

**VICTOR TALLIS BAZON**

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE FERRAMENTAS  
REFRIGERADAS INTERNAMENTE NA USINAGEM DE  
FERRO FUNDIDO CINZENTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2020**

VICTOR TALLIS BAZON

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE FERRAMENTAS REFRIGERADAS  
INTERNAMENTE NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Usinagem e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Coorientador: Gustavo H. N. Fernandes

**Uberlândia – MG**

**2020**

**VICTOR TALLIS BAZON**

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE FERRAMENTAS REFRIGERADAS  
INTERNAMENTE NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Usinagem e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Coorientador: Gustavo H. N. Fernandes

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Orientador

---

MSc. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Co-Orientador

---

Prof. Dr. Maksym Ziberov  
Universidade de Brasília (UnB)

**Uberlândia, 21 de Dezembro de 2020**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha mãe Cristiane Tallis por todo apoio e carinho demonstrado sempre que precisei, ao meu pai Leandro Bazon e à minha madrasta Flávia Cecília por todo suporte e atenção dados durante essa trajetória, juntamente da minha irmã Nicoli.

À minha namorada Aurea por toda ajuda, carinho e atenção que precisei nessa jornada.

À Fabiana por toda assistência e amparo que me ajudaram a chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva e ao M.Sc. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes por toda atenção, disposição e orientação deste trabalho.

Ao Prof. Wisley (*in memoriam*), o qual me deu o primeiro norte para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Éder, Eng. Daniel e mestrandos Augusto e Pedro que me ajudaram nos ensaios e experimentos.

Ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade Engenharia Química pelas análises de MEV e EDS.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

E por fim, à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e seus professores e técnicos juntamente da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por toda educação investida em mim.

*“A única história que vale alguma coisa é a história que fazemos hoje”*

*Henry Ford*

BAZON, V. T. **ESTUDO DA APLICABILIDADE DE FERRAMENTAS REFRIGERADAS INTERNAMENTE NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2020.

## RESUMO

Neste trabalho foi proposta uma nova técnica inovadora que utiliza o conceito de refrigeração interna à ferramenta de corte. Para isso realizou-se um estudo sobre o comportamento de ferramentas de metal duro, refrigeradas internamente, no torneamento de Ferro Fundido Cinzento por Fundição Contínua (FoFo). As variáveis de entrada do processo foram: velocidade de corte ( $V_c$ ) (100 e 150 m/min), profundidade de corte ( $a_p$ ) (1,0 e 2,0 mm) e ambientes, Fluido de Corte Abundante (FCA) e Ferramenta Refrigerada Internamente (FRI). As variáveis resposta foram: força de usinagem e integridade superficial (rugosidade, microdureza e metalografia) além de tipos e mecanismos de desgaste. Os principais resultados indicaram que as forças de corte foram maiores com a utilização das FRIs, em comparação com o FCA, sendo um possível indicativo do efeito da maior capacidade de refrigeração das FRIs. Em relação à rugosidade, para maior velocidade de corte (150 m/min), portanto maior geração de calor e temperatura, o ambiente FRI apresentou melhores resultados. A análise de microdureza subsuperficial indicou que ambos os processos, FRI e FCA, como esperado, causaram encruamento do material. O método FRI apresentou resultados maiores de microdureza, possivelmente por conta da baixa capacidade lubrificante do sistema. O tipo de desgaste mais evidente nas ferramentas de corte foi o desgaste de flanco, enquanto os mecanismos predominantes foram de adesão (*attrition*), comuns em baixas velocidades de corte assim como o desgaste abrasivo.

**Palavras-chave:** Ferro fundido cinzento, Torneamento, Ferramenta refrigerada internamente, Fluido de corte abundante.

## ABSTRACT

In this work, an innovative technique was proposed using the concept of internal cooling of the cutting tool. For this purpose, a study was carried out on the behavior of carbide tools, internally cooled, in the turning of Gray Cast Iron by Continuous Casting (FoFo). The process input variables were: cutting speed ( $V_c$ ) (100 and 150 m / min), cutting depth ( $a_p$ ) (1.0 and 2.0 mm) and environments, Abundant Cutting Fluid (ACF) and Internally Cooled Tool (ICT). The response variables were: cutting forces, superficial integrity (roughness, microhardness and metallography) as well as types and mechanisms of wear. The main results indicated that the cutting forces were greater with the use of ICT, in comparison with the ACF, being a possible indication of the effect of the greater cooling capacity of ICTs. In relation to roughness, for a higher cutting speed (150 m/min), therefore greater heat and temperature generation, the ICT environment showed better results. The analysis of subsurface microhardness indicated that both processes, ICT and ACF, as expected, caused hardening of the material. The ICT method showed higher results of microhardness, possibly due to the low lubricating capacity of the system. The most evident type of wear on cutting tools was flank wear, while the predominant mechanisms were adhesion (attrition), common at low cutting speeds as well as abrasive wear.

**Keywords:** Gray cast iron, turning, internally cooled tool, abundant cutting fluid.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fase Ferro-Carbono (CENTRO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA - UNIJORGE, 2017).....	5
Figura 2 - Estrutura do FoFo Cinzento, mostrando os constituintes perlita, ferrita e os veios de grafita (CHIAVERINI, 1977).....	7
Figura 3 - Morfologia da grafita encontrada nos ferros fundidos. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens gerada por MEV (DAWSON <i>et al.</i> , 2001).....	8
Figura 4 - Processo de fundição contínua (FUCO, 1998).....	10
Figura 5 - Operações realizadas no torno (MACHADO <i>et al.</i> , 2015).....	11
Figura 6 - Parâmetros de corte e superfícies no torneamento (AMORIM, 2002).....	12
Figura 7 - Geometria da ferramenta de corte (AMORIM, 2002) .....	13
Figura 8. Componentes das forças de usinagem (MACHADO <i>et al.</i> , 2015).....	15
Figura 9 - Rugosidade Média $R_a$ .....	18
Figura 10 - Rugosidade Média $R_z$ .....	19
Figura 11 - Rugosidade Média $R_a$ , $R_z$ e $R_y$ (GUESSER; PEREIRA; BOEHS, 2016).....	21
Figura 12 - a) Penetrador e b) Identação Vickers (VEADO, 1965).....	22
Figura 13 - Microestrutura típica do ferro fundido cinzento no centro (a) e na periferia (b) (TUPY, 2011).....	24
Figura 14 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte (Adaptado de Sandvik Coromant, 1994).....	26
Figura 15 - Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura (MACHADO <i>et al.</i> , 2009).....	29
Figura 16 - Representação esquemática do desgaste de flanco (KÖNIG; KLOCKE, 1997).....	30
Figura 17 - Tipos de desgastes.....	32
Figura 18 - Diagrama dos procedimentos experimentais.....	37



Figura 19 - Ilustração do Sistema de Refrigeração Contendo o Trocador de Calor Primário.....	39
Figura 20 - Design da Ferramenta de Refrigeração Interna em Detalhes Mostrando os Canais de Refrigeração.....	39
Figura 21 - Ferramenta utilizada no torneamento. a) Lado usado com fluido de corte abundante, b) Lado usado com refrigeração interna.....	40
Figura 22 - Posições das cinco seções da barra nas medidas de rugosidade.....	42
Figura 23 - Microestrutura do ferro fundido cinzento. Região de borda (esquerda) e região central (direita).....	43
Figura 24 - Esquematização da medição de microdureza.....	44
Figura 25 - Equipamentos usados para medições e coleta de dados.....	45
Figura 26 - Esquematização do torneamento.....	47
Figura 27 - Curva de forças em função da velocidade.....	50
Figura 28 - Rugosidades $R_a$ , $R_q$ e $R_z$ .....	53
Figura 29 - Metalografia da região de borda. a) Sem usinagem; b) FCA; c) FRI.....	54
Figura 30 - Metalografia da região central. a) Sem usinagem; b) FCA; c) FRI.....	54
Figura 31 - Variação da microdureza sub-superficial nas condições de sem usinagem, FRI e FCA.....	55
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de folga primária das ferramentas. a) FRI com $ap = 1$ mm ; b) FCA com $ap = 1$ mm ; c) FRI com $ap = 2$ mm ; d) FCA com $ap = 2$ mm.....	57
Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura da ponta das ferramentas. a) FRI com $ap = 1$ mm ; b) FCA com $ap = 1$ mm ; c) FRI com $ap = 2$ mm ; d) FCA com $ap = 2$ mm.....	58
Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura com elétrons retroespalhados da condição FCA com $ap = 1$ mm. a) Superfície de folga primária; b) “ponta” da ferramenta.....	59
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura com elétrons retroespalhados da condição FRI com $ap = 1$ mm. a) Superfície de folga primária; b) “ponta” da ferramenta.....	59

Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de folga primária das ferramentas após ataque químico. a) FRI com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; b) FCA com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; c) FRI com  $ap = 2 \text{ mm}$  ; d ) FCA com  $ap = 2 \text{ mm}$ .....60

Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura do ponta das ferramentas após ataque químico. a) FRI com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; b) FCA com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; c) FRI com  $ap = 2 \text{ mm}$  ; d ) FCA com  $ap = 2 \text{ mm}$ .....61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades físicas de alguns tipos de ferro fundido (adaptado de DAWSON; SCHROEDER, 2000).....	9
Tabela 2 - Parâmetros de Rugosidade ( $R_a$ , $R_q$ , $R_z$ ) (ABNT 4287, 2002).....	18
Tabela 3 - Valores recomendados para comprimentos de amostragem e avaliação (ISO 4288, 1996).....	20
Tabela 4 - Propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro.....	27
Tabela 5 - Composição e propriedades do ferro fundido cinzento (TUPY, 2011).....	38
Tabela 6 - Especificações do Sistema de Refrigeração.....	40
Tabela 7 - Análises Típicas da Solução de Monoetilenoglicol (PETRONAS, 2005).....	41
Tabela 8 - Distâncias das medições de microdureza.....	43
Tabela 9 - Condições utilizadas no processo de torneamento com $a_p$ 1 mm.....	46
Tabela 10 - Condições utilizadas no processo de torneamento com $a_p$ 2 mm.....	46
Tabela 11 – Planejamento fatorial completo ( $2^3$ ).....	46
Tabela 12 - Valores das medições do ensaio de força.....	48
Tabela 13 - Tabela ANOVA de forças.....	49
Tabela 14 - Tabela ANOVA para rugosidade $R_a$ .....	52
Tabela 15 - Tabela ANOVA para rugosidade $R_q$ .....	52
Tabela 16 - Tabela ANOVA para rugosidade $R_z$ .....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$a_p$	Profundidade de corte
APC	Aresta Postiça de Corte
CNC	Controle Numérico Computadorizado
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
$f$	Avanço
$F_{ap}$	Força de apoio
$F_c$	Força de corte
$f_c$	Avanço de corte
FCA	Fluido de Corte Abundante
$F_f$	Força de avanço
$F_n$	Força de compressão
FoFo	Ferro Fundido
$F_p$	Força passiva
FRI	Ferramenta Refrigerada Internamente
$F_{TR}$	Força ativa
$F_u$	Força de usinagem
FUCO	Ferro Fundidos Cinzentos por Fundição Contínua
HRc	Dureza Rockwell
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization
KT	Desgaste de cratera

$l_n$	Comprimento de avaliação
$l_r$	Comprimento de amostragem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MQSL	Mínima Quantidade de Lubrificante Sólido
NBR	Norma brasileira
PCD	Diamante Policristalino
$R_a$	Rugosidade média aritmética
$r_\epsilon$	Raio de ponta da ferramenta
RPM	Rotações por minuto
$R_q$	Rugosidade média quadrática
$R_z$	Rugosidade total
$VB_B$	Desgaste de flanco médio
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
$VB_N$	Desgaste de entalhe
$v_c$	Velocidade de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$Z_i$	Rugosidade parcial

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contextualização.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
1.2.1. Objetivo geral.....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Ferros Fundidos – FoFo .....</b>	<b>4</b>
2.1.1. Ferro fundido cinzento .....	6
2.1.2. Fundição contínua.....	9
<b>2.2. Torneamento .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. Forças de usinagem .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4. Integridade superficial.....</b>	<b>17</b>
2.4.1. Rugosidade.....	17
2.4.2. Microdureza .....	21
2.4.3. Metalografia .....	23
<b>2.5. Materiais para ferramentas de corte .....</b>	<b>25</b>
2.5.1. Ferramentas de metal duro .....	26
<b>2.6. Desgaste das ferramentas na usinagem de ferros fundidos .....</b>	<b>27</b>
<b>2.7. Fluidos de Corte Abundante - FCA.....</b>	<b>32</b>
<b>2.8. Ferramentas Refrigeradas Internamente - FRI.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1. Preparação do material .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Máquina e ferramentas .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3. Fluido de corte e fluido refrigerante empregados .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Equipamentos e métodos de medição .....</b>	<b>41</b>
3.4.1. Dinamômetro .....	41
3.4.2. Rugosímetro .....	42
3.4.3. Ensaio metalográficos .....	42

3.4.4. Testes de microdureza.....	43
3.4.5. Desgaste da ferramenta de corte.....	44
<b>3.5. Procedimentos Experimentais.....</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADO E DISCUSSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1. Análises das forças de corte.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2. Integridade superficial.....</b>	<b>51</b>
4.2.1. Análises de rugosidade.....	51
4.2.2. Análises metalográficas.....	54
4.2.3. Análises de microdureza.....	55
4.2.4. Análises de desgaste (MEV e EDS).....	56
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO I - Certificado de calibração do rugosímetro.....</b>	<b>71</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

A literatura indica que maior parte da potência utilizada na usinagem dos metais é transformada em calor nas zonas de cisalhamento primária, secundária e terciária, quando houver, na interface ferramenta/cavaco. O aumento de calor gera um aumento de temperatura, que por um lado é favorável ao processo por diminuir a resistência ao cisalhamento e dureza da peça, facilitando o corte. Por outro lado, prejudica a vida da ferramenta, tolerâncias dimensionais, integridade superficial (rugosidade, tensões residuais), diminui a produtividade, aumenta custos (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015) .

Uma forma de contornar os efeitos adversos da alta temperatura é utilizar técnicas de lubrefrigeração, sendo a mais amplamente utilizada o Fluido de Corte em Abundância – FCA. Byers (2016) explica que os FCAs atuam sobre todo o conjunto máquina-ferramenta-peça e contribui no resfriamento geral do sistema, diminuindo a temperatura média, em especial da ferramenta de corte, mantendo sua integridade mecânica, especialmente dureza, além de lubrificar a interface ferramenta/cavaco, zona de escorregamento, diminuindo o coeficiente de atrito entre ambas. Menos atrito, menos calor, menor temperatura e conseqüentemente, melhora do processo de uma maneira geral.



Contudo, por se tratar de um insumo tóxico, tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana, com um grande potencial de poluição, pesquisadores, governos e entidades relacionadas têm buscado formas de mitigar esses impactos ambientais com leis mais restritas junto com a Pesquisa e Desenvolvimento de técnicas mais ecologicamente amigáveis (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; SHARMA; SINGH; SORBY, 2015). A responsabilização dos fabricantes pelo ciclo completo do produto, desde fabricação ao descarte, tem tornado os FCAs mais dispendiosos. Alguns estudos apontam que os FCAs sozinhos são responsáveis por 7 a 17% do custo total de usinagem (KING *et al.*, 2001).

## 1.2. Objetivos

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar uma alternativa ecologicamente amigável de Ferramentas Refrigeradas Internamente no torneamento de Ferro Fundidos Cinzentos por Fundição Contínua – (FUCO). O sistema proposto utiliza o conceito de ciclo fechado de refrigeração, isto é, sem nenhuma dispersão fluido na atmosfera, resfriando apenas a ferramenta de corte, mantendo suas propriedades mecânicas, ao mesmo tempo aproveitando o lado favorável da alta temperatura da peça que é diminuir dureza e resistência ao cisalhamento, facilitando o corte.

### 1.2.1. Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a aplicação de Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRIs, em metal duro, em comparação ao método convencional de Fluido de Corte Abundante - FCA, no torneamento de Ferro Fundidos Cinzentos por Fundição Contínua – (FUCO).

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar os mecanismos de desgaste das ferramentas no torneamento de ferro fundido cinzento com Fluido de Corte Abundante (FCA) e Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRI;

- Avaliar a integridade superficial através da análise de rugosidade e perfil de microdureza (dureza x distância), antes da usinagem e após nas condições FCA e FRI;
- Avaliar as forças de usinagem para o método FRI e FCA;

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Ferros Fundidos – FoFo

Dentro da indústria metalmecânica, os Ferro Fundidos - FoFo são considerados materiais versáteis com um bom equilíbrio entre suas propriedades físico-mecânicas que lhes garagem ampla aplicação e, principalmente, baixo custo (KOERICH *et al.*, 2010). São utilizados direta ou indiretamente em praticamente todas as indústrias, tais como naval, agrícola, automobilística, aeroespacial, farmacêutica, de móveis, maquinário pesado, etc. Têm destaque na indústria automotiva na fabricação de peças como tambores e discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes de cilindro e, especialmente, blocos de motor. Também são utilizados em suportes para máquinas-ferramentas, peças de máquinas rodoviárias, caminhões articulados, pás niveladoras, compactadores, pavimentadoras de asfalto, bombas, entre outras (DE SOUSA; SALES; MACHADO, 2018).

Dentre os diversos tipos de Ferros Fundidos, a variar conforme a presença, quantidade, fase, formas, do carbono em forma de grafita, têm-se os ferros fundidos cinzentos. Para obtê-los com melhor resistência mecânica, convém que a quantidade de silício seja suficiente para promover a grafitização até a temperatura da formação da perlita (aprox. 700° C), porém em quantidade insuficiente para decompor a cementita da perlita. Se isso

acontecer, o ferro fundido terá baixa resistência e se tornará mais dúctil (COLPAERT; DA COSTA, 2008).

Segundo Chiaverini (1977), a definição mais abrangente do ferro fundido é a de que se trata de uma liga de Fe-C com teor de carbono acima de 2% da matriz (como mostrado na Fig. 1) e, em alguns casos, pode ser definido como uma liga ternária de Fe-C-Si onde o silício frequentemente apresenta teores superior ao de carbono. O carbono forma uma estrutura livre dentro da matriz do ferro na forma de grafita. A depender da quantidade e da forma da grafita, seja nódulos, lamelas ou vermiculas, o FoFo terá uma determinada característica que define suas subclasses.

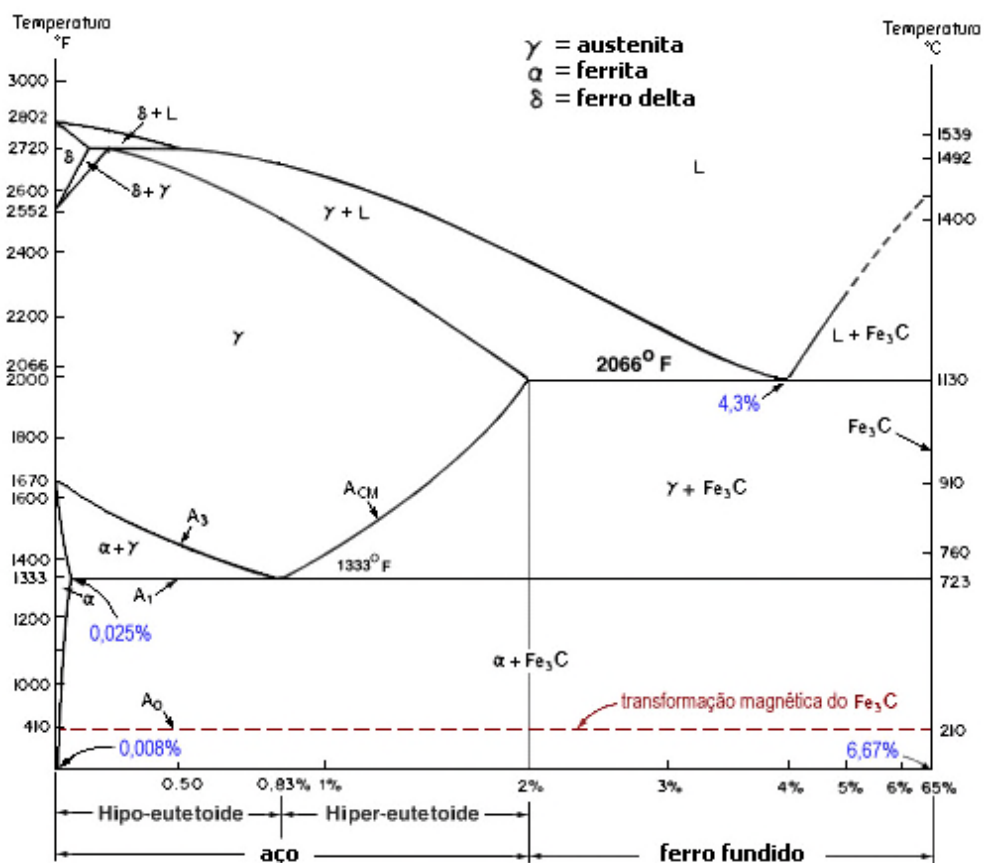


Figura 1 – Diagrama de fase Ferro-Carbono (CENTRO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA - UNIJORGE, 2017)

Chiaverini (1977) diz que dois fatores são preponderantes na determinação da estrutura do ferro fundido, sendo eles a composição química e velocidade de resfriamento. A respeito da composição química, os elementos carbono e silício são os elementos que mais influem na estrutura, além do próprio ferro. O carbono determina a quantidade de

grafita que se pode formar e o silício é um elemento essencial para a grafitação do carbono, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. Há também outro elemento que tem o efeito contrário do silício, o manganês, estabilizando a cementita e contrabalanceando a ação grafificante.

Outra variável importante é a Taxa de Resfriamento - TR: É um fator que relaciona a espessuras das peças moldadas e a TR propriamente dita, ou seja, em seções espessas essa velocidade se dá de maneira lenta, enquanto para espessuras finas ocorre mais rapidamente. Em elevadas taxas, como nas paredes do molde ou em seções de espessuras finas, o tempo é muito curto, dificultando a decomposição de cementita, gerando pouca ou nenhuma grafitação dependendo dos teores de carbono e silício.

Para TR mais lentas, como nas seções espessas, há maior tempo para a grafitação, dependente sempre do teor de silício, formando uma composição composta de perlita e grafita. Em resfriamentos mais lentos ainda e com altos teores de silício, a cementina da perlita pode decompor-se parcialmente, originando uma estrutura constituída de veios de grafita, ferrita e perlita, conferindo ao material razoável resistência mecânica, menores valores de dureza e excelente usinabilidade.

### 2.1.1. Ferro fundido cinzento

Dentre os tipos de Ferro Fundidos - FoFo, o cinzento é o mais utilizado pois tem fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento de vibrações. Fora isso, é uma das ligas metálicas mais baratas disponíveis atualmente no mercado (SERBINO, 2005).

A grafita na microestrutura é a principal influência na usinabilidade do ferro fundido cinzento. A grafita possui resistência mecânica muito baixa, de modo que, sob o enfoque de propriedades mecânicas, a sua presença pode ser entendida como uma descontinuidade, exercendo um efeito de concentrador de tensões. As condições que promovem a grafitação melhoram a usinabilidade do material. O carbono em forma de grafite forma uma estrutura lamelar com baixa interação entre cadeias e baixa resistência ao cisalhamento, característica propicias para lubrificantes sólidos, o que faz dos FoFos materiais autolubrificantes. Esta é uma característica importante, pois conforme explicam De Sousa, Sales e Machado, (2018), o efeito lubrificante da grafita permite com que os

FoFo sejam usinados sem a utilização de fluidos de corte, tornando-os ligas ainda mais competitivas em termos de custo.

Outro fator favorável à usinabilidade dos FoFos é que a grafita provoca descontinuidades na microestrutura que facilitam a nucleação e a propagação de trincas no plano de cisalhamento primários, promovendo a quebra do cavaco (ASTM, 1992). A Fig. 2 mostra um exemplo da microestrutura de um FoFo cinzento onde é possível notar a formação heterogênea e não uniforme de grafita em forma lamelar (parte escura).



Figura 2 - Estrutura do FoFo Cinzento, mostrando os constituintes perlita, ferrita e os veios de grafita (CHIAVERINI, 1977).

Comparando-se o FoFo cinzento com outros tipos de ferros fundidos, é possível ver que as diferenças entre as propriedades mecânicas ocorrem em função da diferença na morfologia da grafita. A Fig. 3 mostra os diversos tipos de formas e composição da grafita na estrutura dos Ferros Fundidos. A forma, a distribuição e o percentual da grafita está diretamente associada a propriedades mecânicas desses materiais e, desta forma, também definem a sua classe, sendo os principais: cinzento (Fig. 3 (A)); vermicular (Fig. 3 (B)); nodular (Fig. 3 (C)) (DAWSON *et al.*, 2001).

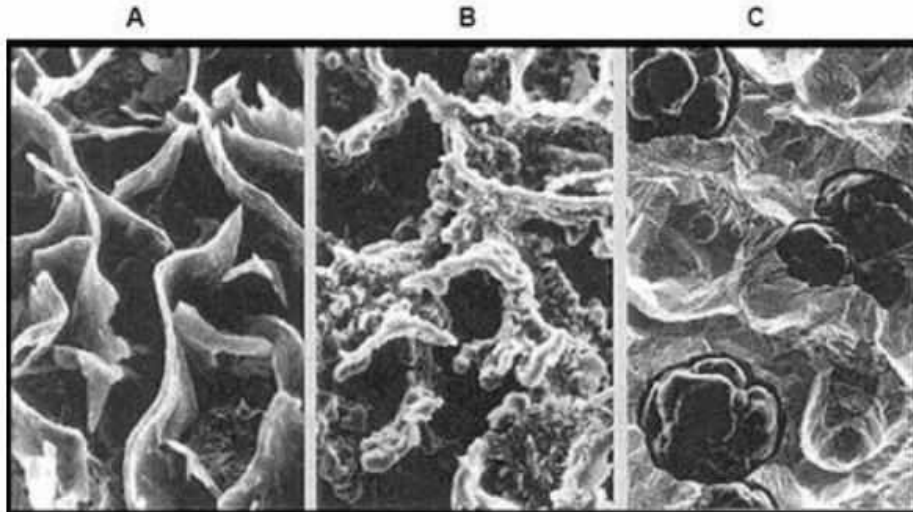


Figura 3 - Morfologia da grafita encontrada nos ferros fundidos. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens gerada por MEV (DAWSON *et al.*, 2001)

A estrutura da grafita lamelar, Fig. 3 (A) proporciona boa condutividade térmica e possui excelente capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas, além de garantir uma melhor usinabilidade em relação às demais. A obtenção do FoFo cinzento ocorre a partir do aumento no teor de silício (elemento grafitizante), sendo que a quantidade, a forma e a distribuição durante a grafitização é controlada pela velocidade de resfriamento, para que a cementita tenha tempo suficiente para se decompor.

A Fig. 3 (B) mostra estruturas ainda lamelares, porém mais, mais curtas e com as extremidades arredondadas. As formações vermiculares podem ser obtidas adicionando elementos nodularizantes, como o magnésio (Mg) em quantidades controladas e elementos anti-nodularizantes, como o titânio (Ti). Essas extremidades das lamelas da grafita no vermicular não agem como pontos de concentração de tensões, e a grafita interconectada propicia taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações do que o nodular, por exemplo. Estruturas deste tipo garantem ao ferro fundido boas propriedades físicas e mecânicas (BAGETTI, 2009).

Por fim, na Fig. 3 (C) tem-se a grafita em forma de esferas, ou nódulos, o que não interrompe a continuidade da matriz (ferrítica e/ou perlítica) como a grafita em veios. Vidal (2013) explica que o tratamento da nodularização é feito com a liga ainda em estado líquido, junto ao processo de inoculação que consiste na adição de silício, como elemento grafitizante, na forma de FeSi.

A Tab. 1 mostra as principais propriedades mecânicas desses materiais.

Tabela 1 - Comparação das propriedades físicas de alguns tipos de ferro fundido (adaptado de DAWSON; SCHROEDER, 2000)

<b>Propriedade Mecânica</b>	<b>Cinzento</b>	<b>Nodular</b>	<b>Vermicular</b>
Resistência à Fadiga [MPa]	110	250	200
Resistência à Tração [MPa]	250	750	450
Módulo de Elasticidade [GPa]	105	160	145
Condutividade Térmica [W/m <sup>2</sup> K]	48	28	37
Dureza [HB]	200	270	225
Limite de escoamento 0,2%	160	425	380
Capacidade de amortecimento	13,2 x 10 <sup>-4</sup>	(2 a 5) x10 <sup>-4</sup>	(4 a 6) x 10 <sup>-4</sup>

### 2.1.2. Fundição contínua

O processo de fundição contínua consiste no vazamento do metal líquido num forno alimentador, onde na parte frontal inferior é montada uma coquilha de grafite refrigerada à água, que confere a forma e a dimensão desejada do perfil a ser produzido, conforme mostra a Fig. 4. Nesta figura, o metal líquido é alimentado continuamente (1), através de uma bica de enchimento (2) no forno de alimentação (3) onde na parte frontal inferior é moldada em um molde de grafite refrigerado à água (4). Roletes de apoio (5) são responsáveis pelo transporte da barra. Ao entrar em contato com a coquilha, uma casca sólida é gerada. Quando essa casca tiver resistência suficiente, um comando de controle será acionado (6) e a barra será tracionada (7), se solidificando no decorrer do processo, sendo cortada (8) e quebrada (9) no comprimento desejado de projeto (10).



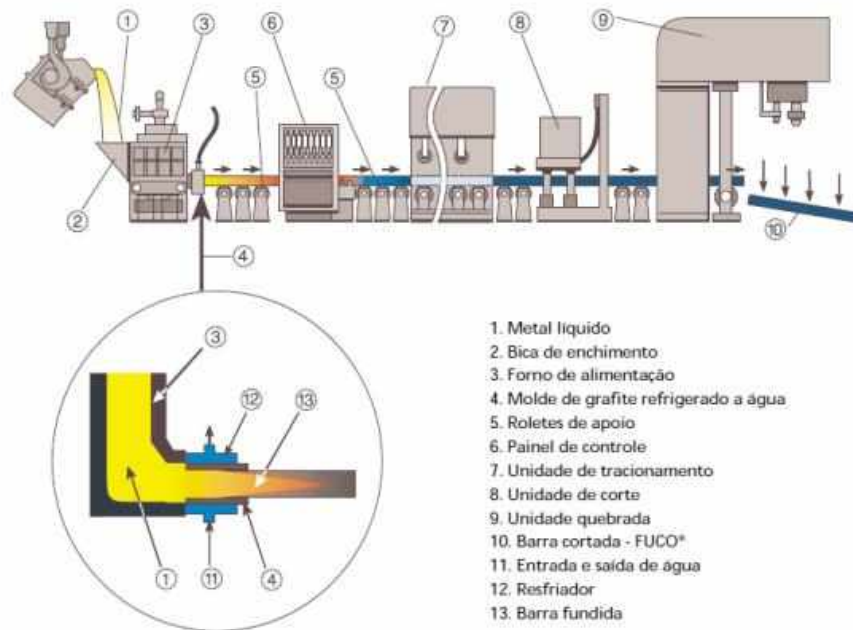


Figura 4 - Processo de fundição contínua (FUCO, 1998).

A fundição contínua é uma alternativa interessante para a fabricação de peças de ferros fundidos, pois através desse processo são fabricadas diversas classes de ferros fundidos, como cinzentos e nodulares, produzindo-se uma grande gama de peças tais como engrenagens, moldes para vidraria, comandos hidráulicos, êmbolos de pistões hidráulicos, buchas, polias, capas de mancal, etc. Devido à usinagem que o componente sofre, é importante que a usinabilidade do material do perfil seja compatível com as necessidades de custo e produtividade (GUESSER *et al.*, 2000).

O processo de fundição contínua é versátil e permite que se obtenham peças de vários formatos geométricos, como seções redondas, retangulares, quadradas, ovais, etc., além de vantagens como a presença de menos sobremetal a remover, economia de energia e um produto com boas propriedades metalúrgicas e mecânicas (FUCO, 1998).

## 2.2. Torneamento

A usinagem nada mais é que um processo de fabricação em que uma ferramenta de corte faz parte de um movimento relativo, aplicando uma força para superar a resistência

ao cisalhamento da peça trabalhada, que deve ser menos resistente que a ferramenta e, com isso, remover material em forma de cavaco (DHAR; KAMRUZZAMAN, 2007). A norma DIN 8589 ramifica a usinagem em dois grupos, um com ferramenta de geometria bem definida, outro com geometria indefinida (NORMUNG, 2003).

O torneamento é o processo de usinagem mais utilizado e é destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas de geometria bem definida e monocortantes. Nela a ferramenta desenvolve um deslocamento transversal e longitudinal, enquanto a peça exerce um movimento rotacional em torno do seu próprio eixo principal (ABNT NBR 6175, 1971). Dentre os principais métodos podem-se citar o: faceamento, torneamento cilíndrico, externo ou interno, torneamento cônico, externo ou interno, perfilamento, sangramento, recartilhamento, dentre outros (KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2015). A Fig. 5 indica algumas sub-operações de torneamento.

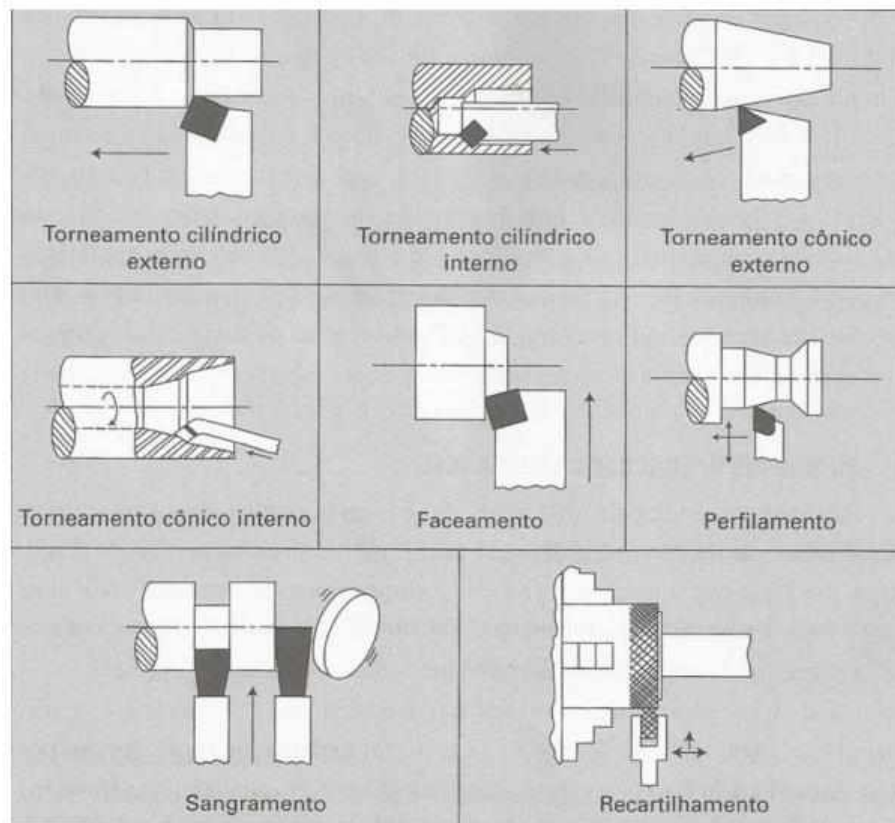


Figura 5 - Operações realizadas no torno (MACHADO *et al.*, 2015)

Segundo Amorim (2002), dois parâmetros importantes na usinagem, determinam o resultado final do processo, sendo eles: geometria da ferramenta e parâmetros de corte. Entre os parâmetros de corte (Fig. 6), a velocidade de corte ( $V_c$ ) é a taxa na qual a superfície

não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, dada em m/min, normalmente. O avanço ( $f$ ) é a distância percorrida pela ferramenta a cada revolução da peça, e a profundidade de corte ( $a_p$ ) é a medida de penetração da ferramenta na peça, perpendicularmente ao plano de trabalho (definido pelo avanço e pela velocidade de corte).

Entretanto, a geometria da ferramenta (Fig. 7), também tem influência significativa sobre as variáveis de resposta de um processo. Como explica Machado, *et al.* (2015), os principais elementos que compõe a geometria de uma ferramenta de corte bem definida são as superfícies de saída, de folga e secundária de folga, que representam as superfícies onde o cavaco passa após o corte, a folga entre a ferramenta e a superfície principal e a folga entre a ferramenta e a superfície secundária, respectivamente.

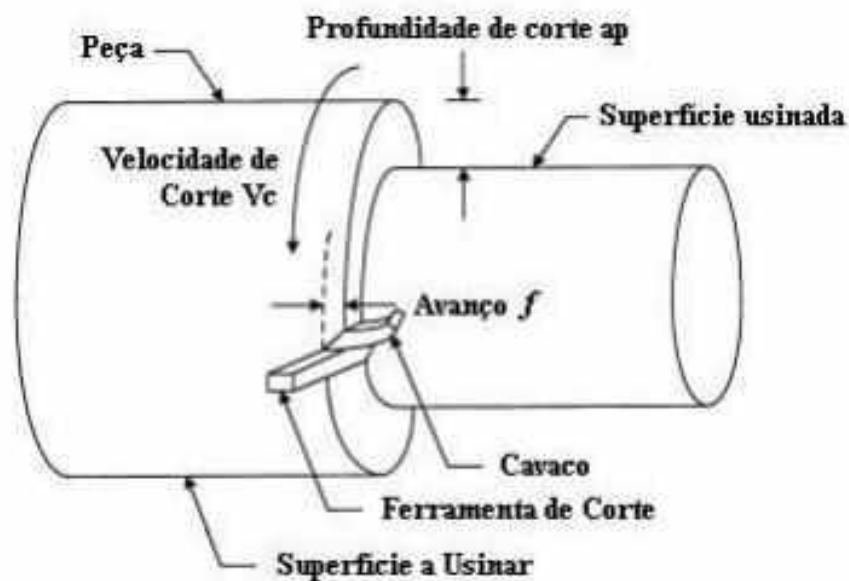


Figura 6 - Parâmetros de corte e superfícies no torneamento (AMORIM, 2002).

A cunha de corte é formada pela superfície de saída e de corte e as arestas de corte e as arestas de corte são formadas pela aresta principal de corte e aresta secundária de corte. A ponta de corte é o local da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e a aresta secundária de corte.

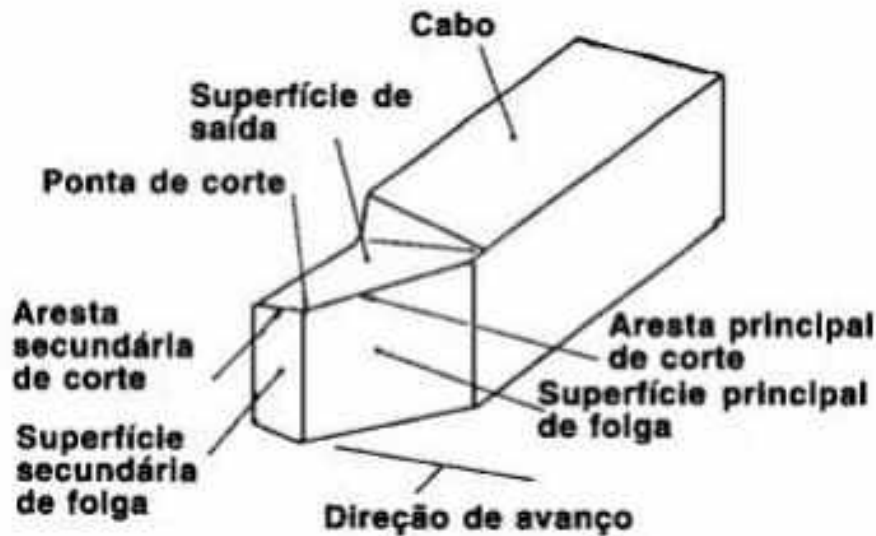


Figura 7 - Geometria da ferramenta de corte (AMORIM, 2002).

Devido à relativa facilidade de aquisição (equipamentos e insumos), operação e instrumentação o torneamento é a operação mais utilizada para se fazer pesquisa em usinagem. Machado *et al.* (2020) fez uma revisão sobre diversas variáveis, força, temperatura, rugosidade, vida de ferramenta, etc. e pôde constatar que dos trabalhos analisados 70% eram relativos ao torneamento, 20% ao fresamento, 5% furação e, demais, outras operações.

O torneamento também é amplamente utilizado para estudar o comportamento dos Ferros Fundidos. Marcelino *et al.* (2004) fez uma análise do comportamento das ferramentas de cerâmica à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  no processo de torneamento de ferro fundido cinzento investigando a influência de alguns parâmetros, como a profundidade de corte ( $a_p$ ) (0,1 e 0,25 mm) e o ângulo de direção do gume ( $85^\circ$ ,  $89,5^\circ$ ), no torneamento cilíndrico longitudinal do ferro fundido cinzento e verificou que a grandeza das forças passivas é superior à das forças de corte e avanço.

Assis e da Silva (2017) analisaram a variação de rugosidade no torneamento de face do ferro fundido cinzento em torneamento de face em peças de ferro fundido cinzento, com diferentes rotações e avanços e concluíram que houve uma tendência de um melhor acabamento com velocidades de corte mais altas onde a rotação de 90 RPM e o avanço de 0,18 mm/rot apresentaram melhor acabamento.

Rossi Neto, (2009) estudou a substituição do processo de mandrilamento pelo torneamento interno de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento centrifugado utilizando um centro de torneamento com sistema integrado, ferramentas de corte e dispositivos de fixação especiais e estratégias de usinagem não usuais, posteriormente aplicando a metodologia em ambiente fabril, para analisar nas condições práticas de operação. Os resultados mostraram que os insertos de metal duro com cobertura apresentaram um melhor desempenho que os insertos de cerâmica à base de nitreto de silício e de óxido de alumínio na aplicação estudada, sendo constatado também as melhores condições de corte para o torneamento interno de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento centrifugado.

### 2.3. Forças de usinagem

Trent e Wright, (2000) dizem que o conhecimento das forças de usinagem se faz necessário para estimar a potência requerida e para o projeto de máquinas operatrizes, suportes e fixação das ferramentas de corte, com rigidez adequada e livres de vibrações. Segundo Stephenson e Agapiou (2016), as forças de usinagem mantem relação direta com o desgaste das ferramentas, que influenciam a viabilidade econômica do processo. Além disso a força é um importante fator de usinabilidade, constituindo um parâmetro na tomada de decisão sobre qual material pode ser utilizado em determinada operação.

De acordo com Ferraresi (2018), as forças são ponderadas agindo em direção e sentido sobre a ferramenta. Machado *et al.* (2015) diz que por se tratar de uma operação no espaço tridimensional, a força de usinagem ( $F_u$ ) pode ser analisada de forma decomposta em três parcelas básicas de forças que agem diretamente na cunha de corte, e conseqüentemente, na estrutura da máquina-ferramenta. A Fig. 8 ilustra essa explicação mostrando a força de usinagem tridimensional e seus componentes.

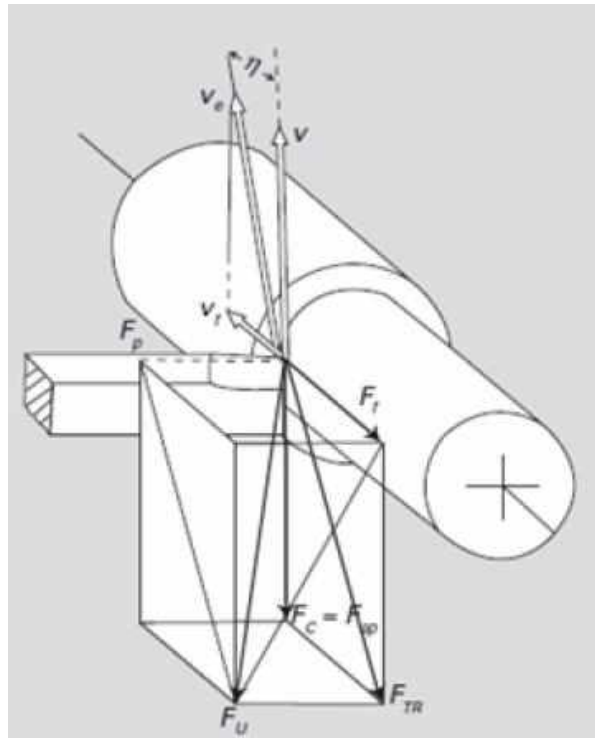


Figura 8 - Componentes das forças de usinagem (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo Machado *et al.* (2015), em um processo de usinagem, é possível analisar as forças separadamente por componentes. A força de corte ( $F_c$ ) é a força principal onde a projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) se dá no plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte ( $V_c$ ). A força de avanço ( $F_f$ ) se mostra em uma projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) sobre o plano de trabalho, direcionada pelo avanço e pela velocidade de avanço ( $V_f$ ). Já a força passiva ( $F_p$ ) é a força dada pela projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) perpendicular ao plano de trabalho.

Além desses três principais componentes, outras três são descritas por Machado *et al.* (2015).

A força ativa ( $F_{TR}$ ) é a componente na qual a projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) se dá sobre o plano de trabalho. A força de compressão ( $F_n$ ) é a força na qual a força de usinagem ( $F_u$ ) se dá perpendicularmente à superfície principal de corte. Já a força de apoio ( $F_{ap}$ ) é a componente na qual a projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) se dá perpendicularmente à direção de avanço, localizada no plano de trabalho.

A força de usinagem ( $F_u$ ) que é a força exercida pela peça sobre a ferramenta durante a usinagem pode ser definida vetorialmente em função de seus três principais componentes (Eq. 1).

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1)$$

Segundo Ferraresi (2018), a força de usinagem ( $F_u$ ) depende de uma série de fatores, como: material da peça, área de seção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição, estado e material da ferramenta, lubrificação e velocidade de corte.

No processo de usinagem, constata-se que as condições de interface entre ferramenta e cavaco influenciam de forma significativa a força de usinagem. De modo geral, pode-se afirmar que todos os fatores que facilitam o deslizamento do cavaco sobre a superfície de saída influenciam para diminuir a força de usinagem ( $F_u$ ). Além das condições na interface, a resistência mecânica do material da peça também deve ser considerada para a força de usinagem. Assim, todos os outros parâmetros de saída do processo (ângulo de cisalhamento, espessura do cavaco, velocidade e saída do cavaco, forças de corte, etc.) são, direta ou indiretamente, consequência desses dois fatores (MACHADO *et al.*, 2015).

Através de sistemas de medição que tenham boa sensibilidade, boa precisão, rigidez e exatidão, é possível medir as componentes das forças de usinagem. Nos dias atuais o sistema de medição mais usado para a medição de forças de usinagem são os sistemas que utilizam transdutores de força com elementos sensíveis feitos de cristais de quartzo, utilizando do efeito piezométrico, uma vez que possibilita medir precisamente as componentes de força e o momento torsor nos processos de usinagem (ROCHA, 1985).

Ebersbach *et al.* (2019) fez uma análise das componentes da força de usinagem no torneamento de compósitos autolubrificantes sinterizados. Os ensaios foram feitos a seco em um torno CNC usando ferramenta de metal-duro classe P20 com revestimento em Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN) variando a velocidade de corte entre 100 e 200 m/min, o avanço em 0,1 e 0,2 mm e a profundidade de corte em 0,5 e 1 mm. As medições da força de usinagem foram monitoradas através de uma plataforma piezométrica da Kistler Instrument. O trabalho mostrou que com o aumento da velocidade de corte, as componentes de força de usinagem diminuíram. Já o comportamento oposto foi observado com o aumento do avanço e da profundidade de corte.

## 2.4. Integridade superficial

### 2.4.1. Rugosidade

De acordo com Benardos e Vosniakos (2003) a integridade superficial é um parâmetro importante para avaliar a qualidade de produtos manufaturados, sendo muitas vezes a rugosidade adotada como o principal critério de aceitação ou rejeição de um determinado produto. Portanto, alcançar a qualidade de superfície desejada é de grande importância dentro da indústria em geral e, principalmente, como forma de garantir o comportamento funcional das partes acabadas.

Uma superfície é constituída de irregularidades finas ou de pequenos erros geométricos que resultam da ação da etapa de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros). A rugosidade depende de parâmetros como: conjunto máquina-ferramenta, propriedades do material da peça e da ferramenta, também da geometria, além dos parâmetros de corte, dentre outros. Para se avaliar estes parâmetros, são aplicadas soluções estatísticas (MACHADO *et al.*, 2015).

A rugosidade superficial é usada como um indicador crítico de qualidade para as superfícies usinadas e influencia em vários outros parâmetros, como resistência ao desgaste, resistência à fadiga, coeficiente de atrito, lubrificação e resistência à corrosão, nucleação e propagação de trincas, entre outros (WANG; FENG, 2002).

A norma ISO 4288 ou 4287 define a rugosidade e suas formas de medição. Estes parâmetros podem ser classificados como parâmetros de amplitude, que são determinados pela altura dos picos e/ou profundidade dos vales, com base em um referencial horizontal, parâmetros de espaçamento que são definidos pela distância entre as irregularidades no decorrer da superfície e por fim, os parâmetros híbridos, que são uma combinação entre os dois parâmetros anteriores.

Três importantes parâmetros definidos na norma ABNT ISO 4287 (2002) e amplamente utilizados pela indústria como critérios de avaliação de rugosidade incluem as variáveis:  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$ . A Tab. 2 contém a definição destes parâmetros.

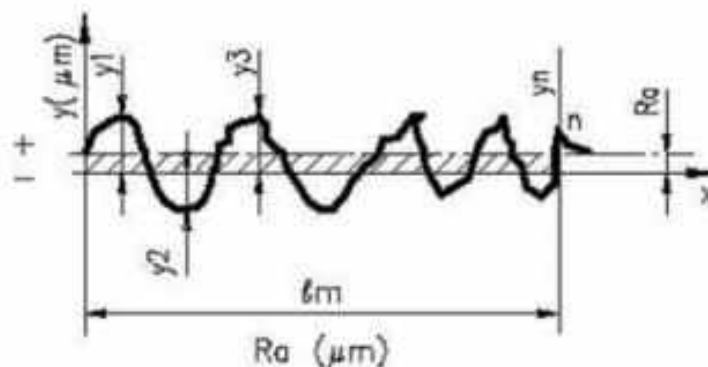


Tabela 2 - Parâmetros de Rugosidade ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ) (ABNT 4287, 2002)

Símbolo	Nome	Definição
$R_a$	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento da amostragem
$R_q$	Desvio médio quadrático do perfil avaliado	Raíz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
$R_z$	Altura máxima do perfil avaliado	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem

A rugosidade média  $R_a$  é o parâmetro mais difundido na indústria, por ser aplicado à maioria dos processos de fabricação, sendo muitas vezes critério de qualidade “*passa ou não passa*”. É determinada pela média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, ao longo do comprimento de amostragem, conforme mostra a Fig. 9. Pode ser calculada teoricamente para o processo de torneamento. No caso do avanço ( $f$ ) menor que o raio de ponta da ferramenta ( $r_\epsilon$ ) os valores podem ser encontrados aproximadamente pela Eq. (2).

$$R_a = \frac{f^2}{(18\sqrt{3})r_\epsilon} = \frac{f^2}{(31,2)r_\epsilon} \quad (2)$$

Figura 9 - Rugosidade Média  $R_a$

A rugosidade média quadrática  $R_q$  é um parâmetro calculado segundo a Eq. (3). Este parâmetro representa melhor a natureza de uma superfície, pois acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média.

$$R_q = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad (3)$$

A rugosidade média  $R_z$  é um parâmetro que considera todo o comprimento de avaliação e informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça. É obtido como sendo a média aritmética dos cinco valores de rugosidades parciais  $Z_i$ . A rugosidade parcial  $Z_i$  é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut-off*), conforme mostra a Fig. 10.

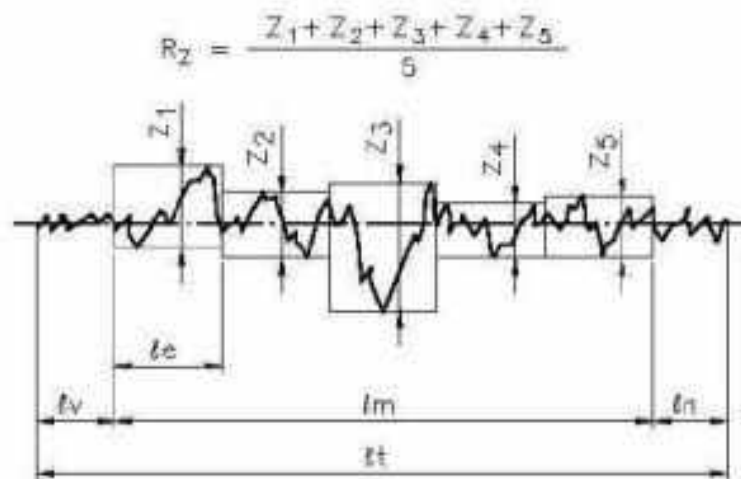


Figura 10 - Rugosidade Média  $R_z$

O comprimento de amostragem ( $l_r$ ) é estipulado, de acordo com a Norma NBR ISO 4287 (2002), como sendo o comprimento na direção do eixo X utilizado para indicar as discontinuidades características do perfil avaliado. Já o comprimento de avaliação ( $l_n$ ) é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo X utilizado para designar o perfil sob apreciação e pode compreender um ou mais comprimentos de amostragem. Recomenda-se  $l_n$  no mínimo cinco vezes maior que  $l_r$ , de modo que se tenha uma maior confiabilidade dos dados.

A Tab. 3 a seguir apresenta os valores dos comprimentos de acordo com a norma (MACHADO *et al.*, 2015).

Tabela 3 - Valores recomendados para comprimentos de amostragem e avaliação (ISO 4288, 1996)

<b>Faixa de <math>R_a</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Comprimento de Amostragem <math>l_r</math> (mm)</b>	<b>Comprimento de Avaliação <math>l_n</math> (mm)</b>
Até 0,02	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 2	0,8	4
De 2 a 10	2,5	12,5
De 10 a 80	8	40

Guessser, Pereira e Boehs, (2016) estudaram os efeitos na integridade superficial (rugosidade, microdureza e microestrutura) de ferros fundidos cinzentos, classe 250, utilizando ferramentas de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), classe 6090, sem revestimento, em operação de torneamento. A variável de entrada foi a velocidade de corte. Os autores verificaram que a rugosidade superficial é um resultado não somente das marcas de avanço deixadas pela ferramenta, mas também das deformações e microfraturas sofridas pelo intenso processo de deformação. A Fig. 11 mostra detalhes dos valores de rugosidade encontrados em função da variação de velocidade de corte.

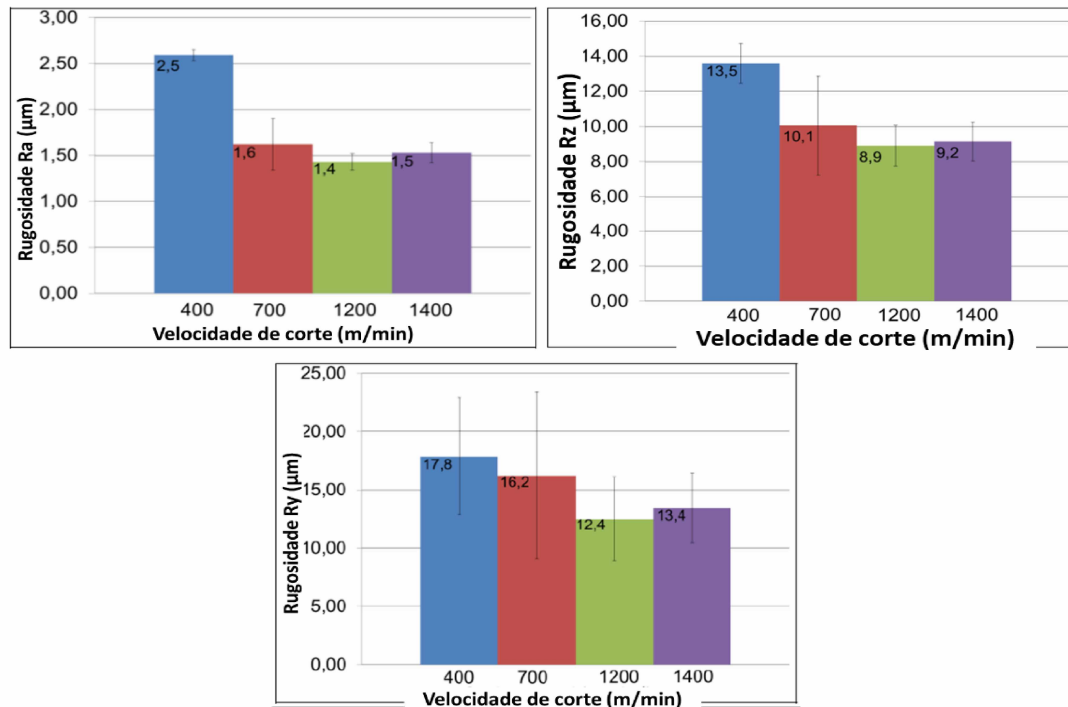


Figura 11 - Rugosidade Média  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_y$  (GUESSER; PEREIRA; BOEHS, 2016)

#### 2.4.2. Microdureza

Nos ensaios de penetração a dureza é definida como sendo a resistência à deformação gerada quando um penetrador de material duro é pressionado sobre a superfície da amostra analisada. O ensaio de microdureza possibilita, graças à pequenez das impressões geradas, a inspeção em pequenas áreas até em dimensões de grãos. Como instrumento de laboratório, o microdurômetro permite ensaio em pequenos corpos de prova, isso aliado ao caráter de ser um ensaio não destrutivo, apresenta grande utilidade na pesquisa.

Na dureza Vickers, que nada mais é do que uma relação entre a carga e a área de contato, o penetrador tem formato de pirâmide de base quadrada com ângulos de faces opostas de  $136^\circ$ , conforme a Fig. 12 (VEADO, 1965).

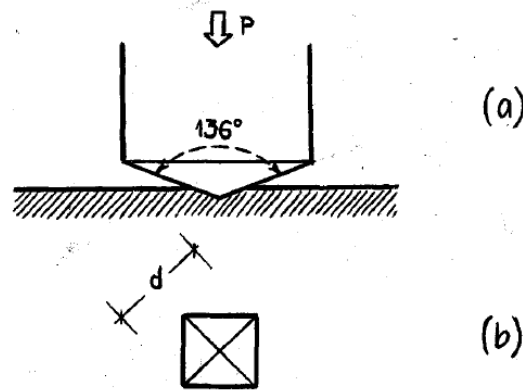


Figura 12 - a) Penetrador e b) Identação Vickers (VEADO, 1965)

A dureza Vickers é definida pela Eq. (4):

$$HV = \frac{P}{\frac{1}{2}d^2 \sin \frac{1}{2}(136^\circ)} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

Onde d é a diagonal da impressão (mm), P é a carga aplicada (kg) e HV se dá em kg/mm<sup>2</sup>.

Na usinagem a remoção de material é capaz de gerar não só aporte térmico para a peça e, conseqüentemente alterações em nível microestrutural, como também uma camada composta por campos de deformação por encruamento. Uma das formas de avaliar essa alteração da microestrutura é através do ensaio de microdureza.

Marques *et al.* (2017) fez uma avaliação sobre alteração de microdureza em função do afastamento da superfície durante o torneamento do Inconel 718 para analisar o efeito de se usar um regime de mínima quantidade de lubrificante sólido (MQSL) utilizando velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de corte de 1,5 mm como parâmetros de corte sob diferentes condições de lubri-refrigeração. As medidas de microdureza foram feitas em vários pontos na seção transversal das superfícies usinadas em direção ao centro da amostra. De forma geral, observou-se que houve uma diminuição significativa na dureza do material e todas as condições de superfície apontaram uma curva semelhante caindo gradativamente para uma profundidade de cerca de 120 µm

abaixo da superfície usinada. Entre 120 e 220  $\mu\text{m}$  abaixo da superfície, não houve variações significativas de dureza.

### 2.4.3. Metalografia

A metalografia é uma técnica de estudo da microestrutura dos metais, relacionando-a com as propriedades físicas, processos de fabricação, composição química, etc., de modo a esclarecer seu comportamento em uma determinada aplicação. O ensaio feito como o auxílio de um microscópio é chamado de micrografia. Esses ensaios são feitos em seções do material, polidas e atacadas com reativos adequados, segundo a norma E407 (STANDARD, 2012).

Através da micrografia, é possível observar a granulação do material, a natureza, quantidade, distribuição e forma dos variados constituintes, além de inclusões, etc (COLPAERT; DA COSTA, 2008), a exemplo dos Ferros Fundidos, como consta a Fig. 13. Por vezes dentro de um mesmo material há variações microestruturais importantes, a exemplo de perfis cilíndricos, em que as diferentes taxas de resfriamento propiciam a formação de diferentes fases e formas de grafita.

Em ferros fundidos continuamente, a fase periférica é constituída por grafita do tipo D, em uma matriz essencialmente ferrítica com aproximadamente 5% de carbonetos dispersados na microestrutura Fig. 13 (b). Por sua vez o núcleo do mesmo material contém matriz perlítica, com ferrita variando de 5 a 20%. A grafita forma estruturas lamelares, forma tipo A, segundo a norma ASTM A 247, Fig. 13 (a). Essas características são possíveis de serem reveladas através de micrografia (TUPY, 2011).

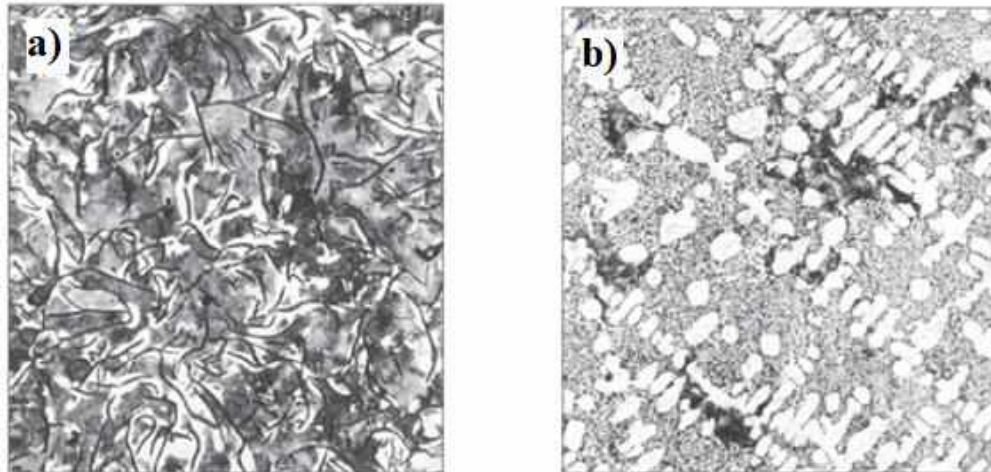


Figura 13 - Microestrutura típica do ferro fundido cinzento no centro (a) e na periferia (b) (TUPY, 2011)

Uma outra característica importante da metalografia é a possibilidade de medição de forma indireta das temperaturas desenvolvidas durante o corte. A microestrutura neste caso funciona como um filme em que uma determinada temperatura propicia a formação de uma determinada estrutura. Trent e Wright (2000) utilizaram essa complexa técnica para avaliar a distribuição da temperatura na ferramenta de usinagem em função de alterações microestruturais propiciadas por aporte térmico do processo.

A dureza do aço carbono endurecido e do aço rápido na temperatura ambiente, decrescem após seu reaquecimento e a diminuição na dureza depende do tempo e da temperatura de reaquecimento. As ferramentas de aço-carbono endurecidas perdem sua dureza a partir de 250°C, podendo reduzir rapidamente após um aquecimento a 600°C, porém as ferramentas de aço rápido não sofrem grande diminuição na dureza até 600 °C. Entre 600°C e 850°C, a dureza cai rapidamente, mas pode voltar a aumentar e chegar a temperaturas de reaquecimento maiores, se forem resfriadas rapidamente (WRIGHT; EM, 1973).

Para os insertos de metal duro foi desenvolvida uma técnica que permite mensurar a distribuição de temperatura na ferramenta. A técnica consiste na substituição do elemento ligante frequentemente utilizado nesses insertos, o Co, por ferro e ferrosilício, com diferentes teores. Cada ligante usado possui uma temperatura específica de transformação de fase, o que permite determinar as isotérmicas nas ferramentas. Por meio desse método, a distribuição de temperatura foi determinada em uma seção transversal à aresta principal de corte da ferramenta.

De Oliveira *et al.* (2018) fez uma análise das mudanças das grafitas de discos de freios de ferro fundido cinzento FC-250. O trabalho consiste em um estudo metalográfico da evolução dessas grafitas em discos de freio, com diferentes quilometragens, uma vez que as funções das grafitas seria de transporte de energia do sistema e lubrificação e como a mudança estrutural poderia levar à perda de funcionalidade. Foram analisados três discos. Um novo, um com 60 mil quilômetros rodados e outro com 80 mil. As análises metalográficas revelaram uma pequena diferença pela ação do uso, devido à mudança estrutural da base perlítica do material.

## 2.5. Materiais para ferramentas de corte

Os processos de usinagem convencional em geral, se baseiam no corte de uma peça com a utilização de uma ferramenta com material mais duro e mais resistente mecanicamente do que a peça a ser usinada (MACHADO *et al.*, 2015). De forma geral, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa). Contudo, com o avanço da metalurgia e o surgimento de novas ligas, uma melhor relação destas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas de diferentes composições químicas, refinamentos de grãos, controles de processos de fabricação e tratamento térmico, conferindo-lhes pureza e qualidade (MACHADO *et al.*, 2015). A Fig. 14 mostra uma relação dureza vs tenacidade para diversos tipos de materiais utilizados como ferramentas de corte.

Segundo Machado *et al.* (2015) Uma ferramenta de corte ideal deve possuir as seguintes propriedades: Boa dureza, tenacidade considerável para dificultar fratura, resistência ao desgaste, à compressão e ao cisalhamento, propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas adequadas, resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente. Ainda não existe disponível no mercado um material de ferramenta que atenda todas estas propriedades, portanto, para cada situação específica um material é mais vantajoso que o outro.

Para o caso das ligas de ferros fundidos, o material de ferramenta mais utilizado são os metais duros, ferramentas a base de carboneto de tungstênio, cujas características serão discutidas a seguir.



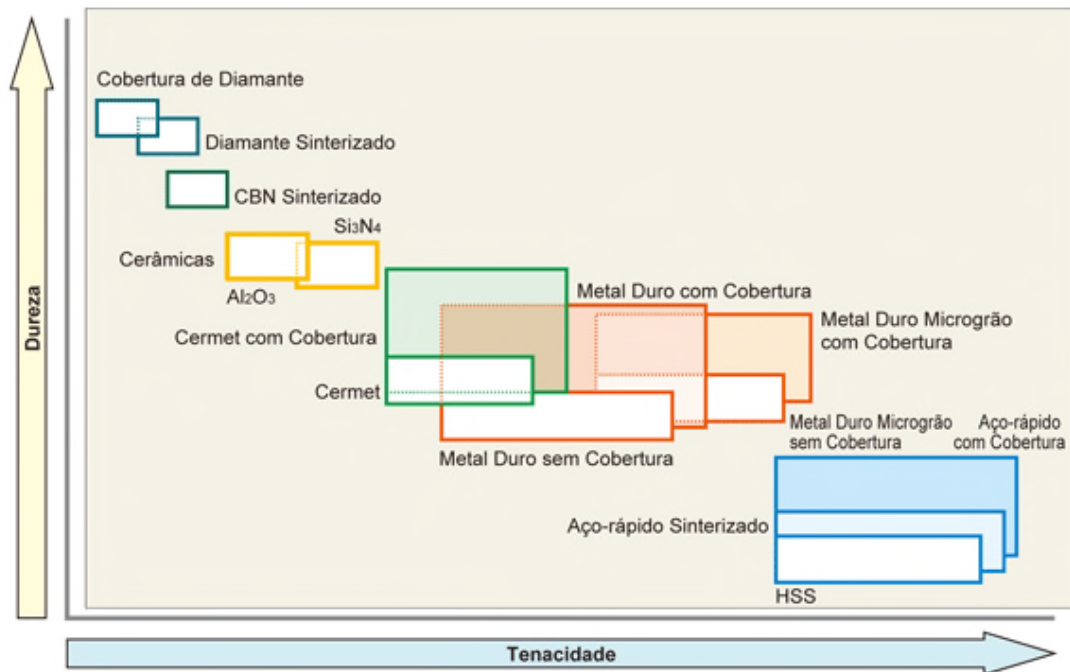


Figura 14 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte (Adaptado de Sandvik Coromant, 1994)

### 2.5.1. Ferramentas de metal duro

O metal duro é o nome dado a um compósito de carbeto de tungstênio. Este material foi desenvolvido na década de 1920 na Alemanha por Schröter utilizando a técnica da metalurgia do pó. É um material com alta resistência ao desgaste, alta dureza e boa tenacidade. Possui uma fase dura de alta dureza, resistência mecânica e uma fase ligante que confere tenacidade e plasticidade à liga. A fase dura é formada por grãos de carbeto de tungstênio (WC) normalmente misturados com cobalto, mas em algumas aplicações são adicionadas pequena quantidade de carbeto refratários, tais como TaC, MoC, NbC ou TiC afim de melhorar a dureza a quente e a resistência ao desgaste (DOS SANTOS TORRES; SCHAEFFER, 2009).

Os metais duros marcaram um salto tecnológico na usinagem dos metais, já que com eles as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes, passando dos 35 m/min com ferramentas de aços-rápidos para 250 - 300 m/min na usinagem de ligas ferrosas (TRENT; WRIGHT, 2000). A Tab. 4 abaixo mostra as principais propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro (UFSC, 2019)

Composição	Dureza (HV)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Ruptura Transversal (Mpa)	Módulo de Young (GPa)	Tenacidade à Fratura ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ )	Coefficiente de Expansão Térmica (W/mK)	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
WC-3Co	1900	7100	1600	673	8,5	5,0	15,25
WC-10Co	1625	6000	2280	580	10,8	5,5	14,50
WC-20Co	1050	3100	2850	490	14,5	6,4	13,55
WC-10Co-22(Ti, Ta, Nb, Mb)C	1500	5900	2000	510	9,0	6,1	11,40

A norma ABNT 513, (2015) padronizou a especificação dos metais duros e denominou classes para materiais ferrosos, a exemplo da classe K contendo WC+Co. Esta categoria também é conhecida por classe dos ferros fundidos ou de materiais que produzem cavacos curtos, adotando uma cor vermelha no sistema de cores de especificação internacional.

Teles, (2007) avaliou a usinabilidade do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio no torneamento com pastilhas de metal duro revestidas, analisando a microestrutura do ferro fundido usado, a vida da ferramenta, as formas do cavaco e os mecanismos e formas de desgaste, além da influência do fluido de corte. Os resultados mostraram que a vida mais longa da ferramenta foi obtida empregando-se a ferramenta de metal duro com revestimento de TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN. As pastilhas com aresta reforçada tiveram melhores resultados e mantiveram sua integridade em melhor estado. O fluido de corte também contribuiu para o aumento de vida da ferramenta.

## 2.6. Desgaste das ferramentas na usinagem de ferros fundidos

Segundo Machado *et al.* (2015), um dos fenômenos em que a ferramenta de corte perde sua eficiência são as avarias, que nada mais é do que um fenômeno de acontecimento repentino e inesperado, provocado pela trinca, lascamento ou quebra da aresta de corte. Outro fenômeno é o desgaste, que acarreta da mudança da forma original da ferramenta no decorrer do processo de corte, derivado da perda contínua e progressiva de material. Já a deformação plástica, é causada pela modificação da geometria da aresta de corte ocasionada pelo deslocamento de material. Advém por cisalhamento devido às grandes tensões nas superfícies das ferramentas.

Na prática, as avarias costumam ocorrer em processos de corte interrompido, como o fresamento, devido aos choques mecânicos e térmicos envolvidos. Nos processos de corte contínuo, como o torneamento, esses fenômenos são mais raros, a não ser que as condições de corte usadas estejam acima das máximas recomendadas para aquele processo em específico ou que a ferramenta possua algum defeito de fabricação.

Já o desgaste ou a deformação são observados tanto nos processos de corte contínuo quanto interrompido, ocorrendo tanto na superfície de folga como na de saída. Quando atingem proporções elevadas podem comprometer a usinagem dentro das especificações de determinado processo.

Estes mecanismos são importantes na usinagem do ferro fundido cinzento, uma vez que a liga é utilizada em larga escala na indústria. O fato é que o desgaste da ferramenta e a velocidade de produção estão em “lados opostos da mesma moeda”. Com o aumento da velocidade de corte a produtividade aumenta, reduzindo, conseqüentemente, a parte do custo de fabricação relativa à máquina. Porém, diminui simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento da parte do custo devido à ferramenta, além da paralização da linha para substituição da ferramenta em alguns casos (FERRARESI, 2018).

Pesquisas recentes têm mostrado que, para o ferro fundido cinzento, essa afirmação apenas é válida em baixas ou muito elevadas velocidades de corte. Na usinagem do FoFo cinzento, o desgaste da ferramenta apresenta um comportamento adverso, isto é, o desgaste diminui com o aumento da velocidade de corte para um intervalo específico. Esse comportamento observado do ferro fundido cinzento vem recebendo atenção em virtude da possibilidade de redução de custos de produção e aumento de produtividade, ao mesmo tempo. As explicações encontradas na literatura a respeito do “atípico comportamento” observado na usinagem do ferro fundido cinzento são a formação da “camada protetora” de óxido, de sulfeto de manganês e à formação do Aresta Postiça de Corte - APC à baixa velocidade de corte (PEREIRA, 2012).

Na análise de desgaste é importante primeiramente compreender quais são os principais mecanismos, sendo que esses podem depender da tensão de contato, temperaturas e propriedades físicas dos materiais envolvidos e velocidades relativas da interface de corte sendo encontrado quatro principais classes (ASM, 1989). A Fig. 15 apresenta um diagrama clássico com os principais mecanismos de desgaste em função da temperatura.

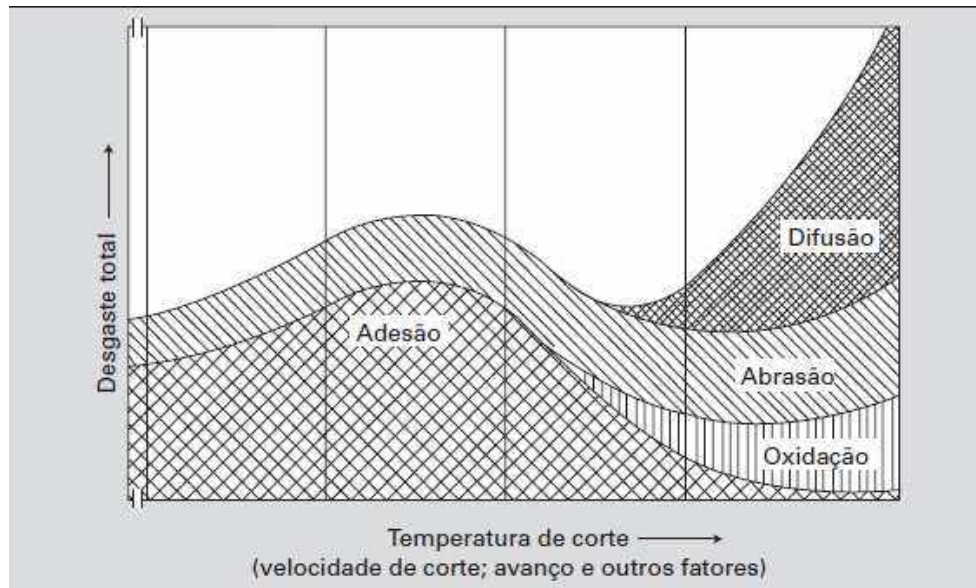


Figura 15 - Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura (MACHADO *et al.*, 2015).

Machado *et al.* (2015) mostra através do diagrama da Fig. 15 que para temperaturas inferiores, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão predomina, enquanto em temperaturas mais altas, a adesão dá lugar para os mecanismos de difusão e oxidação. É possível observar que esses dois mecanismos crescem em conjunto com o aumento da temperatura, e que a difusão cresce em uma escala exponencial. Esse diagrama também reforça que o desgaste total na ferramenta cresce muito com o aumento da temperatura de corte.

O desgaste por adesão (Fig. 16 (a)) é mais comum em usinagem em baixas velocidades de corte. Torna a superfície de saída irregular e promove um contato menos contínuo, assim fragmentos microscópicos são retirados da ferramenta. Quando analisados no microscópio apresenta aparência áspera.

O desgaste por abrasão (Fig. 16 (b)) é causado por partículas de alta dureza contidas na peça (óxidos, carbonetos e carbonitretos), ou na ferramenta (arrancadas por desgaste de aderência) ocasionando em perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento. Apresentam na superfície da ferramenta riscos ou sulcos.

O mecanismo de desgaste por difusão (Fig. 16 (c)) acontece devido à transferência atômica e depende da temperatura e dos elementos envolvidos. É mais comum ocorrer nas superfícies de saída e de folga da ferramenta e a taxa de desgaste aumenta em altas

velocidades de corte e avanço. A área desgastada apresenta uma superfície “lisa” quando vista em microscópio.

Já a oxidação (Fig. 16 (d)) é considerada um desgaste que ocorre quando o metal abaixo da camada de óxido da superfície possui baixa dureza ou está sob ação de uma alta carga de contato, ocorrendo deformação plástica. As asperidades da superfície com maior dureza irão penetrar através da camada de óxido, ocasionando atrito entre duas superfícies metálicas, que dependendo do sistema e do material pode ser abrasão ou desgaste adesivo. Trent e Wright, (2000) consideram a oxidação seguida de *attrition* os mecanismos responsáveis pela formação do desgaste de entalhe.

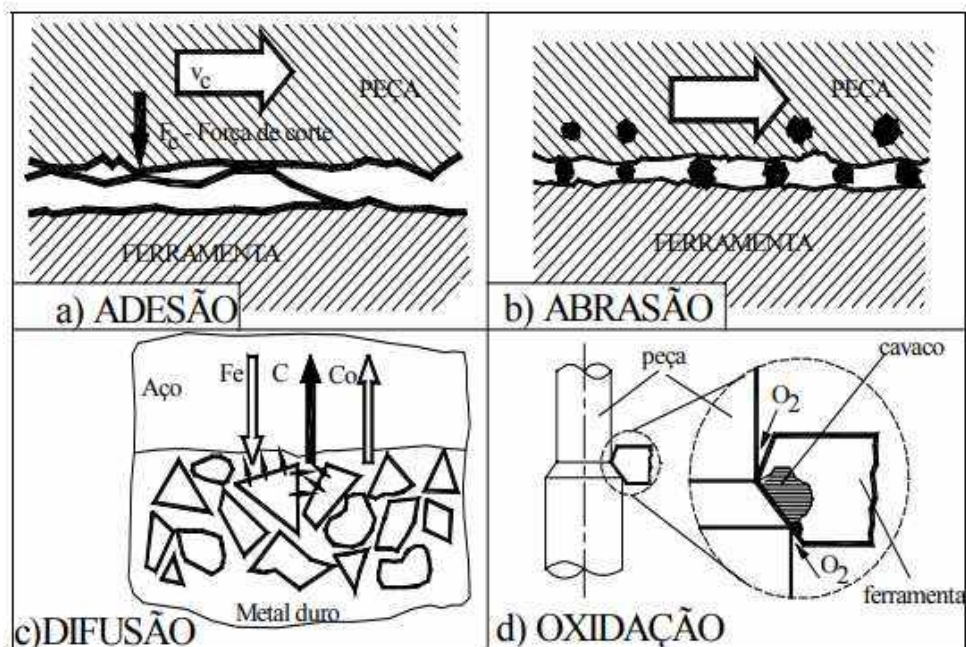


Figura 16 - Representação esquemática do desgaste de flanco (KÖNIG; KLOCKE, 1997)

A atuação dos mecanismos de desgaste leva a formas, ou tipos de desgaste, como o desgaste de flanco ( $VB_B$ ) (Fig. 17 (a)). Este se forma em função de mecanismos de desgaste contínuo, em que dois corpos se atritam entre si e há perda progressiva de material da ferramenta. Na prática a ferramenta progressivamente perde sua capacidade de corte e quando atinge determinados patamares passa a ser inviável a continuidade do processo.

Amorim, (2002) explica que um desgaste de flanco excessivo leva a aumento de esforços (forças de corte), aumento da potência requerida, perda de qualidade dimensional

e de integridade superficial, além do aumento de vibrações. Esse tipo de desgaste costuma ser usado como critério de fim de vida da ferramenta, uma vez que apresenta o maior risco de danos a peça e exige maiores potências de corte. A fim de evitar tais problemas, a norma ISO 3685 sugere um critério para troca de ferramentas da seguinte forma (Eq. 6 e 7):

$$VB_B = 0,3mm \quad (6)$$

$$VB_{Bm\acute{a}x} = 0,6 mm \quad (7)$$

Onde:  $VB_B$  é Desgaste de flanco médio e  $VB_{Bm\acute{a}x}$  é Desgaste de flanco máximo.

O desgaste de cratera ( $KT$ ) (Fig. 17 (b)) ocorre na superfície de saída da ferramenta, localizando-se na zona de deslizamento do cavaco durante o corte. É uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e principalmente difusão. Acontece principalmente em altas velocidades de corte devido ao grandes valores de temperatura na interface cavaco-superfície de saída. Assume uma forma de uma cratera alongada com extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte. A Eq. (8) quantifica o critério de fim de vida recomendado pela ISO 3685 para substituição da ferramenta.

$$KT = (0,06 + 0,3 f_c) \quad (6)$$

Onde  $f_c$  é o avanço de corte, dado em mm/rev.

O desgaste de entalhe ( $VB_N$ ) (Fig. 17 (c)) é um desgaste mais pronunciado que acontece normalmente na região onde ocorre o contato com a superfície da peça. Pode decorrer devido à vários fatores, como o corte de uma camada de material endurecida ou oxidada, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Apesar de nem sempre interferir no processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante danoso, uma vez que sua profundidade age como um concentrador de tensões, podendo levar a quebra da ferramenta. A Eq. (9) define o critério adotado pela norma ISO 3685 (1977) para quantificar esse tipo de desgaste.

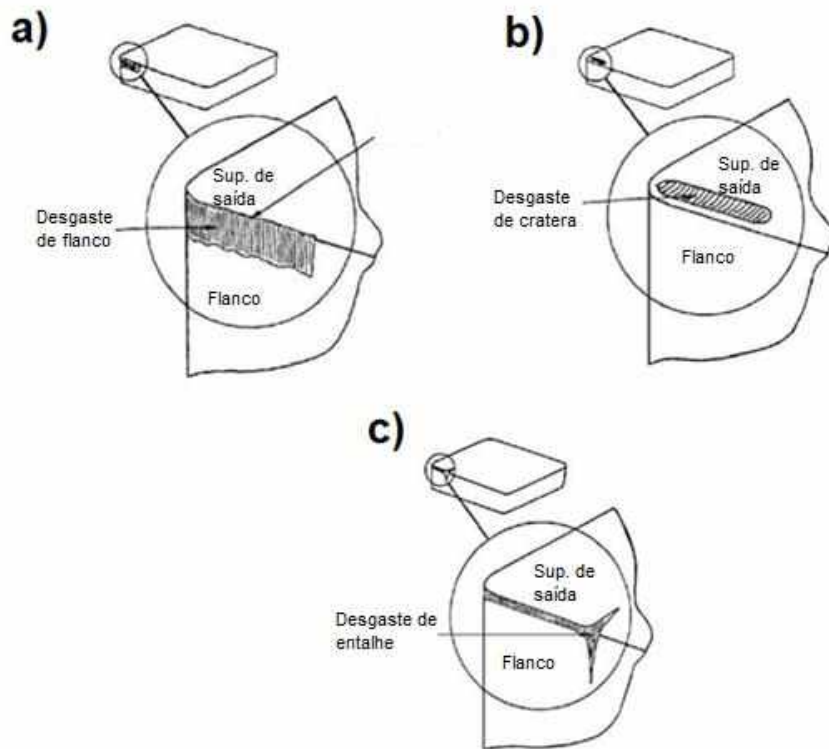


Figura 17 - Tipos de desgastes

Arendt (2017) avaliou o comportamento da usinagem do FoFo nodular austemperado comparando os resultados obtidos com diferentes parâmetros, tendo como referência um menor desgaste de flanco da ferramenta. Foi utilizado um FoFo nodular austemperado entre 40 e 45 HRC, avaliando o desempenho dos revestimentos TiAlN e TiN com velocidade de corte de 80 m/min e avanços de 0,1 e 0,15 mm com o uso de fluido de corte. A variável de saída foram o desgaste de flanco máximo, qualidade dimensional e a qualidade superficial. Os melhores resultados foram obtidos ao utilizar um avanço de 0,1 mm com cobertura de TiAlN, resultando em menor desgaste de flanco e melhor qualidade superficial e dimensional.

## 2.7. Fluidos de Corte Abundante - FCA

Astakhov (2008) diz que a principal função de um fluido de corte é proporcionar uma boa condição de lubri-refrigeração para a região de corte, reduzindo o atrito nas interfaces ferramenta/cavaco. Os fluidos podem afetar as condições de usinagem, modificando o comportamento das forças de usinagem, da temperatura, dos mecanismos de desgaste,

assim como do acabamento superficial da peça. Também atuam como agentes antioxidantes para todo o conjunto máquina-ferramentas-peça, além de ajudarem no controle de cavaco, remoção e, em alguns, caso quebra dos mesmos (BYERS, 2016).

Para operações de alta velocidade de corte, a função de refrigeração dos FCAs tem papel primordial, uma vez que as altas taxas de remoção de material gera mais atrito, calor e aumento de temperatura. Para velocidades mais baixas, especialmente em operações mais severas, tais como brochamento, rosqueamento, furações profundas, fresamento *fellows* de engrenagens, a função de lubrificação se torna mais apropriada, reduzindo o atrito, além de ajudar a evitar a formação de Aresta Postiça de Corte (APC) (MACHADO *et al.*, 2015).

Fernandes (2017) fez um estudo da concentração de óleo lubrificante em emulsões semi-sintéticas na usinagem industrial de ligas de alumínio (10 ~12 % Si) analisando a rugosidade como variável resposta. A operação foi o faceamento por fresamento com ferramenta de Diamante Policristalino (*PCD*) a uma velocidade de corte de 2512 m/min. Os resultados indicaram que um aumento da concentração de óleo no fluido tende a piorar a condição de acabamento superficial, indicando que para altas velocidade de corte o efeito de refrigeração é mais importante do que o efeito lubrificante.

Os fluidos de corte podem ser aplicados através de três maneiras: Jorro ou refrigeração convencional (baixa pressão), Pulverização ou MQF (Mínima Quantidade de Fluido) e Sistemas de alta pressão. O primeiro sistema é o mais utilizado devido à sua simplicidade de utilização. Há diversos problemas relativos ao uso dos FCAs. Em grandes indústrias, normalmente esses fluidos são aplicados de maneira contínua, circulando dentro de grandes reservatórios, podendo chegar à casa dos milhões de litros de FCs. Os usuários tendem a crer que há uma economia por conta dessa reutilização. Porém, com frequência, os FCs sofrem alterações em suas características químicas, físicas e biológicas, exigindo manutenção corriqueira, até o fim de suas vidas úteis. Portanto, existem custos atrelados a esses processos de manutenção, reciclagem e descarte que impactam diretamente no custo total de produção (FERNANDES, 2019).

Nem sempre a utilização de fluido de corte é benéfica. Há casos em que a aplicação de um fluido lubrificante é inócua, ou mesmo prejudicial para o processo, como por exemplo na usinagem de aços endurecidos. Essas ligas são consideradas materiais de difícil corte pois possuem alta dureza, podendo chegar aos 60 HRc, assim como elevada resistência ao cisalhamento. Nesse caso, o efeito do aumento de temperatura é crucial para



que o amolecimento do material e para facilitar o corte. A aplicação de FCA não é recomendada, pois ao invés de atuar como refrigerante apenas para a ferramenta de corte, atinge toda a região da formação do cavaco, refrigerando também a peça exigindo maiores quantidades de energia envolvidas no corte, promovendo maiores esforços (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Outro desabono para os FCAs é relativo tripé de sustentabilidade, ambiental, econômico e social. Os custos para a reciclagem e eliminação desses resíduos representam cerca de 16 a 20% do custo de fabricação (SREEJITH; NGOI, 2000), impactando negativamente o fator econômico do processo. Outro efeito negativo do fluido é com relação ao aspecto social, uma vez que FCAs são tóxicos para a saúde humana. O operador de máquinas, por estar em contato com os fluidos, pode desenvolver sérias doenças ocupacionais, tais como reações alérgicas de pele, respiratória, olhos, até mesmo câncer (MACHADO; WALLBANK, 1997; OZCELIK *et al.*, 2011). Shashidhara e Jayaram (2010) estimam que ~ 80% dos afastamentos de operadores são associados à intoxicação com FCs.

## **2.8. Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRI**

Com a intenção de reduzir ou eliminar a presença de fluido de corte no processo, alguns pesquisadores estudam maneiras viáveis e eficientes de como proceder à usinagem nas condições a seco, mantendo a qualidade do produto usinado. A Ferramenta Refrigerada Internamente (FRI) se destaca nesse seguimento. O método de resfriamento se dá pela introdução de um líquido resfriado, bombeado internamente através da ferramenta, retirando o calor da ferramenta de corte sem resfriar a peça usinada.

A ideia de resfriar indiretamente a ferramenta durante o processo de usinagem não é nova. Em 1970, Jeffries e Zerkle, (1970) propuseram uma análise térmica e matemática de uma FRI para corte ortogonal considerando ferramentas novas e gastas no flanco. Os estudos demonstraram que pode resultar em redução significativa da temperatura ao longo da superfície de folga principal do flanco.

Neto *et al.* (2015) realizaram um teste de torneamento em SAE XEV-F, um tipo de aço inoxidável, usando refrigerante de mudança de fase (R141-b) em vez de água, comumente usados. Os autores encontraram resultados promissores para FRI em comparação com

corte à seco, mas menos no que diz respeito ao corte com fluido abundante, que é amplamente empregado na indústria.

Sun *et al.* (2012) também fizeram uma estrutura de troca de calor próximo ao corte, adaptando uma ferramenta aço rápido com entrada de água e saída de resfriamento. Eles tornaram o Al 6063 em condições secas e FRI e encontraram uma quantidade significativa de calor retirado da zona de corte, observando uma redução de temperatura de 106 para 51° C em comparação com condições secas.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

A usinagem da barra de ferro fundido cinzento foi realizada no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O processo utilizado no estudo deste trabalho foi o torneamento. Neste projeto, para atingir os objetivos propostos, foram realizadas atividades antes, durante e após a usinagem, como mostrado na Fig. 18. Antes da usinagem (pré-usinagem) foi selecionado o material e foi feita uma adequação ao torno para realizar os ensaios (limpeza, troca de óleo, etc.). Durante a usinagem foram considerados as medições da temperatura e forças. Após a usinagem, vários ensaios foram feitos como EDS, MEV, metalografia, microdureza e rugosidade afim de se tirar melhores resultados do estudo.

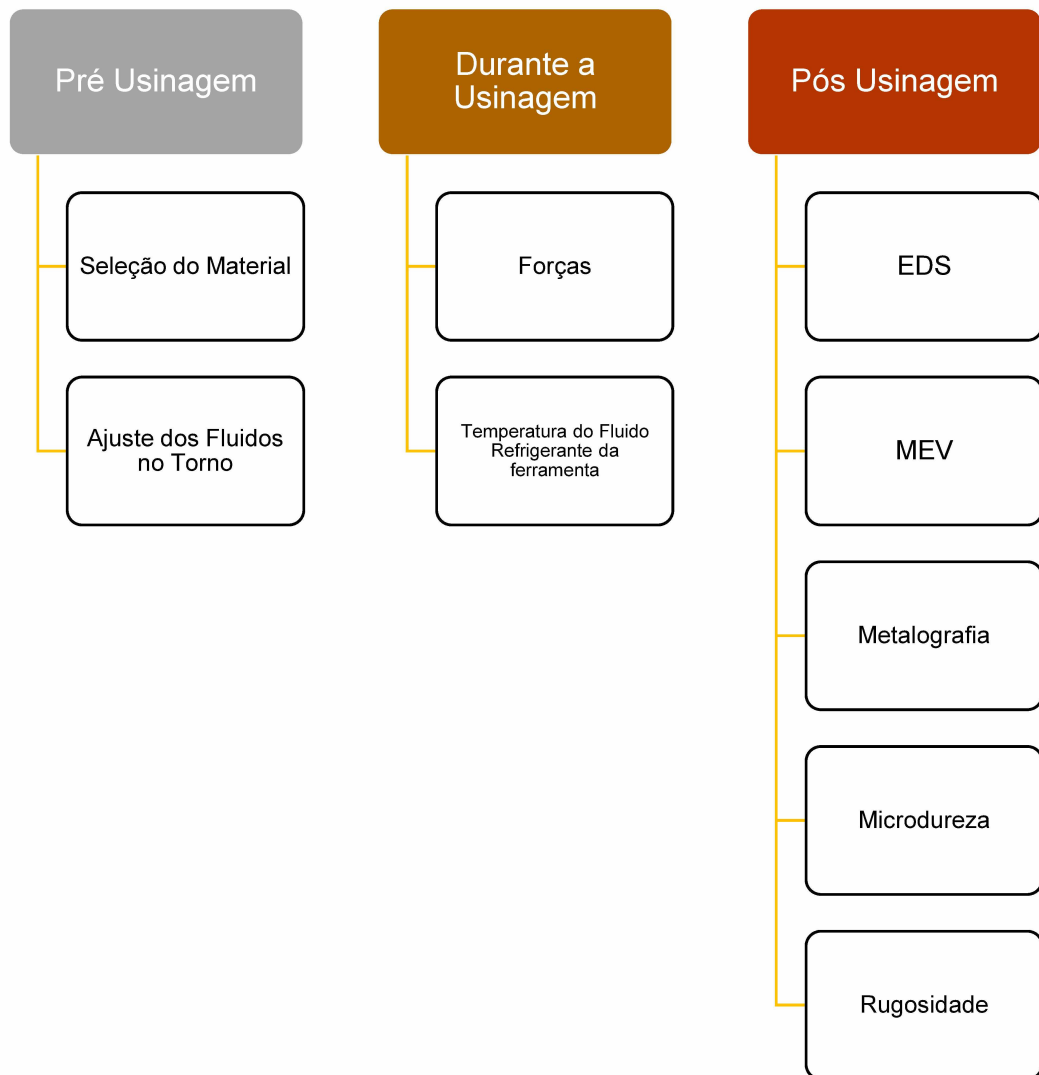


Figura 18 - Diagrama dos procedimentos experimentais

### 3.1. Preparação do material

O material utilizado neste trabalho foi uma Barra de FoFo Cinzento de 91,2 mm de diâmetro e 237 mm de comprimento, FUCO 200®. A barra foi fabricada pelo processo de fundição contínua que consiste no vazamento do metal líquido num forno alimentador, onde na parte frontal inferior é montada uma coquilha de grafite refrigerada à água, que confere a forma e a dimensão desejada do perfil a ser produzido. A composição química e as propriedades mecânicas do material são mostradas na Tab. 5.

Tabela 5 - Composição e propriedades do ferro fundido cinzento (TUPY, 2011)

<b>Propriedades Mecânicas do FoFo Cinzento</b>	
Resistência à Tração [MPa]	150
Dureza [HV]	180
<b>Elemento</b>	<b>%</b>
C	2,8 ~ 3,70
Si	2,20 ~ 2,70
Mn	0,20 ~ 0,70
S	0,20 máx
P	0,15 máx
Cr	0,10 máx

### 3.2. Máquina e ferramentas

Foi utilizado um Torno Multiplic 35 D, fabricado pelas indústrias Romi S.A., com 11 kW de potência, rotação variável de eixo de 3 a 3000 RPM, equipado com comando numérico GE FANUC, Series 21i-TB.

Neste trabalho, foi adotada a técnica de malha fechada de refrigeração com canais internos e dutos passando diretamente dentro da ferramenta de metal duro. O sistema de refrigeração é composto por dois trocadores de calor. O trocador de calor primário é um refrigerador convencional adaptado, marca Prodocimo, modelo 04180CBC201, 146 W. O freezer consiste em isolante térmico, compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador (Fig. 19).

O trocador de calor secundário é composto por reservatório, bomba centrífuga, dutos frio e quente e ferramenta de metal duro adaptada. O reservatório é responsável por armazenar o fluido de resfriamento e trocar o calor com o trocador de calor primário. Uma bomba centrífuga (até 22 KPa) é responsável por circular o refrigerante na FRI.

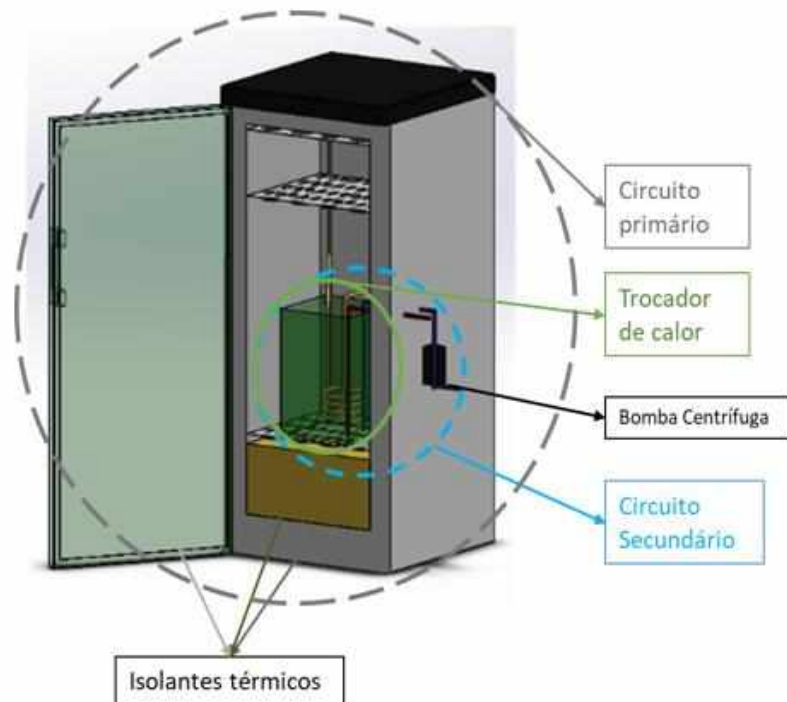


Figura 19 - Ilustração do Sistema de Refrigeração Contendo o Trocador de Calor Primário

A FRI consiste em uma ferramenta adaptada de metal duro, porta-ferramentas, grampo e calço, que possuem dutos para a passagem do refrigerante. Foi adaptado um modelo de porta-ferramenta DSSNR2525X12-P, marca Walter Tools (Fig. 20).

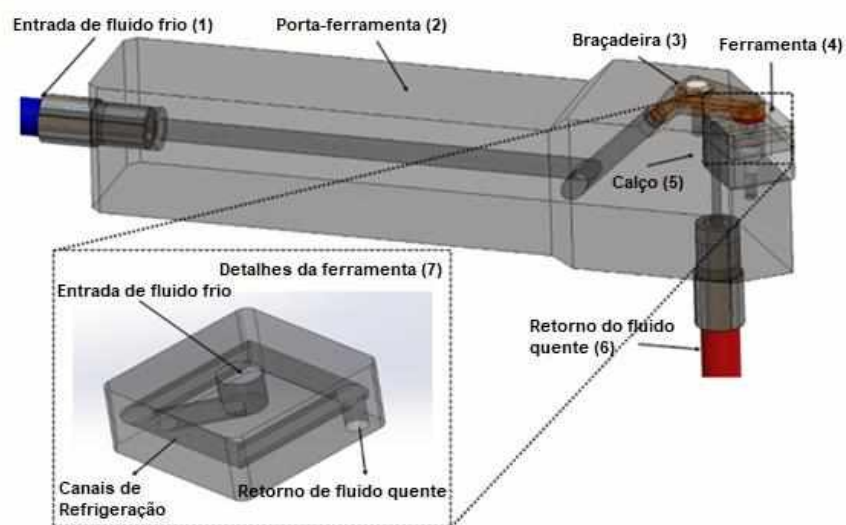


Figura 20 - Design da Ferramenta de Refrigeração Interna em Detalhes Mostrando os Canais de Refrigeração

O refrigerante entra no sistema pela entrada de fluido frio (1), passa por um duto especial adaptado no porta-ferramenta (2) até chegar à braçadeira (3) e posteriormente à ferramenta (4) onde irá remover o calor do processo de usinagem e escoar para o calço (5) saindo pelo duto quente (6).

A Fig. 20 (7) mostra detalhes dos canais internos em uma ferramenta de corte de metal duro ISO SNUN120412 classe K (Fig. 21). O refrigerante entra pela parte superior da ferramenta e retorna pela parte inferior, passando pelos canais (região escura, Fig. 20 (7)). O design desta ferramenta permite que quatro arestas sejam resfriadas e utilizadas. A Tab. 6 contém os detalhes dos trocadores de calor.

Tabela 6 - Especificações do Sistema de Refrigeração

<b>CIRCUITO PRIMÁRIO</b>	
Refrigerador Comercial	
Freezer Comercial (Marca/modelo)	Prosdócimo/04180CBC201
Potência de Refrigeração [W]	146
Fluido Refrigerante	R 134
Tensão [V]	220
Pressão Refrigerante R 134 [KPa]	52
<b>CIRCUITO SECUNDÁRIO</b>	
Fluido Refrigerante	Monoetilenoglicol (50%) e Água (50%)
Temperatura mínima [°C]	-25°C
Bomba (marca/modelo)	Bosch (compatível)
Vazão [l/min]	1,02
Tensão [V]	12
Pressão Refrigerante [KPa]	22

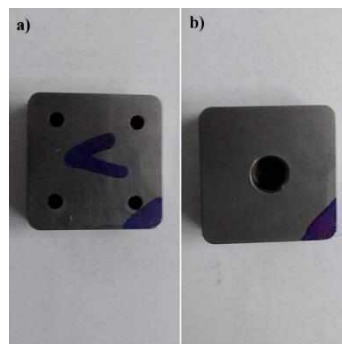


Figura 21 - Ferramenta utilizada no torneamento. a) Lado usado com fluido de corte abundante, b) Lado usado com refrigeração interna.

### 3.3. Fluido de corte e fluido refrigerante empregados

Utilizou-se uma emulsão para o torneamento com FCA em uma solução com 90% de água e 10% do fluido de corte 100% sintético ECOCOOL P 1977 BF. Como fluido refrigerante interno à ferramenta de corte, foi utilizada uma mistura de 50% água e 50% de uma solução à base de monoetilenoglicol, cujas propriedades estão na Tab. 7.

Tabela 7 - Análises Típicas da Solução de Monoetilenoglicol (PETRONAS, 2005).

Propriedades	Valor
Cor	Laranja
Aspecto	Límpido
Densidade 20°C / 4°C, g/cm <sup>3</sup>	1,1150
Ponto de Ebulição, °C	170
pH 10%	8,5
Reserva Alcalina 10%, ml HCL 0,1 N	6,7
Água K.F.	2,5
Nitritos	Ausente
Aminas. Fosfato	Ausente
Especificações	ASTM D-3306; ASTM D-4985; NBR 15297; FIAT 9.55523-2

### 3.4. Equipamentos e métodos de medição

#### 3.4.1. Dinamômetro

Para assimilar os valores de força gerado durante o corte, foi utilizado um dinamômetro acoplado ao suporte da ferramenta, de Modelo 9265B e um amplificador de sinal Modelo 5070 A, ambos fabricados pela Kistler, com placa de aquisição de dados da National Instrument USB-6251 modelo DaqPad para gerenciar o sistema de aquisição de dados com o software LabVIEW (Fig. 25a).



### 3.4.2. Rugosímetro

Foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-201 P (Fig. 25b) calibrado e aferido. O método de medição foi avaliar cinco medições para cada uma das condições de corte, variando as seções da barra em  $72^\circ$  (Fig. 22). Para cada condição de corte, foi analisada a rugosidade. As medições foram feitas em uma sala à  $25^\circ\text{C}$ . A Fig. 25 mostra um esquema do posicionamento do Rugosímetro para medições.

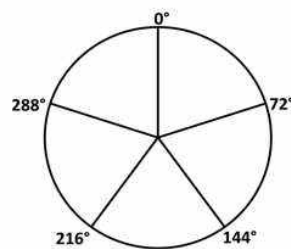


Figura 22 - Posições das cinco seções da barra nas medidas de rugosidade

Nas medidas de rugosidades  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$  da superfície usinada da peça, o rugosímetro foi apoiado em uma superfície plana. Seguindo a norma ISO 4288 adotou-se um cut-off ( $\lambda$ ) de 2,5 mm ( $2 < R_a < 10 \mu\text{m}$ ).

### 3.4.3. Ensaio metalgráficos

A análise da microestrutura e da morfologia do metal foi feita através de um ensaio metalográfico com o auxílio de um microscópio Leica DM750 M (Fig. 25c). Os procedimentos foram feitos com corte dos corpos de prova, após o torneamento com profundidade de 2 mm, na máquina serra-fita, que posteriormente foram lixadas com lixas de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh sequencialmente, polidas com óxido de alumínio (alumina) de  $1 \mu\text{m}$  e atacadas quimicamente com uma solução de nital à 10%. A Fig. 23 mostra a microestrutura revelada (antes do ataque químico) do material utilizado. Nota-se que está de acordo com a microestrutura da Fig. 13, fornecida pelo fabricante do material.

Para fins de comparação, foram analisadas as amostras antes da usinagem, com FRI e com FCA.

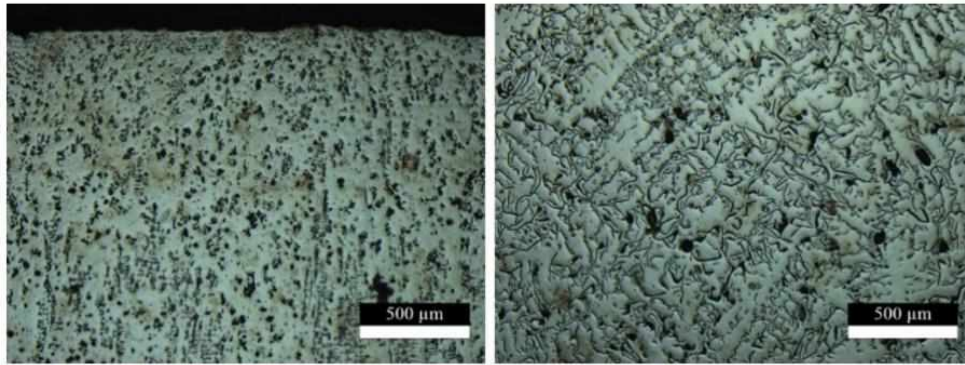


Figura 23 - Microestrutura do ferro fundido cinzento. Região de borda (esquerda) e região central (direita)

#### 3.4.4. Testes de microdureza

Os testes de microdureza Vickers foram feitos em um microdurômetro SHIMADZU HMV-G21S (Fig. 25d) na temperatura ambiente de 25°C. Inicialmente foram feitos três ensaios com corpos de prova padrão na dureza de 700HV para aferir a calibração do aparelho. Feito isso, adotou-se o seguinte critério: foram realizadas 33 medições, sendo onze linhas e três colunas (em cada uma das amostras), tendo a superfície como ponto zero ( $y = 0 \mu m$ ). Para cada linha foram feitas três medições e retira a médias delas. Medidas grosseiras foram eliminadas. Inicialmente, tendo como superfície da barra o valor de  $y = 0 \mu m$ , foram feitas medidas distanciando 100  $\mu m$  na direção radial com sentido para o centro da barra, até atingir 500  $\mu m$  de distância. Após isso, variou-se a distância em mais 500  $\mu m$ , atingindo 1 000  $\mu m$  da superfície, depois cada medição foi realizada variando 1 000  $\mu m$  até uma profundidade de 5000  $\mu m$ , conforme a Tab. 8 e a Fig. 24.

Tabela 8 - Distâncias das medições de microdureza

Medição	Distância da Superfície ( $\mu m$ )
0	0
1	100
2	200
3	300
4	400
5	500
6	1000
7	2000
8	3000
9	4000
10	5000

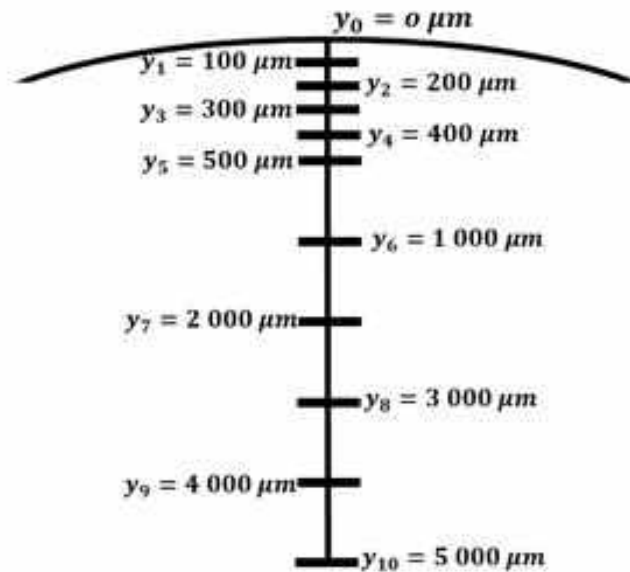


Figura 24 - Esquemática da medição de microdureza

#### 3.4.5. Desgaste da ferramenta de corte

Para realizar análises de desgaste das ferramentas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TM 3000 (Fig. 25e) fabricado pela HITACHI. Os insertos foram limpos durante três horas em uma máquina de ultrassom DNS Ultrasonic Cleaner - 3060, utilizando uma solução de nital à 5%.

A verificação dos elementos químicos presentes na amostra do ferro usinado pelo método de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) através de um OXFORD INSTRUMENTS INCAx-act (Fig. 25f). Ambo foram avaliados em uma sala na temperatura ambiente de 25°C.



Figura 25 - Equipamentos usados para medições e coleta de dados

### 3.5. Procedimentos experimentais

Utilizou-se um planejamento fatorial completo ( $2^3$ ) com três variáveis de entrada em dois níveis ( $\pm$ ), sendo duas quantitativas, profundidade de corte ( $a_p$ ) e velocidade de corte ( $v_c$ ) e uma qualitativa, ambiente (FRI ou FCA). Foram realizados oito experimentos ( $2^3$ ) com réplica e mais tréplica, totalizando 24 experimentos.

Usando profundidade de 1 mm, e avanço de 0,1 mm/rev foram usinados 12 trechos de 12 mm de comprimento, nos quais os seis primeiros foram feitos na condição de FCA e os seis últimos na condição FRI. A velocidade de corte foi alternada em cada trecho, começando com 100 m/min, depois 150 m/min e assim sucessivamente, conforme a representação na Fig. 26. O processo se repetiu em uma segunda etapa, porém com profundidade de 2 mm (Tab. 9 e 10). As condições estipuladas para a realização dos ensaios são mostradas na Tab. 11. Conforme os trechos foram usinados, os valores de forças foram adquiridos pelo dinamômetro e revelados no computador.

Tabela 9 - Condições utilizadas no processo de torneamento com  $a_p$  1 mm.

Velocidade de Corte ( $V_c$ [m/mi n])	100 e 150
Avanço ( $f$ [mm /rot])	0.1
Profundidade de Corte ( $a_p$ [mm])	1
Temperatura Inicial da Ferramenta FRI (T [°C])	-24,0
Temperatura Final da Ferramenta FRI (T [°C])	-22,3

Tabela 10 - Condições utilizadas no processo de torneamento com  $a_p$  2 mm.

Velocidade de Corte ( $V_c$ [m/mi n])	100 e 150
Avanço ( $f$ [mm /rot])	0.1
Profundidade de Corte ( $a_p$ [mm])	2
Temperatura Inicial da Ferramenta FRI (T [°C])	-21,7
Temperatura Final da Ferramenta FRI (T [°C])	-19,8

Tabela 11 – Planejamento fatorial completo ( $2^3$ )

Condições	Profundidade de corte [mm]	Velocidade de corte [m/min]	Ambiente
1	1,00	100	
2	1,00	150	FCA
3	2,00	100	ou FRI
4	2,00	150	

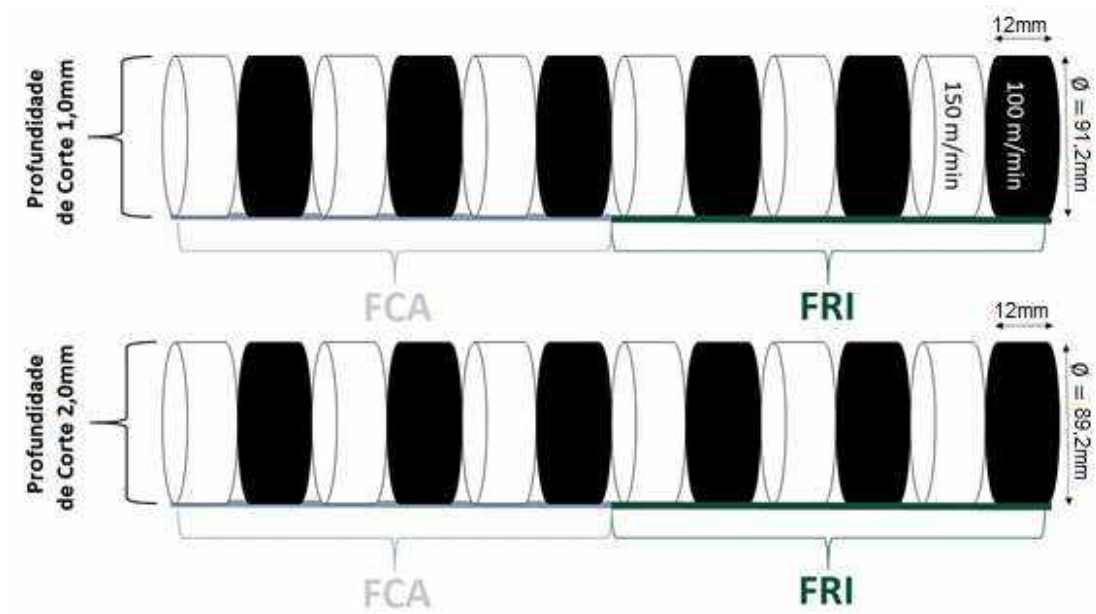


Figura 26 - Esquematização do torneamento

Foi feito também um teste univariado para ver a interação entre força e velocidade de corte, onde os valores dos esforços eram adquiridos nas velocidades de 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 240, 360, 480 e 600 m/min com profundidade de 1 mm para ambos os ambientes. As aquisições foram feitas em passes de dez segundos de duração.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos durante o procedimento experimental.

### 4.1. Análise das forças de corte

A Tab. 12 apresenta os valores de força de corte no teste (T1), réplica (T2) e tréplica (T3), no qual foi alterado o ambiente (A), a profundidade de corte ( $a_p$ ) e a velocidade de corte ( $V_c$ ).

Tabela 12 - Valores das medições do ensaio de força

Experimento	Método de Refrigeração	Profundidade de Corte (mm)	Velocidade (m/min)	T1 (N)	T2 (N)	T3 (N)	Força Média (N)
1	FCA	1	100	85.26	136.47	118.93	113.55
2	FCA	1	150	208.24	195.29	169.50	191.01
3	FCA	2	100	406.02	372.94	384.23	387.73
4	FCA	2	150	632.90	609.37	579.61	607.29
5	FRI	1	100	193.68	119.40	129.94	147.67
6	FRI	1	150	142.30	135.81	138.05	138.72
7	FRI	2	100	356.79	448.58	500.04	435.14
8	FRI	2	150	543.87	538.18	502.55	528.20

Através análise estatísticas, a Tab. 13, mostra o quadro de ANOVA dos testes de força, e seu diagrama de Pareto. Definindo um nível de significância de 5 % ( $p < 0,05$ ) é possível verificar que as variáveis ambientes ( $A$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e velocidade de corte ( $v_c$ ) influenciaram a força de corte de corte, assim como a interação destas variáveis.

Tabela 13 - Tabela ANOVA de forças

	SS	df	Média	Valor de F	p-value Prob > F	Pareto Efect % (100%= 379,6)
<b>Ambiente (A)</b>	117110,6	1	117110	73,542	< 0,0001	36,80
<b>Profundidade de corte (<math>a_p</math>)</b>	155586,3	1	155586	97,704	< 0,0001	42,42
<b>Velocidade de corte (<math>V_c</math>)</b>	9130,8	1	9131	5,7339	0,0284	10,28
<b>A * <math>a_p</math></b>	9729,8	1	9730	6,1100	0,0243	-10,61
<b>A * <math>V_c</math></b>	13,9	1	13,9	0,0088	0,9266	-0,40
<b><math>a_p</math> * <math>V_c</math></b>	2290,4	1	2290,4	1,4383	0,2469	5,15
<b>Erro</b>	27071,3	17	1592,4			
<b>Total SS</b>	320933,1	23				

De acordo com o diagrama de pareto da Tab. 13 é possível afirmar que a variável profundidade de corte ( $a_p$ ) tem forte influência sobre as forças de corte. Isso ocorre pois o aumento de  $a_p$ , aumenta também a área da seção de corte, dada pela ( $A = a_p \times f [mm^2]$ ), e por fim a força de corte.

O segundo parâmetro de maior relevância foi o ambiente (A), onde o sistema FRI apresentou maiores forças de corte para as condições de baixa velocidade (100 m/min) e menores valores para maior velocidade (150 m/min) comparado ao FCA. Esta diferença pode ser atribuída ao efeito de lubricidade, predominante em menores velocidades de corte. As baixas velocidades de corte olaboram para uma melhor atuação do fluido de corte e seus efeitos de lubrificação, em detrimento ao contato a seco na usimagem utilizando o FRI.

O terceiro fator de maior influência foi a combinação dos efeitos entre as variáveis ambiente e profundidade de corte. As causas prováveis é que a mudança da área de seção de corte da interface cavaco/ferramenta, causado pela mudança na profundidade de corte, afete, de certo modo, a transferência de calor no interior da ferramenta assim como a capacidade de troca térmica entre o fluido no interior da galeria com a ferramenta.



A ampla literatura indica que maiores velocidades de corte, geram maior taxa de remoção de material, com maior atrito, geração de calor e aumento de temperatura. O aumento da temperatura contribui para a redução das propriedades mecânicas do material, em especial resistência ao cisalhamento e dureza e, desta forma contribui para redução das forças de corte (TRENT; WRIGHT, 2000; KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2015). Os resultados encontrados indicaram que o aumento da velocidade fez aumentar as forças de corte, conforme mostram a Tab. 12 e o quadro de Anova, Tab. 13.

Para explicar e validar este fenômeno, descartando a hipótese de erros sistemáticos, foram realizados ensaios de *força x velocidade de corte* univariados, velocidade de corte de 40 m/min até 600 m/min, ambientes FCA e FRI e profundidade de corte  $a_p = 1,0 \text{ mm}$ . Os resultados são mostrados na Fig. 28.

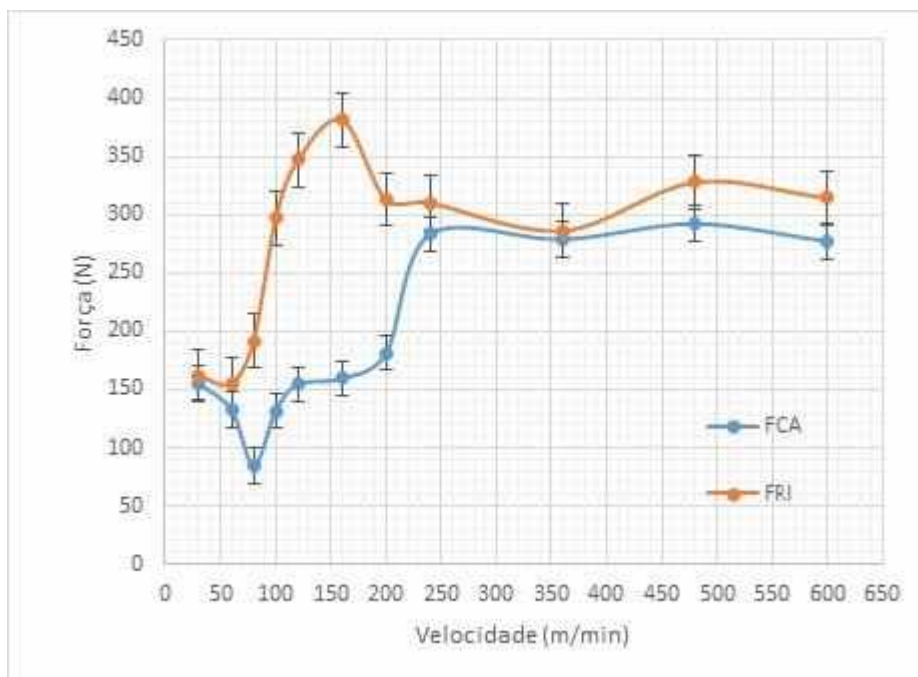


Figura 27 - Curva de forças em função da velocidade.

Analisando a comparação FCA e FRI, há duas hipóteses para as forças de corte serem maiores no caso de o FRI. A primeira é relativa ao efeito de lubrificidade do meio FCA proeminente para baixas velocidades de corte (até ~150 m/min) que contribui para a redução do coeficiente de atrito e facilitando o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

A segunda hipótese se refere ao efeito de refrigeração acentuado do FRI. Para altas velocidades de corte o fluido passa a ter pouco ou quase nenhum acesso à zona de corte, atuando mais como refrigerante do sistema. Neste caso, forças menores indicam

temperaturas maiores, pois conforme debatido as altas temperaturas atuam facilitando o corte. Portanto, é razoável inferir que o sistema FRI tem eficiência na remoção de calor da ferramenta. Para confirmar isso ensaios de temperatura deveriam ser realizados.

Para o FCA, a menor força ocorreu próxima de 80 m/min, possivelmente em função da formação de APC, e aumentou até os 240 m/min, onde estabilizou-se. No caso da FRI as forças aumentam consideravelmente dos 60 até os ~160 m/min, onde cai notadamente até estabilizar a partir dos 200 m/min. Possivelmente há formação de APC para o ambiente FRI, especialmente por conta da inexistência de lubrificidade que facilita os mecanismos de adesão e sua formação.

## 4.2. Integridade Superficial

### 4.2.1. Análises de rugosidade

A rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$  foram medidas, para cada condição de usinagem, com cinco medições para cada trecho, calculando média e desvio padrão, totalizando 120 medidas. Foi realizado um estudo estatístico com o objetivo de avaliar os parâmetros de usinagem de maior importância sobre as variáveis de resposta  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$ .

Os resultados para rugosidade  $R_a$  e  $R_q$ , Tab. 14 e 15, respectivamente, mostraram que a velocidade de corte e a interação entre as variáveis velocidade de corte e ambiente foram mais significativas para  $R_a$  e  $R_q$ . A velocidade de corte foi o parâmetro de maior destaque, seguido por sua interação com o ambiente, mostrando que o aumento da velocidade de corte atuou na redução da rugosidade superficial (Fig. 29), o que está em grande parte de acordo com a literatura (DONTAMSETTI; FISCHER, 1988; SIVAPRAKASAM; HASAN, 2006; LU *et al.*, 2020). Já a rugosidade  $R_z$  não teve variância considerável.

A profundidade de corte não teve significância e o ambiente não foi uma variável significativa. Isso pode ser explicado de alguma forma pelo fato do ferro fundido cinzento ser um material de boa usinabilidade, contendo grafita em sua microestrutura, que acaba agindo como um autolubrificante no processo do corte.

Tabela 14 - Tabela ANOVA para rugosidade  $R_a$ .

	Somatório dos quadrados	GL	Média	Valor de F	p-value prob>F	Efeito %
<b>Velocidade de Corte (<math>V_c</math>)</b>	0,7301	1	0,7301	20,5603	<b>0.0002</b>	-10.84
<b>Profundidade de Corte (<math>a_p</math>)</b>	0,0194	1	0,0194	0,5458	0.4578	1.77
<b>Ambiente (A)</b>	0,0379	1	0,0379	1,0679	0.3027	-2.47
$V_c \times a_p$	0,0755	1	0,0755	2,1258	0.1521	3.49
$V_c \times A$	0,3675	1	0,3675	10,3501	<b>0.0042</b>	-7.69
$a_p \times A$	0,0693	1	0,0693	1,9526	0.1688	3.34
<b>Erro</b>	0,5707	17	0,0336			
<b>Total SS</b>	1,8705	23				

Tabela 15 - Tabela ANOVA para rugosidade  $R_q$ .

	Somatório dos quadrados	GL	Média	Valor de F	p-value prob>F	Efeito %
<b>Velocidade de Corte (<math>V_c</math>)</b>	1,1197	1	1,1197	23,0399	<b>0,0002</b>	-21,89
<b>Profundidade de Corte (<math>a_p</math>)</b>	0,0329	1	0,0329	0,6760	0,4223	-3,36
<b>Ambiente (A)</b>	0,0616	1	0,0616	1,2677	0,2758	-3,36
$V_c \times a_p$	0,1176	1	0,1176	2,4197	0,1382	-3,36
$V_c \times A$	0,5717	1	0,5717	11,7623	<b>0,0032</b>	-3,36
$a_p \times A$	0,1267	1	0,1267	2,6076	0,1248	-3,36
<b>Erro</b>	0,8262	17	0,0486			
<b>Total SS</b>	2,8564	23				

Tabela 16 - Tabela ANOVA para rugosidade  $R_z$ .

	Somatório dos quadrados	GL	Média	Valor de F	p-value prob>F	Efeito %
<b>Velocidade de Corte (<math>V_c</math>)</b>	218,298	1	218,2	0,6049	0,4474	46,94
<b>Profundidade de Corte (<math>a_p</math>)</b>	404,44	1	404,4	1,1207	0,3046	63,90
<b>Ambiente (A)</b>	316,26	1	316,2	0,8763	0,3623	56,50
$V_c \times a_p$	403,35	1	403,3	1,1177	0,3052	63,81
$V_c \times A$	253,53	1	253,5	0,7025	0,4136	50,59
$a_p \times A$	425,73	1	425,7	1,1797	0,2926	65,56
<b>Erro</b>	6135,20	17	360,8			
<b>Total SS</b>	8156,83	23				

O ambiente FCA atuou a favor da rugosidade apenas para as condições 1 e 3 (Tab. 11) (Fig. 28), em menores velocidades de corte (100 m/min), ou seja, para menor geração

de calor. Em maiores velocidades (150 m/min), condições 2 e 4 (Tab. 11) (Fig. 28), o ambiente FRI apresentou melhores resultados. Baixas temperaturas significam melhor acabamento superficial, segundo a literatura (DHAR; KAMRUZZAMAN, 2007; SHOKRANI *et al.*, 2013; SUHAIMI *et al.*, 2017). Portanto, mais um indicativo que o sistema FRI removeu o calor de forma mais eficiente do que o FCA, provavelmente devido à sua dificuldade de acesso à zona de corte.

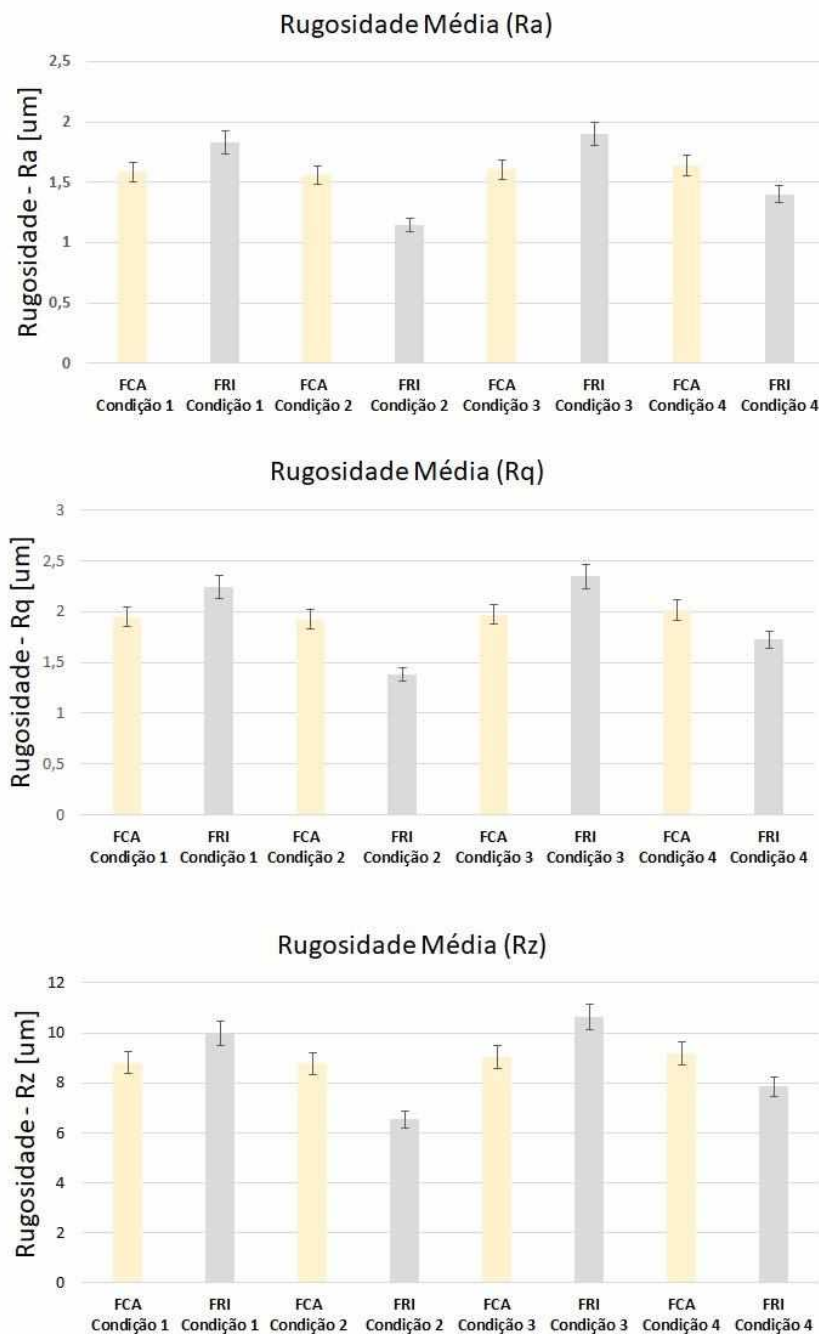


Figura 28 - Rugosidades  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$ .

#### 4.2.2. Análises metalográficas

As Fig. 29 e 30 mostram a microestrutura, da região de borda e central do material, antes do processo de torneamento e após, nos ambientes FCA e FRI respectivamente.

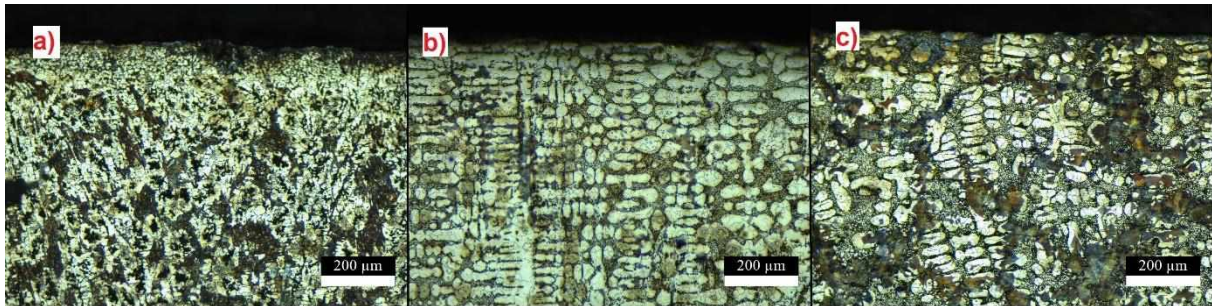


Figura 29 - Metalografia da região de borda. a) Sem usinagem; b) FCA; c) FRI.

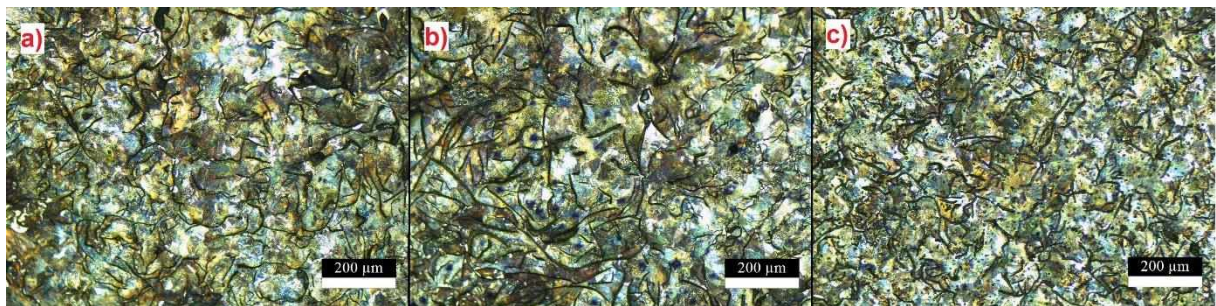


Figura 30 - Metalografia da região central. a) Sem usinagem; b) FCA; c) FRI

Através das imagens é possível observar a matriz perlítica com lamelas de grafitas incrustadas, comum nos ferros fundidos cinzentos. Nota-se que a região central apresenta majoritariamente grafita tipo A e não sofreu alteração de sua microestrutura em nenhuma das condições analisadas.

Para a na região de superfície é notória a diferença da amostra antes da usinagem para as amostras usinadas. A microestrutura se aproxima de uma grafita tipo D em formato de veios pequenos, curtos e agrupados demonstrando uma orientação dos grãos devido à alta taxa de deformação plástica e encruamento sofrido nessa região. Outro fator que leva a alterações microestruturais é o resultado da alta temperatura e esforços nessa região, causando um processo de tratamento termomecânico.

#### 4.2.3. Análises de microdureza

A Fig. 31 representa os valores de microdureza medidos, conforme Tab. 8 e Fig. 24, na amostra antes e após o torneamento, tanto em ambiente de fluido de corte abundante quanto no corte com ferramenta refrigerada internamente.

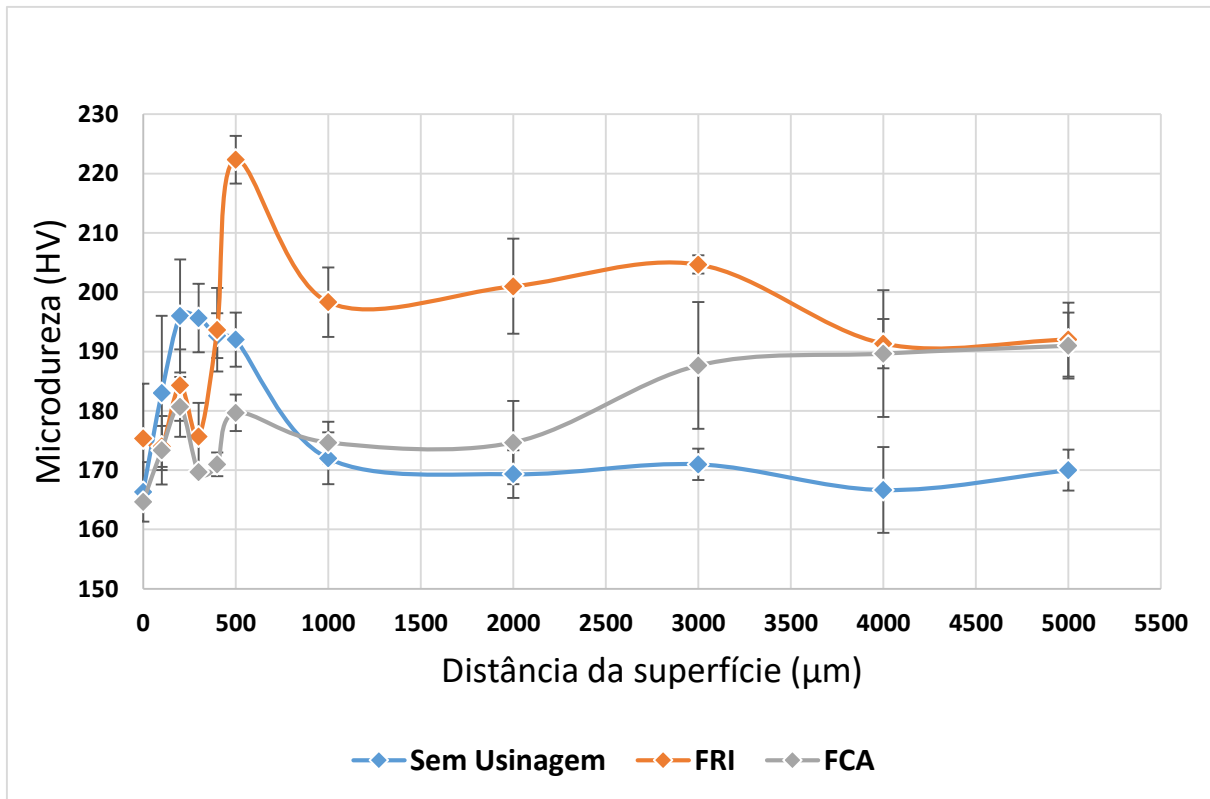


Figura 31 - Variação da microdureza sub-superficial nas condições de sem usinagem, FRI e FCA

Há uma tendência de crescimento dos valores de microdureza na camada superficial (até  $200 \mu m$ ). Eles crescem e depois começam a cair à medida que se caminha para o centro da peça. Na superfície os valores ficam próximos entre si e do material base. O material apresenta uma tendência de encruamento logo na sub-camada da superfície em valores de  $200 \mu m$  até aproximadamente  $500 \mu m$ , sendo mais evidente para o torneamento no ambiente FRI. Nos valores de maior distância, o material começa a evidenciar uma estabilidade em seus valores de dureza.

Possivelmente os menores valores de dureza da superfície ( $y = 0 mm$ ) podem estar associados a formação de camada de óxido, que geralmente apresentam dureza menor. Também é uma Zona Termicamente Afetada – ZTA que sofre grande aporte térmico

durante a usinagem. Essas temperaturas elevadas podem ser suficientemente grandes para proporcionar um recozimento do material.

Logo na sub-camada essas temperaturas já diminuem e ainda há o processo de corte onde trabalho mecânico tende a arrancar material da peça. Esse movimento causa nucleação e propagação de trincas mecânicas, com orientação dos grãos da microestrutura, conforme mostra Fig. 29 (FCA) e 30 (FRI). Há evidente encruamento do material em função da usinagem. Material encruado tende a concentrar tensões por deformações dentro e no contorno dos grãos e com isso, apresenta maiores valores de microdureza. Essa região de encruamento vai até aproximadamente  $500 \mu m$  da superfície e é mostrada tanto pelos resultados de dureza quanto pela análise metalográfica (Fig. 29 e 30).

Nota-se também maiores valores de dureza na sub-camada na condição FRI em relação à FCA. Isso possivelmente se deve ao fato de que nessa condição houve maior resfriamento da região de corte. Maior resfriamento significa menor temperatura (menos recozimento) e maiores forças de corte, ou esforços, promovendo um maior encruamento do material.

#### 4.2.4. Análises de desgaste (MEV e EDS)

Para a análise do desgaste das ferramentas, foram feitas imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas superfícies primária de folga e imagens da ponta da ferramenta, para cada uma das condições de corte sugeridas neste trabalho, sem ataque químico, apenas com limpeza por ultrassom.

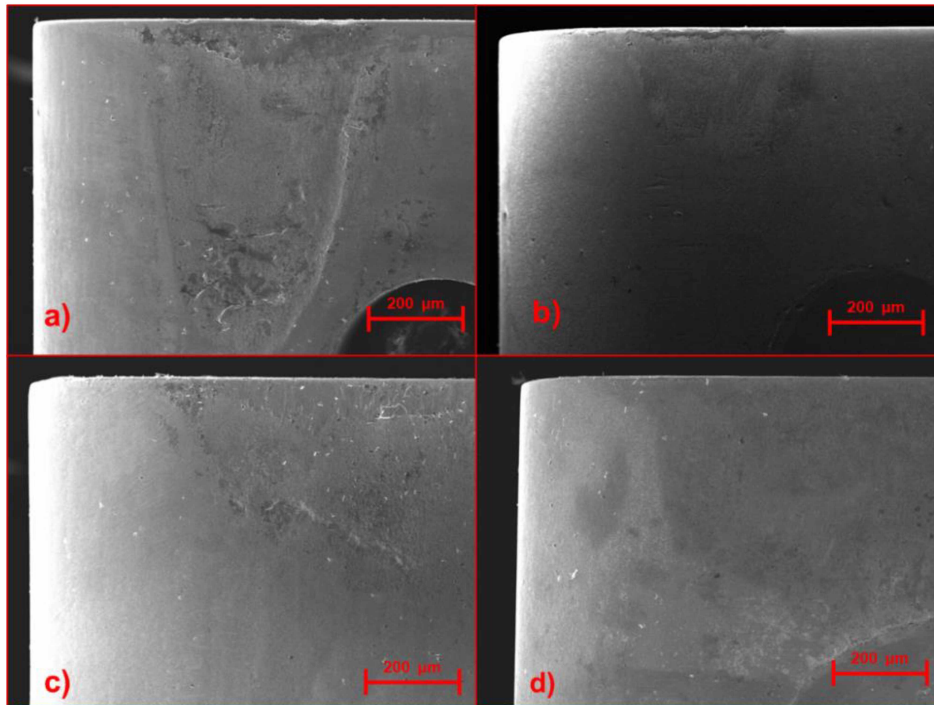


Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de folga primária das ferramentas. a) FRI com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; b) FCA com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; c) FRI com  $ap = 2 \text{ mm}$  ; d) FCA com  $ap = 2 \text{ mm}$

O desgaste de flanco é definido como a perda gradativa da aresta de corte da ferramenta. Pela análise da Fig. 32 somente, há uma falsa percepção de que houve desgaste de flanco pronunciado das ferramentas. Contudo, ao analisar a Fig. 33 em perspectiva da ponta da ferramenta, nota-se que os traços que compõem as arestas de corte estão praticamente intactos, com pequenos indícios de deformação plástica no caso do FRI. Pode-se supor que as marcas presentes na Fig. 32, são em decorrência de atrito entre a superfície principal de folga e a superfície da peça recém formada, possivelmente em função de um baixo ângulo de folga da ferramenta.

As imagens da ponta da ferramenta (Fig. 33) mostram as superfícies de folga primária, secundária e de saída. É possível verificar que não houve desgaste de cratera pronunciado, há apenas indícios de uma pequena quantidade de material aderido.



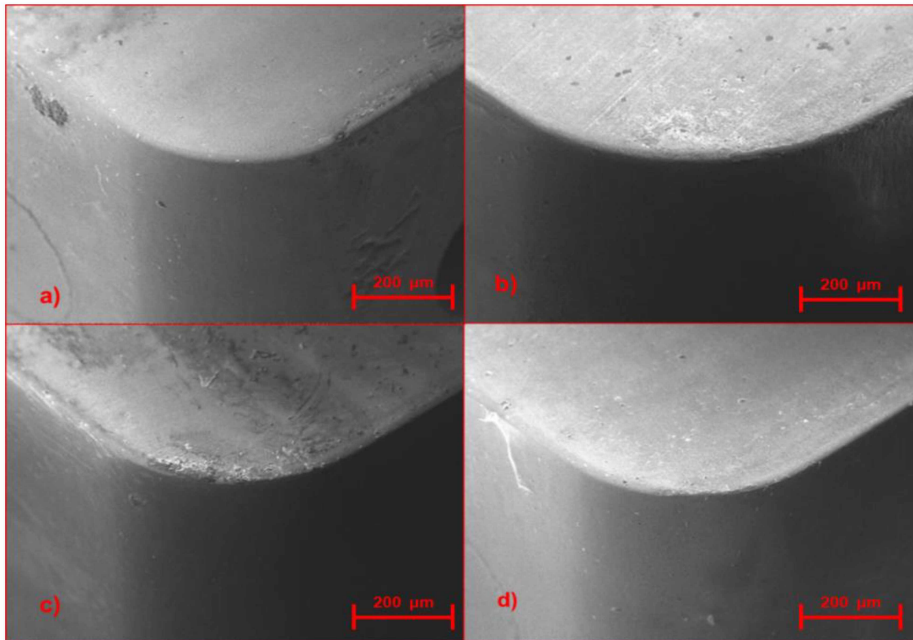


Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura da ponta das ferramentas. a) FRI com  $ap = 1$  mm ; b) FCA com  $ap = 1$  mm ; c) FRI com  $ap = 2$  mm ; d) FCA com  $ap = 2$  mm.

Foram realizadas análises Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para verificar a presença de material aderido. O mapa gerado foi ajustado para os elementos presentes no material da peça (Fe, C, Si, Mn, P, S e Cr) e da ferramenta (W, C e Co). As imagens, assim como feito no MEV, foram realizadas sobre a superfície primária de folga e da ponta da ferramenta para as condições FCA e FRI com profundidade de corte de 1 mm. Observando as Fig. 34 e 35 nota-se a presença de elementos que compõe o FoFo cinzento, em especial o Fe, assinalando a presença de material aderido.

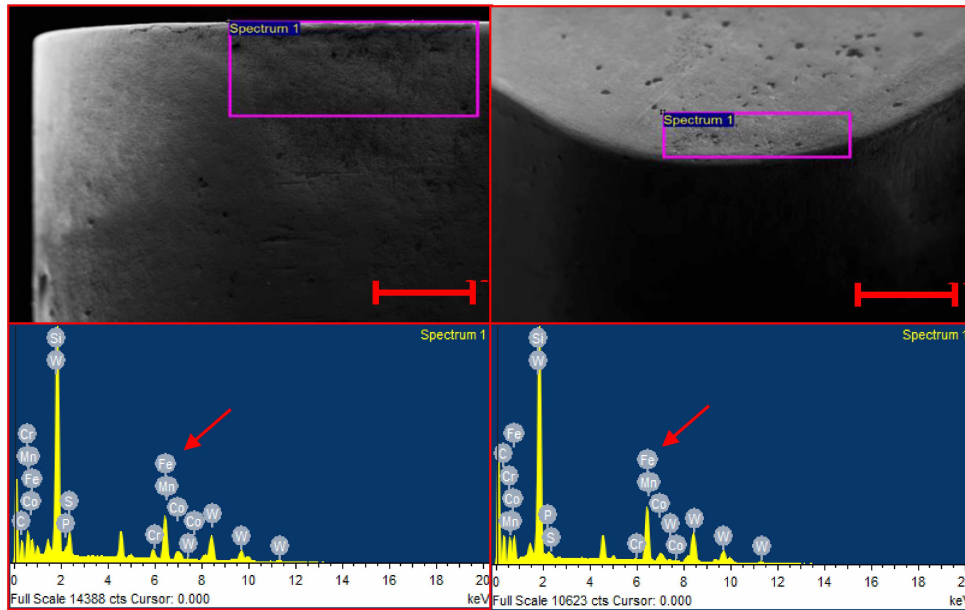


Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura com elétrons retroespalhados da condição FCA com  $ap = 1$  mm. a) Superfície de folga primária; b) “ponta” da ferramenta.

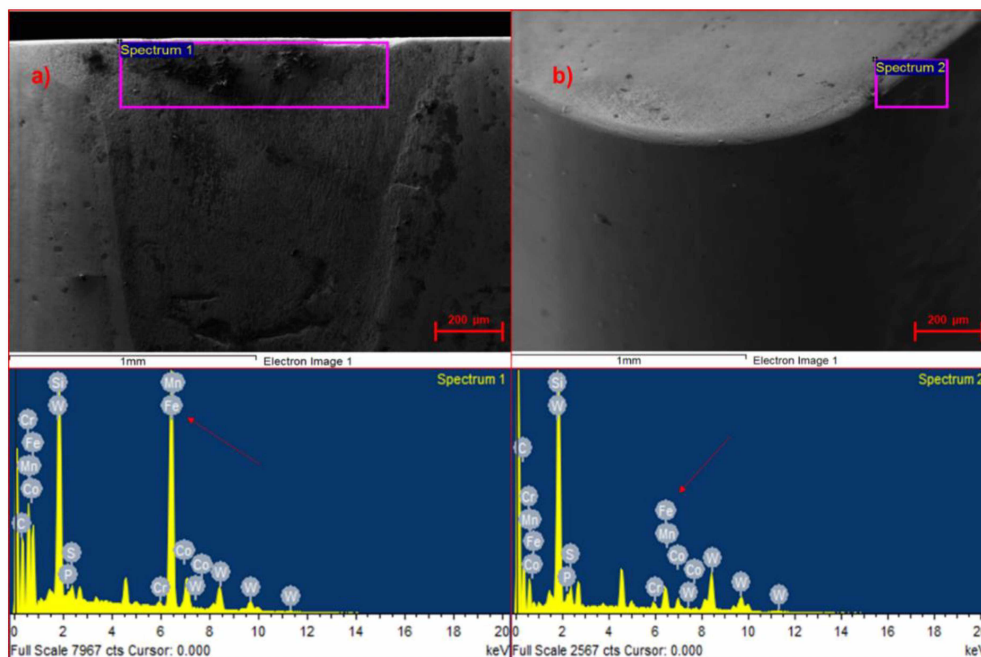


Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura com elétrons retroespalhados da condição FRI com  $ap = 1$  mm. a) Superfície de folga primária; b) “ponta” da ferramenta.

Para uma melhor análise do desgaste e seus mecanismos nas superfícies das ferramentas, foi feito um ataque químico no inserto, na qual ficou imersa em uma solução de Nital a 5% por três horas inseridas em um aparelho de ultrassom. A Fig. 36 mostra as

imagens do MEV para a superfície de folga primária e para o ponta da ferramenta, como analisado anteriormente.

Mesmo após o ataque químico, a superfície de folga primária manteve o aspecto áspero, indicando que realmente houve atrito entre as superfícies de folga e da peça. As Fig. 36 e 37 indicam a presença de mecanismos de desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste se forma com micro partículas, tanto da ferramenta quanto da peça, que ao se soltarem, formam um sistema abrasivo de três corpos que causam retirada de material da ferramenta formando micro sulcamento. A Fig. 37 comprova isso mostrando os sulcos causados por esse deslizamento, seguindo a direção das setas na imagem.

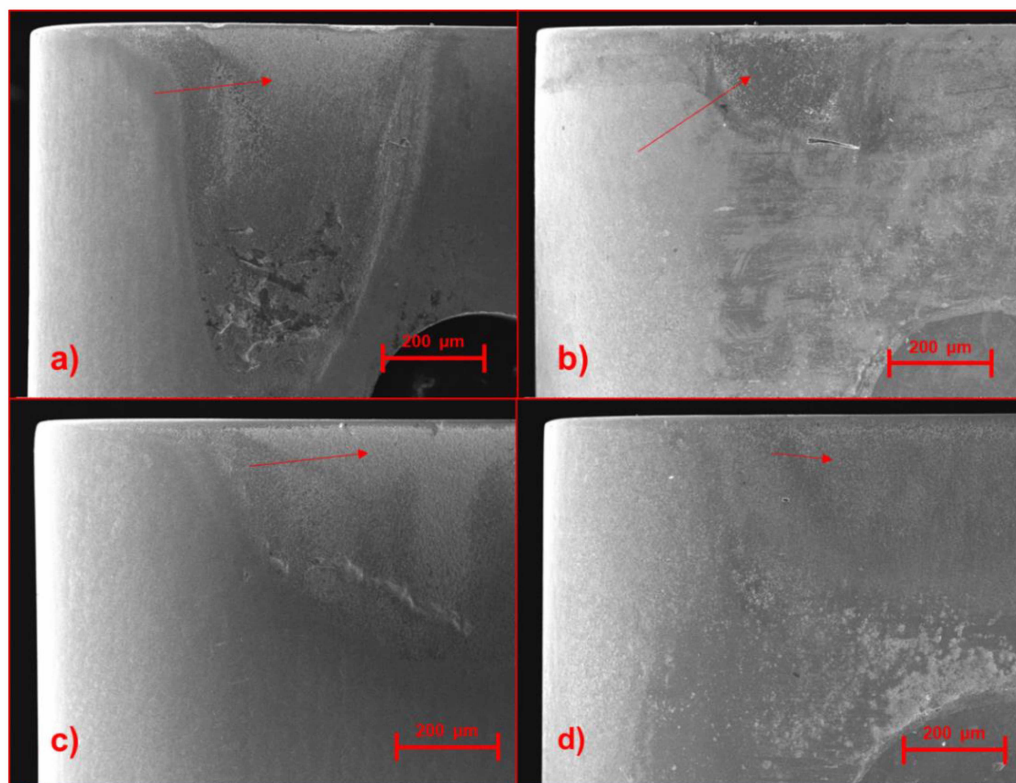


Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de folga primária das ferramentas após ataque químico. a) FRI com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; b) FCA com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; c) FRI com  $ap = 2 \text{ mm}$  ; d) FCA com  $ap = 2 \text{ mm}$ .

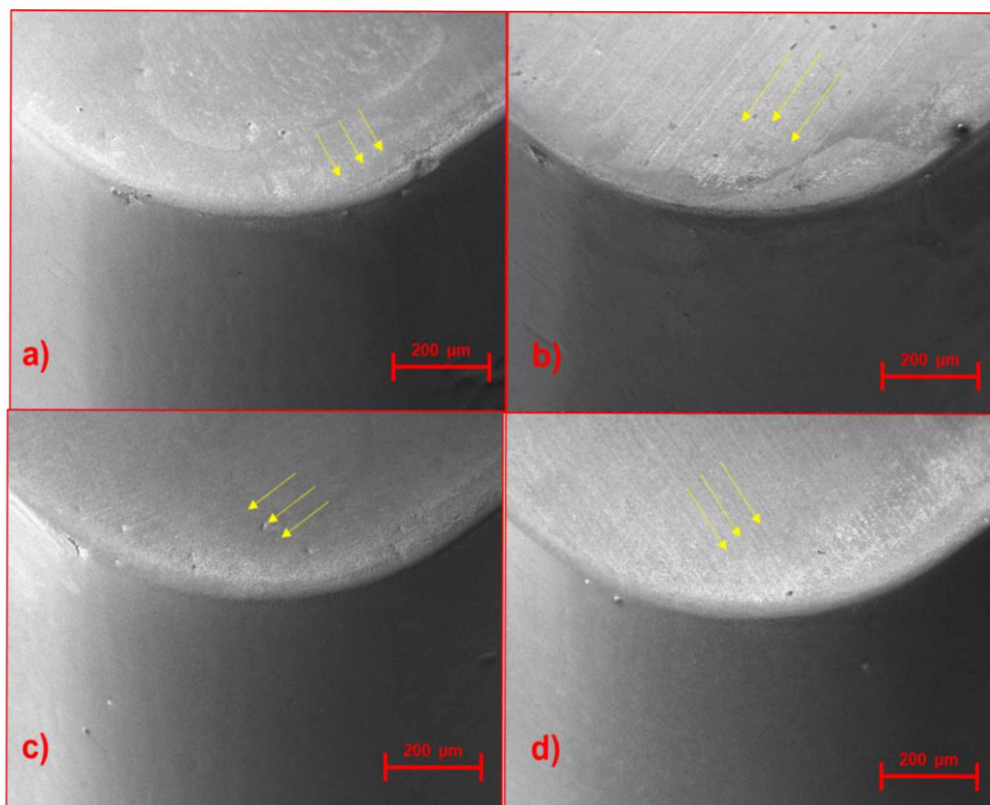


Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura do ponta das ferramentas após ataque químico. a) FRI com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; b) FCA com  $ap = 1 \text{ mm}$  ; c) FRI com  $ap = 2 \text{ mm}$  ; d ) FCA com  $ap = 2 \text{ mm}$ .

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES

Este estudo verificou a aplicabilidade de Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRI, em comparação com método convencional de Fluido de Corte Abundante – FCA. Para isso utilizou-se um planejamento fatorial completo, em dois níveis ( $2^3$ ), com réplica mais tréplica, totalizando vinte e quatro experimentos. As variáveis de entrada foram: velocidade de corte (100 ou 150 m/min); profundidade de corte (1 ou 2 mm); ambiente (FCA ou FRI). As variáveis resposta foram: forças de corte; integridade superficial (rugosidade, micro dureza e micro estrutura), além de tipos e mecanismos de desgaste. As principais conclusões indicam que:

- Com o aumento da profundidade de corte de 1 mm para 2 mm houve um nítido aumento dos valores de forças, tanto para o ambiente FCA quanto para o ambiente FRI, fato explicado pelo aumento da área da seção de corte;
- O ambiente FRI apresentou maiores valores médios de forças para velocidade de 100 m/min ( $F_{c(FRI)} = 148 N$ ;  $F_{c(FCA)} = 114 N$ ), e menores para 150 m/min ( $F_{c(FRI)} = 139 N$ ;  $F_{c(FCA)} = 191 N$ ). O efeito da lubrificação do fluido na condição FCA pra baixas velocidades se mostram relevante.
- Contrariando a literatura, a força aumentou junto com a velocidade de corte. Tal fato pode ser explicado à formação de cavacos segmentados e de estrutura lamelares, típicos do ferro fundido cinzento, que aumentam o comprimento de contato cavaco/ferramenta e consequentemente as forças de corte. Testes univariados de *força x velocidade de corte*

mostraram que ao aumentar a velocidade, as forças também aumentaram, principalmente em velocidades de até 200 m/min. Tal efeito se deve à provável presença da aresta postiça de corte, comum em velocidades mais baixas;

- O aumento da velocidade de corte atuou de forma a melhorar a rugosidade superficial da peça, conforme esperado. Para uma velocidade de corte baixa (100 m/min) o ambiente FCA atuou de forma favorável da rugosidade, mostrando a capacidade de lubrificação. Na velocidade de corte maior (150 m/min) o ambiente FRI se mostrou mais eficaz, removendo calor de forma mais eficiente, uma vez que menores temperaturas geram melhores acabamentos superficiais;

- Nos ensaios metalográficos foi possível ver a mudança da microestrutura do ferro fundido cinzento na região sub-superficial nas amostras FCA e FRI causado pela deformação plástica e encruamento sofrido nesta região.

- Os ensaios de microdureza mostraram o aumento dos valores de dureza na camada sub-superficial, causadas pelo encruamento sofrido no processo de usinagem.

- Os valores de dureza foram maiores na condição FRI em relação ao FCA, ocasionados pelo melhor desempenho de troca de calor da ferramenta refrigerada internamente, já que quanto menores forem os valores de temperatura na região de corte, maiores serão os esforços necessários para cisalhar o material;

- Houve pouco ou quase nenhum desgaste das ferramentas para as condições FCA e FRI, típico da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos, materiais auto lubrificantes. Para a condição FRI houve pequena deformação plástica da aresta de corte;

- As análises feitas por EDS mostraram a presença do elemento Ferro (Fe) na ferramenta de corte, sugerindo a existência de material aderido à peça;

- Pelas imagens geradas pelo MEV notou-se desgaste abrasivo causado pelos sulcamentos feitos por partículas que se soltam da peça e da ferramenta, que fluem pela superfície da ferramenta.

## **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Para um melhor entendimento do funcionamento e da eficácia do uso de ferramentas refrigeradas internamente, as sugestões para estudos são:

- Realização de ensaios utilizando a temperatura como prâmetro de entrada, variando seus valores;
- Variar o material usinado, como por exemplo, a utilização de outros tipos de ferros fundidos;
- Realizar os ensaios em uma ferramenta de metal duro revestida;
- Comparar o método de refrigeração interna com outros tipos de lubrificação;
- Realizar teste *quick-stop* para melhor avaliação das forças.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(FIRM), Sandvik Coromant. **Modern metal cutting: a practical handbook.** [S. l.]: Sandvik Coromant, 1994. *E-book*.

ABNT. **Nbr Iso 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.** [S. l.: s. n.]

ABNT 513, Norma. **Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas - Designação dos grupos principais e grupos de aplicação.** [S. l.: s. n.]

AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. [S. l.], 2002.

ARENDT, Cristiane. Análise do comportamento de desgaste de ferramentas de corte no torneamento de ferro fundido nodular austemperado. [S. l.], 2017.

ASSIS, Álvaro; DA SILVA, Edson Roberto. VARIACÃO DE RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DE FACE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO. [S. l.], 2017.

ASTAKHOV, Viktor P. Ecological machining: near-dry machining. *In: Machining.* [S. l.]: Springer, 2008. p. 195–223. *E-book*.

ASTM, A. 247 Standards; American Society for Testing and Materials. **Rec. Practice for evaluating the microstructure of graphite in gray iron,** [S. l.], 1961.



BAGETTI, João Henrique. Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros fundidos vermicular e cinzento. [S. l.], 2009.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 43, n. 8, p. 833–844, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)

BYERS, Jerry P. **Metalworking fluids**. [S. l.]: crc Press, 2016. *E-book*.

CENTRO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA - UNIJORGE. **Diagrama de Fase Ferro-Carbono**. [s. l.], 2017. Disponível em: <http://caengmecuj.blogspot.com/2017/02/diagrama-de-fase-ferro-carbono.html>.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. [S. l.]: Abm, 1977. *E-book*.

COLPAERT, Hubertus; DA COSTA, André Luiz V. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. [S. l.]: Editora Blucher, 2008. *E-book*.

COMMITTEE, A. S. M. International Handbook. **ASM Handbook, Volume 16-Machining**. [S. l.]: ASM International., 1989. *E-book*.

DAWSON, Steve *et al.* The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. **SAE transactions**, [S. l.], p. 334–352, 2001.

DAWSON, Steve; SCHROEDER, Tom. Compacted graphite iron: a viable alternative. **Engineering Casting Solutions AFS**, [S. l.], 2000.

DE OLIVEIRA, Lucemar Diogo *et al.* ANÁLISE DAS MUDANÇAS DAS GRAFITAS DE DISCOS DE FREIOS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO FC-250. [S. l.], 2018.

DE SOUSA, José Aécio G.; SALES, Wisley Falco; MACHADO, Alisson R. A review on the machining of cast irons. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 94, n. 9–12, p. 4073–4092, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of cleaner production**, [S. l.], v. 83, p. 33–47, 2014.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 47, n. 5, p. 754–759, 2007.

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **DIN 8589: Manufacturing processes chip removal.** [S. l.: s. n.]

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** [S. l.]: Artliber Editora, 2006. *E-book*.

DONTAMSETTI, S. K.; FISCHER, G. W. Factors affecting surface roughness in finish turning of gray cast iron. **MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 689–725, 1988.

DOS SANTOS TORRES, Camila; SCHAEFFER, Lírio. 7. Sinterização do compósito metal duro WC-Co. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S. l.], v. 4, n. 3, 2009.

EBERSBACH, Felipe Gustavo *et al.* ANÁLISE DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DE COMPÓSITOS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS. [S. l.], 2019.

FERNANDES, G. H. N.; MARTINS, P. S.; MAIA, L. H. A.; GOMES, M. S.; PEDRO RODRIGUES LOPES; SILVA, A. A.; SANTOS, I. B.; SIQUEIRA, B. S. A STUDY ABOUT THE EFFECTS OF EMULSIFIABLE OIL CONCENTRATION OVER THE ROUGHNESS ALUMINUM - AL-SI (10 ~ 12%) PARTS. **24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba.**, [S. l.], 2017.

FERNANDES, Matheus Emmanuel Pereira. **Torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido nas condições seco, jorro e LN2: uma análise técnico-econômica.** [S. l.]: Brasil, 2019.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** [S. l.]: Editora blucher, 2018. *E-book*.

FUCO, 1998, “Perfis de fundição contínua”, Joinville: Indústria de fundição Tupy, Manual Técnico.

FUNDIDOS, Perfis. Perfis Fundidos®. [S. l.], p. 1–52, 2011.

GUESSER, Wilson Luis; PEREIRA, Fernando Souza; BOEHS, Lourival. Surface changes during turning of grey cast iron. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 313–324, 2016.

GUESSER, Wilson Luiz *et al.* Usinabilidade de perfis contínuos de ferros fundidos nodulares das classes FE-45012 e FE-50007. **Publicado no SULMAT, Joinville–SC, Setembro–2000**, [S. l.], 2000.

JEFFRIES, N. P.; ZERKLE, R. D. Thermal analysis of an internally-cooled metal-cutting tool. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 381–399, 1970.

KING, Nathan *et al.* **Wet versus dry turning: a comparison of machining costs, product quality, and aerosol formation**. [S. l.]: SAE Technical Paper, 2001.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1 Cutting Translated by Aaron Kuchle. *In*: 2011, **Library of Congress Control**. [S. l.: s. n.]

KOERICH, L. A. *et al.* Efeito do antimônio na matriz e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. *In*: 2010, **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. [S. l.: s. n.] p. 10.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. **Auflage. Aachen**, [S. l.], 1997.

LU, Juan *et al.* Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression. **Measurement**, [S. l.], v. 157, p. 107578, 2020.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. **Wear**, [S. l.], v. 210, n. 1–2, p. 76–82, 1997.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. [S. l.]: Editora Blucher, 2015. *E-book*.

MARCELINO, Ademir P. *et al.* Análise do comportamento das ferramentas de cerâmica à base de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> no processo de torneamento de ferro fundido cinzento. *In*: 2004, **Congresso Regional de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro**. [S. l.: s. n.]

MARQUES, A. *et al.* Performance assessment of MQSL: Minimum quantity solid lubricant during turning of Inconel 718. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S. l.], v. 231, n. 7, p. 1144–1159, 2017.

NBR, ABNT. 6175: Processos mecânicos de usinagem. **Rio de Janeiro**, [S. l.], 1971.

NETO, Rubens Roberto Ingraci *et al.* Toolholder Internally Cooled by a Phase Change Fluid in Turning of SAE. **Applied Mechanics and Materials**, [S. l.], v. 798, p. 486–490, 2015.

OZCELIK, Babur *et al.* Experimental investigations of vegetable based cutting fluids

with extreme pressure during turning of AISI 304L. **Tribology International**, [S. l.], v. 44, n. 12, p. 1864–1871, 2011.

PEREIRA, Adriana Ana. Análise do desgaste da ferramenta à base de  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução. [S. l.], 2012.

Petronas coolant up. [S. l.], v. 18, p. 2005, 2005.

ROCHA, Antonio Salvador da. Determinação de um modelo de força de usinagem para a furação, a partir do modelo de força de usinagem do torneamento. [S. l.], 1985.

ROSSI NETO, Eneas. Torneamento interno de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento centrifugado. [S. l.], 2009.

SERBINO, Edison Marcelo. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. [S. l.]: Universidade de São Paulo, 2005.

SHARMA, Vishal S.; SINGH, GurRaj; SORBY, Knut. A review on minimum quantity lubrication for machining processes. **Materials and manufacturing processes**, [S. l.], v. 30, n. 8, p. 935–953, 2015.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid—an evolution. **Tribology international**, [S. l.], v. 43, n. 5–6, p. 1073–1081, 2010.

SHOKRANI, Alborz *et al.* State-of-the-art cryogenic machining and processing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, [S. l.], v. 26, n. 7, p. 616–648, 2013.

SIVAPRAKASAM, Thamizhmanii; HASAN, Sulaiman. Analyses of roughness, forces and wear in turning gray cast iron. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, [S. l.], v. 17, 2006.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of materials processing technology**, [S. l.], v. 101, n. 1–3, p. 287–291, 2000.

STANDARD, ASTM. E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. **ASTM International., West Conshohocken, PA**, [S. l.], v. 11, n. November, p. 1–21, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0407-07.2>

STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. **Metal cutting theory and practice**. [S. l.]: CRC press, 2016. *E-book*.

SUHAIMI, Mohd Azlan *et al.* Evaluation of cutting force and surface roughness in high-speed milling of compacted graphite iron. *In: 2017, MATEC Web of Conferences.* : EDP Sciences, 2017. p. 3016.

SUN, X. *et al.* Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S. l.], v. 226, n. 4, p. 585–591, 2012.

TÉCNICAS, ABNT-Associação Brasileira de Normas. **ISO 3685 - Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento.** [S. l.: s. n.]

TÉCNICAS, Associação Brasileira de Normas. **ABNT NBR ISO 4287: 2002: especificações geométricas do produto (GPS). Rugosidade: método do perfil: termos, definições e parâmetros da rugosidade.** [S. l.]: ABNT São Paulo, 2002.

TELES, José Marcelo. Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro. [S. l.], 2007.

TRENT, Edward Moor; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting.** [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2000. *E-book*.

UFSC. Tecnologia de Controle Numérico. [S. l.], 2019. Disponível em: [http://www.grima.ufsc.br/cnc/transparencias/usinagem/Aula7\\_DesgasteDeFerramentas\\_v1.pdf](http://www.grima.ufsc.br/cnc/transparencias/usinagem/Aula7_DesgasteDeFerramentas_v1.pdf)


VEADO, Juarez Távora. Aspectos do ensaio de microdureza. [S. l.], 1965.

VIDAL, DOUGLAS FERREIRA. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino.** [S. l.]: Dissertação de mestrado, 2013.

WANG, X.; FENG, C. X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 348–356, 2002.

WRIGHT, P. K.; EM, TRENT. Metallographic methods of determining temperature gradients in cutting tools. [S. l.], 1973.

## ANEXO I - Certificado de calibração do rugosímetro

	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
<b>Certificado de Calibração: CCA-0001/2016</b>		

### **1. Cliente**

Nome ou Razão Social: LEPU  
 Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121  
 Telefone: (34) 3239-4584  
 E-mail: Não consta

### **2. Instrumento de medição**

Instrumento: Rugosímetro  
 Tipo: portátil  
 Fabricante: Taylor Hobson  
 Resolução: 0,01  $\mu\text{m}$   
 Serial: 6317L  
 Identificação: Patrimônio UFU N.º 14 12 90  
 Última calibração: 2013

### **3. Calibração**


Ordem do serviço: 01/2016  
 Data do pedido: 17/03/2016  
 Data da calibração: 17/03/2016

### **4. Procedimento**

Inicialmente foi realizada a análise visual tanto do instrumento quanto do padrão de rugosidade e não foi notada nenhuma anomalia. O rugosímetro funciona de forma adequada e o padrão se encontra em bom estado de conservação, sem a presença de risco e defeitos aparentes. O padrão de rugosidade possui Ra igual a 0,38  $\mu\text{m}$  e foi adotada uma posição central para a realização das medições. Foram efetuadas dez medições. A posição de medição pode ser observada na figura abaixo.



*Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.*  
 Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
<b>Certificado de Calibração: CCA-0001/2016</b>		

Condições de Medição:

Ra (0,38  $\mu\text{m}$ )

Cut-off (lr) = 0,08 mm

Comprimento de avaliação (ln) = 0,4 mm

### **5. Condições ambientais**

Temperatura: (20  $\pm$  1) °C

### **6. Padrões e equipamentos**

Tipo: Padrão de Rugosidade

Fabricante: Mitutoyo

Código: 178-604

Número de série: 001031008

Valor nominal: Ra (0,38  $\mu\text{m}$ )

Número do Certificado de Calibração: 15218/11

Incerteza expandida: 6% para k = 2,65 e 95% de abrangência

Tipo: Termo-higrômetro Digital

Fabricante: Instrutherm

Modelo: HT-260

Número de série: 06120362

Número do Certificado de Calibração: R4996/13

Incerteza expandida: 0,3 °C para k = 2,00 e 95% de abrangência

Tipo: Desempeno de Granito

Fabricante: Mitutoyo

Capacidade: 1000 x 1000 mm

Número do Certificado de Calibração: 06994/13


Incerteza expandida: 2,9  $\mu\text{m}$  para k = 2,25 e 95% de abrangência

### **7. Resultados da calibração**

Ra (0,38 $\mu\text{m}$ )													
Posição 1	Leituras ( $\mu\text{m}$ )										Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,005

Nota: Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio padrão.

*Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.*  
 Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584


	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
<b>Certificado de Calibração: CCA-0001/2016</b>		

### 8. Incerteza da calibração

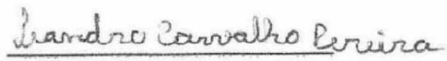
Ra (0,38 $\mu\text{m}$ )		
Posição 1	U ( $\mu\text{m}$ )	k
	0,02	2,23

A incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão combinada de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t corresponde a um nível de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (BIPM et al., 2008).

Data da Emissão: Uberlândia, (17) de (março) de (2016).



Rosenda Valdes Arencibia  
Gerente Responsável



Leandro Carvalho Pereira  
Operador

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.  
Av. João Naves de Ávila, 2121 - UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38408-902. Fone (34) 3239 4584