento de carbonitreto de titânio (TiCN), que além de elevada dureza (3000 HV), uma porção dos átomos de C é substituída por N durante o processo de deposição (COSTA, 2016). As camadas de TiC e TiCN, por ter carbono presente, podem apresentar desgaste difusivo durante a usinagem, necessitando assim de uma barreira térmica para minimizá-lo. Então, aplica-se uma camada de óxido de alumínio sobre estas duas (DINIZ et al., 2014). O óxido de alumínio é um composto que apresenta elevada dureza, inércia química considerável e maiores resistência ao desgaste, e sua baixa condutividade térmica propicia uma barreira que dificulta a passagem do calor proveniente da peça à superfície da pastilha (MACHADO et al., 2015).

O nitreto de titânio (TiN) apresenta uma estabilidade química superior ao TiC, diminuindo a ocorrência de difusão durante a usinagem de aços, além de diminuir o atrito entre o inserto e o cavaco, sendo então utilizado na superfície mais externa da ferramenta (DINIZ et al., 2014).

Outro método comum de revestimento é o PVD (*Physical Vapor Deposition* – Deposição Física de Vapor), onde a deposição dos átomos, íons ou moléculas dá-se por um processo puramente físico, não havendo reação química entre estes elementos e o substrato. Possui alguns benefícios se comparado ao método CVD. Por exemplo, o fato de ocorrer em temperaturas mais baixas (por volta de 500°C) que evita o surgimento de camada “eta”. O método PVD permite granulometrias mais finas, o revestimento de aços-rápidos e cantos vivos. Contudo, não permite a deposição de multicamadas, a adesão do revestimento ao substrato e resistência ao calor são menores que nos processos de CVD.

Os compostos mais utilizados no revestimento por PVD são TiN, TiC, nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de alumínio-titânio (AlTiN), não sendo possível a aplicação de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

O TiAlN pode atuar sob temperaturas mais elevadas, pois apresenta maiores resistências à oxidação, e quando oxida ocorre a formação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que apresenta alta estabilidade química

e resistência à difusão, além de proteger a aresta da ferramenta devido sua baixa condutividade térmica, induzindo o calor a ser retirado pelo cavaco.

Na Figura 16 pode-se observar uma comparação entre ferramentas revestidas pelos processos PVD e CVD:

Figura 16 - Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD

|                             | CVD – Deposição química de vapor                                                                              | PVD – Deposição física de vapor                                                                                                                                     |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperatura de revestimento | Aproximadamente 1.000 °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,<br>TiN - TiCN - TiN, TiC - Al <sub>2</sub> C <sub>3</sub>                             | TiN, TiCN, TiAl                                                                                                                                                     |
| Principais aplicações       | Torneamento e mandrilamento                                                                                   | Fresamento, roscamento e furação                                                                                                                                    |
| Vantagens                   | <p>Maior resistência ao desgaste</p> <p>Maior resistência à craterização</p> <p>Grande vida da ferramenta</p> | <p>Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão</p> <p>Reduz APC</p> <p>Maior vida na ferramenta</p> |

Fonte: Machado et al. (2011).

### 2.5.3 Ferramentas de Materiais Super Duros

Sabe-se que a dureza é uma das propriedades mais importantes e que determina a aplicação de muitos materiais. E quando esta grandeza assume magnitude acima de 40GPa na escala de dureza Vickers, pode-se dizer que este é um material super-duro. Esta classe de materiais ganhou uma atenção especial devido sua ampla gama de aplicações sobretudo na área industrial, sendo muito utilizada na fabricação de ferramentas de corte, componentes abrasivos, revestimentos resistentes a riscos, etc. Até um dado momento o diamante era o material mais duro conhecido na natureza (HV~96GPa), contudo, sua fragilidade e instabilidade química na presença de oxigênio sob temperaturas próximas a 1000K acabou por restringir seu uso, estimulando a busca por novos materiais super-duros, mais estáveis termicamente. Considerou-se dois grupos como candidatos a materiais super-duros: um deles representado por fortes compostos de ligação covalente formados por elementos leves como o B, C, N e O, e o outro

grupo representado por boretos, carbonetos, e nitretos de metais de transição pesados parcialmente covalentes, sendo materiais aplicados a diversos segmentos industriais (VEPREK, 1999; HAINES, LÉGER, BOCQUILLON, 2001; KANER, GILMAN, TOLBERT, 2005).

O cBN é um material super abrasivo e utilizado na usinagem de aços ferrosos, possui estabilidade térmica superior ao diamante (1376K para o cBN e 953K para o diamante) e inércia química considerável. Porém, sua dureza ainda é relativamente baixa se comparada à do diamante (47GPa para o cBN e 85GPa para o diamante). Há uma busca por materiais super-duros alternativos a fim de preencher esta lacuna de propriedades entre estes dois materiais (cBN e diamante). Devido à afinidade com as treliças estruturais e o caráter de ligação covalente, o cBN e o diamante podem formar ligas capazes de preencher esta lacuna de desempenho. Em um estudo relatou-se a síntese e caracterização de corpos compactos e transparentes da liga de diamante-cBN, com diâmetros de 3mm, tamanho suficiente para reproduzir uma ferramenta de corte. Os resultados dos testes mostram que a liga diamante-cBN apresenta inércia química superior ao diamante policristalino e dureza maior que o cBN monocristalino. Foram realizados testes de corte sob elevadas velocidades em aço temperado e granito, concluindo-se que a liga diamante-cBN pode ser um material de corte universal (WANG P. et al., 2015 ).

Outro material super-duro utilizado no segmento de ferramentas de corte é o nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN). Este material confere à ferramenta uma elevada resistência à abrasão, possibilitando a usinagem de aços com uma fração de alto volume de carbonetos primários na microestrutura. Ferramentas de PCBN geralmente são empregadas na usinagem de aços com dureza entre 45 e 50 HRC, e quando são aplicadas na usinagem de aços com dureza inferior a 45 HRC é comum a ocorrência de adesão em sua superfície de saída. Um estudo recente analisou a influência deste material aderido nas ferramentas PCBN durante o torneamento do aço AISI D2, com durezas de 35 e 50 HRC. Pôde-se observar que o material aderido na ferramenta possuía os mesmos elementos químicos da liga de aço usinada, e que sua microestrutura era orientada de acordo com a direção do fluxo do cavaco. Observou-se também a fragmentação dos carbonetos primários. A quantidade de material aderido à superfície de saída da ferramenta durante a usinagem da peça com 35 HRC foi cerca de 360% maior que na usinagem do aço com 50 HRC. No caso da peça de 35 HRC, a camada de material aderida à ferramenta atua como uma aresta postiça de corte. No caso do aço com 50 HRC, o material aderido intensifica o mecanismo de desgaste por adesão, através do lascamento da superfície de saída da ferramenta de corte. O desgaste de flanco durante a usinagem da peça 50 HRC foi

menor que na usinagem da peça de 35 HRC, o que pode ser atribuído aos princípios do torneamento duro (SIRTULI; BOING; SCHROETER, 2019).

#### 2.5.4 Ferramentas de Cermets

Para a usinagem de materiais mais duros, é importante ressaltar não só a dureza da ferramenta de corte, mas também sua tenacidade. E o aprimoramento destas propriedades exige estudos constantes nesta linha. Geralmente esta classe (cerâmicas metálicas) é dividida em duas famílias de materiais de acordo com o material base, sendo eles o carboneto de tungstênio (WC-Co) e carboneto de titânio (TiC). Os cermets à base de TiC são mais refratários se comparados aos de WC-Co, e estes apresentam dureza mais elevada que o primeiro. Porém, os cermets à base de TiC possuem menor tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), o que restringe suas aplicações ao corte em altas velocidades (MARI et al., 2003). Através de estudos foi possível aprimorar a tenacidade à fratura destes materiais por meio de diversos fatores, como a escolha adequada da proporção C/N, teor de C, estado da liga na fase de pó bruto e o tamanho de grãos, temperatura de sinterização e o teor de ligante (LENGAUER W., SCAGNETTO F., 2018). Os cermets já foram considerados os materiais de ferramenta de corte mais promissores devido a alta dureza a quente, baixa reatividade com aços e outros metais, e alta condutividade térmica, que contribui para a diminuição do gradiente de temperatura e assim minimizam as rachaduras resultantes dos choques térmicos (ZHANG S., 1993).

Um estudo recente foi realizado a partir do torneamento a seco de um aço endurecido (liga VDEH-90CrSi5) utilizando uma ferramenta cermet (Ti, W)C-Mo2C-Co, onde analisou-se os desgastes e a resistência da mesma. Os testes foram executados dentro de uma faixa de parâmetros de corte, com  $V_c$  variando entre 180 e 450rpm,  $f$  entre 0,08 e 0,24mm/rot e  $a_p$  entre 0,20 e 0,50. A partir da análise da ferramenta pós experimento, observou-se que a fratura intergranular nas fases cerâmicas foi o modo dominante segundo a fractografia, devido aos grãos cerâmicos possuírem formato arredondado com energia superficial isotrópica nas fronteiras. Com relação ao seu desgaste de flanco, observou-se que o mecanismo de difusão foi mais significativo conforme o aumento da velocidade de corte, seguido pelo aumento da profundidade de corte. Contudo, os mecanismos de abrasão e adesão foram mais significativos no desgaste do flanco ao aumentar a taxa de avanço ( $f$ ). A profundidade de corte mais elevada resultou em um lascamento anormal da aresta de corte da ferramenta, devido ao aumento de tensões. O experimento permitiu concluir que para um aumento de eficiência desta ferramenta

sem diminuir significativamente sua resistência durante o torneamento do material em questão, considera-se primeiramente um aumento na taxa de avanço (YANG et al., 2018).

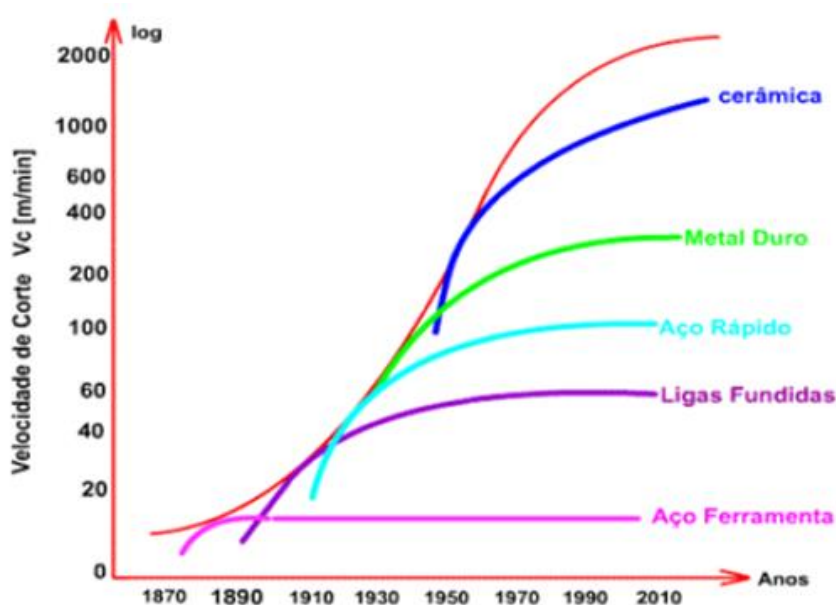
### 2.5.5 Ferramentas de Corte de Materiais Cerâmicos

Devido as propriedades desta classe de materiais, é possível obter ferramentas com elevada dureza a quente, baixo coeficiente de atrito, alta estabilidade química e trabalhar utilizando altas velocidades de corte. Porém, é uma classe que apresenta uma fragilidade maior em relação a outros tipos de materiais, exigindo um certo cuidado com a ferramenta principalmente com relação a esforços de impacto. Apresentam também uma baixa condutividade térmica (XAVIER, 2003).

Contudo, diversas pesquisas são realizadas com a finalidade de descobrir novas tecnologias e otimizar as propriedades destas ferramentas. Atualmente, os materiais mais usados na fabricação das mesmas são CBN,  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 + TiC$ , entre outras (SOUSA, 2013).

Analisando o gráfico na Figura 17, é possível observar uma evolução dentro da usinagem graças ao avanço no estudo dos materiais, relacionando cada um destes com sua capacidade de trabalho em termos de velocidade de corte de uma ferramenta:

Figura 17 - Evolução da máxima velocidade de corte ao longo dos anos



Fonte: CIMM (2019).

Apesar de algumas limitações, como mencionado anteriormente neste item, as ferramentas de corte de materiais cerâmicos ainda são mais adequadas que outras, por exemplo, na usinagem de materiais com elevada dureza e superligas.

#### *2.5.5.1 Ferramentas cerâmicas à base de $Al_2O_3$*

De acordo com Machado (2015), as ferramentas de corte de material cerâmico tiveram seu início no ramo industrial no início do século XX, e por volta de 1950 apenas, passou-se a utilizar o  $Al_2O_3$  como material base na fabricação das mesmas e introduzi-las no mercado.

Uma ferramenta à base de  $Al_2O_3$  pode proporcionar excelentes acabamentos superficiais e alta precisão nas dimensões da peça usinada. Com a capacidade de manter a dureza a temperaturas mais elevadas, boa resistência ao desgaste e uma boa estabilidade química mesmo sob grandes variações de temperatura, a alumina se destaca na confecção de ferramentas de corte diante até mesmo de alguns aços rápidos. Estas propriedades permitem que a ferramenta trabalhe em uma faixa ampla de parâmetros e dificulta sua adesão ao material usinado e a formação de uma aresta postiça (SOUSA, 2013). É comum acrescentar outros elementos ao material da ferramenta de corte para otimização de suas propriedades. Por exemplo, para aumentar ainda mais a resistência mecânica pode-se adicionar óxido de titânio, níquel e cromo. O fato de a alumina possuir uma baixa condutividade térmica pode acarretar no crescimento de grãos em temperaturas muito elevadas, podendo até alterar suas propriedades mecânicas. Adicionando MgO é possível inibir o crescimento dos grãos em tais condições. E a baixa condutividade térmica também torna o material mais susceptível a choques térmicos podendo gerar trincas na ferramenta, exigindo outros elementos como complemento (SANTOS, 2007).

De acordo com Sousa (2013), com a adição de elementos específicos é possível obter uma ferramenta de corte com propriedades melhoradas e torná-la capaz de usinar ferros fundidos e aços endurecidos. É possível ainda inserir mais de uma fase de reforço na ferramenta, podendo ser composta por TiN, TiC, whiskers (reforços em forma de fibras) de  $ZrO_2$ , SiC, WC, CBN, entre outros.

Em um estudo realizado utilizou-se uma ferramenta à base de alumina desenvolvida em laboratório no torneamento de um ferro fundido nodular, avaliando seu desempenho a partir dos desgastes gerados, rugosidades e comprimentos de corte. A ferramenta é composta de 95% de  $Al_2O_3$  e 5% de  $Y_2O_3$  em peso, com formato 16,36 x 16,36 x 7,50mm. O corpo de prova é de ferro fundido nodular em uma matriz ferrítica/perlítica de acordo com a norma ASTM A247, e dureza aproximada de 203HB. No experimento utilizou-se velocidades de corte ( $V_c$ ) de 200,

500 e 600 m/min, avanço ( $f$ ) de 0,25 e 0,10mm/rot e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,50mm. A partir dos resultados obtidos observou-se que com  $V_c$  de 500m/min foram gerados os menores valores de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_y$  e  $R_z$ ) e maior comprimento de corte ( $L_c$ ) (SOUZA *et al.*, 2014). Este estudo serviu de base para trabalhar com a ferramenta à base de alumina no torneamento de um ferro fundido nodular.

## 2.6 TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTES

Sob condições comuns em um processo de corte estão presentes, simultaneamente, diversos mecanismos de desgaste, que se apresentam de várias formas ainda que uma delas se mostre em evidência. E os principais mecanismos são (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2015):

**Abrasão:** Ocorre quando há remoção ou deslocamento de material da superfície devido a presença de partículas duras no sistema em um movimento relativo, podendo estas pertencerem a uma das superfícies nomeada de “dois corpos” ou então estarem soltas entre as duas superfícies considerada “três corpos”. É um dos principais mecanismos de desgaste. O desgaste frontal pode ser gerado a partir deste mecanismo, assim como o desgaste de cratera, sendo o primeiro o que mais sobressai. Um outro fator que pode influenciar neste mecanismo de desgaste é a temperatura de corte, visto que geralmente ocorre uma redução na dureza do material conforme o aumento de temperatura. Assim sendo, um material que apresenta maior dureza a quente tende a ser mais resistente quanto ao desgaste por abrasão (MACHADO *et al.*, 2015; DINIZ *et al.*, 2014).

**Difusão:** É responsável pelo desgaste de cratera quando há elevadas velocidades de corte, sendo a superfície de saída da ferramenta a região que oferece as condições necessárias. Neste mecanismo ocorre a passagem de átomos de um material a outro. Depende bastante do fator temperatura, do tempo e da afinidade entre os materiais envolvidos. Elevadas velocidades relativas entre ferramenta e peça ou entre ferramenta e cavaco e pequenas faixas de tempo de contato não são tão favoráveis para que ocorra este tipo de mecanismo, porém, há uma região de contato na ferramenta em que a velocidade relativa é próxima de zero, proporcionando tempo suficiente para que ocorra a difusão, juntamente com temperaturas elevadas (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2015).

**Aderência ou adesão:** Este mecanismo ocorre mais facilmente em baixas velocidades de corte. Se há um fluxo irregular de material passando pela superfície de folga ou de saída da ferramenta, pode vir a ocorrer em altas velocidades, contudo, nestas condições é normal que outros tipos de mecanismos se sobressaiam, de maneira que a adesão se torna quase insignificante. Ao unir duas superfícies metálicas, em contato sob ação de uma carga mediana, com velocidades de corte e temperaturas baixas, ocorre a formação de um extrato metálico na interface e sua resistência é o suficiente para gerar uma fragmentação em um dos metais ao tentar desanexá-los. Então, as partículas de um material são transferidas para a superfície do outro. Este processo pode contribuir para gerar uma aresta postiça de corte (APC) ou um desgaste por entalhe. Pode estar presente também em situações em que o fluxo de cavaco é irregular, e nestes casos, um recobrimento com baixos coeficientes de atrito na ferramenta e uso apropriado de um fluido de corte podem reduzir sua ocorrência (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2015).

**Oxidação:** Este mecanismo está presente quando há uma certa afinidade entre o material e oxigênio. Forma-se então um filme poroso de óxido em sua superfície, que pode ser removido com facilidade pelo atrito, gerando desgaste. Geralmente este desgaste ocorre com maior intensidade nas extremidades da região de contato entre a ferramenta e o cavaco, por ser uma região acessível ao ar. Alguns óxidos apresentam boa resistência podendo melhorar as propriedades na superfície de um material, por exemplo, o óxido de alumínio (DINIZ et al., 2014).

Ainda que a ferramenta de corte apresente propriedades que minimizam ao máximo a ocorrência de avarias, sempre estará suscetível a sofrer desgastes. Para que o processo de usinagem não seja comprometido, geralmente a ferramenta é reafiada ou substituída por outra antes que os desgastes atinjam uma proporção crítica. E dentre os vários tipos de desgaste existentes, alguns se destacam, sendo mencionados a seguir (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2015):

**Degaste de flanco:** É gerado a partir do contato entre a ferramenta e a peça, e tende a aumentar conforme o aumento da velocidade de corte. Ocorre na superfície de folga da ferramenta, prejudica o acabamento superficial da peça e pode alterar suas dimensões finais. É o tipo mais comum de desgaste, e possibilita à ferramenta uma vida estável e previsível (DINIZ et al., 2014; SANDVIK, 2015a).

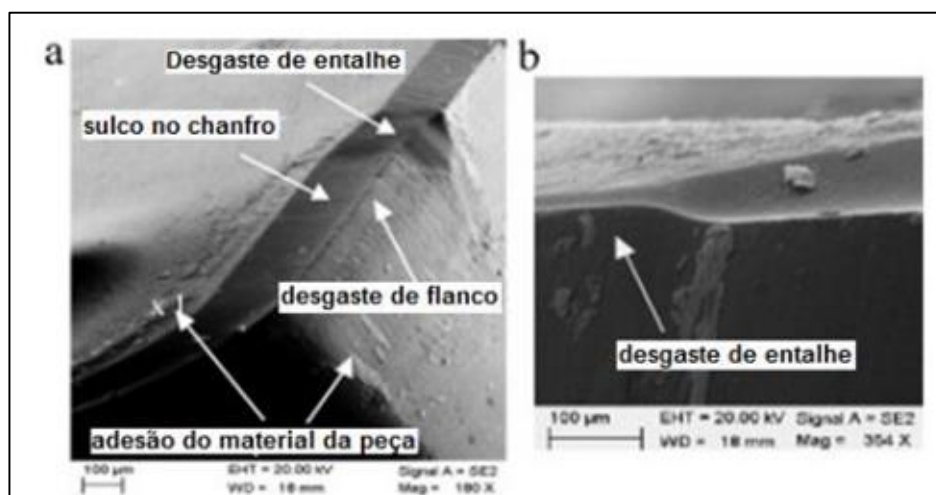
**Desgaste de cratera:** Gerado a partir do atrito entre ferramenta e o cavaco, apresentando-se na superfície de saída da ferramenta. Esta forma de desgaste pode ser evitada ou minimizada quando a ferramenta possui um revestimento eficiente em sua superfície. Contudo, quando um desgaste de cratera se encontra com o desgaste de flanco, tem-se um colapso da ferramenta, necessitando a troca da mesma (DINIZ et al., 2014).

**Lascamento:** É uma falha em que partículas grandes são removidas da ferramenta de uma só vez, sendo de ocorrência prematura e acidental. Sua ocorrência prejudica o acabamento superficial da peça (STEMMER, 1993; DINIZ et al., 2014).

**Trincas:** Surgem em decorrência da variação de temperatura e de esforços mecânicos, gerados em cortes descontínuos ou interrompidos e alteração na espessura de corte, e podem promover a quebra da ferramenta (DINIZ et al., 2014).

Em um estudo sobre torneamento do ferro fundido nodular utilizando ferramentas cerâmicas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , com velocidade de corte ( $V_c$ ) de 240m/min ou superior, foi possível observar que dois mecanismos de desgaste foram predominantes, o desgaste por abrasão e desgaste adesivo. Ainda foi possível observar um desgaste por oxidação em uma região específica da ferramenta de corte, acarretando em desgaste de entalhe nos gumes primários e secundários (GRZESIK; MALECKA, 2011). Tais mecanismos de desgaste podem ser observados na Figura 18:

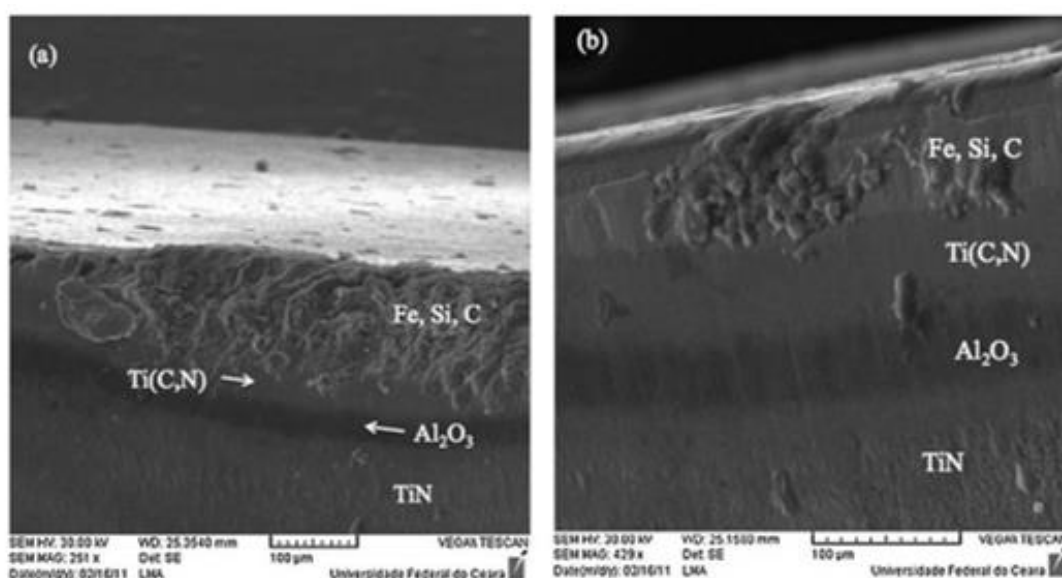
Figura 18 - Desgaste do entalhe de gume primário (a) e secundário (b) na ferramenta cerâmica  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com  $V_c$  de 240m/min



Fonte: Adaptado de Grzesik e Malecka (2011).

Em outro estudo realizou-se o torneamento do ferro fundido nodular austemperado dos grupos G2 e G3 segundo a norma ASTM, e também observou-se abrasão e adesão como principais mecanismos de desgaste na ferramenta de corte. A velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada foi de 120m/min, e o avanço ( $f$ ) de 0,18mm/rot, com profundidade de corte ( $a_p$ ) de 2 mm (CARVALHO et al., 2013). Na figura 19 pode-se observar imagens das ferramentas de corte obtidas a partir da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 19 - Imagens MEV das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular austemperado. (a) G2 e (b) G3.



Fonte: Carvalho et al., (2013).

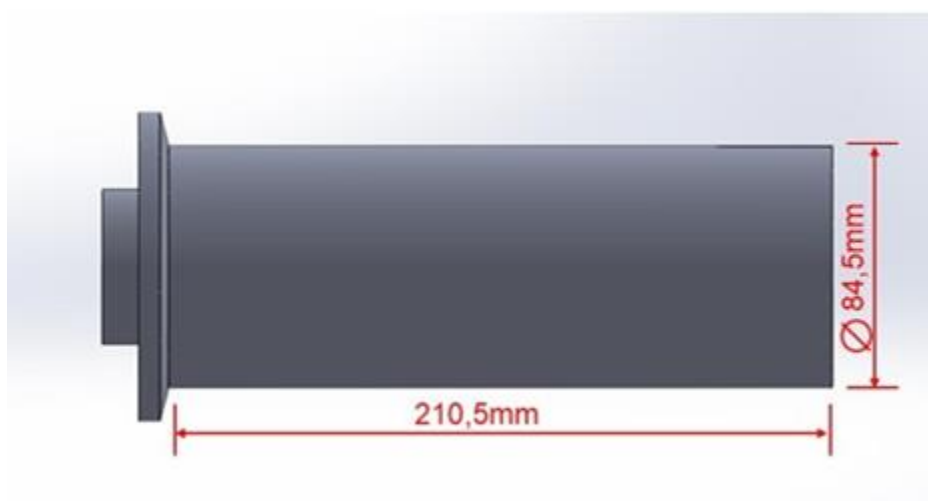
Na Figura 19, a imagem (a) retrata uma região da superfície indicando que houve maior adesão de material na usinagem do material G2, enquanto que na imagem (b) pode-se observar ranhuras verticais, evidenciando o desgaste por abrasão durante a usinagem do material G3.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de torneamento foram realizados usando uma peça cilíndrica de ferro fundido nodular com matriz perlítica, nas dimensões de comprimento 210,5mm e diâmetro de 84,5mm, condição para utilização de altas velocidades, sem a utilização de fluido de corte. O corpo de prova pode ser observado na Figura 20:

Figura 20 – Representação do corpo de prova utilizado no experimento



Fonte: Autor.

Para a realização dos testes de usinagem, dividiu-se o corpo de prova (tarugo) em duas seções lineares de 105,25mm, sendo que em cada seção utilizou-se combinações iguais de parâmetros, com duas réplicas. No processo de usinagem foi utilizada uma ferramenta de corte redonda de material cerâmico na geometria RNGN120400-T0220, de acordo com a norma ISO 1832, constituída por uma composição de 99,75% em massa de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com dopagem de óxido de magnésio (0,25% em massa de  $\text{MgO}$ ). Os parâmetros utilizados na execução do torneamento estão na Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processo de torneamento.

| Parâmetro | $V_c$ (m/min) | $f$ (mm/rot) | $a_p$ (mm) |
|-----------|---------------|--------------|------------|
| 1         | 400           | 0,50         | 0,25       |
| 2         | 400           | 0,30         | 0,25       |
| 3         | 500           | 0,30         | 0,25       |
| 4         | 500           | 0,50         | 0,25       |
| 5         | 600           | 0,30         | 0,25       |
| 6         | 600           | 0,50         | 0,25       |
| 7         | 700           | 0,30         | 0,25       |
| 8         | 700           | 0,50         | 0,25       |

Fonte: Autor.

Os parâmetros de usinagem foram escolhidos com base na literatura de ferramentas cerâmicas. Ao final de cada etapa de usinagem, os cavacos foram recolhidos com o objetivo de realizar uma análise sobre o comportamento do material da peça/ferramenta em cada seleção de parâmetros. A análise de desempenho da ferramenta foi realizada a cada duas passadas (duas réplicas), retirando a ferramenta para monitoramento dos desgastes e mecanismos de desgaste, como também para realização de três medidas de rugosidade no corpo de prova defasadas de 120° cada. Após as medidas de rugosidade  $Ra(\mu m)$  e  $Rt(\mu m)$  foram calculados a média para a determinação do gráfico. No mesmo ensaio foram utilizados equipamentos para análise de vibrações, potência de corte e emissão acústica, utilizando os softwares Matlab versão R2015a e Minitab versão 17.

## 3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste item são demonstrados e especificados todos os equipamentos utilizados na usinagem e nas análises dos resultados.

### 3.2.1 Equipamentos e ferramentas de corte utilizados

Os testes de torneamento foram realizados em um centro de torneamento modelo ROMI GL240M, alocado no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP), conforme pode ser observado na Figura 21:

Figura 21 - Centro de torneamento modelo ROMI GL240M situado no DMT, FEG-UNESP.

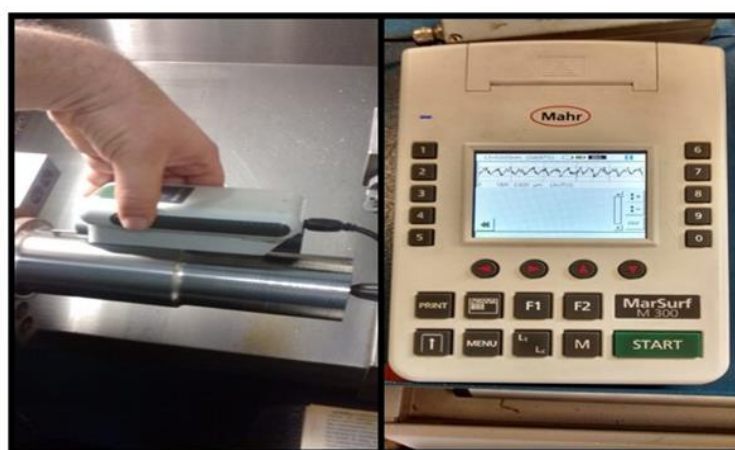


Fonte: Autor.

Para analisar a rugosidade da superfície da peça usinada, foram considerados os parâmetros  $R_a$  (Rugosidade média) e  $R_t$  (Rugosidade total), conforme o item 2.1. O comprimento de amostragem ou “cut-off” adotado foi de 0,8mm, de acordo com a norma ISO 4288:1996, utilizando um rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18, ilustrado na Figura 22.

A análise estatística de variância entre os fatores  $V_c$ ,  $f$ , e da interação  $V_c \times f$ , com a Rugosidade média ( $R_a$ ) registrada durante o experimento foi realizada considerando valor crítico (alfa) de 5%.

Figura 22 - Rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18.



Fonte: Autor.

Na Figura 23 pode ser observado as ferramentas de corte utilizadas nos ensaios com composição de 99,75% em massa de alumina ( $Al_2O_3$ ) com dopagem de óxido de magnésio (0,25% em massa de  $MgO$ ).

Figura 23 - Ferramentas de corte redondas de geometria RNGN120400-T0220 de acordo com a norma ISO1832.



Fonte: Autor.

Na Tabela 2 são mostradas algumas propriedades da ferramenta utilizada no trabalho:

Tabela 2 - Propriedades da ferramenta  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  utilizada no trabalho

| Propriedades                                               | Valores            |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| Densidade relativa (%)                                     | 98,50 0,008        |
| Dureza (GPa)                                               | $19,28 \pm 0,12\%$ |
| Tenacidade à fratura ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) | $3,65 \pm 14\%$    |
| Retração linear                                            | $20,4 \pm 0,16\%$  |

Fonte: Autor.

A ferramenta foi fixada em um suporte ilustrado na Figura 24:

Figura 24 - Suporte para fixação da ferramenta



Fonte: Autor

Para a captação da potência consumida durante os processos de usinagem foi usado um sensor de transdução de corrente da marca LEM, modelo AT 100 B10, ilustrado na Figura 25:

Figura 25 - Sensor de transdução de corrente da marca LEM, modelo AT 100 B10



Fonte: Autor

Os sinais captados pelo sensor, na entrada da máquina, são encaminhados para uma placa de aquisição de dados, que realiza a conversão dos sinais analógicos e o transformam em unidade de potência (Watts), de acordo com a Equação 1:

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (1)$$

Onde temos:

$P_c$ : Potência consumida (Watts);

$I$ : Corrente alternada (Ampére);

$U_f$ : Tensão de uma fase (Volts);

$F_p$ : Fator de potência;

É gerada uma tensão de 0 a 10 Volts ( $V_{cc}$ ) no sensor, sendo proporcional à corrente de entrada em uma fase do motor. É necessária uma conversão do sinal para utilizar a Equação(3). Para tal, o fabricante do sensor oferece a equação(2) descrita abaixo:

$$I = V_{cc} \times 10 \quad (2)$$

Onde:

$I$ : Corrente de uma das fases (Ampéres);

$V_{cc}$ : Tensão de corrente contínua (Volts);

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

A partir do software Matlab, os sinais coletados foram convertidos em números, e então, com ajuda do software Minitab estes dados puderam ser melhor interpretados a partir da confecção de curvas correlacionando diversos parâmetros.

A análise estatística de variância da influência dos fatores  $V_c$ ,  $f$  e da interação  $V_c \times f$  na potência registrada durante o ensaio foi realizada considerando um valor crítico (alfa) de 5%.

Para realizar a captação dos sinais de emissão acústica utilizou-se um sistema da marca Physical Acoustics Corporation, contendo o sensor R15A e um amplificador de sinal 1272-1000 com uma saída retificada para RMS, valor quadrático médio (Figura 26):

Figura 26 - Sistema de captação da emissão acústica da marca Physical Acoustics Corporation



Fonte: Autor.

Para captar os sinais de vibração utilizou-se um sensor da marca Vibro Control, modelo TV-100, que envia os sinais analógicos à placa de aquisição de dados, e esta irá convertê-los

em sinais digitais para que possam ser analisados. Os valores são obtidos em Vcc e precisam ser convertidos em velocidade (mm/s) a partir da Equação 4:

$$v = \frac{25xV_{cc}}{8} \quad (4)$$

O sensor de vibração é ilustrado na Figura 27:

Figura 27 - Sensor de vibração marca Vibro Control, modelo TV-100



Fonte: Autor.

A análise estatística de variância entre os fatores  $V_c$ ,  $f$ , e da interação  $V_c \times f$ , com a vibração registrada durante ensaio foi feita considerando valor crítico (alfa) de 5%.

As análises de desgaste da ferramenta foram realizadas a partir de um microscópio Zeiss modelo Stemi 2000 ilustrado na Figura 28:

Figura 28 - Microscópio Zeiss modelo Stemi 2000



Fonte: Autor.

Realizou-se as medições em um microscópio Mar Vision MM 200, ilustrado na Figura 29:

Figura 29 - Microscópio Mar Vision MM200



Fonte: Autor

A medição dos desgastes foi realizada levando em consideração o maior desgaste encontrado em cada lado utilizado da ferramenta de corte, associando o valor ao parâmetro  $VB_{máx}$ .

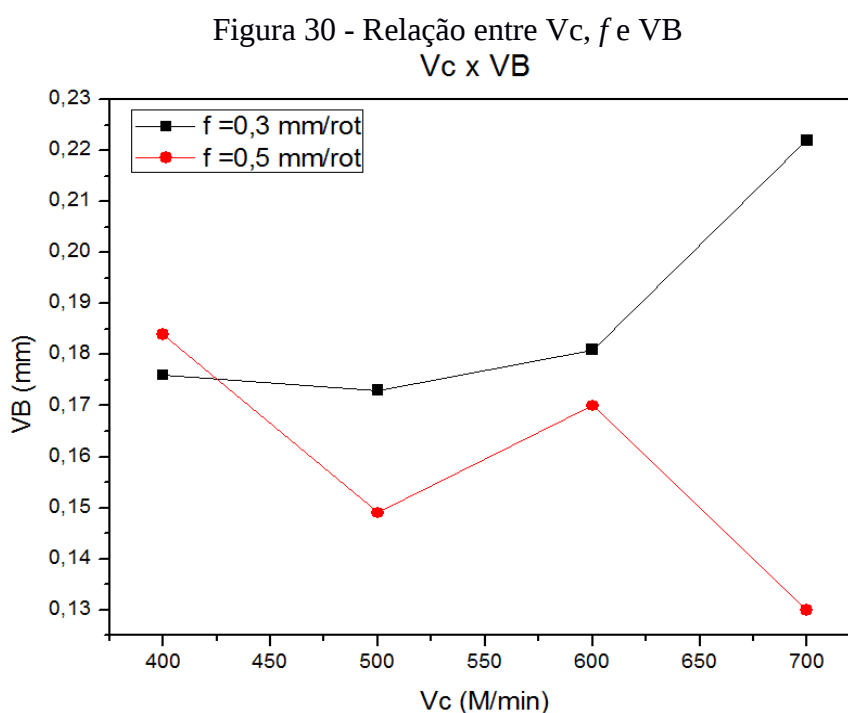
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são abordados os resultados obtidos no experimento, bem como comparações com a literatura e discussões que permitem chegar às conclusões finais deste trabalho.

### 4.1 ANÁLISE DOS DESGASTES DE FLANCO E VELOCIDADE DE CORTE

Com os valores dos desgastes medidos após o experimento ( $VB_{\text{máx}}$ ) e as velocidades de corte ( $V_c$ ) foi possível plotar um gráfico relacionando estes dois parâmetros juntamente com o avanço ( $f$ ), ilustrado na Figura 30.

Na Figura 30 observa-se a influência do avanço no desgaste da ferramenta em função das diferentes velocidades de corte. Pode ser observado nesta figura, que o avanço de 0,5mm/rot promoveu menor desgaste de flanco na ferramenta de corte comparado ao avanço de 0,3mm/rot, com exceção da  $V_c$  de 400m/min, resultados que podem influenciar nas rugosidades. Acredita-se que tal fato ocorre devido a melhor acomodação ferramenta-peça. Os resultados observados na Figura 30 também demonstram que a ferramenta de corte cerâmica utilizada pode apresentar um bom desempenho em alta velocidade, sendo característico das ferramentas cerâmicas exibir boa performance sob elevadas temperaturas.



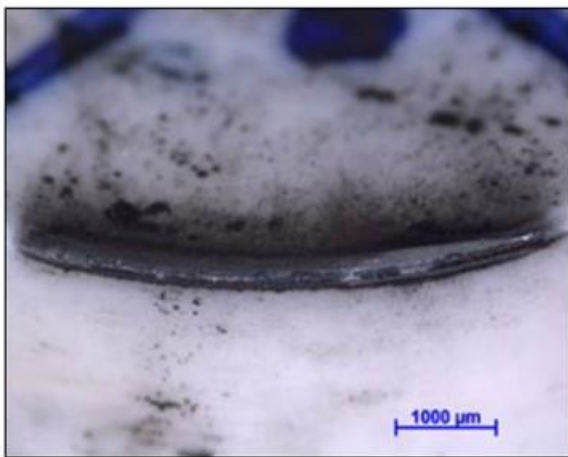
Fonte: Autor.

Analisando a Figura 30, nas condições de velocidade de corte de 400, 500 e 600 m/min com avanço de 0,3mm/rot observa-se desgaste com tendência similar. Nestas mesmas condições utilizando avanço de 0,5mm/rot observou-se maior taxa de desgaste com  $V_c$  de 400m/min e uma redução em  $V_c$  de 500m/min, confirmando esta redução com  $V_c$  de 500m/min. Isto demonstra que o avanço possui grande influência nos resultados. Estas características são possíveis de ser observadas devido ao desgaste ser abrasivo.

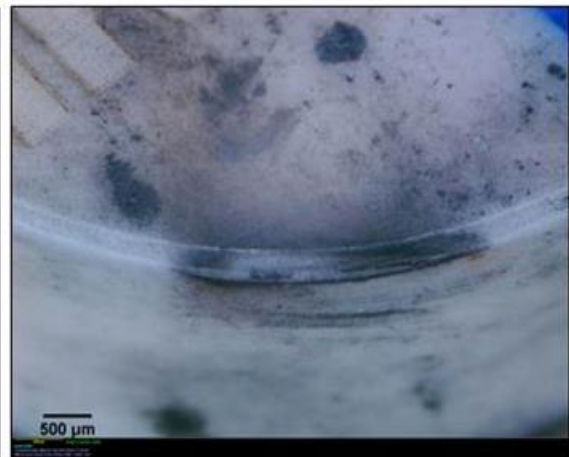
#### 4.1.1 Análise dos tipos de desgastes

Analisando as Figuras de 31 a 38 podemos observar os desgastes gerados em cada combinação de parâmetros de usinagem. Os parâmetros utilizados são identificados em cada figura:

Figura 31 (a) -  $V_c=700\text{m/min}$ ,  $f=0,5\text{mm/rot}$ ,  $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}}=0,130\text{mm}$       Figura 31 (b) -  $V_c=700\text{m/min}$ ,  $f=0,5\text{mm/rot}$ ,  $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}}=0,130\text{mm}$

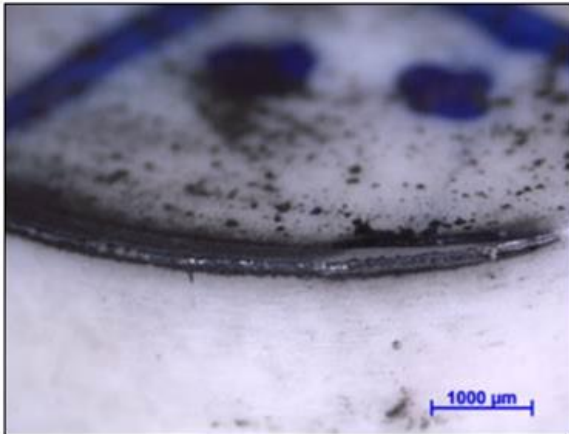


Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

Figura 32 (a) -  $V_c = 400\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{m\acute{a}x} = 0,184\text{mm}$



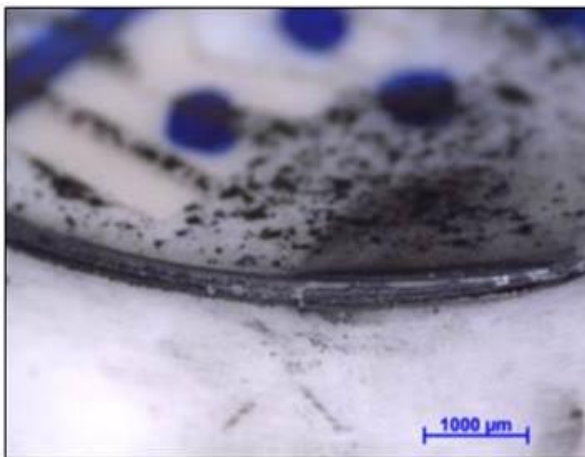
Fonte: Autor.

Figura 32 (b) -  $V_c = 400\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{m\acute{a}x} = 0,184\text{mm}$



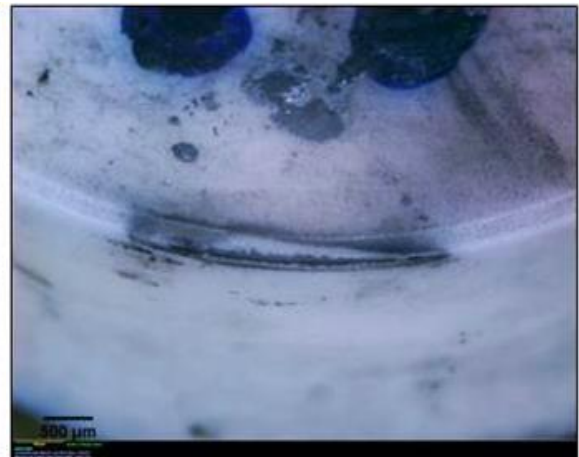
Fonte: Autor.

Figura 33 (a) -  $V_c = 400\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{m\acute{a}x} = 0,176\text{mm}$



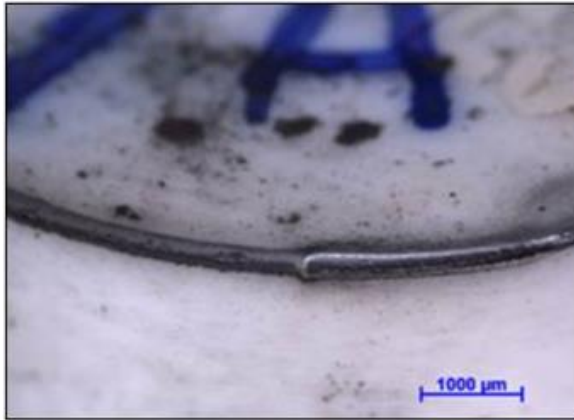
Fonte: Autor.

Figura 33 (b) -  $V_c = 400\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{m\acute{a}x} = 0,176\text{mm}$



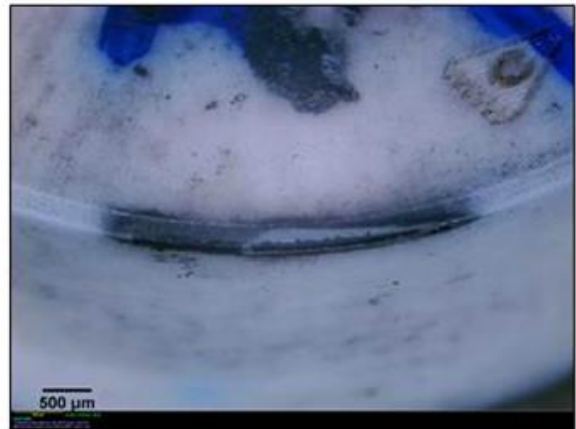
Fonte: Autor.

Figura 34 (a) -  $V_c = 500\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,173\text{mm}$



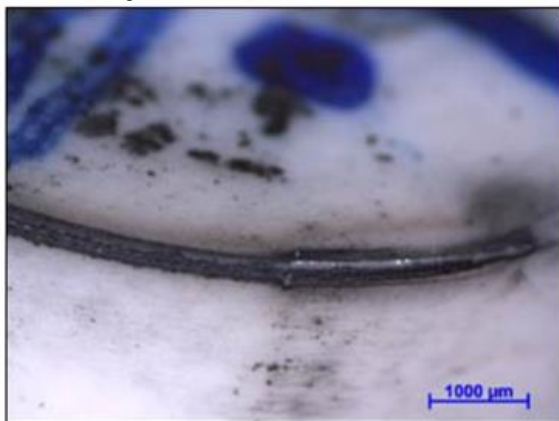
Fonte: Autor.

Figura 34 (b) -  $V_c = 500\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,173\text{mm}$



Fonte: Autor.

Figura 35 (a) -  $V_c = 500\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,149\text{mm}$



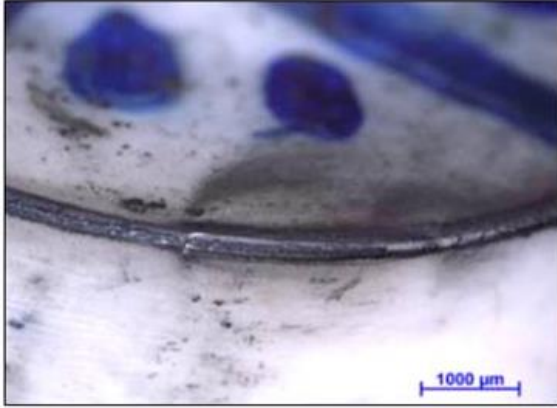
Fonte: Autor.

Figura 35 (b) -  $V_c = 500\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,149\text{mm}$



Fonte: Autor.

Figura 36 (a) -  $V_c = 600\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,181\text{mm}$



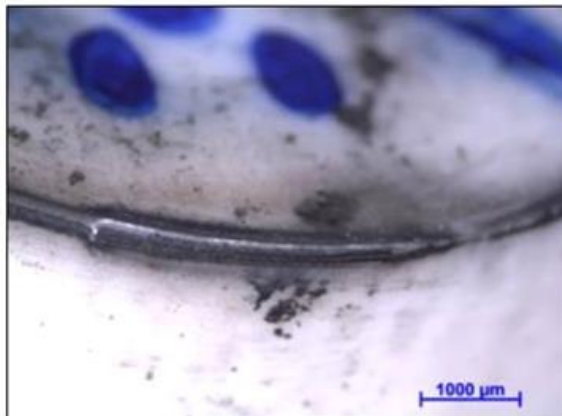
Fonte: Autor.

Figura 36 (b) -  $V_c = 600\text{m/min}$ ,  $f = 0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,181\text{mm}$



Fonte: Autor.

Figura 37 (a) -  $V_c = 600\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,170\text{mm}$



Fonte: Autor.

Figura 37 (b) -  $V_c = 600\text{m/min}$ ,  $f = 0,5\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p = 0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}} = 0,170\text{mm}$



Fonte: Autor.

Figura 38 (a) -  $V_c=700\text{m/min}$ ,  $f=0,3\text{mm/rot}$ , Figura 38 (b) -  $V_c=700\text{m/min}$ ,  $f=0,3\text{mm/rot}$ ,  
 $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}}=0,222\text{mm}$   $a_p=0,25\text{mm}$ ,  $VB_{\text{máx}}=0,222\text{mm}$



Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

Analisando o desempenho da ferramenta podemos observar que a ferramenta não sofreu fratura abrupta, o que segura possibilidades de uso desta cerâmica como ferramenta de corte em função das suas propriedades físicas e mecânicas. Os resultados obtidos demonstram potencial para usinagem do ferro fundido nodular em altas velocidades. Analisando os parâmetros de usinagem podemos observar que na velocidade de corte  $700\text{m/min}$  e avanço de  $0,5\text{mm/rot}$  foi obtido o menor desgaste, conforme demonstrado nas Figuras 30 e 31. Entretanto nesta mesma velocidade utilizando  $f$  de  $0,3\text{mm/rot}$  foi a condição que promoveu o maior desgaste. Isto evidencia que nesta condição o avanço tem grande influência no desgaste de flanco.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DAS RUGOSIDADES MÉDIA( $R_a$ ) E TOTAL ( $R_t$ )

Após a coleta de dados a partir das medições, estes foram reunidos junto aos parâmetros de corte, permitindo a comparação entre eles e a confecção de curvas a fim de facilitar o estudo. Os dados adquiridos estão na Tabela 3:

Tabela 3 - Relação entre parâmetros de usinagem utilizados e os dados coletados durante e após o experimento

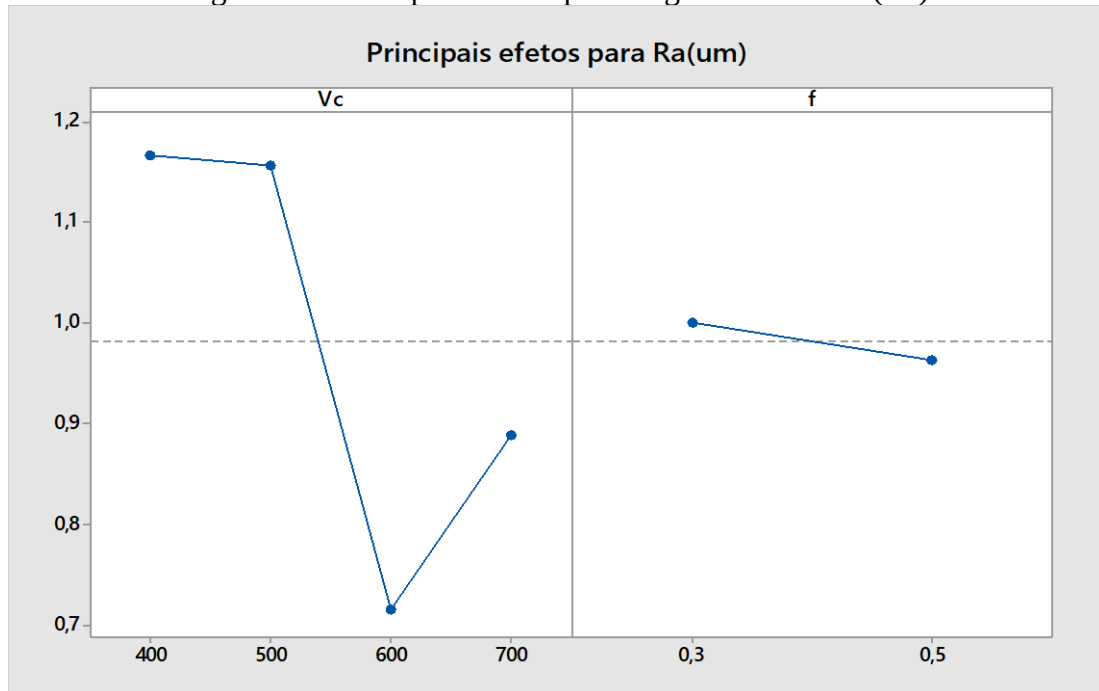
| Ensaio | $V_c$ (m/min) | $f$ (mm/rot) | $a_p$ (mm) | $R_{amédio}$ | $R_{tmédio}$ | $V_B$ máx (mm) |
|--------|---------------|--------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| 1      | 400           | 0,50         | 0,25       | 1,136        | 8,331333     | 0,184          |
| 2      | 400           | 0,50         | 0,25       | 1,007333     | 9,100667     |                |
| 3      | 400           | 0,30         | 0,25       | 10           | 40           | 0,176          |
| 4      | 400           | 0,30         | 0,25       | 1,259667     | 6,368        |                |
| 5      | 500           | 0,30         | 0,25       | 10           | 40           | 0,173          |
| 6      | 500           | 0,30         | 0,25       | 0,751        | 6,253667     |                |
| 7      | 500           | 0,50         | 0,25       | 1,367667     | 7,440667     | 0,149          |
| 8      | 500           | 0,50         | 0,25       | 1,753333     | 10,266       |                |
| 9      | 600           | 0,30         | 0,25       | 0,621667     | 4,966667     | 0,181          |
| 10     | 600           | 0,30         | 0,25       | 1,143333     | 6,152333     |                |
| 11     | 600           | 0,50         | 0,25       | 0,594        | 4,938        | 0,170          |
| 12     | 600           | 0,50         | 0,25       | 0,503667     | 4,535        |                |
| 13     | 700           | 0,30         | 0,25       | 1,006        | 6,069333     | 0,222          |
| 14     | 700           | 0,30         | 0,25       | 1,206333     | 6,641        |                |
| 15     | 700           | 0,50         | 0,25       | 0,685333     | 5,613333     | 0,130          |
| 16     | 700           | 0,50         | 0,25       | 0,659667     | 5,825        |                |

Fonte: Autor.

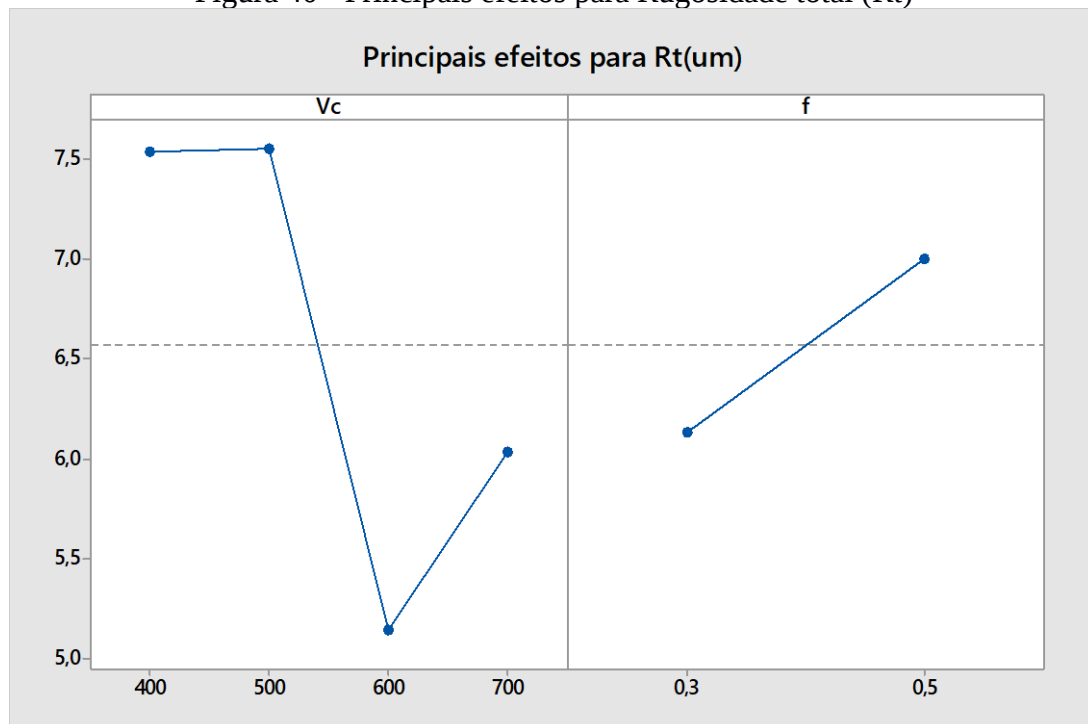
Os valores de  $R_a$  e  $R_t$  nos ensaios 3 e 5 representam as maiores rugosidades da tabela e podem ser associados a maiores vibrações da ferramenta-peça, cujos valores podem ser observados na Figura 42.

Nas Figuras 39 e 40 são encontrados valores de Rugosidade média ( $R_a$ ) e Rugosidade total ( $R_t$ ) respectivamente, e estão correlacionados com as diferentes velocidades de corte e avanços, a fim de analisar a influência destes parâmetros isoladamente.

Os gráficos ilustrados nas Figuras de 39 a 43 representam análises estatísticas obtidas a partir dos softwares Matlab e Minitab, de maneira que os valores plotados não são necessariamente os mesmos coletados durante as medições.

Figura 39 - Principais efeitos para Rugosidade média ( $R_a$ )

Fonte: Autor.

Figura 40 - Principais efeitos para Rugosidade total ( $R_t$ )

Fonte: Autor.

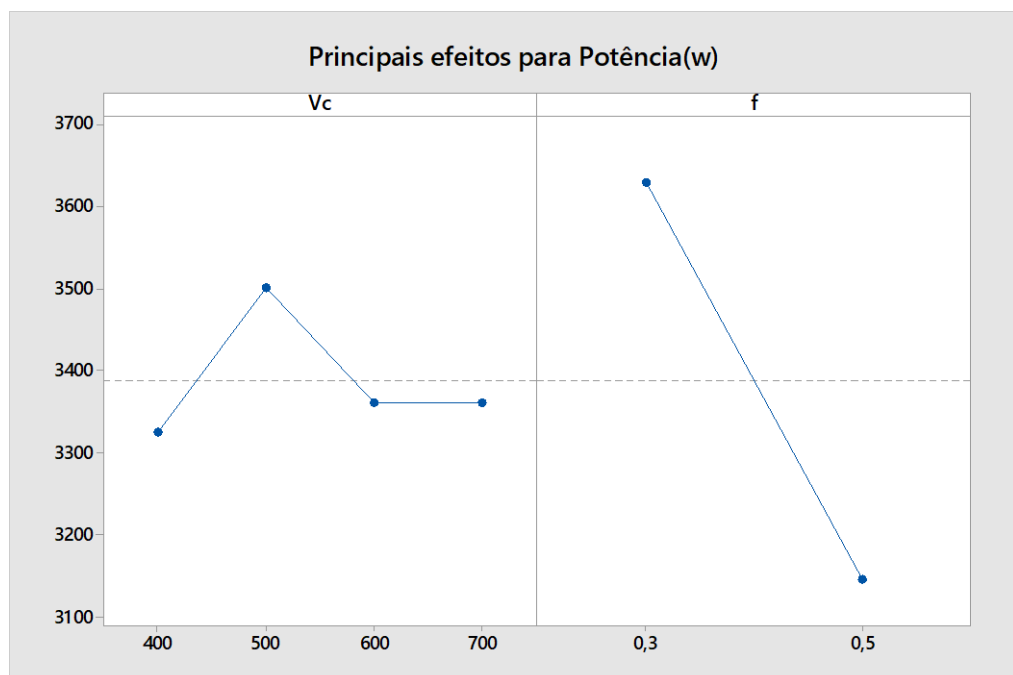
Analisando os resultados obtidos de  $R_a$  e  $R_t$  (Figuras 39 e 40) podemos observar a influência das velocidades de corte e dos avanços. Na Figura 39 os resultados de  $R_a$  demonstram

uma redução para a velocidade de 600m/min com avanço de 0,5mm/rot, obtendo o menor valor de  $R_a$ . Pela medição do rugosímetro, com estes parâmetros obteve-se o valor de  $R_a = 0,5\mu\text{m}$ , o que caracteriza um processo de retífica. Nas velocidades de 400, 500 e 700m/min com avanço de 0,5mm/rot, os  $R_a$ 's médios obtidos com o rugosímetro foram de 1,072, 1,5605 e 0,6725 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Na Figura 40 pode-se observar as variações dos valores de  $R_t$  em função das diferentes velocidades de corte e avanços. Nesta Figura pode-se observar para velocidade de corte uma tendência similar à observada na Figura 39, entretanto, o comportamento da rugosidade é o inverso quando tem-se a influência do avanço como parâmetro isolado. Para as velocidades de 400, 500 e 700m/min e avanço de 0,5mm/rot, os  $R_t$ 's médios obtidos nas medições foram de 8,716, 8,853 e 5,719 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Isto ocorre devido a maior precisão dos resultados obtidos pela rugosidade total.

#### 4.3 POTÊNCIA DE CORTE

Na Figura 41 pode-se observar com mais clareza a interação entre os parâmetros velocidade de corte ( $V_c$ ) e avanço ( $f$ ) com a Potência, individualmente.

Figura 41- Principais efeitos para potência



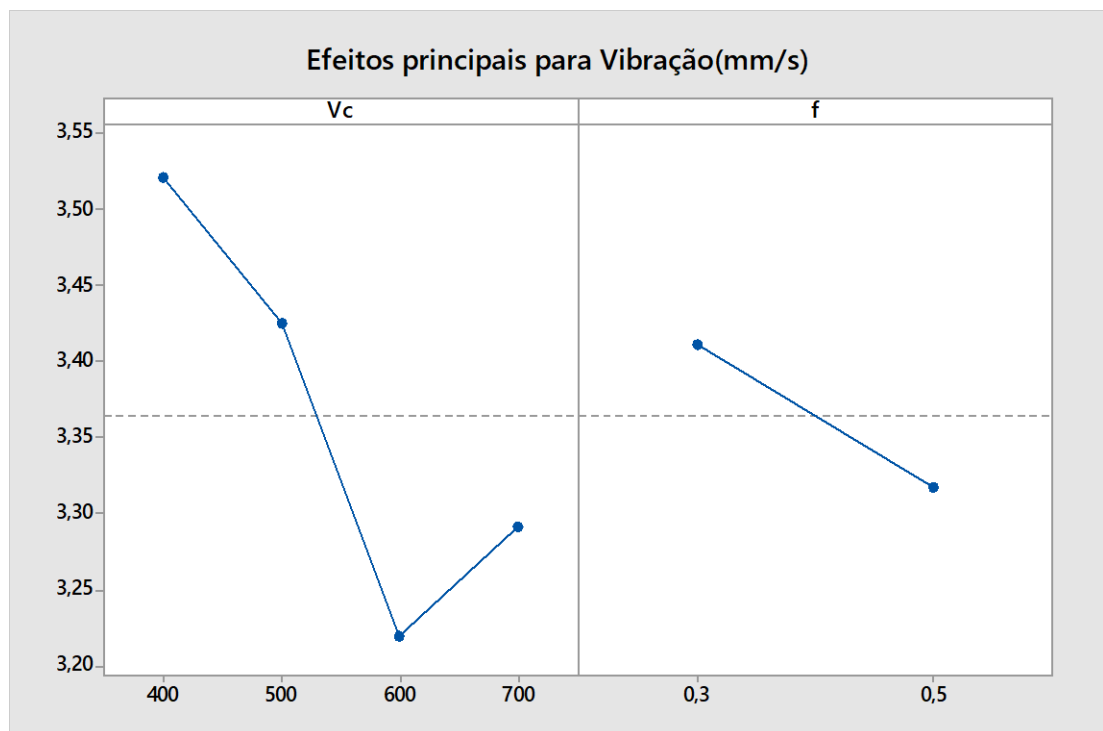
Fonte: Autor.

A partir do gráfico ilustrado na Figura 41, pode-se observar que o menor valor de Potência foi obtido com avanço de 0,5mm/rot, enquanto que na análise da velocidade de corte a menor foi para  $V_c = 400\text{m/min}$ . Entretanto se forem considerados valores significativos podemos concluir que a velocidade de corte de 600 e 700m/min apresentam valores considerados baixos quando comparados à velocidade de 500m/min, o que poderia ser vantajoso em uma linha de produção, levando em conta o consumo energético mais baixo juntamente com o ganho no tempo de produção. Esses resultados convergem com os resultados já observados no item 4.1(rugosidade e desgaste de flanco). Isso evidencia a possibilidade do uso desta ferramenta em alta velocidade de corte. Os resultados observados na Figura 41 são opostos aos observados na literatura, que relatam que quando aumenta-se o avanço tem-se um aumento da potência de corte, conforme (KOLLMANN F. F. P; COTÊ JR, 1984).

#### 4.4 VIBRAÇÕES

A Figura 42 apresenta as curvas de interação entre os parâmetros  $V_c$ ,  $f$  e a vibração gerada durante o ensaio de usinagem.

Figura 42 – Principais efeitos para Vibração



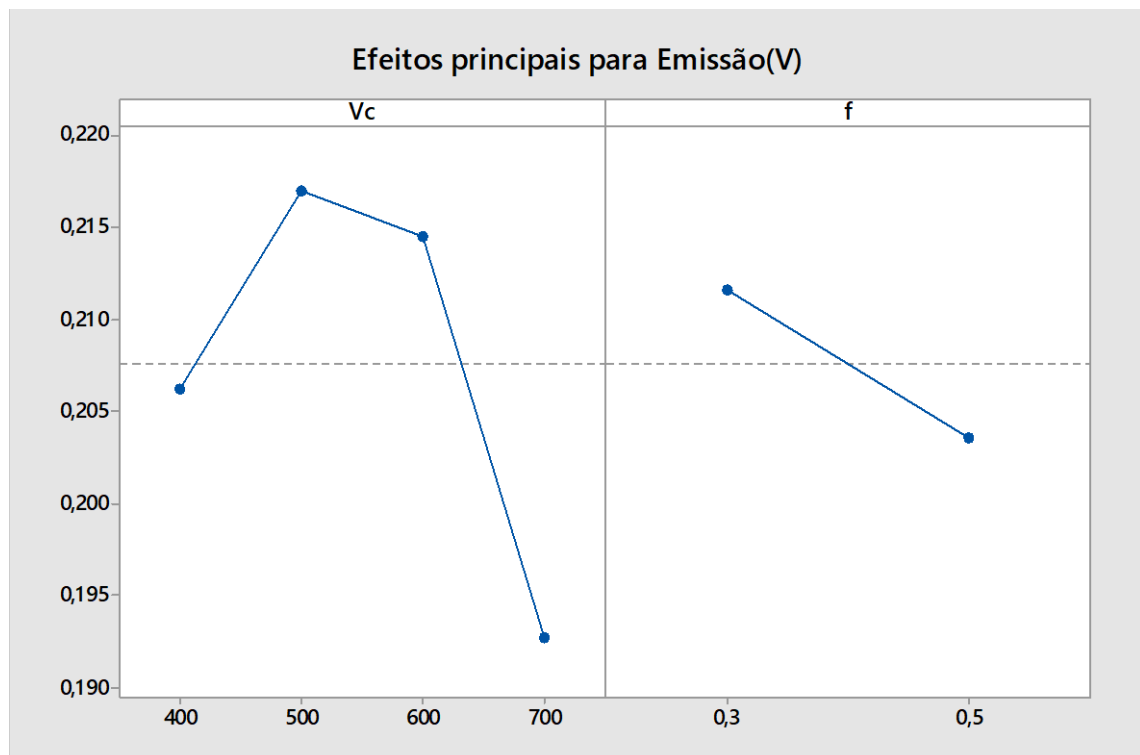
Fonte: Autor.

A partir da Figura 42 pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte houve diminuição das vibrações, demonstrando que houve uma melhor acomodação da peça-ferramenta. Com avanço de 0,5mm/rot e velocidade de corte de 600m/min obteve-se menores vibrações, refletindo também nos menores valores de rugosidade média. Ao aumentar de 600 a 700m/min a vibração aumentou até chegar a um valor intermediário (considerando os pontos extremos), o que pode ser associado ao desgaste de aresta de corte que acaba por diminuir o desempenho da ferramenta. Com o aumento do avanço também houve diminuição da vibração demonstrando que houve melhor acomodação peça-ferramenta.

#### 4.5 EMISSÃO ACÚSTICA

Na Figura 43 pode-se observar com mais clareza a interação entre os parâmetros velocidade de corte ( $V_c$ ) e avanço ( $f$ ) com a Emissão acústica, individualmente:

Figura 43 – Principais efeitos para Emissão acústica



Fonte: Autor.

Analisando os dados obtidos (Figura 43) observa-se que o menor valor de Emissão acústica ocorreu com velocidade de corte de 700m/min e avanço de 0,5 mm/rot. Nesta condição os parâmetros de corte utilizados promoveram o menor desgaste de flanco da ferramenta, conforme item 4.1. Os resultados obtidos convergem com os dados da literatura, pois com o aumento do desgaste de flanco tende-se a ter um aumento da emissão acústica, devido a maior área de contato ferramenta-peça e assim uma maior força de usinagem. Um outro fator descrito na literatura é que com o aumento de  $V_c$  tende-se a gerar um aumento nos valores de emissão acústica (RANGWALA; DORNFELD, 1991), o que não ocorreu neste trabalho, conforme observado na Figura 43.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a eficiência da ferramenta de corte de alumina, devido as suas propriedades físicas e mecânicas obtidas.

Avaliando o desempenho da ferramenta a partir das variáveis de saída conclui-se que foram obtidos menores valores de  $R_a$  e  $R_t$  para  $V_c$  de 600m/min e  $f$  de 0,5mm/rot, menor valor de Potência consumida para  $V_c$  de 400m/min e  $f$  de 0,5mm/rot, menores vibrações para  $V_c$  de 600m/min e  $f$  de 0,5mm/rot e menor valor de emissão acústica para  $V_c$  de 700m/min e  $f$  de 0,5mm/rot, convergindo com o menor desgaste da ferramenta  $VB_{\max}$  que também foi obtido com  $V_c$  de 700m/min e  $f$  de 0,5mm/rot. Assim, pode-se concluir que o melhor desempenho da ferramenta foi na velocidade de corte de 700m/min e avanço de 0,5mm/rot, assegurando nestas condições, a sua aplicação em velocidade de corte elevada.

Este trabalho demonstra a capacidade da ferramenta estudada em usinar o ferro fundido nodular utilizando elevadas velocidades de corte, o que promove elevadas temperaturas de usinagem na interface peça-ferramenta, condição benéfica às ferramentas cerâmicas.

Sabendo as condições adequadas para operações de torneamento sob elevadas velocidades de corte a indústria pode obter ganhos significativos em uma linha de produção, ressaltando a importância deste trabalho, considerando ainda os ganhos pela eliminação do fluido de corte, nos aspectos econômico, ambiental e humano. Estes estudos também contribuem positivamente para a ciência e tecnologia dos materiais, ampliando o campo de pesquisa da ferramenta de corte redonda  $Al_2O_3$ -MgO no torneamento do ferro fundido nodular ou ainda utilizando estes dados como base para trabalhar com outros materiais.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**: heat treating. 9th. ed. Ohio, 1988. v. 4.

BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J.C. A usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 398, p.58-72, jul. 2000.

CARVALHO, M. V.; MONTENEGRO D. M.; GOMES J. O. An analysis of the machinability of ASTM grades 2 and 3 austempered ductile iron. **Journal of materials processing technology**, v. 213, p. 560-573, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612003299>. Acesso em: 02 nov. 2019.

CERVELIN, José Eduardo. **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. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-28092009-152513/en.php>. Acesso em: 02 nov. 2019.

CHIANG, Y. M.; BIRNIE, D.P.; KINGERY, W.D. **Physical ceramics**: principles for ceramic science and engineering. USA: John wiley & Sons, 1997. The MIT Series in Material Science and Engineering Series Statement. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-18052012-141434/en.php>. Acesso em: 04 dez. 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990. v.1.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo:ABM, 1996. 599 p. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1821/TCC%20Guilherme%20Scroder%20Comi.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 04 dez. 2019.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. **Evolução das velocidades de corte**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br>. Acesso em: 08 nov. 2019.

COSTA, Anderson Figueiredo. **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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144680> . Acesso em: 02 nov. 2019.

DEVILLEZ, A. *et al.* Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. **Wear**,v. 262, n. 7–8, p. 931–942, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806003553>. Acesso em: 21 out. 2019.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DÖRRE, E.; HÜBNER, H. **Alumina: processing, properties and applications**. Germany: Springer – Verlag, 1984.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1, 1970.

FORTULAN, C. A.; IKEGAMI, R. A.; PURQUERIO, B. M.; HANEDA, R. N.; FONTES S. R. Manufatura de membranas cerâmicas tubulares. **Minerva**, São Carlos, v. 3, p. 123-130, 2006.

GITZEN, W. **Alumina as a ceramic material**. Columbus: The American Ceramic Society, 1970.

GOEI, R.; LIM, T. Asymmetric TiO<sub>2</sub> hybrid photocatalytic ceramic membrane with porosity gradient: Effect of structure directing agent on the resulting membranes architecture and performances. **Ceramics International**, v. 40, p. 6747-6757, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884213015927>. Acesso em: 02 nov. 2019.

GOMES, U.U. **Tecnologia dos pós: fundamentos e aplicações**. Natal: Editora Universitária/UFRN, 1995. 117 p.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications**. 2nd ed. Opole: Elsevier, 2017. p. 35-63. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444637116/advanced-machining-processes-of-metallic-materials>. Acesso em: 02 nov. 2019.

GRZESIK, W.; MALECKA, J. Documentation of tool wear progress in the machining of nodular ductile iron with silicon nitride-based ceramic tools. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 121-124, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611000849> . Acesso em: 10 nov. 2019.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019. p.1-8 . Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=2wK5DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wilson+guesser&ots=hR5nBwLsmE&sig=\\_0EF5sWgUzb\\_M-\\_BvG3o8ayTdec#v=onepage&q=Wilson%20guesser&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=2wK5DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wilson+guesser&ots=hR5nBwLsmE&sig=_0EF5sWgUzb_M-_BvG3o8ayTdec#v=onepage&q=Wilson%20guesser&f=false). Acesso em: 10 nov. 2019.

HAINES, J.; LÉGER, A. J. M.; BOCQUILLON, G. Synthesis and design of superhard materials. **Annual review of Materials Science**, Meudon, v. 31, p. 1-23, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.31.1.1>. Acesso em: 05 dez. 2019.

HARISHA, S. K.; RAJKUMAR, G. R.; PAWAR, VIKAS, P.; KESHAV, M. **Statistical investigation of tool geometry for minimization of cutting force in turning of hardened steel**. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318302931>. Acesso em: 10 nov. 2019.

HART, L. D. **Alumina chemicals: science and technology handbook**. The American Ceramic Society, 1990, p.99-108.

HEIMANN, R. B. **Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.

HENCH, L. L. **An introduction to bioceramics**. 2nd ed. London: Imperial College Press, 2013.

HENCH, L. L.; BEST, S. M. **Ceramics, glasses, and glass-ceramics: basic principles**. Oxford: Academic Press, 2013.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing process for engineering materials**. Adisson-Wesley Publishing Company, Illinois Institute of Technology, 1985.

KANER, R. B.; GILMAN, J. J.; TOLBERT, S. H. Designing superhard materials, **Science**, v. 308, p. 1268-1269, maio 2005.

KOLLMANN, F. F. P; CÔTE JÚNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Germany: Springer Verlag, 1984. v.1.

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Development of alumina–ceria ceramic composite cutting tool. **International Journal of Refractory Metals e Hard Materials**, v.22, p. 17-20, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436803000763>. Acesso em: 18 out. 2019.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; DEMIRBAS, E. Enviromentally friendly machining: vegetable based cutting fluids. In: DAVIM J. P. (ed.) **Green manufacturing processes and systems: materials forming, machining and tribology**. Berlin: Springer, 2013. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33792-5\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33792-5_2). Acesso em: 02 dez. 2019.

LANNA, M. A. *et al.* Otimização de custos de produção de ferramentas utilizando sinterização normal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICAS, 48., 2004, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2004. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2004/artigos/48cbc-9-16.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2019.

LENGAUER, W.; SCAGNETTO, F. Ti(C,N)-based cermets: critical review of achievements and recent developments. **Solid State Phenomena**, Switzerland, v. 274, p.53-100, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85047246720&origin=inward&txGid=10a7be4f0d4dbbe1182ada50e97c2e67>. Acesso em: 05 out. 2019.

LIRA, H. L. *et al.* Microfiltração do soro de leite de búfala utilizando membranas cerâmicas como alternativa ao processo de pasteurização. **Ciência e tecnologia de alimentos**, v. 29, p. 33-37, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3959/395940091006.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2019.

LIU, X. *et al.* Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, United Kingdom, v. 84, nov. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026343681930321X>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**, 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MARI, D. *et al.* TiMoCN based cermets part II: Microstructure and room temperature mechanical properties. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, United Kingdom, v. 21, p. 47-53, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436803000118>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MARQUARD, R. & SORGER, H., AVL List, Austria e MAC DONALD, M, Sintercast, Germany. **Engine Technology International**, United Kingdom, p. 59, 1998.

MEDEIROS, K. M. *et al.* Avaliação do comportamento térmico de membranas planas de poliamida/argila obtidas pela técnica de inversão de fases. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, p. 36-43, 2013. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/331/273>. Acesso em: 02 dez. 2019.

METALAB. **Centro tecnológico**. Disponível em: <http://www.metalab.com.br>. Acesso em: 08 nov. 2019.

MINITAB 19. **Software estatístico**. Disponível em: <http://www.minitab.com/Minitab-19/Software> . Acesso em: 08 ago. 2019.

OIKAWA, M. H. *et al.* Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com rebolos diamantados com a técnica da mínima quantidade de lubrificação e refrigeração otimizada. **Cerâmica**, v. 57, p. 263-273, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/8948>. Acesso em: 02 dez. 2019.

ORÉFICE, R.L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S. **Biomateriais, fundamentos & aplicações**. Belo Horizonte: Editora Cultura Médica, 2008, p. 82-89.

PEZZOTI, G.; YAMAMOTO, K. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Netherlands, v. 31, n.3, 2014. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.06.001>. Disponível em: 02 nov. 2019.

PIMENTEL, R. F. *et al.* Evaluation of the friction force generated by monocristalyne and policristalyne ceramic brackets in sliding mechanics. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v.18, n.121, 2013. Acesso em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2176-94512013000100023&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2176-94512013000100023&script=sci_arttext&tlng=es). Disponível em: 02 nov. 2019.

QIT-FER ET TITANE INC. **A design engineer's digest of ductile iron**. 7th ed. Montreal, 1990.

QIT-FER ET TITANE INC. **Ductile iron data for engineers**. Montreal, 1990.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D. A. A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting-2: spectral analysis. **International Journal of Mechanical Science**, v. 33, n. 6, p. 489-499, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002074039190083F>. Acesso em: 05 nov. 2019.

SANDVIK COROMANT. **Desgaste nas arestas de corte**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>. Acesso em: 10 out. 2015a.

SANTOS, Lidiane Faria. **Perovskitas  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ , suportadas em alumina e zircônia, aplicadas à combustão do metano**. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3991>. Acesso em: 02 dez. 2019.

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

SAWANT, M. S.; JAIN, N. K.; PALANI, I.A. Influence of dimple and spot-texturing of HSS cutting tool on machining of Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, n.261, p.1-11, nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013618302280>. Acesso em: 02 dez. 2019.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. Oxford University Press, Great Britain. 1984.

SIRTULI, L. J.; BOING D.; SCHROETER, R. B. Evaluation of layer adhered on PCBN tools during turning of AISI D2 steel. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.84, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436819303488>. Acesso em: 02 nov. 2019.

SOUSA, Leopoldo Ferreira. **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. Disponível em: [http://sites.unifoa.edu.br/portal\\_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/12.pdf](http://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/12.pdf). Acesso em: 02 dez. 2019.

SOUZA, J. V. C. *et al.* **Avaliação das rugosidades em função dos parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido nodular com ferramenta de alumina**. 21º CBECIMAT – CONGRESSO DE ENGENHARIA DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Cuiabá, MT, 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/104-099.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2019.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1993. p.249.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**, 3. ed. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995.

TAZEHKANDI, A.; PILEHVARIAN, F.; DAVOODI, B. Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools. **Journal of cleaner production**, v.80, p.271-281, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005873>. Acesso em: 02 dez. 2019.

TRENT M. C.; WRIGHT P. K. **Metal cutting principles** – 4th edition, Butterworth-Heinemann, USA. 2000.

TRENT, M. C. **Metal cutting principles** – 2nd ed., Butterworth-Heinemann, USA. 1984.

TRUDEL, A.; GAGNÉ, M. **Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons**. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 36, n. 5, p. 289-298, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/cm.1997.36.5.289>. Acesso em: 02 nov. 2019.

VAN VLACK, L.H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**., Edgard Blücher, editora da Universidade de São Paulo, 1973.

VEPREK, S. The search for novel, superhard materials, **Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surface and Films**, v.17, p. 2401-2420, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1116/1.581977>. Acesso em: 02 nov. 2019.

WALKER J. **Machining fundamentals**. USA: GW Publisher, 2000.

WANG P. *et al.* Diamond-cBN alloy: a universal cutting material. **Appl. Phys. Lett.** v.107, 2015. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4929728>. Acesso em: 02 nov. 2019.

WEFERS, K.; MISRA, C. **Oxides and hydroxides of aluminum**. Alcoa Laboratories: Alcoa Technical. Paper n. 19, 1987.

WEINGAERTNER, W. L. *et al.* Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, p.82-89, Maio 1994. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94416>. Acesso em: 05 nov. 2019.

WIKLUND, H. Bayesian and regression approaches to on-line prediction of residual tool life. **Qual. Reliab. Eng. Int.**, Sweden, v. 14, p. 303-309, 1998. Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199809/10\)14:5%3C303::AID-QRE155%3E3.0.CO;2-F](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1099-1638(199809/10)14:5%3C303::AID-QRE155%3E3.0.CO;2-F). Acesso em: 05 dez. 2019.

XAVIER, Fábio Antônio. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Tese (Mestrado 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: 02 dez. 2019.

YANG, T. *et al.* Flank wear mechanism and tool endurance of (Ti, W)C-Mo<sub>2</sub>C-Co cermets during dry turning. **Ceramics International**, United Kingdom, v. 44, p.8447-8455, 2018.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218303353>.

Acesso em: 02 nov. 2019.

ZAWRAH, M. F. *et al.* Effect of CTAB as a foaming agent on the properties of alumina ceramic membranes. **Ceramics International**, United Kingdom, v.40, p.5299-5305, 2014.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027288421301376X>.

Acesso em: 02 dez. 2019.

ZHANG, S.; LEE W. E. Spinel-containing refractories. *In: Refractories handbook*. Taylor & Francis Group, 2004. p. 215-257. Disponível em:

<https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429216282/chapters/10.1201/9780203026328-9>.

Acesso em: 02 nov. 2019.

ZHANG, S. Titanium carbonitride-based cermets: processes and properties. **Materials Science and Engineering A**, v.163, p.141-148, 1993. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0921509393905886>. Acesso em: 02 dez. 2019.