

**AUGUSTO CÉSAR SANTOS PEIXOTO**

**ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE E RUGOSIDADE NO  
TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO  
SISTEMA DE RESFRIAMENTO INTERNO DA FERRAMENTA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

**AUGUSTO CÉSAR SANTOS PEIXOTO**

**ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE E RUGOSIDADE NO  
TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO  
SISTEMA DE RESFRIAMENTO INTERNO DA FERRAMENTA**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins

**UBERLÂNDIA– MG**

**2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

P379a Peixoto, Augusto César Santos, 1993-  
2021 Análise da força de corte e rugosidade no torneamento de ferro fundido cinzento utilizando sistema de resfriamento interno da ferramenta [recurso eletrônico] / Augusto César Santos Peixoto. - 2021.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Coorientador: Paulo Sérgio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.5592>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964-, (Orient.).  
II. Martins, Paulo Sérgio, 1976- (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

---

Glória Aparecida  
Bibliotecária - CRB-6/2047


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

|                                    |  |                 |       |                       |       |
|------------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em:      | Engenharia Mecânica  |                 |       |                       |       |
| Defesa de:                         | Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 596, COPEM   |                 |       |                       |       |
| Data:                              | 30/08/2021   | Hora de início: | 14:10 | Hora de encerramento: | 17:05 |
| Matrícula do Discente:             | 11912EMC003  |                 |       |                       |       |
| Nome do Discente:                  | Augusto César Santos Peixoto   |                 |       |                       |       |
| Título do Trabalho:                | Análise da Força de Corte e Rugosidade no Torneamento de Ferro Fundido Cinzento Utilizando Sistema de Resfriamento Interno da Ferramenta |                 |       |                       |       |
| Área de concentração:              | Materiais e Processos de Fabricação  |                 |       |                       |       |
| Linha de pesquisa:                 | Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)  |                 |       |                       |       |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: |  |                 |       |                       |       |

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU; Alexandre Mendes Abrão - UFMG; Paulo Sérgio Martins (coorientador) - UNA/BH; e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Márcio Bacci da Silva, Álisson Rocha Machado e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, os Prof. Alexandre Mendes Abrão e Paulo Sérgio Martins desde a cidade de Belo Horizonte/MG, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/08/2021, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Sérgio Martins, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 17:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrão, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALISSON ROCHA MACHADO, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 17:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3004418** e o código CRC **18FFA3C8**.

“O otimista é um tolo, o pessimista um chato.  
Bom mesmo é ser um realista esperançoso”

(Ariano Suassuna)

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe e irmão, pelo incentivo e apoio incondicional.

Ao meu pai que onde quer que esteja, sinto que está me apoiando.

À minha namorada pelo amor, carinho e atenção.

Ao meu cunhado e irmã pela ajuda na correção e apoio.

Ao Prof. Dr. Wisley Falco Sales pela sua determinação para a realização do meu trabalho, suas correções e incentivos. Infelizmente nos deixou, mas continua na memória de todos que o conheceram.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pela disponibilidade em ser meu novo orientador, dando todo o apoio que precisei para a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins meu coorientador que com sua experiência na indústria de manufatura foi essencial para a realização desse projeto.

Ao Prof. Dr. Éder Silva Costa o qual foi muito solícito me ajudando a programar o torno CNC e me auxiliando nos ensaios.

À empresa Stellantis, representada pela pessoa do Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins, engenheiro de manufatura da unidade de Betim, que disponibilizou os materiais do projeto.

À empresa Nipo-Tec, especialmente ao Sr. José Ivair e João Isamu, pela completa disponibilidade em realizar adaptações no suporte da ferramenta.

À empresa TUPY, pela disponibilização do material.

À empresa Walter Tools, em especial ao Senhores. Amauri Suga, Sander Gabaldo e André Epifanio pela disponibilização do porta ferramenta.

À empresa Seco Tools, em especial Sr. Nilton Garcia pela disponibilização das ferramentas.

À CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

À UFU e ao LEPU pela excelente infraestrutura laboratorial, que proporcionou a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de laboratório Gustavo Henrique Nazareno Fernandes, Pedro Henrique Pires França, Lucas Melo Queiroz Barbosa, Felipe dos Anjos Rodrigues Campos, Leonardo Rosa Ribeiro da Silva e Felipe Chagas pelo apoio no trabalho e companheirismo.

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



PEIXOTO, A.C.S. Análise da força de corte e rugosidade no torneamento de ferro fundido cinzento utilizando sistema de resfriamento interno da ferramenta. 2021. 70p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil

## RESUMO

O torneamento é uma operação de usinagem convencional que se baseia na retirada de cavaco através do cisalhamento provocado por uma aresta de corte. Durante a deformação plástica do material para a formação do cavaco mais de 95% da energia mecânica fornecida pela máquina é transformada em calor. Esta concentração de energia térmica em uma pequena região produz elevadas temperaturas no contato cavaco-ferramenta, que para o torneamento de ferro fundido cinzento variam numa faixa de 600 °C a 900 °C, dependendo dos parâmetros de usinagem. Essa elevada temperatura sobre a ferramenta de corte tem um efeito danoso visto que potencializa os mecanismos de desgaste, diminuindo assim sua vida útil. Para controlar esse problema diversas soluções são usadas industrialmente, onde se destacam o uso do fluido de corte, a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) e o desenvolvimento de novos materiais para ferramenta corte. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da utilização de ferramentas com refrigeração interna (FRI) na força de corte e na rugosidade da peça. Por meio do processo da eletroerosão, canais de refrigeração foram fabricados nas ferramentas de metal duro para que água a 2 °C circulasse internamente em um ciclo fechado. Foram realizados ensaios de usinagem em uma barra de ferro fundido cinzento FC-300, comparando a utilização de FRI com a ferramenta sem refrigeração interna (FSRI). Utilizou-se um planejamento experimental fatorial misto, com dois níveis para os fatores de profundidade de usinagem (1,0 e 1,5 mm) e uso de refrigeração (FRI ou FSRI), e três níveis para a velocidade de corte (150, 200 e 250 m/min), totalizando 12 condições diferentes. As variáveis de saída foram a força de corte e a rugosidade  $R_a$  e  $R_q$ . Entre os principais resultados estão: uma redução no  $R_a$  de 4,8% a 14,9% e no  $R_q$  de 5,5% a 20,0%, quando se compara FRI com FSRI; o uso das FRI resultou em uma queda de 0,8% a até 21,07 % na força de corte em comparação com a FSRI.

**Palavras-chave:** ferro fundido cinzento, ferramenta refrigerada internamente, força de corte, rugosidade.

PEIXOTO, A.C.S. Analysis of cutting force and roughness in gray cast iron turning using internal tool cooling system. 2021. 70p. Master's dissertation. Faculty of Mechanical Engineering. Federal University of Uberlandia. Uberlandia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

Turning is a conventional machining operation that is based on chip removal through shear caused by a cutting edge. During plastic deformation of the material for chip formation, more than 95% of the mechanical energy supplied by the machine is transformed into heat. This concentration of thermal energy in a small region produces high temperatures in the chip-tool contact, which for turning gray cast iron vary in a range from 600 °C to 900 °C, depending on the machining parameters. This high temperature on the cutting tool has a harmful effect as it enhances the wear mechanisms, thus reducing its useful life. To control this problem, several solutions are used industrially, which include the use of cutting fluid, the minimum amount of lubricant technique (MQL) and the development of new materials for cutting tools. This work aims to evaluate the effect of using internal coolant tools (ICT) on the cutting force and roughness of the workpiece. Through the electrical discharge machining, cooling channels were manufactured in the carbide tools so that water at 2 °C circulated internally in a closed cycle. Machining tests were carried out on a FC-300 gray cast iron bar, comparing the use of ICT with the no internal coolant tool (NICT). A mixed factorial experimental design was used, with two levels for cutting depth factor (1.0 and 1.5 mm) and use of coolant (ICT or NICT), and three levels for cutting speed (150, 200 and 250 m/min), totaling 12 different conditions. The output variables were cutting force and roughness  $R_a$  and  $R_q$ . Among the main results are: a reduction in  $R_a$  from 4.8% to 14.9% and in  $R_q$  from 5.5% to 20.0%, when comparing ICT with NICT; the use of ICT resulted in a drop of 0.8% to up to 21.07% in cutting force compared to NICT.

**Keywords:** gray cast iron, internally cooled tool, cutting force, roughness.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama de fases do sistema ferro-carbono (Callister, 2002). .....   | 5  |
| Figura 2 - (a) Ferro Fundido Cinzento com matriz ferrítica, sem ataque (b) Ferro Fundido Cinzento com matriz ferrítica-perlítica, com ataque 3% Nital. Adaptado de Vaško ... | 6  |
| Figura 3 - Formato tridimensional da grafita nos ferros fundidos cinzentos. Adaptado de Dawson e Schroeder (2000). .....   | 7  |
| Figura 4 - Aplicações típicas de ferros fundidos cinzentos. Bloco de motor, disco de freio, tambor de freio e carcaças de bombas. Adaptado de Guessser (2019).....           | 8  |
| Figura 5 – (a) Contração e extensão de <i>strain gauge</i> ; (b) transdutor de força. Klecker (2020). .....  | 10 |
| Figura 6 - Variação das forças de usinagem com a velocidade de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).....   | 11 |
| Figura 7- Variação das forças de usinagem com avanço de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).....  | 11 |
| Figura 8 - Variação da Rugosidade $R_a$ com a velocidade de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).....  | 15 |
| Figura 9 - Mercado Global de Ferramentas de Corte 2013. Adaptado de Bobzin (2017). .....   | 16 |
| Figura 10 - Refrigeração pela injeção de fluido refrigerante na superfície principal e secundária de folga Adaptado de Peng et al. (2019). .....                             | 20 |
| Figura 11 - Refrigeração interna por meio de <i>Heat Pipe</i> . Adaptado de Wu et al. (2016). .....  | 21 |
| Figura 12 - Esquematização da refrigeração criogênica da ferramenta. Adaptado de Dhananchezian et al. (2011). .....  | 21 |
| Figura 13 - Fluxograma das etapas de trabalho (elaborado pelo autor).....  | 23 |
| Figura 14 - Sistema de Refrigeração em Ciclo Fechado (Barbosa, 2021).....  | 24 |
| Figura 15 - Subsistema de Refrigeração (Barbosa, 2021) .....   | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 16 - Bomba de fluido refrigerante, termômetro e fonte de alimentação utilizados no subsistema de refrigeração (França, 2021) ..... | 26 |
| Figura 17- Ferramenta de metal duro SNUN120412, fabricante Seco Tools (elaborado pelo autor).....   | 27 |
| Figura 18 - Projeto das galerias internas nas ferramentas de metal duro (elaborado pelo autor).....                                       | 28 |
| Figura 19 - Eletroerosão rotativa a fio, equipamento AgieCharmilles (elaborado pelo autor).....   | 29 |
| Figura 20 – Ferramenta de metal duro com galerias internas (elaborado pelo autor) ..  | 30 |
| Figura 21 - Suporte Ferramenta DSSNL2525X12-P. Adaptado de Walter Tools (2021).<br>.....  | 30 |
| Figura 22 – Suporte Ferramenta, detalhe grampo e conector da mangueira (elaborada pelo autor).....  | 31 |
| Figura 23 – Microestrutura do ferro fundido cinzento FC-300 (elaborado pelo autor).<br>.....  | 32 |
| Figura 24 - Região de análise de EDS (elaborado pelo autor).....  | 33 |
| Figura 25 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).....                               | 33 |
| Figura 26 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).....                               | 34 |
| Figura 27 - Calibração do durômetro (elaborado pelo autor). .....   | 35 |
| Figura 28 - Medição de dureza Brinell (elaborado pelo autor).....   | 36 |
| Figura 29 - Torno CNC com o sistema de refrigeração ao lado (Barbosa, 2021) .....   | 38 |
| Figura 30 - Diagrama da barra de ferro fundido exemplificando os ensaios realizados (elaborado pelo autor).....                           | 40 |
| Figura 31 – a) Dinamômetro, b) Amplificador de sinais e placa de aquisição de sinais. (Barbosa, 2021) .....                               | 40 |
| Figura 32 - Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic-S128 (elaborado pelo autor).<br>.....  | 41 |
| Figura 33 - Microscópio de varredura eletrônica (MEV) e equipamento EDS (elaborado pelo autor).....                                       | 42 |
| Figura 34 – Resultado da medição de Força de corte $F_c$ (elaborado pelo autor) .....   | 44 |
| Figura 35 - Diagrama de Pareto para a força de corte $F_c$ (elaborado pelo autor). .....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36 - Exemplo do sinal da $F_c$ para a condição $v_c = 250$ m/min e $a_p = 1,5$ mm<br>(elaborado pelo autor)..... | 46 |
| Figura 37- Resultado da medição da rugosidade $R_a$ (elaborado pelo autor).....   | 48 |
| Figura 38 - Resultado da medição de rugosidade $R_q$ (elaborado pelo autor).....  | 48 |
| Figura 39 - Diagrama de Pareto para a rugosidade $R_a$ (elaborado pelo autor) .....                                     | 50 |
| Figura 40 - Diagrama de Pareto para a rugosidade $R_q$ (elaborado pelo autor) .....                                     | 50 |
| Figura 41 – (a) FSRI 1,0 mm; (b) RFI 1 mm; (c) FSRI 1,5 mm; (d) RFI 1,5 mm .....  | 52 |
| Figura 42 - (a) FSRI 1,0 mm; (b) RFI 1 mm; (c) FSRI 1,5 mm; (d) RFI 1,5 mm.....   | 53 |
| Figura 43 - Espectroscopia por energia dispersiva – EDS (elaborado pelo autor) .....                                    | 54 |

## LISTAS DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos cinzentos. Adaptado de Guessser (2019). ...8  | 8  |
| Tabela 2 - Valores Recomendados para comprimento de amostragem e avaliação (ISO 4288, 1996)..... 14  | 14 |
| Tabela 3 - Especificação dos furos feitos por eletroerosão nas ferramentas de metal duro desenvolvidos para este estudo (elaborado pelo autor) .....28 | 28 |
| Tabela 4 - Geometria do conjunto ferramenta e porta-ferramenta (elaborado pelo autor).<br>..... 31   | 31 |
| Tabela 5 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).....34   | 34 |
| Tabela 6 - Composição química do ferro fundido cinzento FC-300 (elaborado pelo autor).....35   | 35 |
| Tabela 7 - Composição química do ferro fundido cinzento FC-300 fornecida pelo fabricante TUPY. (TUPY, 2011).....35                                     | 35 |
| Tabela 8 - Dureza Brinell do FC-300 (elaborado pelo autor).....37  | 37 |
| Tabela 9 - Parâmetros dos ensaios de usinagem (elaborado pelo autor) .....37   | 37 |
| Tabela 10- Condições dos ensaios de usinagem com planejamento fatorial misto (elaborado pelo autor).....38   | 38 |
| Tabela 11 - Referência adotada para nomear as arestas de corte de acordo com a condição de corte (elaborado pelo autor).....39                         | 39 |
| Tabela 12 - Análise de variância preliminar para a força de corte com todos os fatores (elaborado pelo autor).....44                                   | 44 |
| Tabela 13 - Análise de variância preliminar para a rugosidade $R_a$ com todos os fatores (elaborado pelo autor).....49                                 | 49 |
| Tabela 14 - Análise de variância preliminar para a rugosidade $R_q$ com todos os fatores (elaborado pelo autor).....49                                 | 49 |
| Tabela 15 - Desvio padrão médio da $F_c$ para $a_p = 1,0$ mm (elaborado pelo autor).....51   | 51 |
| Tabela 16 - Desvio padrão médio da $F_c$ para $a_p = 1,5$ mm (elaborado pelo autor).....51   | 51 |

Tabela 17 - Espectroscopia por energia dispersiva FRI e FSRI, com  $a_p = 1,5$  mm  
(elaborado pelo autor).....54

## LISTAS DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

|             |                                       |          |
|-------------|---------------------------------------|----------|
| ANOVA       | Análise de variância                  |          |
| $a_p$       | Profundidade de usinagem              | [mm]     |
| CAD         | Desenho assistido por computador      |          |
| EDS         | Espectroscopia por energia dispersiva |          |
| $f$         | Avanço                                | [mm/rot] |
| $F_{ap}$    | Força de apoio                        | [N]      |
| $F_c$       | Força de corte                        | [N]      |
| $F_f$       | Força de avanço                       | [N]      |
| $F_p$       | Força de profundidade                 | [N]      |
| FRI         | Ferramenta com refrigerao interna    |          |
| FSRI        | Ferramenta sem refrigerao interna    |          |
| $F_t$       | Força de usinagem                     | [N]      |
| $F_u$       | Força de usinagem                     | [N]      |
| HB          | Dureza Brinell                        |          |
| $K_s$       | Pressão específica de corte           | [Mpa]    |
| $KT$        | Profundidade da cratera               | [mm]     |
| MEV         | Microscopia Eletrônica de Varredura   |          |
| MQL         | Mínima Quantidade de Lubrificante     |          |
| $P_c$       | Potência efetiva de corte             | [kW]     |
| PVD         | Physical vapour deposition            |          |
| $r_s$       | Raio de ponta                         | [mm]     |
| $VB_b$      | Desgaste de flanco médio              | [mm]     |
| $VB_{bmax}$ | Desgaste de flanco máximo             | [mm]     |
| $v_c$       | Velocidade de corte                   | [mm/min] |
| $v_f$       | Velocidade de avanço                  | [mm/min] |
| $X_r$       | ngulo de posio primário             |          |



|                 |                              |
|-----------------|------------------------------|
| $X_r'$          | Ângulo de posição secundário |
| $\gamma$        | Fase Austenita               |
| $\gamma_0$      | Ângulo de saída              |
| $\alpha$        | Fase Ferrita                 |
| $\beta_0$       | Ângulo de cunha              |
| $\alpha_0$      | Ângulo de folga              |
| $\varepsilon_r$ | Ângulo de ponta              |

## SUMÁRIO

|   |     |
|---|-----|
| AGRADECIMENTOS .....  | iii |
| RESUMO.....   | v   |
| ABSTRACT .....  | vi  |
| LISTA DE FIGURAS.....   | vii |
| LISTAS DE TABELAS.....  | x   |
| LISTAS DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS .....                       | xii |
| SUMÁRIO .....   | xiv |
| CAPÍTULO I .....  | 1   |
| 1.    INTRODUO .....   | 1   |
| 1.1.  OBJETIVO GERAL.....                                     | 2   |
| 1.2.  OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                             | 2   |
| CAPÍTULO II.....  | 4   |
| 2.    REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                             | 4   |
| 2.1.  FERRO FUNDIDO CINZENTO .....                            | 4   |
| 2.2.  POTÊNCIA E FORÇAS DE USINAGEM.....                      | 8   |
| 2.3.  PARAMETROS DE SUPERFICIE RUGOSIDADE $R_a$ e $R_q$ ..... | 12  |
| 2.4.  FERRAMENTAS DE METAL DURO .....                         | 15  |
| 2.5.  MÉTODOS DE REFRIGERAO DA FERRAMENTA DE CORTE.....      | 17  |
| CAPÍTULO III.....   | 23  |
| 3.    METODOLOGIA .....                                       | 23  |
| 3.1.  PROJETO E MONTAGEM .....                                | 24  |
| 3.1.1.  PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAO .....               | 24  |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.2. PROJETO DA FERRAMENTA COM REFRIGERAÇÃO INTERNA (FRI)   |    |
| 26  |    |
| 3.1.3. ADAPTAÇÃO DO PORTA-FERRAMENTA.....   | 30 |
| 3.2. MATERIAL DA PEÇA.....  | 32 |
| 3.3. ELABORAÇÃO DOS ENSAIOS DE USINAGEM.....  | 37 |
| 3.4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS.....  | 40 |
| CAPÍTULO IV .....   | 43 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....  | 43 |
| 4.1. ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE DURANTE A USINAGEM.....  | 43 |
| 4.2. ANÁLISE DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA $R_a$ e $R_q$ .....                                | 47 |
| 4.3. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE SAÍDA E DAS SUPERFÍCIES PRINCIPAL<br>DE FOLGA DAS FERRAMENTAS ..... | 52 |
| CAPÍTULO V.....   | 55 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....  | 55 |
| 5.1. CONCLUSÕES .....   | 55 |
| 5.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....   | 56 |
| CAPÍTULO VI .....   | 58 |
| 6. REFERÊNCIAS.....   | 58 |
| CAPÍTULO VII.....   | 66 |
| 7. ANEXO .....  | 66 |
| 7.1. ANEXO I: CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO .....  | 66 |
| 7.2. ANEXO II: RESULTADOS DA MEDIÇÃO $F_c$ .....  | 69 |
| 7.3. ANEXO III: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE $R_a$ .....  | 69 |
| 7.4. ANEXO IV: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE $R_q$ .....   | 70 |

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

Em todo processo de usinagem tradicional o movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça provoca um aumento de tensão que supera o limite de cisalhamento do material, proporcionando assim a formação do cavaco e consequente retirada de material da peça (Trent e Wright, 2000). Durante esse processo de deformação plástica quase toda da energia mecânica fornecida pela máquina é transformada em energia térmica, gerando aumento de temperatura na zona de corte. A maior parte dessa energia térmica gerada é dissipada para o cavaco, uma pequena parte fica no material da peça e atmosfera, e o restante, em torno de 20%, é dissipado na ferramenta (Cunha, 2020).

O principal parâmetro de usinagem que influencia no aumento da temperatura no conjunto material-ferramenta é a velocidade de corte ( $v_c$ ) (Karaguzel e Budak, 2018). Tendo em vista que o custo de um processo de usinagem é baseado na quantidade de material removido em determinado tempo, o aumento da  $v_c$  costuma ser um desejo da indústria a fim de tornar seus processos mais produtivos. Contudo, há limites para o aumento desse parâmetro ( $v_c$ ). Isso porque, em temperaturas mais elevadas, ou seja, em operações com maiores velocidades de corte, ocorre aceleração dos mecanismos de desgaste da ferramenta, o que resulta em vida útil mais curta e consequentemente maior custo operacional (Ning e Liang, 2019).

Dessa maneira, esse fenômeno de alta concentração de calor em uma pequena região da ferramenta de modo a gerar problemas técnicos e econômicos, tem sido um campo de grande interesse de pesquisa e avanços industriais. Entre as principais técnicas de lubri-refrigeração da ferramenta de corte estão: aplicação em jorro ou a alta pressão de fluido de corte e o uso da mínima quantidade de lubrificante – MQL (Machado et al., 2015).

Em termos de desempenho, os fluidos de corte e a técnica do MQL têm demonstrado bons resultados em ganho de vida útil das ferramentas de corte reduzindo processos de desgaste

devido ao seu efeito na refrigeração e lubrificação da ferramenta (Pal et al., 2021). Contudo, ao analisar o uso dos fluidos de corte em vista do tripé da sustentabilidade – aspectos econômicos, ambientais e sociais – a maior parte deles apresentam problemas: (i) excessivo consumo de água tanto para a produção dos fluidos quanto para a necessidade de limpeza das peças após terem sido fabricadas; (ii) toxicidade prejudicial para os operadores e meio ambiente; (iii) necessidade que grandes volumes de fluido de corte elevando o custo do processo; e (iv) elevados custos de descarte ou reuso devido às legislações cada vez mais rigorosas (Pervaiz et al., 2018).

Assim, a técnica da MQL e fluido de corte em jorro têm suas desvantagens, de modo que outro método de refrigeração possa ser mais indicado. A fim de estudar a aplicação de método alternativo, este trabalho propõe avaliar qual o efeito da ferramenta de refrigeração interna (FRI) na qualidade final da peça, na força de corte e no desgaste da pastilha. Tal refrigeração interna se deu pelo fluxo de água a 2° C, com uma vazão média de 3 l/min e pressão máxima de 0,7 MPa através de canais internos fabricados pelo processo da eletroerosão nas ferramentas de metal duro.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do trabalho é comparar o uso de ferramentas refrigeradas internamente (FRI) com o uso de ferramentas sem refrigeração interna (FSRI), no torneamento do ferro fundido cinzento FC-300.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Verificar a forma com que os parâmetros de profundidade de usinagem e velocidade de corte influenciam nas variáveis que foram alvo do estudo: força de corte e rugosidade  $R_a$  e  $R_q$ .
- Realizar um estudo estatístico, por meio da medição da força de corte  $F_c$ , comparando o uso do sistema de FRI com a usinagem de FSRI.
- Avaliar estatisticamente a influência do uso da FRI em comparação com as FSRI, por meio da medição das rugosidades superficiais  $R_a$  e  $R_q$ .

- Realizar uma análise da superfície de saída e da superfície principal de folga após a usinagem, comparando as ferramentas FRIs com as FSRIs.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizada uma revisão na literatura sobre os principais temas que envolvem o desenvolvimento do trabalho, como o ferro fundido cinzento, as forças de corte e potência de corte, rugosidade, ferramentas de metal duro, bem como métodos de refrigeração de ferramentas de corte.

#### 2.1. FERRO FUNDIDO CINZENTO

Segundo Callister (2002), ferros fundidos são uma liga ferro-carbono com teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita ( $\gamma$ ), de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. Para o estudo metalúrgico dos ferros fundidos utiliza-se o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, que é um gráfico temperatura versus teor de carbono (C). Nele está traçada todas as fases que a mistura líquida Ferro-Carbono pode passar até se solidificar dependendo do teor de carbono presente na mistura. O diagrama, mostrado na Figura 1, permite ao metalúrgico compreender quais foram as transformações de fase que o material sofreu desde a sua fase líquida até o posterior resfriamento no molde, atingindo sua fase sólida estável.

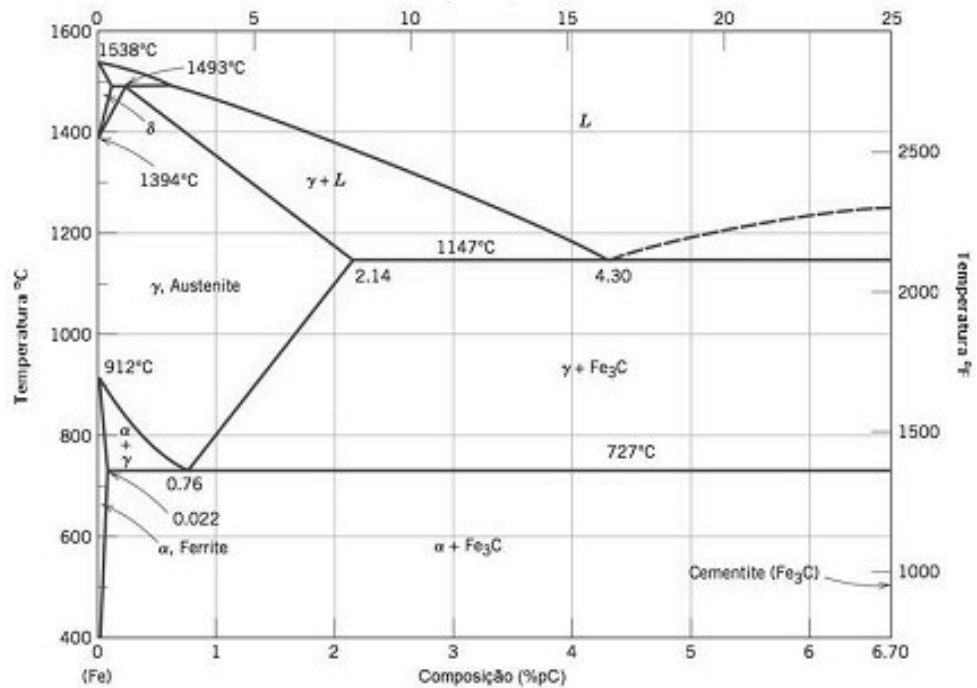


Figura 1 - Diagrama de fases do sistema ferro-carbono (Callister, 2002).

Na solidificação dos ferros fundidos há um fator de complicação que é a possibilidade da formação da cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) associada à grafita, durante o processo de nucleação da fase líquida, conforme apresentado na Figura 1. A cementita é um carboneto de ferro que apresenta alta dureza quando comparada com a matriz ferrítica, sendo assim sua presença geralmente indesejável para a indústria devido a ser um complicador na usinabilidade (Guesser, 2019). Quanto maior for a velocidade de resfriamento, maior será a probabilidade de formação de carbonetos (Pieske et al., 1975). Para solucionar ou amenizar esse problema os fabricantes utilizam inoculantes, os quais são aditivos especiais que irão favorecer a precipitação do carbono na forma de grafita durante a solidificação da mistura. O modo com que o fabricante realiza a inoculação impacta diretamente nas propriedades mecânicas finais do ferro fundido produzido, visto que a quantidade de inoculante utilizada favorece a criação de um maior número de nódulos de grafita (Guesser, 2019).

Além dos elementos ferro (Fe) e carbono (C), os ferros fundidos ainda contêm outros elementos de liga, tais como: silício (Si), manganês (Mn), enxofre (S), fósforo (P), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb). O silício é um elemento que favorece a formação de grafita, enquanto evita a formação do carboneto de ferro. Já o manganês, geralmente presente em menor quantidade, promove a presença de cementita, desfavorecendo a formação da grafita. Por possuírem resistência mecânica inferior à da matriz, a grafita comporta-se como uma segunda



fase, de modo com que seu formato é utilizado para classificar os diferentes tipos de ferro fundido, além de influenciar diretamente nos campos de concentração de tensões (Fang et al., 2020; Upadhyay et al., 2020; Singhal et al., 2020; Beniwal et al., 2020).

Em se tratando dos ferros fundidos cinzentos, eles apresentam a grafita em forma de veios ou lamelas que podem se diferenciar quanto à forma e tamanho. Essas variações advêm do processo de solidificação e de suas variáveis do processo, como a composição química e velocidade de esfriamento, sendo que velocidades elevadas resultam em veios finos enquanto velocidades lentas de esfriamento resultam em veios grossos de grafita.

A matriz metálica dos ferros fundidos cinzentos pode ser classificada como ferrítica ou ferrítica-perlítica, conforme mostradas respectivamente nas Figura 2 (a) e (b).



Figura 2 - (a) Ferro Fundido Cinzento com matriz ferrítica, sem ataque (b) Ferro Fundido Cinzento com matriz ferrítica-perlítica, com ataque 3% Nital. Adaptado de Vaško (2016).

A matriz ferrítica surge a partir de uma reação eutetoide estável, durante o resfriamento do material, de forma que a austenita se transforma em ferrita e grafita – Eq. (1), que resultará em um material com baixa resistência mecânica, porém alta ductilidade e tenacidade. Por sua vez, a matriz ferrítica-perlítica ocorre quando há uma reação eutetoide metaestável – Eq. (2), durante o resfriamento do material, de forma que a austenita se transforma em perlita, sendo esta uma combinação de ferrita com cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). A presença desse carboneto de ferro em combinação com a ferrita faz com que resulte em um material com maiores valores de resistência mecânica associados com baixa ductilidade e tenacidade (Guesser, 2019; Lacaze, 2001).

- Austenita  $\rightarrow$  Ferrita + Grafita (1)
- Austenita  $\rightarrow$  Ferrita + Cementita (Perlita) (2)

A forma com que o carbono se precipita na forma de grafita nos ferros fundidos está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas e de usinabilidade que cada tipo de ferro fundido terá. A Figura 3 mostra a forma tridimensional da grafita presente nos ferros fundidos cinzentos, nota-se uma forma em lamelas longas e finas, apresentando pontas, o que favorece a concentração de tensão e facilita a nucleação e propagação de trincas. A forma com que as lamelas se organizam no ferro fundido cinzento também contribuem para sua elevada condutividade térmica, tornando-o assim uma excelente opção de material para peças que precisam trabalhar sujeitas à fadiga térmica, tais como tambores, freio a disco e cabeçotes de motores (Guessser, 2019, Dawson e Schroeder, 2000).

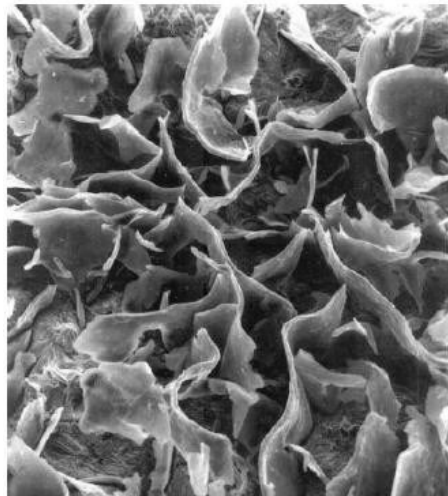


Figura 3 - Formato tridimensional da grafita nos ferros fundidos cinzentos. Adaptado de Dawson e Schroeder (2000).

De forma geral, quando se compara o ferro fundido cinzento com outros tipos de ferro fundido notam-se as seguintes características: boa usinabilidade, capacidade de tolerar altas cargas compressivas, trabalha bem absorvendo vibrações, fácil fusão e modelagem. Essa combinação de qualidades aliada ao seu baixo custo de produção, torna o ferro fundido cinzento o mais utilizado particularmente na indústria pesada e automotiva como blocos e cabeçotes de motores, volantes, discos e tambores de freio e componentes hidráulicos como carcaças de bombas d'água, como mostra a Figura 4 (Silva, 2020; Guessser, 2019).



Figura 4 - Aplicações típicas de ferros fundidos cinzentos. Bloco de motor, disco de freio, tambor de freio e carcaças de bombas. Adaptado de Guessser (2019).

A Norma ABNT/NBR6589 (1986) classifica os ferros fundidos cinzentos em sete classes de acordo com seu limite de resistência, variando de uma faixa de 100 a 400 MPa. A Tabela 1 mostra a direção que cresce ou diminui determinada característica quanto se varia de classe entre os ferros fundidos cinzentos.

Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos cinzentos. Adaptado de Guessser (2019).

| FC100                                      | FC150 | FC200 | FC250 | FC300 | FC350 | FC400 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Resistência Mecânica →                     |       |       |       |       |       |       |
| Módulo de Elasticidade →                   |       |       |       |       |       |       |
| ← Capacidade de amortecimento de vibrações |       |       |       |       |       |       |
| Resistência a altas temperaturas →         |       |       |       |       |       |       |
| ← Resistência ao choque térmico            |       |       |       |       |       |       |
| Dureza →                                   |       |       |       |       |       |       |
| Resistência ao desgaste →                  |       |       |       |       |       |       |
| ← Usinabilidade                            |       |       |       |       |       |       |
| ← Fundibilidade                            |       |       |       |       |       |       |
| Custo →                                    |       |       |       |       |       |       |

## 2.2. POTÊNCIA E FORÇAS DE USINAGEM

A potência de usinagem é essencialmente a quantidade de energia necessária para remover certa quantidade de material em um determinado tempo. Tal grandeza representa o gasto energético que o processo de usinagem demanda, sendo utilizada no dimensionamento do motor da máquina-ferramenta. Segundo Diniz et al. (2006), as forças de usinagens são os principais fatores que influenciam na potência requerida, assim, o estudo da ação dessas forças sobre a aresta cortante e suas grandezas é de grande importância.

Diniz et al. (2006) descreve quais são os principais fatores que afetam, em maior ou menor grau, as forças de usinagem durante a operação de fresamento:

- Material da peça: a composição química de cada material irá influenciar na energia requerida para a deformação plástica durante a formação do cavaco. De forma geral, quanto maior a dureza do material maior será a grandeza das forças de usinagem, havendo exceções quando há presença de elementos de liga.
- Material e geometria da ferramenta: quando se varia o material da ferramenta o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ponta da ferramenta se altera, fazendo que as forças de usinagem se alterem dependendo interação entre o material da peça e o material da ferramenta. Já o aumento do ângulo de saída e do ângulo de inclinação da fresa geram uma diminuição das forças de usinagem devido à menor deformação plástica durante a formação do cavaco.
- Velocidade de corte: é um parâmetro que influencia no fluxo de formação do cavaco e conseqüentemente nos esforços sobre a ferramenta. Segundo George et al. (2021), alguns estudos têm demonstrado a queda da força de corte com o aumento da velocidade de corte. Os efeitos térmicos gerados com o aumento da velocidade ocasionam uma diminuição do limite de escoamento do material além da diminuição da espessura do cavaco ocasionando essa redução dos esforços de corte.
- Condições de lubrificação e refrigeração: quanto maior for a penetração do fluido de corte e maior seu efeito lubrificante maior será a influência na diminuição das forças de usinagem.
- Desgaste da ferramenta: gera-se alterações na geometria e composição do material da ferramenta, podendo ter alterações nos efeitos térmicos e de atrito.

Para a medição experimental das componentes das forças de usinagem, existem basicamente dois métodos principais: com transdutores resistivos – comumente conhecidos por *strain gauge* – ou com transdutores piezoelétricos. Os transdutores são dispositivos utilizados para a conversão de energia de uma natureza para outra (Budak e Altintas, 1998).

Os transdutores resistivos são formados por condutores elétricos firmemente presos em um filme, formando o *strain gauge*. Quando estes são contraídos resultam em uma queda na resistência e quando são estendidos há um aumento da resistência, como mostrado na Figura 5 (a). Para produzir um transdutor de força – Figura 5 (b), além dos medidores *strain gauge*, usa-se um elemento de mola feito em aço, geralmente em forma cilíndrica. São utilizados

geralmente quatro *strain gauge* formando um circuito conhecido como ponte de *Wheatstone*. A força medida é proporcional à tensão mecânica sobre a mola, e esta, por sua vez, é proporcional à sua deformação. O sinal de saída da ponte de *Wheatstone* é linearmente proporcional à mudança relativa na resistência dos *strain gauges* (Klecker, 2020).

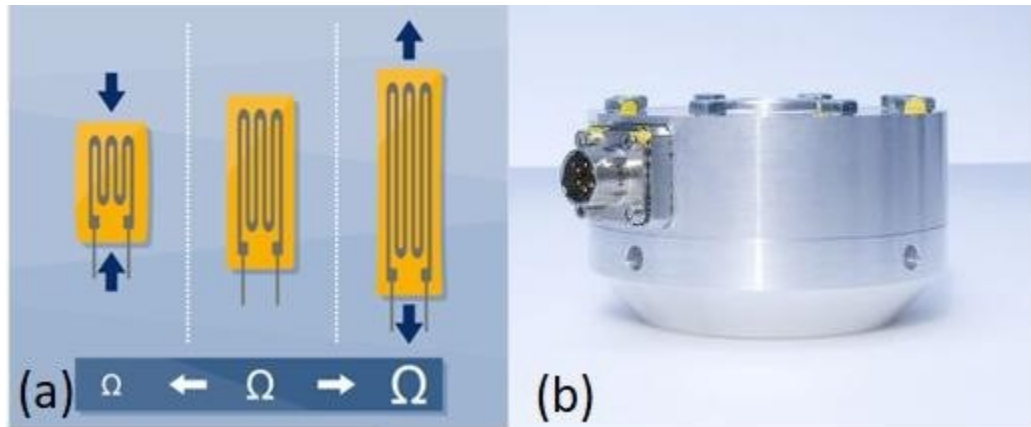


Figura 5 – (a) Contração e extensão de *strain gauge*; (b) transdutor de força. Klecker (2020).

Outra tecnologia mais moderna de transdutores de força utiliza material piezoelétrico, tal como o cristal de quartzo. O princípio é simples, esse tipo de material quando submetido a estresse mecânico produz uma carga elétrica, que é proporcional ao estresse mecânico aplicado. Nos transdutores de força do tipo piezoelétrico um amplificador de carga converte essa carga em um sinal de 0 a 10 V, facilitando a medição. No final, a tensão de saída é proporcional à tensão mecânica (Klecker, 2020). Entre as principais vantagens desse tipo de equipamento são que eles cobrem grandes faixas de medição, e apresentam alta rigidez, sendo ideais para medir grandes esforços como os que são produzidos durante os processos de usinagem.

Souza et al. (2009) estudou o efeito da variação da velocidade de corte e avanço nas forças de usinagem durante o torneamento de ferro fundido cinzento. Foram utilizadas ferramentas cerâmicas baseadas em nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). A velocidade de corte variou em cinco níveis (180, 240, 300, 360 e 420 mm/min) e o avanço em três níveis (0,12; 0,23; 0,33; 0,40 e 0,50 mm/rot), já a profundidade usinagem foi mantida constante em 1 mm. É notado a partir da Figura 6 que para velocidade de corte baixas ( $< 300$  mm/min) as componentes das forças de usinagem aumenta com o acréscimo da velocidade de corte, tal fato foi explicado devido ao fato do corte para estas condições ser mais instável, riscando o material da peça. Por outro lado, para velocidade de corte maiores ( $>300$  mm/min) o corte se torna mais estável além disso o material começa a perder resistência mecânica facilitando o cisalhamento e consequente

formação do cavaco. Também pela Figura 6 Souza et al. (2009) argumentam que o fato da componente da força de corte apresentar o maior módulo em todas as condições, indica que a remoção do material ocorreu em forma dúctil sem fratura, evitando assim a ocorrência de uma remoção de material quebradiço (cavaco segmentado).

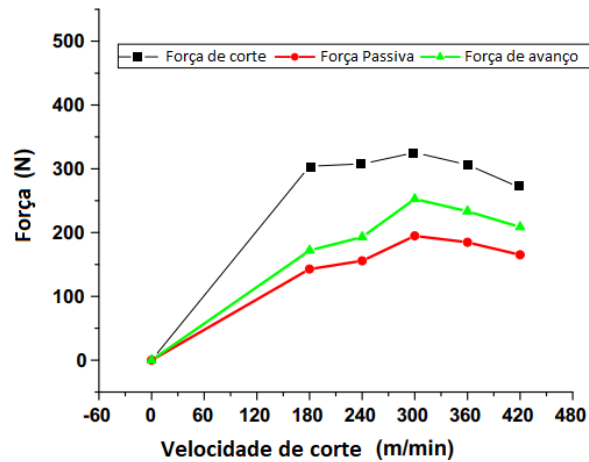


Figura 6 - Variação das forças de usinagem com a velocidade de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).

Souza et al. (2009) estudaram o efeito da variação do avanço nas componentes das forças de usinagem fixando a velocidade de corte em 300 mm/min. A Figura 7 mostra que para a medida que se aumenta o avanço todas as componentes das forças de usinagem se elevaram, os autores novamente argumentaram que devido ao fato da componente força de corte ser maior em módulo do que as demais indicam que a remoção de material se deu de uma dúctil.

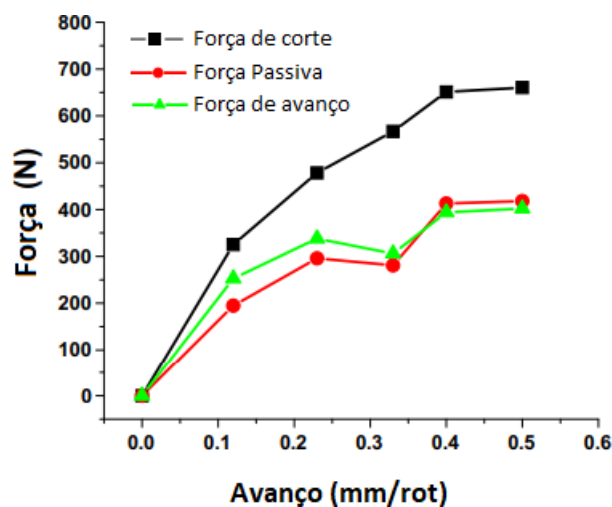


Figura 7- Variação das forças de usinagem com avanço de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).

Ahmed et al. (2021) avaliou em seu trabalho o impacto dos parâmetros de corte nas componentes da força de usinagem para o torneamento de aço inoxidável AISI 201. Foi aplicado um planejamento experimental Taguchi, com quatro fatores (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, e diâmetro da barra) com quatro níveis para cada fator. A análise de variância (ANOVA) mostrou que a interação entre o avanço e a profundidade de usinagem contribuíram com 36,64% para a força passiva. A profundidade de usinagem teve forte influência nas três componentes, contribuindo para 26,94% da força de corte, 26,12% para a força de avanço e 16,28% para a força passiva. Os resultados desse trabalho indicam que a força de corte é sensível a todas as variáveis aplicadas aos parâmetros de usinagem.

### **2.3. PARAMETROS DE SUPERFICIE RUGOSIDADE $R_a$ e $R_q$**

Qualquer superfície, por mais lisa que pareça à vista desarmada, apresentará pequenas irregularidades superficiais ao ser observada em maior ampliação. Essas irregularidades de tamanho micro ou submicrométricos são normalmente resultantes dos processos de fabricação utilizados e dependem de parâmetros como: conjunto máquina-ferramenta, geometria e propriedades do material da peça e da ferramenta, lubrificação e parâmetros de corte, dentre outros.

Segundo Benardos e Vosniakos (2003), a integridade da superfície é um dos principais critérios de avaliação da qualidade das peças produzidas, devido ao seu efeito determinante na qualidade dos ajustes geométricos e nas propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste, resistência à fadiga, coeficiente de atrito, lubrificação, resistência à corrosão, nucleação e propagação de trincas (Wang e Feng, 2002). Sua avaliação é de suma importância para as aplicações industriais e na pesquisa, sendo mais comumente medida para um perfil 2D, apalpando a peça ao longo de uma linha, e expressando o resultado através de parâmetros estatísticos.

O parâmetro  $R_a$ , por exemplo, expressa a altura média aritmética do perfil, definida como a distância média absoluta da altura do perfil à sua linha média num determinado comprimento de avaliação. Seu cálculo é feito conforme as expressões na Eq. (5). Devido a simplicidade de medição e análise, esse parâmetro tem sido o mais utilizado nas análises superficiais historicamente.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad \rightarrow \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5)$$

Outro parâmetro de interesse é o  $R_q$ , que expressa a altura média quadrática do perfil, calculado conforme a Eq. (6). Embora esses parâmetros não forneçam informações sobre o achatamento, simetria ou regularidade do perfil, dão uma ideia do tamanho vertical das irregularidades presentes, sendo o  $R_q$  mais sensível à presença de picos e vales (Gadelmawla, 2002).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)^2 dx\}} \quad \rightarrow \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (6)$$

No processo de torneamento estudado, a remoção contínua do cavaco associada a rotação da peça gera um perfil periódico ondulado fazendo com que o espaçamento dos vales depende principalmente da velocidade de avanço e do raio de ponta da ferramenta. Neste caso, o valor teórico de  $R_a$  pode ser calculado conforme a Eq. (7) (Machado et al., 2015).

$$R_a = \frac{f^2}{(18\sqrt{3})r_s} = \frac{f^2}{(31,2)r_s} \quad (7)$$

As normas NBR ISO 4287 e NBR ISO 4288 orientam os procedimentos de medição e cálculo dos parâmetros de rugosidade para perfis periódicos e não periódicos. A avaliação dos perfis pode ser feita com base em parâmetros de amplitude, tais como  $R_a$  e  $R_q$ , de espaçamento ou híbridos, para um comprimento de avaliação que deve ser maior quanto maior forem as irregularidades das peças. A NBR ISO 4288 recomenda que o comprimento de avaliação ( $l_n$  ou comprimento de apalramento) seja de 5 vezes o valor do comprimento de amostragem ( $l_r$  ou *cut-off*), valor este utilizado como referência para filtragem dos sinais do rugosímetro, separando-os das ondulações da superfície. O valor recomendado para o *cut-off* varia de acordo com o tipo de perfil e seus valores de  $R_a$  ou  $R_q$ , tal como expresso na Tabela 2, devendo ser ajustado no rugosímetro antes das medições.



Tabela 2 - Valores Recomendados para comprimento de amostragem e avaliação (ISO 4288, 1996).

| Faixa de $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) | Comprimento de Amostragem $l_r$ (mm) | Comprimento de Avaliação $l_n$ (mm) |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 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                                  |

Segundo Guessser (2019), durante a usinagem do ferro fundido cinzento verificou-se que a rugosidade não varia apenas conforme as marcas de avanço da ferramenta, mas depende também das deformações e microfraturas que ocorrem no material nas altas taxas de deformação típicas do processo de formação do cavaco. Dessa forma, além dos importantes efeitos dos parâmetros de corte, a integridade se torna dependente também dos parâmetros metalúrgicos, dentre os quais o tamanho e espaçamento médio das grafitas é um dos mais importantes (da Silva, 2020). Isso se deve ao impacto desse fator na resistência mecânica e à fratura do material, que pode favorecer a propagação de trincas durante o processo de deformação plástica causada pela ferramenta de corte.

Jadeja e Patel (2021) compararam o uso de ferramentas de metal duro com e sem o revestimento PVD de Ti-Zr na rugosidade da peça, para o torneamento a seco do aço SS43100. O planejamento experimental utilizou a técnica Taguchi, optou-se por três fatores (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem) com três níveis para cada fator. Os resultados mostraram que a ferramenta de metal duro revestida com Ti-Zr obtiveram melhor performance na rugosidade. A análise de variância (ANOVA) indicou que o avanço foi o fator de maior relevância para a rugosidade  $R_a$ . Experimentalmente chegou-se que as condições otimizadas para a rugosidade  $R_a$ , utilizando ferramenta com revestimento Ti-Zr, foram  $v_c = 150$  rpm,  $f = 0,1$  mm/rot e  $a_p = 0,1$  mm. Este trabalho mostrou que o revestimento da ferramenta de metal duro influencia diretamente na qualidade final da peça.

Souza et al. (2009) em seu trabalho já abordado no item anterior também estudaram o efeito da variação da velocidade de corte na rugosidade  $R_a$  durante o torneamento de ferro fundido cinzento, fixando o avanço em 0,33 mm/rot. A Figura 8 mostra que à medida que se aumentou a velocidade de corte o acabamento superficial da peça melhorou, apresentando

menores valores de rugosidade  $R_a$ . Os autores argumentam que para maiores velocidades de corte o corte se torna mais estável favorecendo um melhor acabamento superficial.

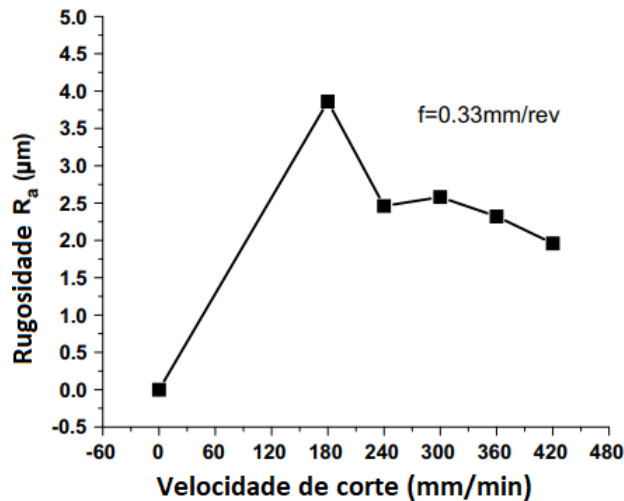


Figura 8 - Variação da Rugosidade  $R_a$  com a velocidade de corte. Adaptado de Souza et al. (2009).

#### 2.4. FERRAMENTAS DE METAL DURO

De acordo com ASM Metals Handbook V.5 (2004) diversos materiais podem ser empregados na fabricação de ferramentas de corte para a usinagem em geral. Cada tipo de ferramenta alia propriedades que são desejáveis para usinar determinado material. Machado et al. (2015) definiram que entre as principais propriedades que as ferramentas de corte devem possuir são:

- Elevada dureza;
- Tenacidade para suportar impactos e não falhar por fratura;
- Resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência mecânica para suportar os esforços de usinagem;
- Capacidade de ser inerte quimicamente;

Na primeira metade do século XX começa o desenvolvimento de uma nova classe de ferramentas baseada na prensagem e sinterização da mistura de pó de carboneto de tungstênio (WC) com pó de metais ligantes geralmente cobalto (Co), níquel (Ni) ou ferro (Fe), tal material ficaria conhecido como metal duro. A primeira parte do processo, a prensagem, é o processo no qual a mistura dos pós constituintes é compactada em moldes adquirindo a forma desejada. Posteriormente, essas ferramentas passam pelo processo de sinterização onde as ferramentas

são aquecidas a uma temperatura entre 1300 °C e 1500 °C, suficiente para fundir o metal ligante, preenchendo então os vazios entre os grãos dos carbonetos, resultando em uma ferramenta de elevada dureza (dos Santos Torres, 2009).

À época, a descoberta foi uma revolução na usinagem, visto que ela trazia uma excelente junção das propriedades de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. Mais tarde, para amenizar o problema de craterização das ferramentas, principalmente na usinagem de aços, foram adicionados TiC, TaC, NbC. E já na segunda metade do século XX o uso de revestimentos de carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e de nitreto de titânio (TiN) foram introduzidos. Esses revestimentos possuem excelente adesão ao metal e trouxeram uma resistência ao desgaste aumentando ainda mais o desempenho destes materiais, tornando-os indicados para utilização na usinagem de quase todos os materiais conhecidos (Machado et al., 2015).

Devido às suas características e aplicações, o metal duro se tornou o tipo de ferramenta de corte dominante no uso industrial. A Figura 9, mostra uma estimativa global do mercado de ferramentas de corte no ano de 2013, onde pode ser visto que o metal duro ocupa a maior fatia do mercado global com aproximadamente 53%.

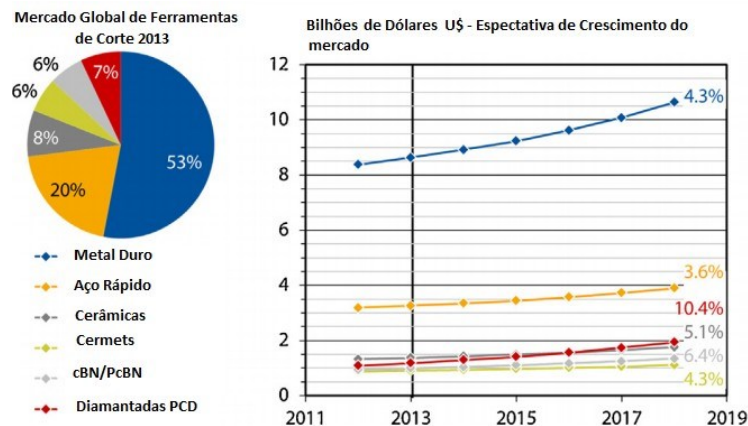


Figura 9 - Mercado Global de Ferramentas de Corte 2013. Adaptado de Bobzin (2017).

Yigit et al. (2008) utilizaram três tipos de ferramentas de metal duro WC/Co: com multicamadas de revestimento de nitreto de titânio (TiN), com 7,5 e 10,5  $\mu\text{m}$  de espessura, e ferramenta sem revestimento. Realizaram-se ensaios de torneamento em ferro fundido nodular fixando o avanço ( $f = 0,25 \text{ mm/rot}$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p = 1,5 \text{ mm}$ ) e variando a velocidade de corte (125, 150, 175 e 200 m/min). Quanto à rugosidade a ferramenta revestida

com 10,5 µm apresentou os melhores resultados para todas as faixas de velocidade de corte ensaiadas. Para a faixa de 175 – 200 m/min a qualidade superficial foi superior para os três tipos de ferramentas. Para a velocidade de corte 125 m/min observou-se os piores resultados de rugosidade, o que foi atribuído à formação de aresta postiça de corte. Este trabalho confirma que a utilização de revestimentos em ferramentas de metal duro tem influência direta na qualidade final da peça produzida.

## **2.5. MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE**

A técnica padrão utilizada para lubri-refrigeração em usinagem é a utilização de fluido de corte em jorro. Esta técnica surgiu como experimentos no final do século XIX com os trabalhos de Frederick W. Taylor que observou incremento na velocidade de corte da ordem de 40% ao utilizar uma mistura da água com soda em fluxo constante durante a usinagem. Este foi um marco na história da manufatura que possibilitou um ganho de produtividade, além de ser uma inovação à época o uso dos chamados fluidos de corte - FCs (Byers, 2016; Machado et al., 2015). Desde então estes insumos vem sendo amplamente utilizados dentro da indústria metal mecânica. Estima-se que em 2022 o consumo de FCs possa chegar a ordem dos 44 milhões de toneladas (Benedicto et al., 2017; Fernandes et al., 2021).

Dentre os principais benefícios advindos da utilização dos FCs, pode-se citar: melhoria de acabamento superficial (rugosidade, tensões residuais, micro dureza, trincas); redução das forças de corte e da potência; ganho de vida de ferramenta e de produtividade; redução de temperatura; proteção contra oxidação do conjunto máquina-ferramenta-peça; varredura de cavacos; lubrificação de mancais, rolamentos, barramentos; dentre outros (Debnath et al., 2014; Klocke, 2009; Sen et al., 2019; Trent e Wright, 2000; Tschätsch e Reichelt, 2009)

Entretanto, os fluídos de corte apresentam algumas desvantagens relacionadas ao tripé de sustentabilidade: social, ambiental e econômico. Os FCs possuem em suas formulações mais de dez aditivos diferentes, dentre eles fungicidas, bactericidas, emulsificadores, umectantes, antioxidantes, desativadores metálicos, reserva alcalina, surfactantes, agentes acopladores, antiespumantes, anti-névoa, corantes, além dos lubrificantes. Estes aditivos podem ser de contorno (óleo mineral, ácidos graxos, sabão) ou de extrema pressão (a base de fósforos, enxofre ou clorinas). A exemplo, as clorinas são altamente inflamáveis e tóxicas e somente podem ser descartadas em incineradores especiais (Shokrani et al., 2012).

Os FCs com esses aditivos são altamente tóxicos para a saúde humana. Operadores com frequente contato com fluido de corte estão susceptíveis a desenvolver doenças respiratórias, alérgicas, dermatites e até mesmo câncer. Um estudo realizado nos Estados Unidos da América – EUA apontou que dentro da indústria metal mecânica, onde trabalhadores tem contato com fluidos de corte, aproximadamente 80% dos afastamentos funcionais estão associados à intoxicação por fluidos de corte (Shashidhara & Jayaram, 2010).

Do ponto de vista ambiental os fluidos de corte, por terem um alto custo de descarte, muitas vezes são despejados em locais inapropriados e acabam por contaminar solos, lençóis freáticos, redes de esgoto, rios e mananciais. Não se tem uma exata dimensão do impacto ambiental destes insumos pois é difícil averiguar como eles são utilizados e/ou eliminados. A ação governamental neste sentido é essencial para criar legislações ambientais rigorosas e eficazes que diminuam cada vez mais o impacto ambiental destes insumos (Bartz, 2001; Soković e Mijanović, 2001).

A legislação ambiental tem se tornado cada vez mais rigorosa implicando na responsabilização pelo ciclo de vida completo do produto, especialmente em países desenvolvidos. Isso naturalmente eleva os custos associados. Apesar de não haver um consenso literário e também de ser uma conta muito específica para cada caso (indústria, lugar, processo, etc), há estudos que apontam que os fluidos de corte são responsáveis sozinhos por um custo total de fabricação variando de 8% até 30% (Demirbas & Kobya, 2017; King et al., 2001; Sharma et al., 2016).

Diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de desenvolver técnicas alternativas aos FCs. Dentre estas principais técnicas citam-se: Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL, Mínima Quantidade de Lubrificante nano particulado – nMQL, lubrificantes sólidos, texturizações, criogenia, usinagem a seco, ar refrigerado, dentre outros (Machado et al., 2021; Marques et al., 2017; Sun et al., 2015; Vieira et al., 2001; Yildiz e Nalbant, 2008).

Dentre as técnicas de refrigeração de ferramentas, incluem-se as ferramentas indiretamente refrigeradas. Esta refrigeração indireta pode ocorrer de diversas formas, sendo pelo calço do porta-ferramentas, por dissipadores de calor acoplados, tubos de calor, galerias internas por onde circulam fluidos e são direcionados à zona de corte, câmaras para troca de calor e as Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRIs, a qual foi utilizada neste trabalho. Nessa técnica (FRI), não há dispersão de fluidos para a atmosfera e as ferramentas são

refrigeradas internamente com a utilização de um de fluido refrigerante que circula internamente às ferramentas fabricadas com canais internos de refrigeração.

Possivelmente a ideia de refrigerar indiretamente as ferramentas de corte teve início na década de 60 nos EUA com o pedido de patente de Meyers (1964). Nela o autor propôs um engenhoso sistema termoelétrico para resfriamento da ferramenta de corte durante a usinagem utilizando o conceito das células de Peltier. Posteriormente, Jeffries e Zerkle (1970) propuseram um sistema de refrigeração interna com uma câmara onde há água. Quando a ferramenta passa a usinar, este fluido aquece até um ponto em que a água da câmara muda de estado líquido para vapor, e retira calor da ferramenta.

Desde então, diversos outros trabalhos que incluem refrigeração indireta de ferramentas foram publicados, cada um com um projeto diferente, porém todos com o mesmo objetivo: refrigerar a ferramenta o máximo possível e assim evitar a utilização de fluidos de corte. Neto et al., (2015) desenvolveram um porta-ferramentas com uma câmara interna (calço) onde circula gás refrigerante em um ciclo de refrigeração fechado, os testes demonstraram um aumento da vida útil da ferramenta utilizando essa configuração de refrigeração. Minton et al., (2013) utilizaram proposta semelhante com um calço refrigerado onde um fluido refrigerante circula no calço e por debaixo da ferramenta, resultando em uma maior troca térmica e desaceleração dos mecanismos de desgaste da ferramenta. Ainda em relação ao calço, Li et al., (2017) propuseram um calço refrigerado com relevo para aumentar a área de troca térmica por condução de forma que conseguiu-se diminuir a temperatura máxima em comparação com a ferramenta não refrigerada.

Os métodos de refrigeração alternativos, em especial aqueles focados na refrigeração das ferramentas, têm demonstrado bons resultados. A exemplo, Peng et al. (2019) em seu trabalho propuseram a refrigeração interna de insertos de metal duro pelo escoamento de um fluido gelado que percorria um canal interno feito no porta-ferramenta. Nesse estudo o fluido refrigerante era injetado para fora através das superfícies principal e secundária de folga, formando assim um ciclo aberto de refrigeração, conforme mostra a Figura 10. O material usinado foi o Inconel 718, e foram ensaiadas condições de corte a seco, com jorro e com refrigeração interna. Quando comparado com as condições de corte a seco e com jorro, a técnica de refrigeração interna obteve uma queda na temperatura de corte de 172,9 °C e 63,3 °C, respectivamente. A força principal de corte teve uma queda de 19% quando comparado com o

corte a seco, e de 11,1% com a condição de corte com jorro. Ou seja, a técnica da refrigeração interna apresentou a melhor performance dentre as demais testadas.

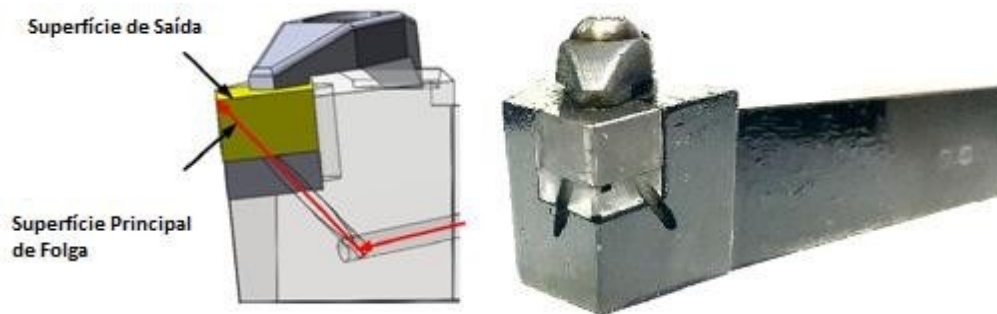


Figura 10 - Refrigeração pela injeção de fluido refrigerante na superfície principal e secundária de folga Adaptado de Peng et al. (2019).

Velan et al. (2021) compararam a utilização de fluido de corte refrigerado a alta pressão circulando por entre o porta-ferramenta com o jorro refrigerado (baixa pressão) no torneamento do aço AISI 1045, variando velocidade de corte e avanço. A refrigeração em alta pressão reduziu as forças de corte em 12 a 23%, bem como a força de avanço de 17 a 27%, e na rugosidade provocou uma redução de 14 a 33%, aumentando a vida útil da ferramenta em 40%. Os resultados mostraram que uso do fluido refrigerante a alta pressão provocaram uma maior retirada de calor na zona de contato cavaco-ferramenta, diminuindo as forças de atrito e favorecendo a quebra do cavaco.

Outro método de refrigeração de ferramentas de corte é por meio de *Heat Pipe*, que é um dispositivo de transferência de calor que combina os princípios de condutividade térmica e transição de fase para transferir calor entre duas interfaces sólidas. Wu et al. (2016) estudaram o uso de refrigeração com *Heat Pipe* em ferramentas de metal duro no torneamento de liga de Ti-6Al-4V. Foram projetados dispositivos de refrigeração própria da ferramenta de corte com quatro, seis e oito enlases de *Heat Pipe*, conforme mostra Figura 11. Em comparação com a ferramenta convencional, o uso das ferramentas de metal duro refrigeradas com *Heat Pipe* reduziu a temperatura de corte de 5 – 15% e aumentou a vida útil da ferramenta em 5 – 25%. Em ensaios de vida, a taxa de desgaste de flanco utilizando *Heat Pipe* reduziu, principalmente após  $VB_{\text{máx}} = 0.4 \text{ mm}$ .



Figura 11 - Refrigeração interna por meio de *Heat Pipe*. Adaptado de Wu et al. (2016).

A combinação do uso de fluido criogênico ( $LN_2$ ) com o método da ferramenta refrigerada internamente (FRI) foi estudada por Dhananchezian et al. (2011). Foi fabricado um furo de 2 mm de diâmetro na superfície de saída da ferramenta de metal duro, por onde entraria o jato de nitrogênio líquido ( $LN_2$ ), tal jato a alta pressão (3 bar) era direcionado para dois furos de 1 mm de diâmetro na superfície principal e secundária de folga, conforme mostra Figura 12. O estudo comparou a utilização do jato de fluido criogênico com a usinagem em jorro, o material utilizado nos ensaios de torneamento foi a liga de Ti-6Al-4V. Entre os principais resultados encontrados estão: (i) uma queda na temperatura de corte 61– 66% utilizando  $LN_2$ , quando comparado com o corte em jorro, (ii) queda na rugosidade em até 36% com a refrigeração criogênica e (iii) diminuição na força de corte de 35 – 42% em comparação com o corte em jorro.

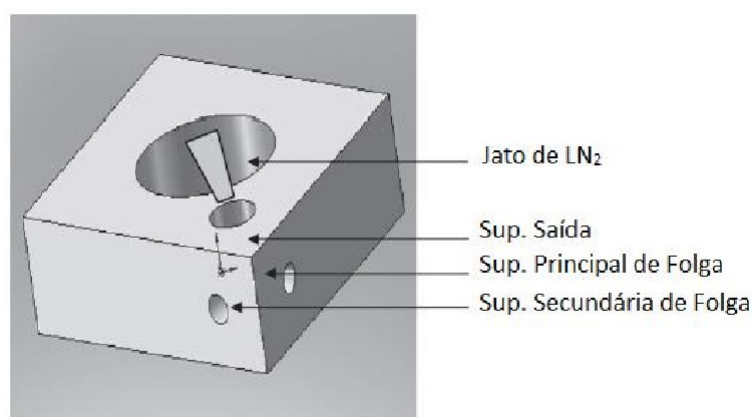


Figura 12 - Esquematização da refrigeração criogênica da ferramenta. Adaptado de Dhananchezian et al. (2011).



Bazon (2020), utilizando o mesmo aparato desta dissertação, torneou com ferramentas refrigeradas internamente (FRIs) ferro fundido cinzento por fundição contínua (FC-200). As variáveis de entrada foram velocidade de corte (100 e 150 m/min), profundidade de usinagem (1,0 e 2,0 mm) além da atmosfera (FC e FRI). As variáveis resposta do sistema foram forças de corte, integridade superficial (rugosidade, micro dureza e metalografia), bem como mecanismos de desgaste da ferramenta. Os principais resultados indicaram que as FRIs tiveram alta capacidade de remoção de calor do processo, uma vez que demonstraram maiores forças de corte em relação aos FCs. Isto é um indicativo de maior remoção de calor, pois maiores temperaturas implicam em menores forças de corte. Além disto, as FRIs tiveram resultados mais satisfatórios quanto a rugosidade para altas velocidades de corte. Por fim, o autor conclui que a FRI é um sistema promissor e ecologicamente amigável.

França (2021) também utilizou o torneamento com FRI e ferro fundido cinzento (FC-300), para estudar o comportamento da temperatura em relação a usinagem a seco. As variáveis de entrada utilizadas foram velocidade de corte (84, 132 e 212 m/min) e atmosfera (a seco, e FRI com água tanto a 2 °C quanto a 25 °C). O principal resultado encontrado indicou que as FRIs foram capazes de reduzir a temperatura na interface ferramenta cavaco em até 21, 52%.

Barbosa (2021) também utilizando FRI, estudou este sistema no torneamento de aços endurecidos D6 utilizando ferramentas híbridas de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) brasadas sobre metal duro. As variáveis de entrada foram: avanço, velocidade de corte e atmosfera (FRI e a seco). As variáveis resposta do problema foram: vida da ferramenta, temperatura via termo câmera, forças e rugosidade. Dentre os principais resultados as FRIs reduziram significativamente a temperatura na superfície de saída da ferramenta além de aumentar sua vida útil em até 35%.

Portanto, as ferramentas refrigeradas internamente (FRI) apresentaram até o momento resultados relativamente bons. Entretanto, trata-se de uma área que carece de estudos por envolver uma técnica inovadora que precisa ser testada em diversas condições e variáveis. Nesse contexto, esta dissertação contribui com a literatura no sentido de estudar o efeito da FRI na força de corte e rugosidade quando comparada com a usinagem utilizando FSRI, no torneamento de ferro fundido cinzento FC-300, algo que ainda não foi realizado.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo será detalhada a metodologia usada nesta dissertação. As atividades foram divididas em quatro etapas, conforme o fluxograma da Figura 13: projeto e montagem do sistema; elaboração dos ensaios; pós ensaios e tratamento dos dados; análise dos resultados e conclusão.

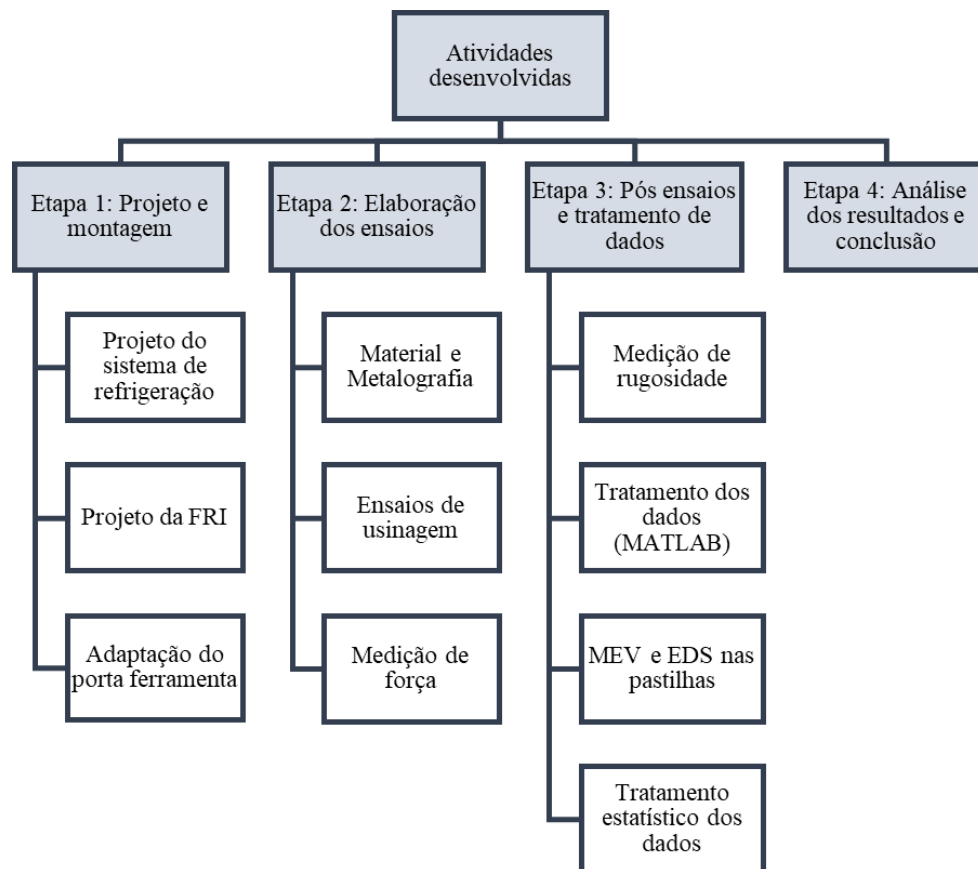


Figura 13 - Fluxograma das etapas de trabalho (elaborado pelo autor).

### 3.1. PROJETO E MONTAGEM

É importante destacar que o autor desta dissertação fazia parte de um grupo de pesquisa composto por três alunos de mestrado e um aluno de doutorado os quais em conjunto realizaram o desenvolvimento e montagem tanto do sistema de refrigeração em ciclo fechado quanto o projeto da ferramenta com refrigeração interna (FRI) de metal duro. Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Entre os principais desafios desta etapa do trabalho estavam:

- Projetar um sistema de refrigeração em ciclo fechado de baixo custo.
- Desenvolver uma geometria funcional para os canais internos de refrigeração das ferramentas de metal duro.
- Fabricar os canais internos nas ferramentas de metal duro.
- Adaptar o porta-ferramenta para o projeto.

#### 3.1.1. PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O projeto do sistema de refrigeração em ciclo fechado pode ser dividido em dois subsistemas: o subsistema de refrigeração responsável por refrigerar o fluido secundário; e o subsistema de usinagem que utiliza o escoamento do fluido secundário para retirar calor da ferramenta, conforme mostra a Figura 14.

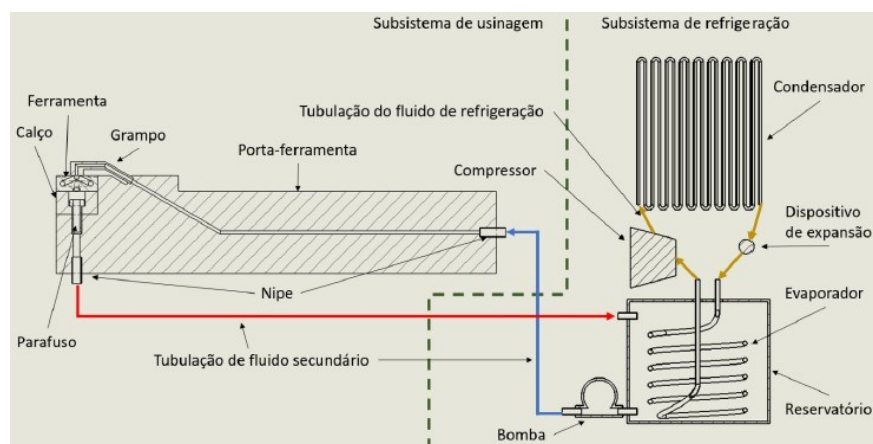


Figura 14 - Sistema de Refrigeração em Ciclo Fechado (Barbosa, 2021).

A conexão entre os subsistemas, garantindo um ciclo fechado de refrigeração, se deu por uma tubulação flexível de 6,75 mm de diâmetro externo e 1 mm de espessura, tubulação plástica de uso comum em sistemas de ar comprimido. O fluido secundário de refrigeração escolhido como padrão para os ensaios foi a água, numa temperatura média de 2 °C. Para os testes com as FSRI não foram utilizados nenhum fluido de corte, bem como as ferramentas empregadas eram comerciais e sem modificação (maciças sem galerias internas).

Detalhando melhor o subsistema de refrigeração criado para esta dissertação, ele foi formado por um freezer vertical doméstico, que trabalha com o fluido de refrigeração primário do tipo R401A e possui um compressor de potência de 124 W. A partir de uma tubulação de cobre foi construída em forma de serpentina um novo evaporador, o qual ficou alojado dentro de um reservatório de 20 litros, conforme mostra a Figura 15. É nesse reservatório que ocorreu a troca térmica entre o fluido refrigerante do R401A e o fluido secundário de refrigeração, que neste trabalho foi a água.

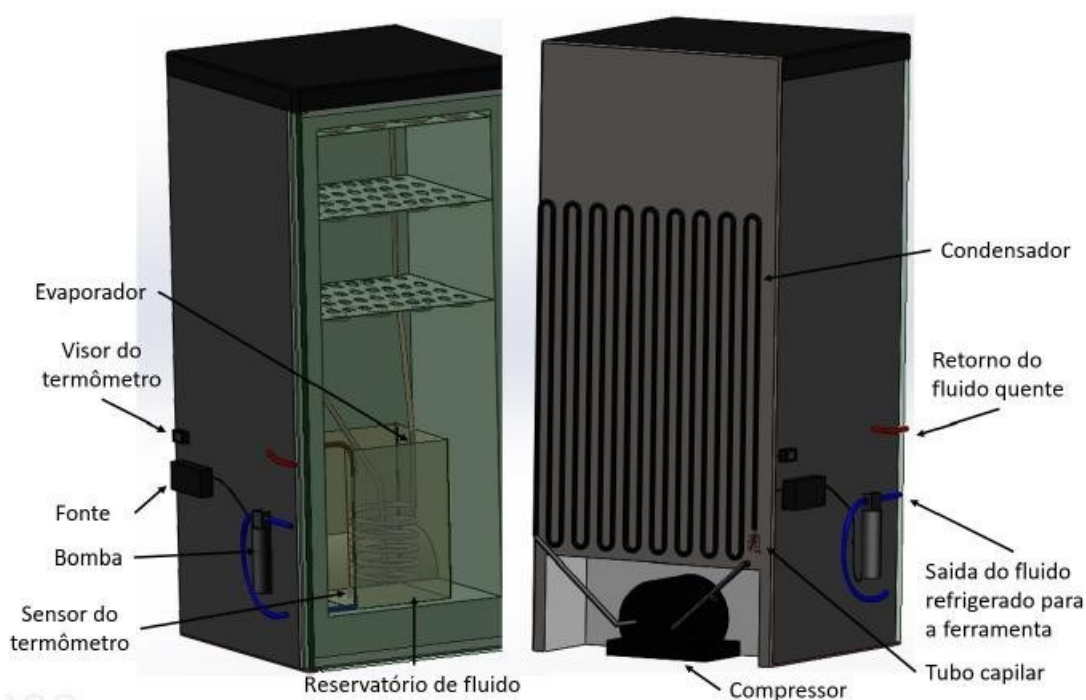


Figura 15 - Subsistema de Refrigeração (Barbosa, 2021).

A circulação do fluido de refrigeração secundário dentro do porta-ferramenta e da pastilha foi realizada por uma bomba de operação por diafragma, modelo P142-30, marca Propumps®, pressão máxima de 0,7 MPa e uma vazão máxima de 3 l/min, com potência de 30 W. Uma fonte universal da marca Nativa®, tensão regulável de 12 V a 24 V, foi utilizada para

a alimentação da bomba, sendo regulada a tensão para 12V. A Figura 16 apresenta essa montagem.

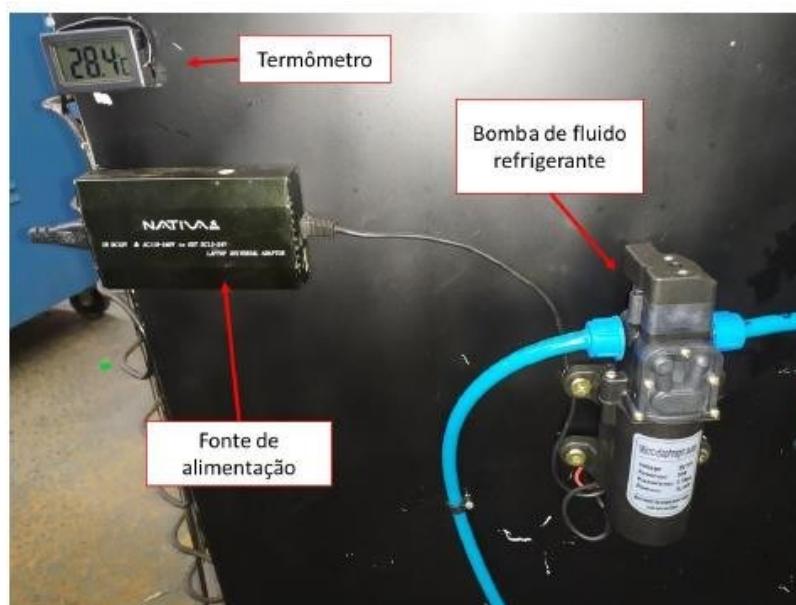


Figura 16 - Bomba de fluido refrigerante, termômetro e fonte de alimentação utilizados no subsistema de refrigeração (França, 2021).

O controle da temperatura do fluido de refrigeração secundário se deu por um termômetro digital, modelo TA21, marca TSSHOP, com faixa nominal de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , resolução de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e exatidão de  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sua instalação foi feita próximo ao recalque da bomba. Aproximadamente 5 horas antes de começar os ensaios de usinagem, ligou-se o sistema de refrigeração de modo a garantir que o reservatório mantivesse uma temperatura estável de  $2^{\circ}\text{C}$ . Durante todos os ensaios a temperatura do fluido de refrigeração secundário ficou estável entre  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.2. PROJETO DA FERRAMENTA COM REFRIGERAÇÃO INTERNA (FRI)

O projeto da ferramenta com refrigeração interna (FRI) iniciou-se com a seleção do modelo da pastilha a ser usada nos ensaios de usinagem. Optou-se pelo modelo de ferramenta de metal duro SNUN120412, sem revestimento, da fabricante Seco Tools da classe K10 (Figura 17). A classe da ferramenta foi selecionada considerando a indicação da fabricante para a usinagem do ferro fundido cinzento FC-300. Um fator relevante deste modelo de ferramenta

foi a sua geometria simples, com espessura adequada (4,76 mm) de modo a obter uma maior liberdade para projetar as galerias internas.



Figura 17- Ferramenta de metal duro SNUN120412, fabricante Seco Tools (elaborado pelo autor).

A partir da seleção da ferramenta de metal duro, parte do propósito deste trabalho foi desenvolver as galerias internas de modo que elas permitissem a circulação adequada do fluido refrigerante. Com isso, seria possível otimizar a troca térmica entre o fluido refrigerante e a ferramenta de metal duro. O projeto pressupõe o ciclo fechado, em que o fluido retorna ao reservatório do subsistema de refrigeração.

Para cumprir com esse objetivo desenvolveu-se um projeto em CAD (Figura 18), no qual foram especificados dez furos conforme mostra a Tabela 3. A Figura 18 também esquematiza o caminho que o fluido refrigerante percorre ao entrar na ferramenta. O fluido refrigerante secundário chega na pastilha através do grampo do porta-ferramenta, pela seta indicada em amarelo, em um furo de 3 mm de diâmetro. Em seguida, o fluido segue em direção à aresta de usinagem, indicado em roxo, por meio de um canal diagonal. Chegando na região próximo à aresta de usinagem, o escoamento de fluido é dividido em dois, indicado pelas setas azuis, até chegar na aresta diagonalmente oposta à aresta de corte. Neste ponto, representado pela seta em vermelho, o fluido de refrigeração secundário sai da pastilha, pela parte inferior, e adentra em um furo feito no calço do suporte da ferramenta. Por fim, o fluido refrigerante secundário retorna por meio de uma tubulação até o reservatório dentro do subsistema de refrigeração (freezer).

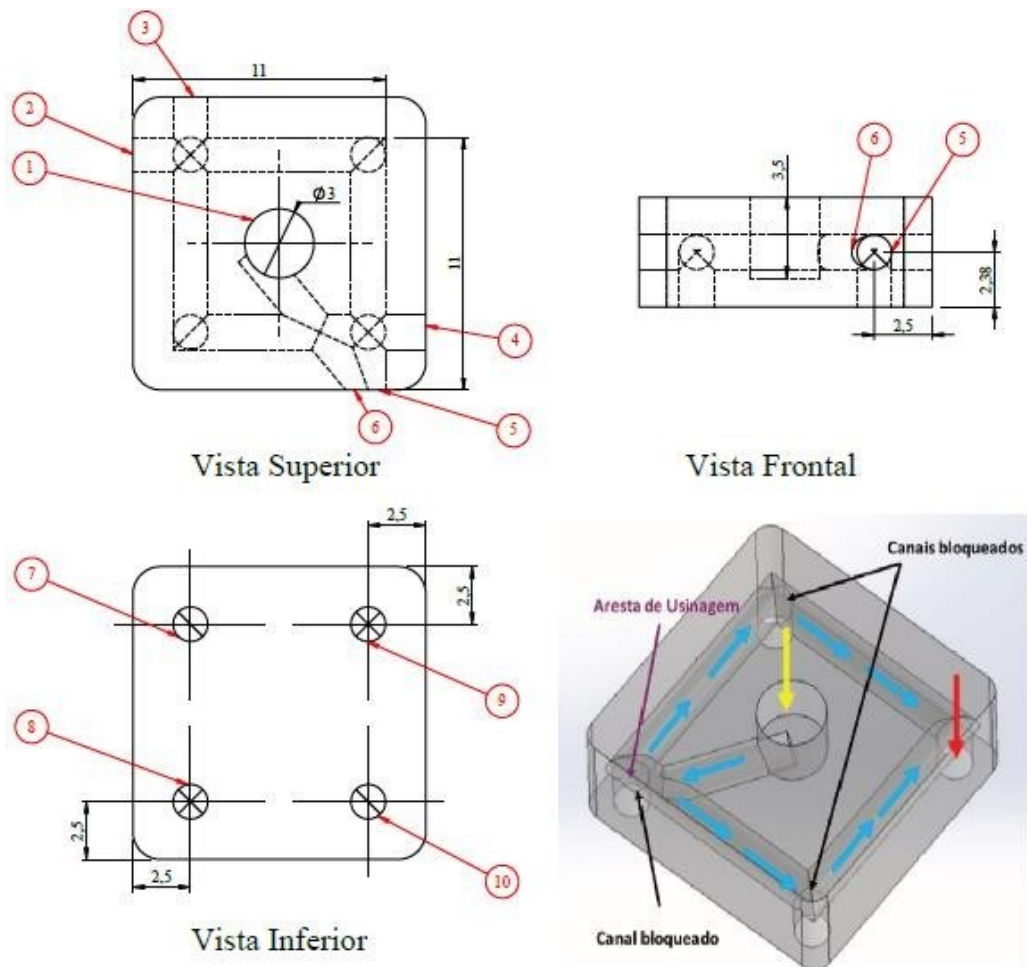


Figura 18 - Projeto das galerias internas nas ferramentas de metal duro (elaborado pelo autor).

Tabela 3 - Especificação dos furos feitos por eletroerosão nas ferramentas de metal duro desenvolvidos para este estudo (elaborado pelo autor).

| Furo | Face     | Diâmetro | Profundidade | Ângulo |
|------|----------|----------|--------------|--------|
| 1    | Superior | 3 mm     | 3,5 mm       | Reto   |
| 2    | Lateral  | 1,5 mm   | 11 mm        | Reto   |
| 3    | Lateral  | 1,5 mm   | 11 mm        | Reto   |
| 4    | Lateral  | 1,5 mm   | 11 mm        | Reto   |
| 5    | Lateral  | 1,5 mm   | 11 mm        | Reto   |
| 6    | Lateral  | 1,5 mm   | 9 mm         | 50°    |
| 7    | Inferior | 1,5 mm   | 2,5 mm       | Reto   |
| 8    | Inferior | 1,5 mm   | 2,5 mm       | Reto   |
| 9    | Inferior | 1,5 mm   | 2,5 mm       | Reto   |
| 10   | Inferior | 1,5 mm   | 2,5 mm       | Reto   |

Para a fabricação das galerias internas foi realizada visita na fábrica da empresa Nipo-Tec, em Jundiaí. A empresa se disponibilizou a realizar os canais internos por meio do processo de eletroerosão rotativa utilizando equipamento da fabricante AgieCharmilles (Figura 19). Este processo foi acompanhado pelo autor desta dissertação a fim de garantir a aderência da execução ao projeto CAD. O projeto e a execução das ferramentas levaram aproximadamente 14 meses para sua conclusão.

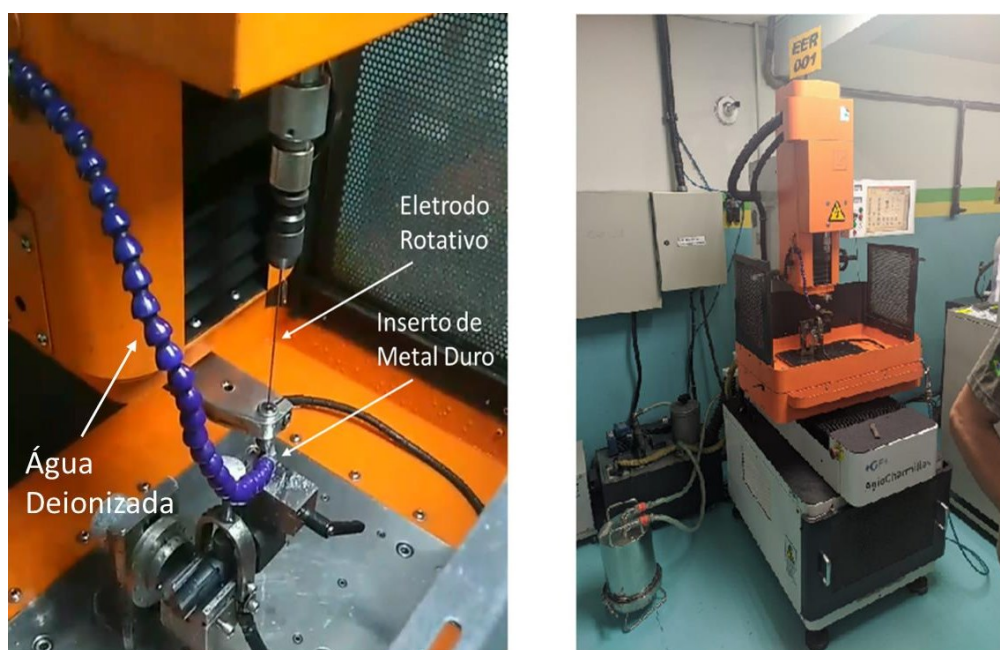


Figura 19 - Eletroerosão rotativa a fio, equipamento AgieCharmilles (elaborado pelo autor)

A eletroerosão é a mais indicada para usinar materiais com elevada dureza em que seria inviável fazer qualquer tipo usinagem com métodos convencionais. Outro fator que se levou em consideração para selecionar este método de fabricação foi que, nos métodos tradicionais de usinagem há uma elevada geração de calor, fazendo que tensões superficiais sejam criadas na pastilha modificando suas características físico-químicas. Na técnica utilizada neste trabalho, ou seja, a eletroerosão por penetração, não há esforços de corte visto que não existe contato entre o fio e a peça, pois a retirada de cavaco se dá por meio de descargas elétricas. Neste processo a peça permanece submersa em uma cuba com água deionizada de modo a garantir uma rápida dissipação do calor gerado durante as descargas elétricas.

Para a fabricação dos furos especificados anteriormente na Tabela 3, foi utilizado um eletrodo de  $3 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$  de modo que o grampo do suporte ferramenta se acomodasse



nesse furo, conforme mostra a Figura 20(a). Já para os demais furos foram utilizados eletrodos de  $1,5 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , apresentada na Figura 20(b).

A saída do fluido refrigerante secundário se deu pela parte inferior da ferramenta, mostrada na Figura 20(b). Nota-se que há 4 saídas, porém três dessas saídas sempre estão obstruídas pela superfície do calço da porta-ferramenta. A Figura 20(c) mostra que as entradas dos furos laterais foram tampadas com solda prata.

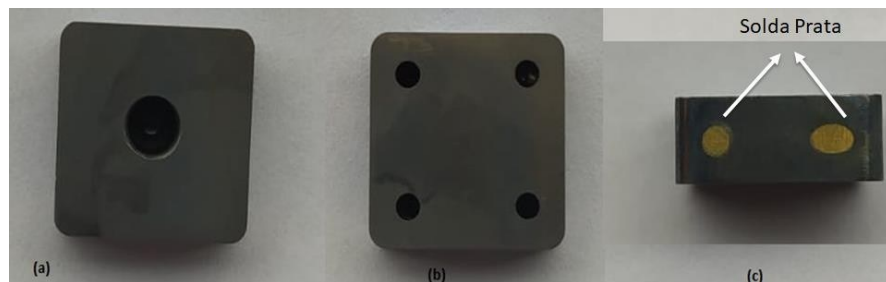


Figura 20 – Ferramenta de metal duro com galerias internas (elaborado pelo autor).

### 3.1.3. ADAPTAÇÃO DO PORTA-FERRAMENTA

O suporte ferramenta utilizado foi o modelo DSSNL2525X12-P fabricado pela empresa Walter Tools. Esse suporte já tinha alguns canais internos, mas passou por modificações para fins deste estudo. Primeiro, tampou-se os furos indicados pela letra “x” na Figura 21. No grampo, adaptou-se o furo de modo que a saída do fluido do grampo entrasse exatamente no furo de 3 mm feito na superfície superior das ferramentas de metal duro, mostrada anteriormente na Figura 20(a).

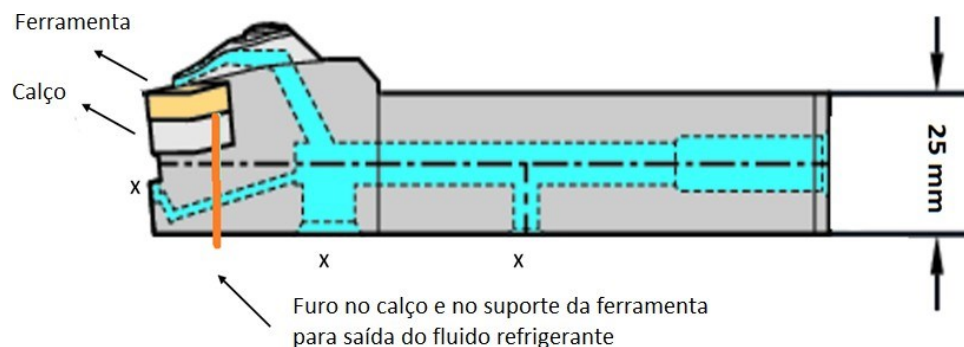


Figura 21 - Suporte Ferramenta DSSNL2525X12-P. Adaptado de Walter Tools (2021).

Tanto na entrada como na saída do fluido refrigerante secundário foram instalados conectores roscados de conexão rápida para o encaixe das mangueiras. Uma borracha foi adaptada junto ao grampo para coibir o vazamento de fluido entre o grampo e a ferramenta, Figura 22.



Figura 22 – Suporte Ferramenta, detalhe grampo e conector da mangueira (elaborada pelo autor).

As pastilhas apresentavam ângulos de folga e de saída de  $0^\circ$ , porém o suporte da ferramenta tinha uma inclinação de modo que os ângulos do conjunto ferramenta e porta-ferramenta são dados na Tabela 4, assim como o raio de ponta da ferramenta.

Tabela 4 - Geometria do conjunto ferramenta e porta-ferramenta (elaborado pelo autor).

| Classe ISO                            | K10        |
|---------------------------------------|------------|
| Ângulo de saída ( $\gamma_0$ )        | $-8^\circ$ |
| Ângulo de posição primário ( $X_r$ )  | $45^\circ$ |
| Ângulo de posição primário ( $X_r'$ ) | $45^\circ$ |
| Ângulo de ponta ( $\epsilon_r$ )      | $90^\circ$ |
| Ângulo de folga ( $\alpha_0$ )        | $8^\circ$  |
| Ângulo de cunha ( $\beta_0$ )         | $90^\circ$ |
| Raio de ponta ( $r_s$ )               | 1,2 mm     |

### 3.2. MATERIAL DA PEÇA

O material da peça utilizado nos ensaios de usinagem foi uma barra de ferro fundido cinzento FC-300, com resistência à tração de 300 MPa, segundo norma ABNT NBR 6589 de fabricação da empresa Fundições Tupy S.A. Para a realização da micrografia da estrutura do material retirou-se uma amostra de material da barra de ferro fundido cinzento FC-300 e seguiu-se os seguintes passos abaixo:

- Retirada de um pedaço da barra na serra de corte.
- Lixamento da superfície.
- Polimento até atingir superfície espelhada.
- Ataque em solução de Nital.
- Observação em Microscópio.

A Figura 23 mostra a microestrutura do material em diferentes ampliações, nota-se que a sua matriz é ferrítica-perlítica, o que confere ao material uma maior resistência mecânica devido à maior presença de cementita, lamelas de tonalidade branca, intercalada com a ferrita.

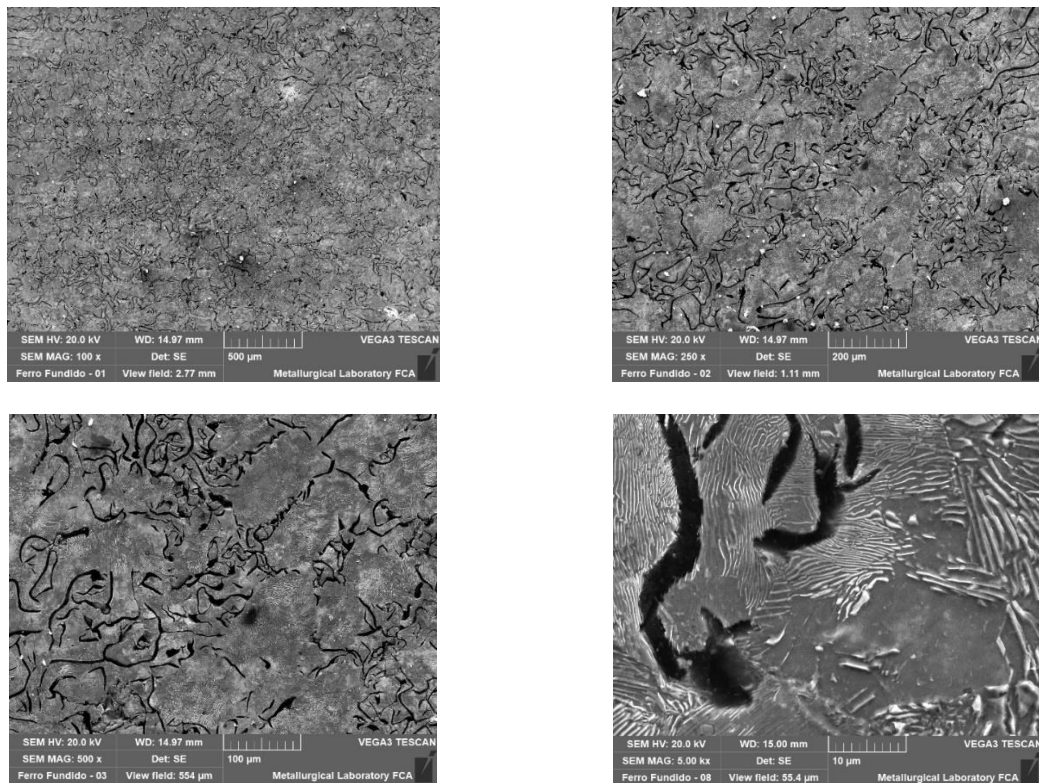


Figura 23 – Microestrutura do ferro fundido cinzento FC-300 (elaborado pelo autor).

Observa-se também que, por se tratar de um ferro fundido cinzento mais resistente, os veios de grafita, em cor preta, são um pouco mais espessos diminuindo a concentração de tensão. Tal material foi fabricado pelo processo de fundição contínua, em que o metal líquido é vazado a partir de um forno alimentador até uma coquilha de grafite refrigerada a água. Essa coquilha tem forma e dimensões do perfil desejado.

A fim de determinar a composição química do material selecionado fez-se uma análise de EDS em uma amostra da peça. A Figura 24 região onde se deu a análise de EDS na amostra de ferro fundido cinzento FC-300.



Figura 24 - Região de análise de EDS (elaborado pelo autor).

O espectro dos elementos químicos presentes no material é dado pelas Figura 25 e 26. Tal espectro é resultado da quantificação de energia dissipada pela amostra após ser excitada por uma fonte de energia – feixe de elétrons. Como cada elemento químico requer certa quantidade de energia para expulsar seu elétron da camada mais externa, essa diferença de energia é calculada e a partir dela gera-se um espectro da composição química do material.

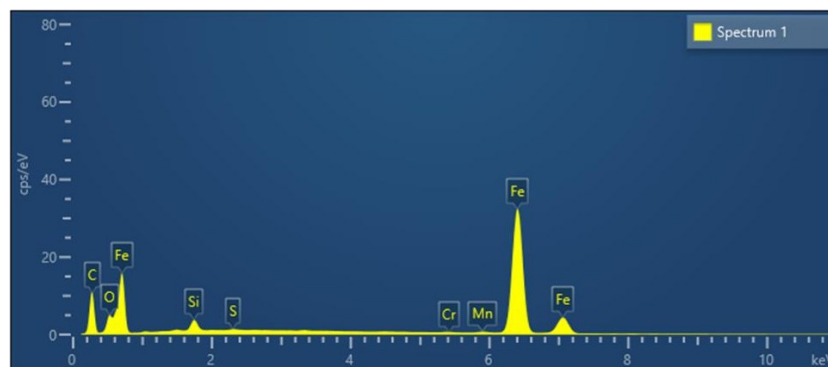


Figura 25 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).

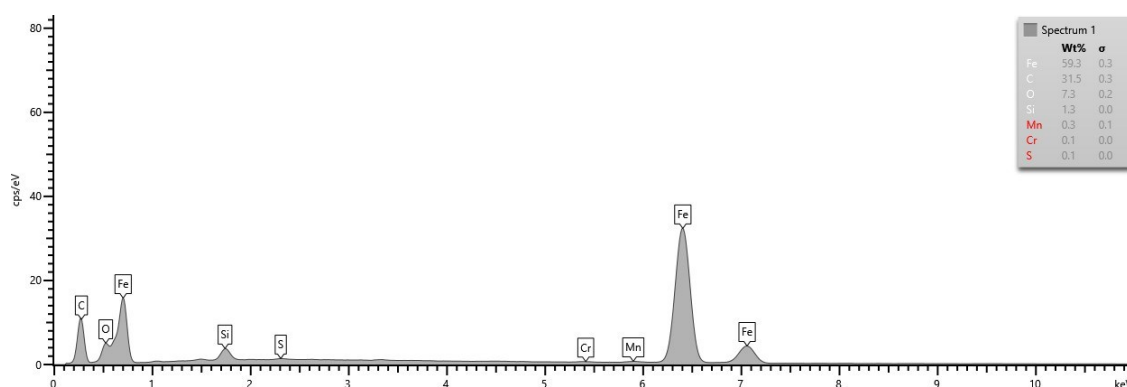


Figura 26 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).

A Tabela 5 mostra o resultado da análise de EDS mostrando a porcentagem em peso de cada elemento e a porcentagem em peso atômico de cada elemento químico presente no material FC-300.

Tabela 5 - Espectro dos elementos químicos presentes na composição do material (elaborado pelo autor).

| Elemento | Tipo de Linha | Peso % | Peso % Sigma | Peso atômico % |
|----------|---------------|--------|--------------|----------------|
| C        | K série       | 31.51  | 0.34         | 62.46          |
| O        | K série       | 7.29   | 0.23         | 10.85          |
| Si       | K série       | 1.31   | 0.04         | 1.11           |
| Fe       | K série       | 59.30  | 0.34         | 25.28          |
| Cr       | K série       | 0.14   | 0.04         | 0.07           |
| Mn       | K série       | 0.35   | 0.06         | 0.15           |
| S        | K série       | 0.11   | 0.03         | 0.08           |
| Total    |               | 100.00 |              | 100.00         |

Ao compararmos a composição química do material feita a partir da análise de EDS, mostrada na Tabela 6, com a composição química fornecida pelo fabricante, mostrada na Tabela 7, nota-se que a presença do carbono detectada pelo EDS foi expressivamente superior à relatada pelo fabricante. A análise de EDS mostrou uma presença de oxigênio, a qual não foi especificada pelo fabricante. Já a presença de fósforo que o fabricante relata em no máximo 0,20 % Tabela 6 não foi detectada pela análise de EDS. Já as porcentagens em peso, detectadas pela análise de EDS, dos elementos químicos silício, manganês e cobre se encontram dentro das faixas de porcentagem relatadas pelo fabricante.

Tabela 6 - Composição química do ferro fundido cinzento FC-300 (elaborado pelo autor).

| Composição Química FC-300 |        |
|---------------------------|--------|
| Fe                        | 59,3 % |
| C                         | 31,5 % |
| O                         | 7,3 %  |
| Si                        | 1,3 %  |
| Mn                        | 0,3 %  |
| Cr                        | 0,1 %  |
| S                         | 0,1 %  |

Tabela 7 - Composição química do ferro fundido cinzento FC-300 fornecida pelo fabricante TUPY. (TUPY, 2011).

| Composição Química FC-300 |               |
|---------------------------|---------------|
| C                         | 2,80% - 3,70% |
| Si                        | 2,20% - 2,70% |
| Mn                        | 0,20% - 0,70% |
| P                         | 0,20% máx.    |
| S                         | 0,15% máx.    |
| Cr                        | 0,10% máx.    |

Realizou-se um ensaio de dureza Brinell em um durômetro de bancada da fabricante LECO, a fim de determinar a dureza do material selecionado. Primeiramente, fez-se uma calibração no durômetro utilizando uma chapa de ferro fundido cinzento, conforme mostra Figura 27.

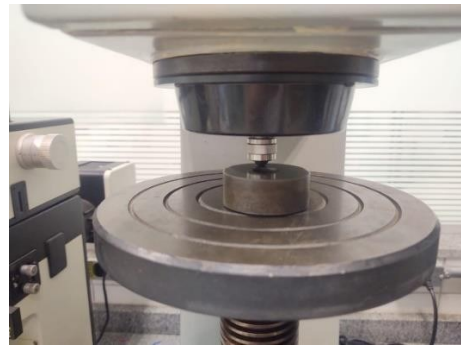


Figura 27 - Calibração do durômetro (elaborado pelo autor).

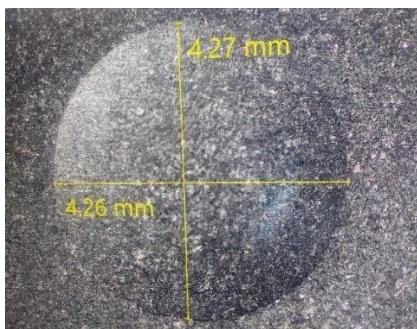
Foram realizadas três medições de dureza para uma amostra do material FC-300, as calotas esféricas impressas no material ensaiado são mostradas na Figura 28 (c), (d) e (e), assim como a medição dos diâmetros das calotas. Para essas medições foi utilizado uma carga de 29419 N e a esfera de aço temperado do durômetro tinha um diâmetro de 10 mm. A Figura 28(a) mostra a amostra de material de ferro fundido cinzento FC-300 que foi retirada da barra e a Figura 28(b) mostra a amostra sobre compressão durante o ensaio de dureza Brinell.



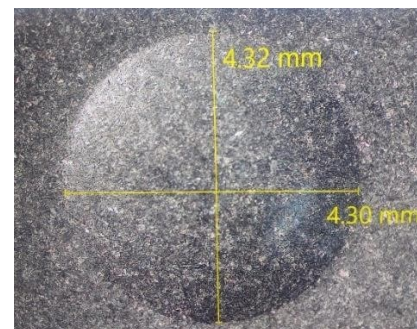
a) Amostra de material FC-300



b) Ensaio de dureza Brinell



c) Calota esférica impressa no material ensaiado, medição 1.



d) Calota esférica impressa no material ensaiado, medição 2.



d) Calota esférica impressa no material ensaiado, medição 3.

Figura 28 - Medição de dureza Brinell (elaborado pelo autor).

As medições de dureza Brinell e o resultado da medição são dados pela Tabela 8.

Tabela 8 - Dureza Brinell do FC-300 (elaborado pelo autor).

| Dureza do material FC-300 |               |
|---------------------------|---------------|
| Medição 1                 | 196 HB        |
| Medição 2                 | 196 HB        |
| Medição 3                 | 199 HB        |
| Resultado da Medição      | 197 ± 2,82 HB |

### 3.3.ELABORAÇÃO DOS ENSAIOS DE USINAGEM

Para atingimento do objetivo desta dissertação, ou seja, comparar o efeito do uso da ferramenta com refrigeração interna com as FSRI, montou-se um planejamento experimental específico. Como parâmetros de usinagem, decidiu-se variar a velocidade de corte em três níveis a fim de ter uma maior faixa de valores: 150, 200 e 250 m/min. Para a profundidade de usinagem optou-se por dois níveis de variação, sendo 1 e 1,5 mm, a fim de que possíveis variações das propriedades físicas com diferentes diâmetros da barra de ferro fundido cinzento fossem evitadas. Já o avanço foi mantido constante em 0,1 mm/rot para todos os ensaios, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros dos ensaios de usinagem (elaborado pelo autor).

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| Velocidade de corte [m/min]   | 150 – 200 – 250           |
| Avanço [mm/rot]               | 0,1                       |
| Profundidade de usinagem [mm] | 1 – 1,5                   |
| Meio                          | FSRI – FRI com água (2°C) |

Para validar de forma estatística os resultados foi feito um planejamento fatorial misto onde todos os fatores e interações foram avaliados. O planejamento contou com três fatores (meio, velocidade de corte, profundidade de usinagem), sendo que para o meio e para a velocidade de corte teve-se dois níveis e para a profundidade de corte três níveis, totalizando 12 condições diferentes conforme mostra a Tabela 10. Do mesmo modo, foram realizados também duas réplicas para cada condição, totalizando 36 ensaios.



Tabela 10- Condições dos ensaios de usinagem com planejamento fatorial misto (elaborado pelo autor).

| Condição | Meio | Fatores       |            |
|----------|------|---------------|------------|
|          |      | $v_c$ [m/mim] | $a_p$ [mm] |
| 1        | FRI  | 150           | 1          |
| 2        | FRI  | 200           | 1          |
| 3        | FRI  | 250           | 1          |
| 4        | FSRI | 150           | 1          |
| 5        | FSRI | 200           | 1          |
| 6        | FSRI | 250           | 1          |
| 7        | FRI  | 150           | 1,5        |
| 8        | FRI  | 200           | 1,5        |
| 9        | FRI  | 250           | 1,5        |
| 10       | FSRI | 150           | 1,5        |
| 11       | FSRI | 200           | 1,5        |
| 12       | FSRI | 250           | 1,5        |

Os ensaios de usinagem foram realizados, no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no torno CNC ROMI Multiplic 35D com potência principal de 11032 W e rotação máxima 3000 rpm (Figura 29). Primeiramente a barra foi limpa com passe de uma ferramenta de metal duro, com o objetivo de retirar oxidação e garantir uma boa estabilidade na máquina. Após essa limpeza, mediu-se o diâmetro da barra a fim de programar o código na CNC, medindo 94 mm de diâmetro.



Figura 29 - Torno CNC com o sistema de refrigeração ao lado (Barbosa, 2021)

Os ensaios foram cuidadosamente planejados tendo em vista sua realização durante a pandemia da Covid-19. Foram tomadas todas as precauções sanitárias necessárias para o bom andamento das atividades, bem como resguardar a segurança do operador do CNC que pertencia ao grupo de risco. Por essa razão, os testes foram condensados o máximo possível.

Este trabalho foi realizado com um lote ferramentas internamente refrigeradas (FRI) produzido em parceria com a empresa Nipo-tec. Para executar todos os ensaios foram usadas 4 arestas, sendo duas arestas FRI e duas arestas de ferramenta maciça sem galerias internas, de modo a permitir a comparação, a qual é objetivo deste trabalho. Definiu-se a nomenclatura abaixo (Tabela 11) para facilitar a compreensão dos resultados:

Tabela 11 - Referência adotada para nomear as arestas de corte de acordo com a condição de corte (elaborado pelo autor).

| Condição  | Referência adotada |
|---|--------------------|
| Aresta refrigerada internamente para $a_p = 1$ mm   | RFI 1 mm           |
| Aresta refrigerada internamente para $a_p = 1,5$ mm | RFI 1,5 mm         |
| Aresta sem refrigeração interna para $a_p = 1$ mm   | FSRI 1 mm          |
| Aresta sem refrigeração interna para $a_p = 1,5$ mm | FSRI 1,5 mm        |

A Figura 30 mostra um esquema de como se deu os ensaios. Realizou-se os ensaios para a profundidade de usinagem  $a_p = 1$  mm, iniciando com a aresta “FRI 1 mm”. Realizou-se teste e duas réplicas. Foram ensaios que duraram aproximadamente 15 segundos de aquisição do sinal da força de corte, para cada condição de velocidade de corte. Após os 9 ensaios com a aresta “FRI 1 mm” em azul, trocou-se de ferramenta para uma maciça e em seguida, realizou-se os ensaios sem refrigeração com a aresta “FSRI 1 mm”. Após terminar os 18 ensaios, retirou-se a barra do torno CNC deu-se início à medição da rugosidade. O mesmo procedimento, utilizando a mesma barra de FC-300 se repetiu para a condição de profundidade de usinagem  $a_p = 1,5$  mm.

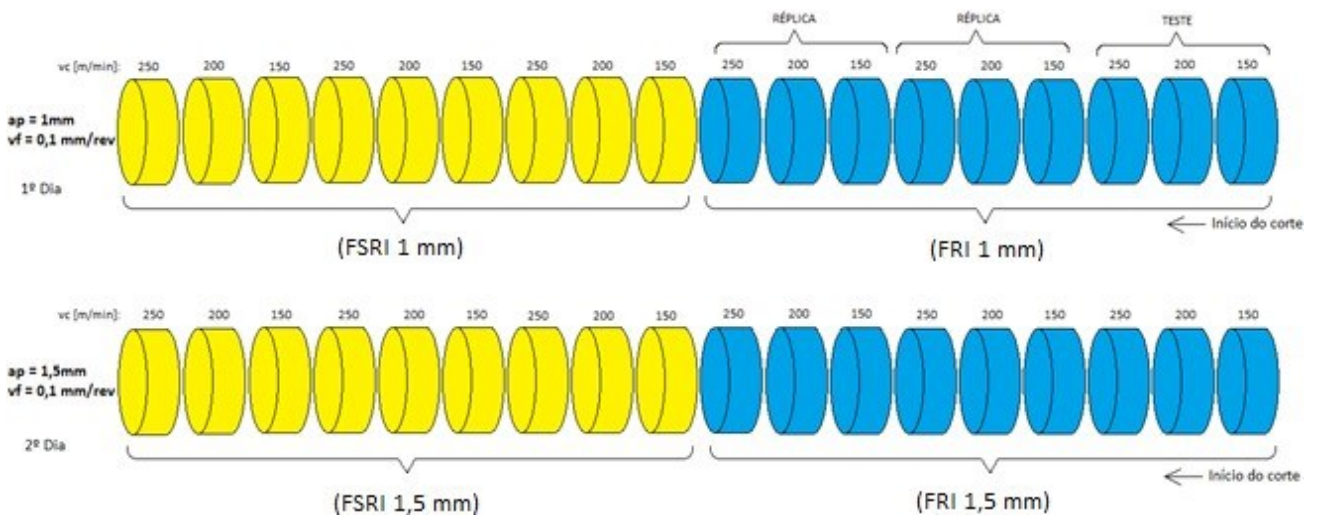


Figura 30 - Diagrama da barra de ferro fundido exemplificando os ensaios realizados (elaborado pelo autor).

### 3.4.EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Durante os ensaios de usinagem ocorreu a medição da força de corte ( $F_c$ ) por meio do dinamômetro da fabricante Kistler Instruments modelo 9265B, Figura 31(a), que tem funcionamento baseado em cristais piezoelétricos. O amplificador de sinal 5019A, também da fabricante Kistler Instruments, e a placa de aquisição de sinais modelo NI PCO-6036E da National Instrument, ficavam em uma cabine específica – Figura 31(b). O sinal da medição era enviado para um notebook com o programa Labview 7.6 em que o sinal era salvo em arquivo de .txt.



Figura 31 – a) Dinamômetro, b) Amplificador de sinais e placa de aquisição de sinais. (Barbosa, 2021)

Em cada ensaio o tempo de aquisição do sinal da força de corte ( $F_c$ ) se dava por 15 segundos, com uma frequência de 30 Hz. O sinal da força de corte medida pelo dinamômetro ( $F_{c, \text{medido}}$ ) foi corrigido por uma curva de calibração dada pela Eq. (8).

$$F_c = 0,935 \cdot F_{c, \text{medido}} - 21,34655 \pm 15 \text{ N} \quad (8)$$

Em seguida, com a correção realizada pela curva de calibração, os dados brutos foram tratados por meio do software MatLab® R2018a, em que se calculou a força de corte média para cada condição de ensaio.

Em se tratando da medição de rugosidade, esta foi realizada com um rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic-S128 (Figura 32), calibrado e aferido conforme Anexo I desta dissertação. Este equipamento possui resolução de  $0,05 \mu\text{m}$  e agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de  $0,2 \mu\text{m}$ . Foram realizadas três medições para cada condição, de modo que a barra era rotacionada em  $120^\circ$  entre uma medição e outra. As medições foram feitas em uma sala à  $20^\circ\text{C}$ . Seguindo a norma ISO 4288 adotou-se um *cut-off* ( $\lambda$ ) de 2,5 mm.



Figura 32 - Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic-S128 (elaborado pelo autor).

Os dados de cada medição foram tratados no software TalyProfile Silver 7.1, em que se visualizava o perfil de rugosidade. Antes de calcular os parâmetros de rugosidade foram aplicados um filtro de desnível a fim de retirar possíveis erros de inclinação do sistema de

medição, e um filtro para a retirada de micro rugosidade de  $0,8 \mu\text{m}$ . Os parâmetros  $R_a$  e  $R_q$  foram em seguida tratados estatisticamente.

Para a análise das superfícies de saída e das superfícies de folga primária das ferramentas foram realizadas imagens a partir do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo EVO MA10, fabricado pela empresa Zeiss. Antes as ferramentas passaram por uma limpeza de três horas em uma máquina de ultrassom DNS Ultrasonic Cleaner - 3060, utilizando uma solução de nital à 5%. O técnico fixou as ferramentas de modo que todas as fotos fossem retiradas na mesma posição.

As análises de espectrometria foram realizadas pelo equipamento, EDS modelo INCAx-act 51-ADD0048 fabricado pela empresa Oxford Instruments, tal equipamento é instalado junto MEV (Figura 33). Para as análises de espectrometria, selecionava-se uma região de análise na superfície de saída da ferramenta pertencente à aresta de corte que foi submetida aos ensaios de usinagem. Estes equipamentos pertencem à Faculdade de Engenharia Química da UFU.



Figura 33 - Microscópio de varredura eletrônico (MEV) e equipamento EDS (elaborado pelo autor).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da utilização da ferramenta desenvolvida, apresentada no Capítulo III desta dissertação, foram realizados ensaios de usinagem a fim de obter as variáveis de saída. Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais encontrados no trabalho, o qual foi subdividido em três partes, sendo elas: (i) análise dos resultados da força de corte ( $F_c$ ); (ii) análise dos resultados da rugosidade superficial  $R_a$  e  $R_q$ ; e por fim, (iii) análise das superfícies de saída de folga principal das ferramentas.

#### 4.1. ANÁLISE DA FORÇA DE CORTE DURANTE A USINAGEM

Durante os ensaios de usinagem foram medidas as forças de corte para cada condição prevista no planejamento experimental. A partir dessa medição o sinal adquirido foi corrigido pela curva de calibração – conforme Eq (8) apresentada anteriormente no item 3.3 desta dissertação – e tratado no software MatLab® a fim de que fosse calculada a força de corte média para cada medição. Os resultados de força de corte média estão apresentados no Anexo II.

Em suma, foram comparados os resultados da  $F_c$  na ferramenta desenvolvida neste trabalho com a ferramenta convencional trabalhando sem refrigeração. A Figura 34 mostra o resultado dessa medição  $F_c$  para todas as condições de usinagem definidas no planejamento experimental. A barra de erro representa o desvio padrão entre as medições para a mesma condição.

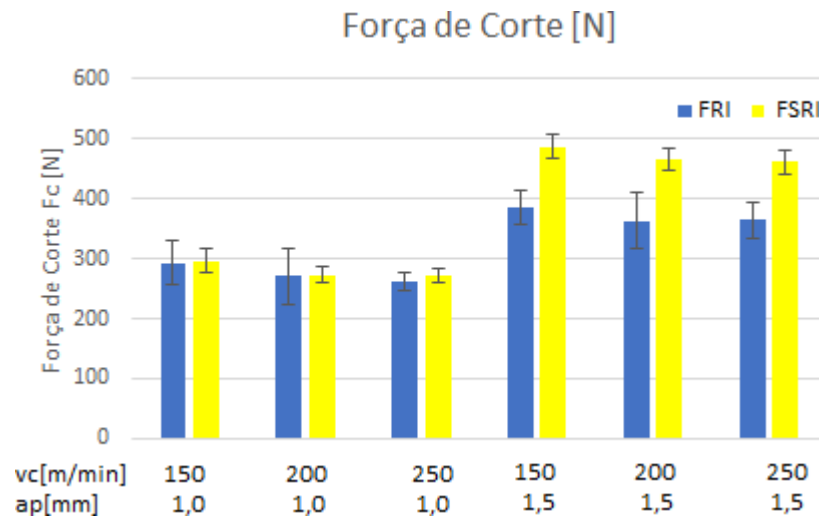


Figura 34 – Resultado da medição de Força de corte  $F_c$  (elaborado pelo autor).

Para estudar o efeito da refrigeração interna da ferramenta (FRI), elaborou-se, por meio do software Statistica®, uma análise de variância preliminar (ANOVA) da força de corte ( $F_c$ ) considerando todas as variáveis de entrada, ou seja: meio de refrigeração (FRI ou FSRI); velocidade de corte; e profundidade de usinagem. Foi adotado um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5% (Valor-p < 0,05). A partir do resultado mostrado na Figura 34, notou-se que as variáveis “meio”, “velocidade” e “profundidade” apresentaram significância para o comportamento da  $F_c$ , ou seja, a variação delas implicaram em variação da força de corte. Do mesmo modo, a interação “meio x profundidade” também apresentou esse comportamento, sendo significativa para o módulo da  $F_c$ . O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) na análise da força de corte foi calculado em 0,9835, indicando que os fatores utilizados para esta análise explicam 98,35% do comportamento da  $F_c$ .

Tabela 12 - Análise de variância preliminar para a força de corte com todos os fatores (elaborado pelo autor).

| Fator                     | S.Q.     | G.L. | Q.M.     | F        | Valor-p  |
|---------------------------|----------|------|----------|----------|----------|
| Meio                      | 25158,8  | 1    | 25158,8  | 42,3722  | 0,000000 |
| Velocidade                | 3950,6   | 1    | 3950,6   | 6,6535   | 0,015232 |
| Profundidade              | 185052,7 | 1    | 185052,7 | 311,6634 | 0,000000 |
| Meio x Velocidade         | 0,4      | 1    | 0,4      | 0,0007   | 0,979211 |
| Meio x Profundidade       | 20748,4  | 1    | 20748,4  | 34,9442  | 0,000002 |
| Velocidade x Profundidade | 22,0     | 1    | 22,0     | 0,0371   | 0,848601 |

|            |          |    |       |
|------------|----------|----|-------|
| Erro       | 17219,0  | 29 | 593,8 |
| Total S.Q. | 252152,0 | 35 |       |

A partir dos resultados da Tabela 12 anteriormente apresentada, gerou-se o diagrama de Pareto mostrado na Figura 35. Por meio dele, observa-se que a variável que mais impacta no aumento da força de corte ( $F_c$ ) é a profundidade de usinagem. Isto se deve à maior área da seção de corte (A) a ser cisalhada o que demanda maior força. Essa explicação pode ser teoricamente dada por meio da Eq (9) em conjunto com a Eq (10). Nelas, mostra-se que a força de corte é diretamente proporcional à área da seção de corte, e esta, por sua vez, é diretamente proporcional à profundidade de usinagem ( $a_p$ ).

$$F_c = K_s \cdot A \quad (9)$$

$$A = a_p \cdot f \quad (10)$$

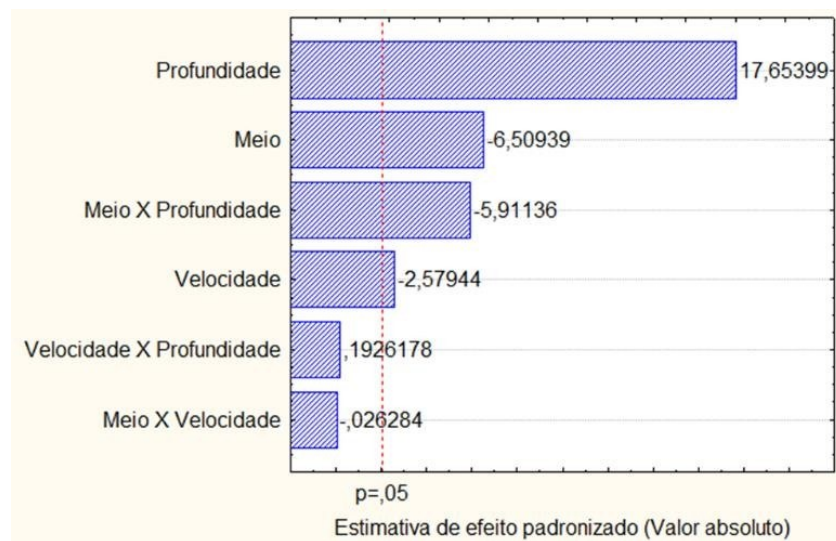


Figura 35 - Diagrama de Pareto para a força de corte  $F_c$  (elaborado pelo autor).

Diversos autores afirmam que a força de corte tende a diminuir em decorrência do aumento da temperatura (Trent e Wright, 2000; Machado et al., 2015). Porém, este trabalho obteve que o uso do sistema de refrigeração interna de ferramenta (FRI) resultou em menores esforços para usinagem quando comparado com o corte sem refrigeração. Tais quedas na  $F_c$  foram mais expressivas para os ensaios realizados com  $a_p = 1,5$  mm, sendo a maior queda de



21,07 % na  $F_c$  para a condição de 250 m/min. A Figura 36, mostra um exemplo do sinal da força de corte  $F_c$  medida, comparando o uso da FRI com o corte sem refrigeração, para a condição  $a_p = 1,5$  mm e  $v_c = 250$  m/min.

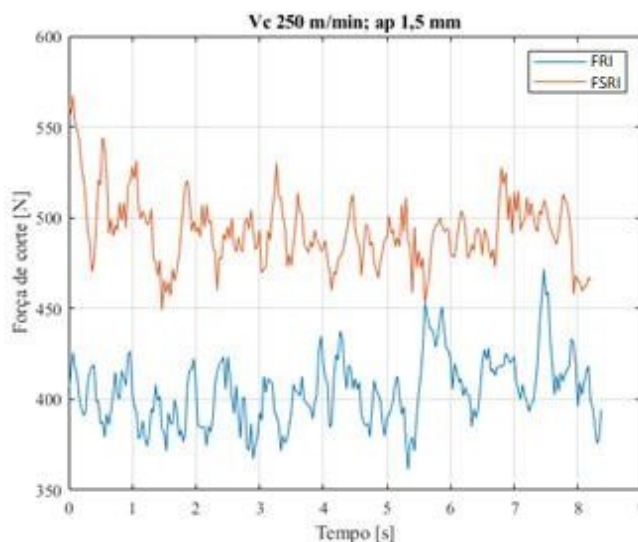


Figura 36 - Exemplo do sinal da  $F_c$  para a condição  $v_c = 250$  m/min e  $a_p = 1,5$  mm (elaborado pelo autor).

Uma possível explicação para os resultados deste trabalho, em que o uso da FRI resultou em queda da força de corte (conforme mostra o diagrama de Pareto), pode ser explicado por uma variação na ductilidade do ferro fundido cinzento causada pela queda da temperatura próximo à zona de corte. Tal queda na temperatura foi comprovada pelo trabalho de França (2021), o qual utilizou o mesmo sistema de FRI e material – ferro fundido cinzento FC-300 – chegou-se ao resultado que a temperatura na região de contato entre a ferramenta-peça apresentou uma queda de 21,5 % quando se compara uso da FRI com corte sem refrigeração. Desta maneira, podemos argumentar que quando se opera com o sistema de refrigeração (FRI) o material – ferro fundido cinzento – estará mais frágil do que quando está operando sem refrigeração – temperaturas maiores. Como a formação do cavaco na usinagem de ferro fundido, se dá pela completa ruptura do plano de cisalhamento formando o cavaco do tipo descontínuo, fatores que ajudam nessa propagação da trinca irão propiciar menores esforços de usinagem. Em resumo, a fragilização do material, devido à menor temperatura na zona de corte (com o uso da FRI), favoreceu a nucleação e propagação de trincas, facilitando a formação do cavaco descontínuo na usinagem do ferro fundido cinzento – resultando por fim, em menores esforços requeridos para o corte.

Trent e Wright (2000) explicam que as forças de corte estão intrinsecamente relacionadas à formação do cavaco e às zonas de fluxo e de escorregamento. Se por um lado maiores temperaturas favorecem o corte por reduzir a resistência mecânica (tensão de cisalhamento), por outro lado cavacos maiores geram maior área de contato entre zona de escorregamento aumentando o atrito e por consequência a energia mecânica gasta para realizar o corte. Isso implica em forças maiores, mesmo que haja temperaturas mais elevadas.

A interação entre o meio e a profundidade de usinagem é um indicativo de que o sistema de refrigeração obteve maior efeito em maiores profundidades de corte, uma vez que a maior área de contato entre o cavaco e a ferramenta favoreceu a troca térmica.

Das variáveis estatisticamente influentes, a velocidade de corte apresentou menor correlação com a força de corte, de maneira inversamente proporcional. A maior velocidade de corte tende a diminuir a força de corte devido a maior taxa de energia envolvida no processo. Essa energia térmica provoca o aquecimento do material diminuindo sua resistência ao cisalhamento, favorecendo o corte e causando uma menor força/potência requerida da máquina (Trent e Wright, 2000).

#### **4.2. ANÁLISE DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA $R_a$ e $R_q$**

As medições de rugosidade foram feitas logo após o ensaio de usinagem, conforme apresentado no item 3.2 desta dissertação. Em suma, foram realizadas três medições para cada ensaio. Os resultados da rugosidade para cada condição estão nos Anexos III e IV deste trabalho. A Figura 37 mostra as rugosidades  $R_a$  enquanto a Figura 38 mostra a rugosidade  $R_q$ , sendo que, em ambas, a barra de erro representa o desvio padrão identificado.

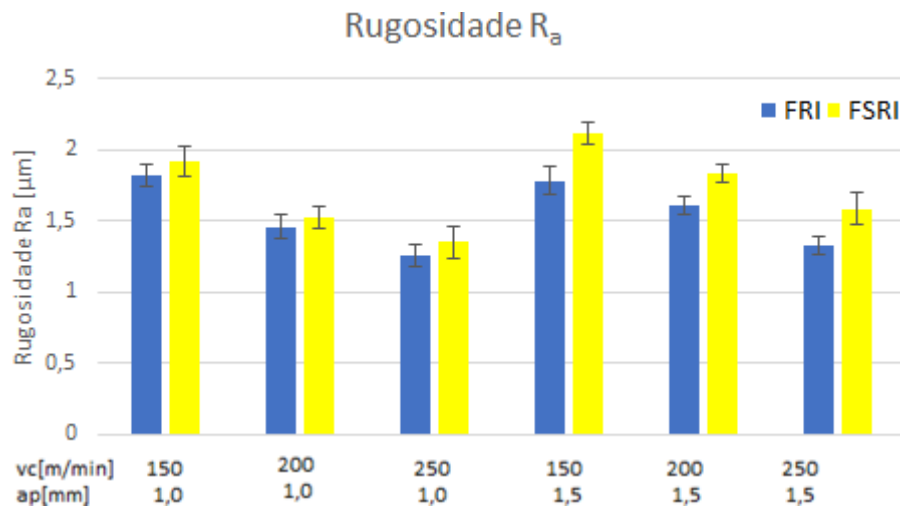


Figura 37- Resultado da medição da rugosidade  $R_a$  (elaborado pelo autor).

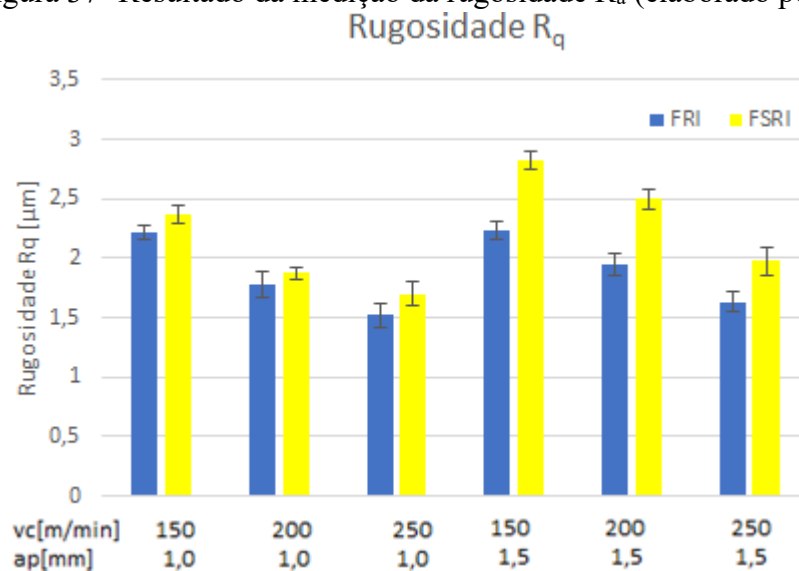


Figura 38 - Resultado da medição de rugosidade  $R_q$  (elaborado pelo autor).

Para fins estatísticos, elaborou-se uma análise de variância preliminar (ANOVA) da rugosidade  $R_a$  (Tabela 13) e  $R_q$  (Tabela 14) considerando todas as variáveis de entrada a fim de estudar o efeito da refrigeração interna da ferramenta (FRI). Com um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5% (Valor-p < 0,05), observou-se que tanto para o  $R_a$  quanto para o  $R_q$  as variáveis de “meio”, “velocidade” e “profundidade” foram significativas, ou seja, a variação delas implica em variação da rugosidade. Do mesmo modo, para o  $R_q$  a interação “meio x profundidade” também apresentou esse comportamento, sendo também significativa. Os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) foram de 0,90012 e 0,9146 respectivamente para o  $R_a$  e  $R_q$ ,

indicando que os fatores utilizados para esta análise explicam acima de 90% o comportamento dessas rugosidades.

Tabela 13 - Análise de variância preliminar para a rugosidade  $R_a$  com todos os fatores (elaborado pelo autor).

| Fator                     | S.Q.     | G.L. | Q.M.     | F        | Valor-p  |
|---------------------------|----------|------|----------|----------|----------|
| Meio                      | 0,199511 | 1    | 0,199511 | 24,6918  | 0,000030 |
| Velocidade                | 1,886539 | 2    | 0,943269 | 116,7404 | 0,000000 |
| Profundidade              | 0,127211 | 1    | 0,127211 | 15,7438  | 0,000458 |
| Meio x Velocidade         | 0,010837 | 1    | 0,010837 | 1,3413   | 0,256594 |
| Meio x Profundidade       | 0,031211 | 1    | 0,031211 | 3,8627   | 0,059360 |
| Velocidade x Profundidade | 0,000937 | 1    | 0,000937 | 0,1160   | 0,735927 |
| Erro                      | 0,226242 | 28   | 0,008080 |          |          |
| Total S.Q.                | 2,482489 | 35   |          |          |          |

Tabela 14 - Análise de variância preliminar para a rugosidade  $R_q$  com todos os fatores (elaborado pelo autor).

| Fator                     | S.Q.     | G.L. | Q.M.     | F        | Valor-p  |
|---------------------------|----------|------|----------|----------|----------|
| Meio                      | 0,444444 | 1    | 0,444444 | 41,2461  | 0,000001 |
| Velocidade                | 2,633438 | 1    | 2,633438 | 244,3928 | 0,000000 |
| Profundidade              | 0,190678 | 1    | 0,190678 | 17,6956  | 0,000228 |
| Meio x Velocidade         | 0,023438 | 1    | 0,023438 | 2,1751   | 0,151036 |
| Meio x Profundidade       | 0,052900 | 1    | 0,052900 | 4,9093   | 0,034719 |
| Velocidade x Profundidade | 0,001837 | 1    | 0,001837 | 0,1705   | 0,682681 |
| Erro                      | 0,312487 | 29   | 0,010775 |          |          |
| Total S.Q.                | 3,659222 | 35   |          |          |          |

A partir das tabelas anteriores, foram elaborados os diagramas de Pareto apresentados na Figura 39 e na Figura 40. Eles mostram que a principal variável de influência na integridade superficial foi a velocidade de corte. A elevação da velocidade de corte, que para este trabalho se deu com um acréscimo de 50 m/min de um nível para outro, está diretamente relacionada ao aumento da temperatura na região de corte. Quanto maior o fluxo de cavaco, maior será a energia mecânica requerida da máquina para cisalhar o material, e por consequência maior a energia térmica dissipada no sistema. Esse aumento na temperatura acaba provocando uma

redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, o que culmina em menores forças de usinagem e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento da peça – queda da rugosidade (Lu et al., 2020; Machado et al., 2015).

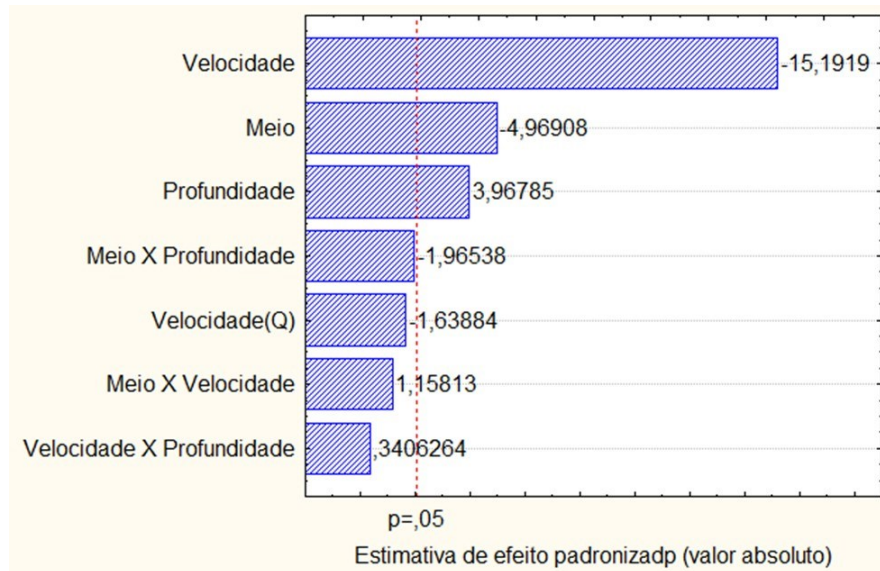


Figura 39 - Diagrama de Pareto para a rugosidade  $R_a$  (elaborado pelo autor).

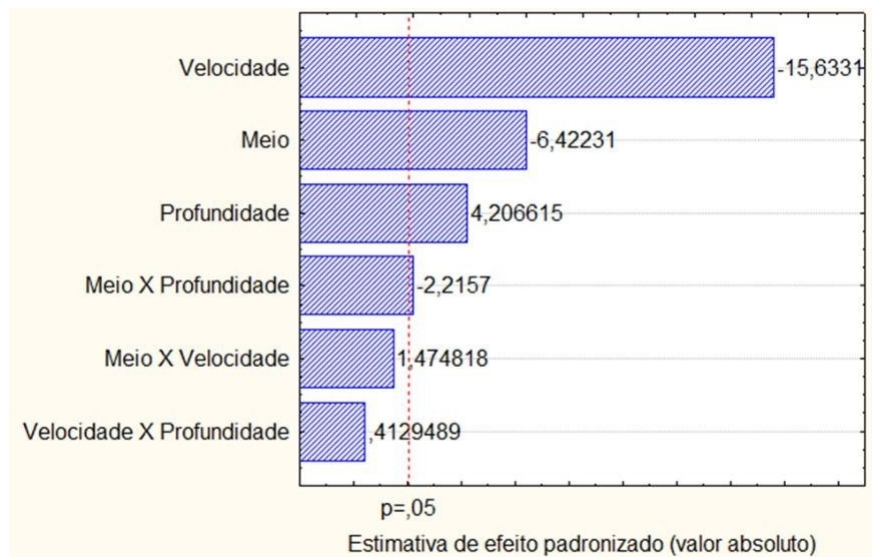


Figura 40 - Diagrama de Pareto para a rugosidade  $R_q$  (elaborado pelo autor).

Outra variável que influencia no acabamento da peça é a profundidade de usinagem. Essa profundidade de usinagem aumenta as forças de corte gerando maiores vibrações na

máquina. As ondulações causadas pelo corte da ferramenta na peça também aumentam com o incremento da profundidade de usinagem, resultando em maior rugosidade (Lu et al., 2020; Machado et al., 2015).

O uso das ferramentas refrigeradas internamente (FRI) gerou considerável melhoria da rugosidade tanto  $R_a$  quanto  $R_q$  em comparação com a usinagem sem refrigeração. Com o emprego das FRIs, considerando os testes com  $a_p = 1,0$  mm, a redução média para o  $R_a$  foi de 5,7%, e para o  $R_q$  de 7,5%. Já para a condição de corte mais severa, com  $a_p = 1,5$  mm, a redução média no  $R_a$  e  $R_q$  foram de 14,9% e 20,0%, respectivamente.

A partir dos dados adquiridos da  $F_c$  fez-se uma análise do desvio padrão de cada sinal medido. Visto que este parâmetro indica o grau de dispersão dos pontos em torno de sua média, é possível assim, ter um indicativo da vibração sentida no porta-ferramenta para cada condição com base em seu cálculo. Os resultados do desvio padrão médio da  $F_c$  para  $a_p = 1,0$  mm e  $a_p = 1,5$  mm são dados respectivamente pelas Tabela 15 e Tabela 16, mostradas abaixo.

Tabela 15 - Desvio padrão médio da  $F_c$  para  $a_p = 1,0$  mm (elaborado pelo autor).

| $v_c$ [m/min] | $a_p$ [mm] | FRI   | FSRI  |
|---------------|------------|-------|-------|
| 150           | 1 mm       | 16,14 | 16,19 |
| 200           | 1 mm       | 11,46 | 15,48 |
| 250           | 1 mm       | 15,03 | 15,17 |

Tabela 16 - Desvio padrão médio da  $F_c$  para  $a_p = 1,5$  mm (elaborado pelo autor).

| $v_c$ [m/min] | $a_p$ [mm] | FRI   | FSRI  |
|---------------|------------|-------|-------|
| 150           | 1,5 mm     | 17,94 | 21,43 |
| 200           | 1,5 mm     | 14,75 | 18,44 |
| 250           | 1,5 mm     | 18,70 | 21,69 |

Nota-se que para a condição de  $a_p = 1,0$  mm, o desvio padrão médio da  $F_c$  para as FRI foi ligeiramente inferior ao calculado para as ferramentas que trabalharam sem refrigeração. Por outro lado, para a condição de  $a_p = 1,5$  mm, o desvio padrão médio da  $F_c$  para as FRI foi consideravelmente inferior aos apresentados pelas FSRI, indicando que a vibração do sistema para as condições de corte sem refrigeração foi mais intensa do que para as condições de FRI.

Com isso, o uso das FRIs proporcionou um acabamento superficial superior quando se compara com as FSRI.

#### 4.3. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE SAÍDA E DAS SUPERFÍCIES PRINCIPAL DE FOLGA DAS FERRAMENTAS

Para a análise das superfícies das ferramentas foram obtidas imagens a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de folga primária (Figura 41) e da superfície de saída (Figura 42). Cada ferramenta esteve em operação por um comprimento de usinagem fixo de 117 mm, com a mesma sequência de condições de ensaios. A nomenclatura para identificar cada aresta de corte foi a adotada como anteriormente pela Tabela 11, do Capítulo III.

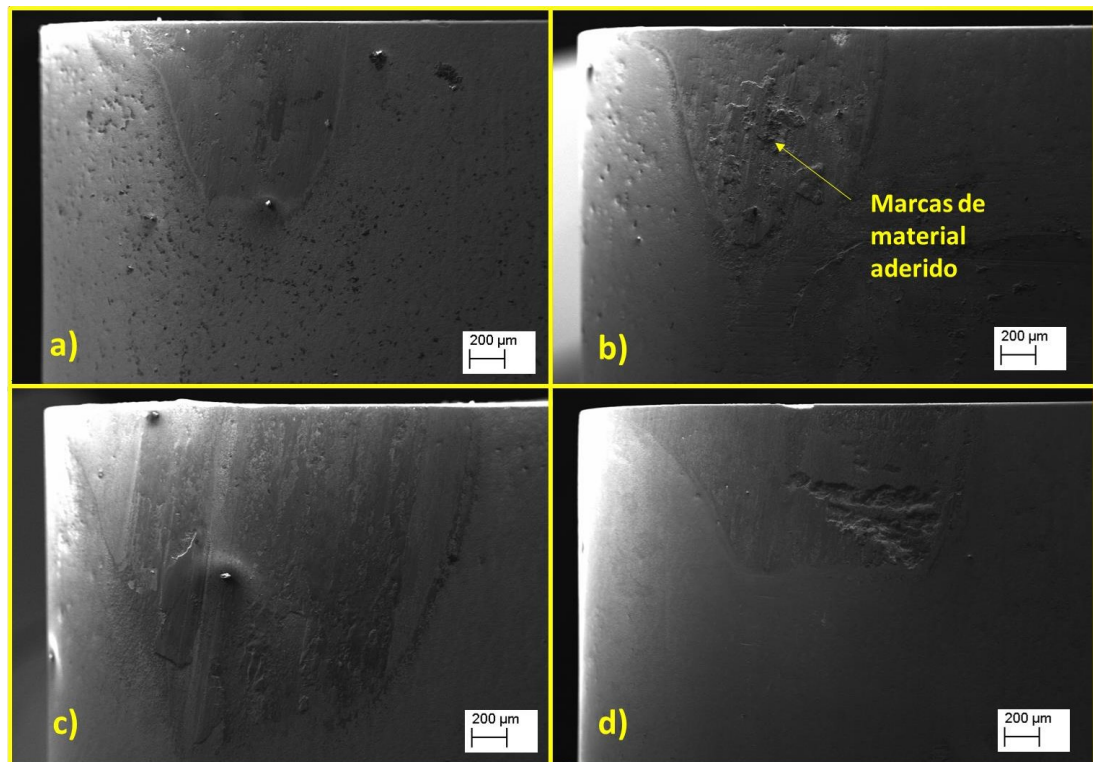


Figura 41 – (a) FSRI 1,0 mm; (b) RFI 1 mm; (c) FSRI 1,5 mm; (d) RFI 1,5 mm MEV – superfície de folga primária (elaborado pelo autor).

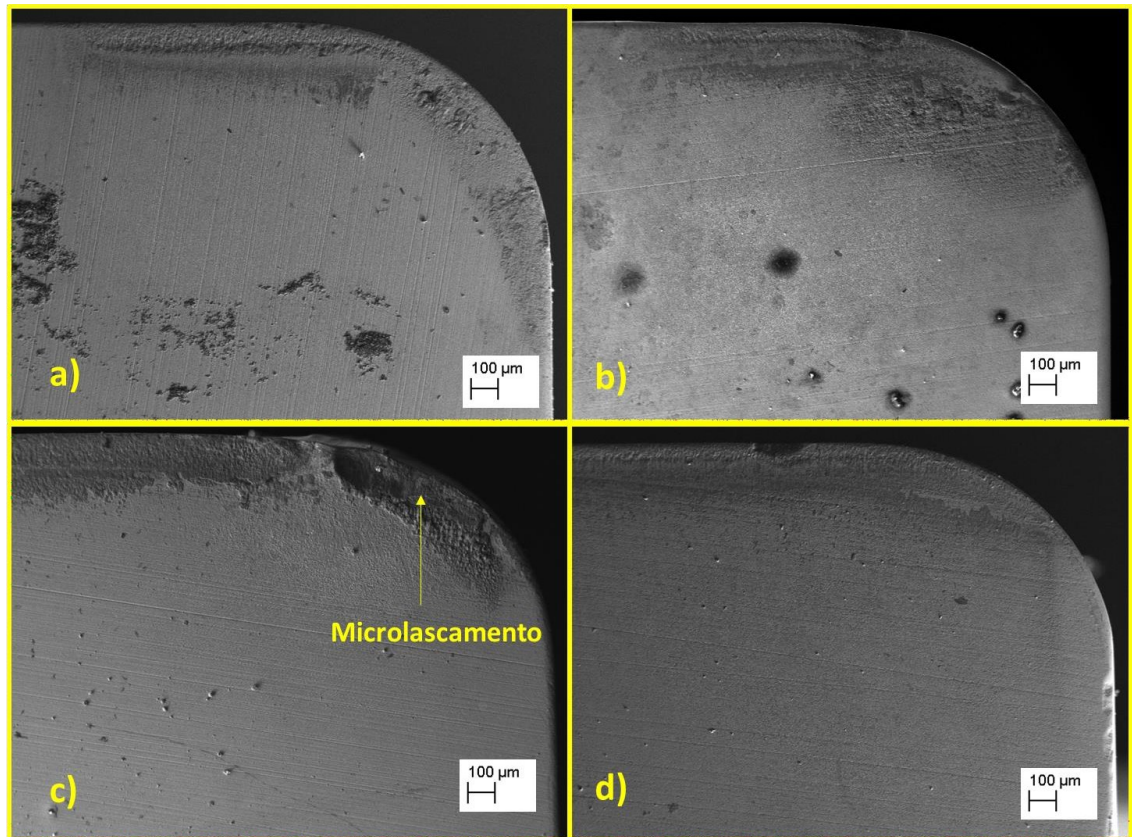


Figura 42 - (a) FSRI 1,0 mm; (b) RFI 1 mm; (c) FSRI 1,5 mm; (d) RFI 1,5 mm  
MEV – superfície de saída (elaborado pelo autor).

O tipo mais comum de desgaste em ferramentas de corte é o desgaste de flanco, o qual ocorre nas superfícies de folga da ferramenta sendo gerado pelo contato entre ferramenta e a peça. Ao observar a Figura 41, nota-se que para todas as ferramentas analisadas a linha que compõe a aresta de corte está praticamente intacta, sem nenhum desvio aparente. Indicando, assim, desgaste de flanco foi praticamente inexistente para todas as ferramentas analisadas. Isso se explica visto que os ensaios de usinagem para a medição de força são ensaios curtos e o material ensaiado – ferro fundido cinzento – é um material de boa usinabilidade, de forma que as ferramentas foram pouco exigidas e terminaram os ensaios praticamente sem desgaste de flanco aparente.

Ainda sobre a Figura 41 (b), é possível notar algumas marcas de material aderido na aresta “RFI 1 mm” o que é totalmente comum devido ao fluxo do material da peça na superfície de folga principal.

A Figura 42 mostra a superfície de saída das ferramentas ensaiadas, nota-se que não houve desgaste de cratera em todas as ferramentas em questão. É possível notar a presença de



alguns indícios de material aderido na aresta “RFI 1 mm”. Para a condição de  $a_p = 1,5$  mm, a aresta que usinou sem refrigeração– “FSRI 1,5 mm” – apresentou um início de processo de lascamento e perda de material na ponta da ferramenta. Tal fato pode indicar que para condições mais severas de corte o uso da FRI pode retardar o desgaste da ferramenta em comparação com o corte sem refrigeração.

Para a análise de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) – Figura 43 – o espectro foi ajustado para os elementos químicos presentes no material da peça (Fe, C, Si, Mn, P, S e Cr) e da ferramenta (W, C e Co). A região de análise foi feita na superfície de saída das ferramentas de usinaram para  $a_p = 1,5$  mm. Os resultados, mostrado na Tabela 17, indicam que devido à alta presença do Fe ocorreu a presença de material aderido do FC-300 nas ferramentas de corte, tal fato é totalmente esperado visto que após qualquer processo de torneamento haverá uma certa quantidade de material da peça aderido na ferramenta.

Tabela 17 - Espectroscopia por energia dispersiva FRI e FSRI, com  $a_p = 1,5$  mm (elaborado pelo autor).

| Condição            | Espectro (Elementos) |      |      |      |      |      |       |      |       |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
|                     | C                    | Si   | P    | S    | Cr   | Mn   | Fe    | Co   | W     |
| FRI $a_p = 1,5$ mm  | 19,81                | 6,09 | 0,10 | 1,19 | 0,08 | 4,51 | 35,70 | 1,70 | 30,79 |
| FSRI $a_p = 1,5$ mm | 18,81                | 2,87 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 1,92 | 39,01 | 2,56 | 34,75 |

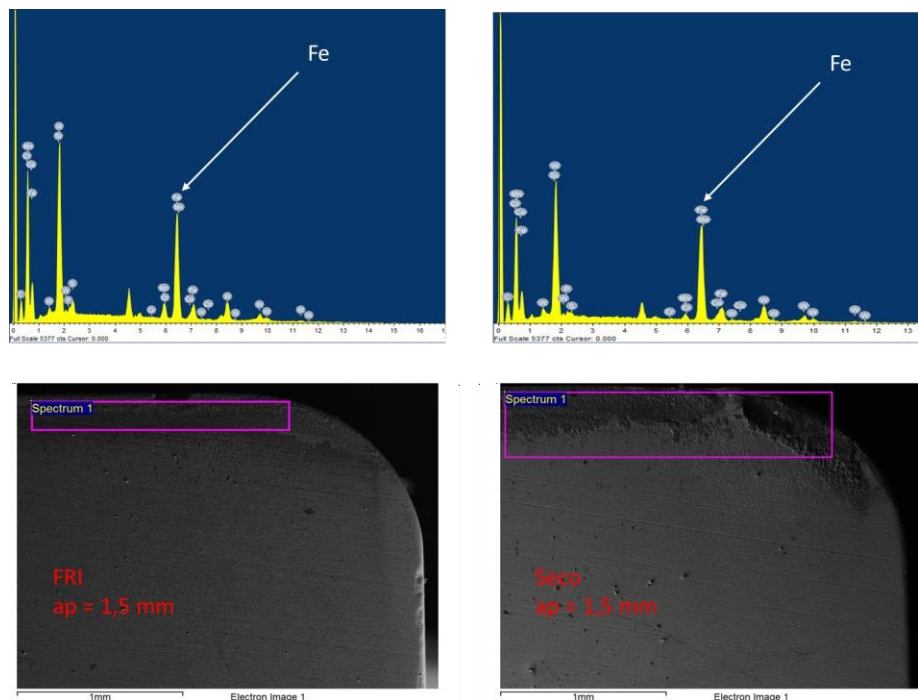


Figura 43 - Espectroscopia por energia dispersiva – EDS (elaborado pelo autor).

## CAPÍTULO V

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1. CONCLUSÕES

Como resultado deste trabalho, foi possível avaliar a influência do uso de ferramentas com refrigeração interna (FRI) na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC-300, em comparação com as FSRI. No intuito de atingir os objetivos propostos, foram fabricados canais internos de refrigeração – por meio do processo de eletroerosão – em um lote de pastilhas de metal duro. A ferramenta e o porta-ferramenta, ao serem montados juntos no subsistema de refrigeração, operaram com um fluxo de 3 l/min com água a 2 °C, circulando em uma em ciclo fechado.

Utilizou-se um planejamento experimental fatorial misto, com dois níveis para os fatores de profundidade de usinagem (1,0 e 1,5 mm), dois para o meio de refrigeração (FRI e a FSRI), e três níveis para o fator da velocidade de corte (150, 200 e 250 m/min). Foram ensaiadas 12 condições diferentes, sendo realizadas duas réplicas, de modo a resultar em 36 ensaios no total. As principais conclusões do trabalho foram:

- A análise da composição química do material por EDS apresentou incoerências com o fornecido pelo fabricante, principalmente em relação à expressiva presença de carbono. Outras divergências foram: (i) a detecção de oxigênio, o que não foi relatado pelo fabricante, e (ii) a não detecção de fósforo pelo EDS. Já os elementos químicos silício, manganês e cobre foram encontrados dentro das faixas de porcentagem relatadas pelo fabricante.
- O aumento da profundidade de usinagem de 1,0 mm para 1,5 mm resultou em um aumento da força de corte. Da mesma forma, o aumento da velocidade de

corte causou uma queda na força de corte, fato este devido ao amolecimento do material causado pelo aumento da temperatura, facilitando assim o cisalhamento.

- Os resultados mostraram uma queda na força de corte, principalmente na condição de  $a_p = 1,5$  mm. Tal resultado pode ser explicado pela fragilização do material, devido à queda na temperatura na zona de corte quando se utiliza a FRI. Esse processo favoreceu a nucleação e propagação de trincas, facilitando a formação do cavaco descontínuo, proporcionando assim menores forças de corte.
- Os resultados de rugosidade  $R_a$  e  $R_q$  mostraram que as variáveis mais significativas foram a “velocidade de corte”, “meio de usinagem” e “profundidade de usinagem”. Enquanto o aumento da velocidade de corte provocou uma queda na rugosidade, o aumento da profundidade de usinagem fez com que o acabamento da peça ficasse prejudicado. O uso da ferramenta internamente refrigerada (FRI) teve como resultado na condição de  $a_p = 1,0$  mm a redução média na rugosidade  $R_a$  e  $R_q$  de 5,7% e 7,5%, respectivamente. Já para a condição de corte com  $a_p = 1,5$  mm a redução média no  $R_a$  e  $R_q$  foi de 14,9% e 20,0%, respectivamente.

Assim, este estudo é capaz de comprovar que há benefícios na FRI utilizada neste trabalho em comparação com a FSRI. A partir desse resultado têm-se ganhos na qualidade final da peça produzida, bem como menores esforços requeridos pela máquina de usinagem. Esta dissertação é capaz de proporcionar tanto contribuição acadêmica quanto industrial, de modo a permitir pesquisas futuras no âmbito científico bem como aplicações industriais com sistemas de usinagem mais eficientes.

## 5.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Entre as principais sugestões para trabalhos futuros estão:

- Utilizar outros fluidos refrigerante que possam atingir menores temperaturas, ou até mesmo temperaturas criogênicas.

- Comparar o uso das ferramentas refrigeradas internamente (FRI) com a usinagem utilizando a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL).
- Projetar um sistema de refrigeração interna de ferramenta para outro tipo de processo de fabricação, tal como o fresamento.
- Realizar um estudo de fluidodinâmica e termodinâmica sobre o escoamento do fluido refrigerante dentro da ferramenta, analisando a troca térmica.
- Realizar um estudo utilizando o método da FRI a partir da variação dos tipos de materiais a serem usinados, tais como ligas de aços, titânio e níquel.

## CAPÍTULO VI

### 6. REFERÊNCIAS

ABNT (1986). NBR 6589. Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência à tração.

ABNT (2002). NBR 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade

ABNT (2008). NBR 4288. Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade

Ahmed, T., Mollick, N., Mahmud, S., & Ahmad, T. (2021). Analysis of Effects of Machining Parameters on Cutting Force Components in Turning AISI 201 Stainless Steel Using Cemented Carbide Cutting Tool Insert. *Materials Today: Proceedings*, 42, 832-837. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.416>

ASM Metals Handbook (2004). Properties and selection - Surface engineering. 10th Edition, Volume 5. ASM International, USA. 2535p.

Barbosa, L. M. Q. (2021). Torneamento de aço endurecido ABNT-D6 com ferramenta de PCBN refrigerada através de galerias internas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Bartz, W. J. (2001). Ecological and environmental aspects of cutting fluids. *Tribology & Lubrication Technology*, 57(3), 13.

Benedicto, E., Carou, D., & Rubio, E. M. (2017). Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia Engineering*, 184, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.075>

Beniwal, G., & Saxena, K. K. (2020). Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2337-2343. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.503>

Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)

Bobzin, K. (2017). High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>

Budak, E., & Altintas, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling—part II: application of the general formulation to common milling systems.

Byers, J. P. (2016). *Metalworking fluids*. crc Press.

Callister, W. D. (2002). *Ciência e engenharia de materiais. Uma introdução*, 5, 189-250.

Childs, T. H. C. (1980). The sliding wear mechanisms of metals, mainly steels. *Tribology international*, 13(6), 285-293. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90092-4)

Cunha, R. N. (2020). *Medição experimental de temperatura no torneamento da liga Ti-6Al-4V utilizando o método do termopar ferramenta-peça*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Dawson, S., & Schroeder, T. (2000). *Compacted graphite iron: a viable alternative*. Engineering Casting Solutions AFS.

Dearnley, P. A., & Trent, E. M. (1982). Wear mechanisms of coated carbide tools. *Metals Technology*, 9(1), 60-75.

Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production*, 83, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>

Demirbas, E., & Kobyas, M. (2017). Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013>

Dhananchezian, M., & Kumar, M. P. (2011). Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts. *Cryogenics*, 51(1), 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.10.011>

Dhar, N. R., & Kamruzzaman, M. (2007). Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of machine tools and manufacture*, 47(5), 754-759. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018>

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. (2006). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artliber Editora.

Dos Santos Torres, C., & Schaeffer, L. (2009). 7. Sinterização do compósito metal duro WC-Co. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 4(3), 58-63.

Fang, Z., & Obikawa, T. (2020). Influence of cutting fluid flow on tool wear in high-pressure coolant turning using a novel internally cooled insert. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1114-1125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.028>

Fernandes, G. H. N., Lopes, G. H. F., Barbosa, L. M. Q., Martins, P. S., & Machado, Á. R. (2021). Wear mechanisms of diamond-like carbon coated tools in tapping of AA6351 T6 aluminium alloy. *Procedia Manufacturing*, 53, 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.032>

França, P. H. P. (2021). *Estudo da temperatura em ferramentas de usinagem com canais de refrigeração internos no torneamento do ferro fundido cinzento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of materials processing Technology*, 123(1), 133-145. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)

George, P., Wins, K. L. D., Dhas, D. E. J., George, P., & Beatrice, B. A. (2021). Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.097>.

Guesser, W. L. (2019). *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. Editora Blucher.

ISO, 1993. *Tool life testing with single point turning*, ISO 3685.

Jadeja, N. N., & Patel, D. M. (2021). Experimental investigation of surface roughness and cutting force during machining of SS43100 by using coated and uncoated carbide inserts. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.184>.

Jeffries, N. P., & Zerkle, R. D. (1970). Thermal analysis of an internally-cooled metal-cutting tool. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 10(3), 381–399. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(70\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0020-7357(70)90019-3)

Karaguzel, U., & Budak, E. (2018). Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 532-540. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.024>

King, N., Keranen, L., Gunter, K., & Sutherland, J. (2001). Wet versus dry turning: a comparison of machining costs, product quality, and aerosol formation. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0343>

Kleckers, T. (2020). How Does a Force Transducer Actually Work? Disponível em: <https://www.hbm.com/en/6697/how-does-a-force-transducer-actually-work/>. Acessado em: 14/08/2021.

Klocke, F., & Kuchle, A. (2009). *Manufacturing processes* (Vol. 2, pp. p-433). Berlin: Springer.

Lacaze, J. Transformação eutetoide direta e inversa em ferros fundidos. *Metalurgia & Materiais*, ABM.

Li, T., Wu, T., Ding, X., Chen, H., & Wang, L. (2017). Design of an internally cooled turning tool based on topology optimization and CFD simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1–4), 1327–1337. DOI:10.1007/s00170-016-9804

Lin, Y., He, S., Lai, D., Wei, J., Ji, Q., Huang, J., & Pan, M. (2020). Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting. *Wear*, 454, 203319. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203319>

Lu, J., Zhang, Z., Yuan, X., Ma, J., Hu, S., Xue, B., & Liao, X. (2020). Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression. *Measurement*, 157, 107578. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107578>



Machado, Á. R., da Silva, L. R. R., de Souza, F. C. R., Davis, R., Pereira, L. C., Sales, W. F., De Rossi, W., & Ezugwu, E. O. (2021). State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 293, 117096.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096>

Machado, Á. R., Coelho, R. T., Abrão, A. M., & da Silva, M. B. (2015). *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.

Magadum, S., Kumar, S. A., Yoganath, V. G., Srinivasa, C. K., & GuruMurthy, T. (2014). Evaluation of tool life and cutting forces in cryogenic machining of hardened steel. *Procedia Materials Science*, 5, 2542-2549. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.506>

Marques, Narala, S. K. R., Machado, A. R., Gunda, R. K., Josyula, S. K., Da Silva, R. B., & Da Silva, M. B. (2017). Performance assessment of MQL: Minimum quantity solid lubricant during turning of Inconel 718. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(7), 1144–1159. <https://doi.org/10.1177/0954405415592128>

Meyers, P. G. (1964). Tool cooling apparatus. (Patent No. 3,137,184).

Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., & Roeder, M. (2013). Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 75, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.08.006>

Nakayama, K., & Arai, M. (1987). Burr formation in metal cutting. *CIRP Annals*, 36(1), 33-36. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62547-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62547-5)

Neto, R. R. I., Fragelli, R. L., Fiocchi, A. A., Scalon, V. L., & de Angelo Sanchez, L. E. (2015). Toolholder Internally Cooled by a Phase Change Fluid in Turning of SAE. *Applied Mechanics and Materials*, 798, 486–490. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.798.486>

Ning, J., & Liang, S. Y. (2019). Predictive modeling of machining temperatures with force-temperature correlation using cutting mechanics and constitutive relation. *Materials*, 12 (2), 284. doi. org/10.3390/ma120, 20284. <https://doi.org/10.3390/ma12020284>

Pal, A., Chatha, S. S., & Sidhu, H. S. (2021). Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mixed vegetable-oil-based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024>

Peng, R., Jiang, H., Tang, X., Huang, X., Xu, Y., & Hu, Y. (2019). Design and performance of an internal-cooling turning tool with micro-channel structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 690-701. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.011>

Pervaiz, S., Kannan, S., & Kishawy, H. A. (2018). An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector. *Journal of Cleaner Production*, 197, 134-153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.190>

Pieske, A.; Chaves Filho, L. M.; Gruhl, A. (1971) As variáveis metalúrgicas e o controle da estrutura de ferros fundidos cinzados. *Metalurgia ABM*, v.31, n.215.

Santos, S. C., & Sales, W. F. (2007). *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. São Paulo: Artliber Editora, 246.

Sen, B., Mia, M., Krolczyk, G. M., Mandal, U. K., & Mondal, S. P. (2019). Eco-friendly cutting fluids in minimum quantity lubrication assisted machining: a review on the perception of sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1–32. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>

Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.146>

Shashidhara, Y. M., & Jayaram, S. R. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid—an evolution. *Tribology International*, 43(5–6), 1073–1081. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.065>

Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 83–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>

Silva, L. R. R. D. (2020). Estudo da usinabilidade de ferros fundidos vermiculares de alta resistência nos processos de furação e fresamento. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Soković, M., & Mijanović, K. (2001). Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(1–2), 181–189. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00794-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00794-9)

Singhal, P., & Saxena, K. K. (2020). Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1393-1401. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.281>

Souza, J. V. C., Nono, M. C. A., Ribeiro, M. V., Machado, J. P. B., & Silva, O. M. M. (2009). Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials & Design*, 30(7), 2715-2720. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.041>

Sun, S., Brandt, M., Palanisamy, S., & Dargusch, M. S. (2015). Effect of cryogenic compressed air on the evolution of cutting force and tool wear during machining of Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.017>

Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann.

TUPY. 2011. Catálogo Técnico FUCO® Perfis Fundidos - TUPY. Disponível em: [https://www.tupy.com.br/imagens/promocional/catalogo\\_tecnico\\_fuco.pdf](https://www.tupy.com.br/imagens/promocional/catalogo_tecnico_fuco.pdf). Acessado em: 04/07/2021.

Upadhyay, S., & Saxena, K. K. (2020). Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2462-2470. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.524>

Vaško, A. (2016). Evaluation of shape of graphite particles in cast irons by a shape factor. *Materials Today: Proceedings*, 3(4), 1199-1204. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.03.006>

Velan, M. V. G., Shree, M. S., & Muthuswamy, P. (2021). Effect of cutting parameters and high-pressure coolant on forces, surface roughness and tool life in turning AISI 1045 steel. *Materials Today: Proceedings*, 43, 482-489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.020>

Walter Tools. 2021. Catálogo de produtos Walter Tools® - Porta-ferramentas DSSNL2525X12-P. Disponível em: <https://www.walter-tools.com/pt-pt/search/pages/default.aspx/product/dssnl2525x12-p> . Acessado em: 04/07/2021.

Wang, Q., Jin, Z., Zhao, Y., Niu, L., & Guo, J. (2021). A comparative study on tool life and wear of uncoated and coated cutting tools in turning of tungsten heavy alloys. *Wear*, 203929. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203929>

Wang, X., & Feng, C. X. (2002). Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(5), 348-356. <https://doi.org/10.1007/s001700200162>


Wu, Z., Yang, Y., & Luo, C. (2016). Design, fabrication and dry cutting performance of pulsating heat pipe self-cooling tools. *Journal of Cleaner Production*, 124, 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.129>

Yigit, R., Celik, E., Findik, F., & Koksall, S. (2008). Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated cutting tools in turning nodular cast iron. *Journal of materials processing technology*, 204(1-3), 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.082>

## CAPÍTULO VII

### 7. ANEXO

#### 7.1. ANEXO I: CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

|   |                                      |                      |
|---|--------------------------------------|----------------------|
|  | Data: 17/03/2016                     | Edição/Revisão 01/00 |
|   | Emitido por<br>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  $R_a$  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<br>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: Desempenho 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 |                         |                                 |

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<br>Gerência da Qualidade | Página: 3 de 3       |

**Certificado de Calibração: CCA-0001/2016**

**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 Valdés 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 38406-902. Fone (34) 3239 4504.

### 7.2.ANEXO II: RESULTADOS DA MEDIÇÃO F<sub>c</sub>

| Meio | v <sub>c</sub> [m/min] | a <sub>p</sub> [mm] | F <sub>1</sub> [N] | F <sub>2</sub> [N] | F <sub>3</sub> [N] |
|------|------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| FRI  | 150                    | 1                   | 335,70             | 275,39             | 267,95             |
| FRI  | 200                    | 1                   | 325,36             | 247,89             | 240,39             |
| FRI  | 250                    | 1                   | 259,57             | 261,95             | 264,36             |
| FSRI | 150                    | 1                   | 297,06             | 295,60             | 294,52             |
| FSRI | 200                    | 1                   | 287,26             | 272,25             | 260,71             |
| FSRI | 250                    | 1                   | 286,59             | 264,07             | 264,22             |
| FRI  | 150                    | 1,5                 | 397,28             | 405,13             | 352,38             |
| FRI  | 200                    | 1,5                 | 416,53             | 346,41             | 326,82             |
| FRI  | 250                    | 1,5                 | 399,10             | 344,61             | 348,70             |
| FSRI | 150                    | 1,5                 | 474,01             | 499,30             | 489,89             |
| FSRI | 200                    | 1,5                 | 473,74             | 456,34             | 468,56             |
| FSRI | 250                    | 1,5                 | 449,92             | 465,06             | 468,12             |

### 7.3.ANEXO III: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE R<sub>a</sub>

| Meio | v <sub>c</sub> [m/min] | a <sub>p</sub> [mm] | R <sub>a1</sub> [N] | R <sub>a2</sub> [N] | R <sub>a3</sub> [N] |
|------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| FRI  | 150                    | 1                   | 1,90                | 1,74                | 1,83                |
| FRI  | 200                    | 1                   | 1,36                | 1,52                | 1,49                |
| FRI  | 250                    | 1                   | 1,17                | 1,33                | 1,26                |
| FSRI | 150                    | 1                   | 2,05                | 1,85                | 1,87                |
| FSRI | 200                    | 1                   | 1,44                | 1,56                | 1,58                |
| FSRI | 250                    | 1                   | 1,24                | 1,35                | 1,47                |
| FRI  | 150                    | 1,5                 | 1,80                | 1,68                | 1,87                |
| FRI  | 200                    | 1,5                 | 1,59                | 1,68                | 1,55                |
| FRI  | 250                    | 1,5                 | 1,25                | 1,35                | 1,37                |
| FSRI | 150                    | 1,5                 | 2,20                | 2,05                | 2,10                |
| FSRI | 200                    | 1,5                 | 1,68                | 1,72                | 1,80                |
| FSRI | 250                    | 1,5                 | 1,42                | 1,42                | 1,62                |



#### 7.4. ANEXO IV: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE $R_q$

| Meio | $v_c$ [m/min] | $a_p$ [mm] | $R_{q1}$ [N] | $R_{q2}$ [N] | $R_{q3}$ [N] |
|------|---------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| FRI  | 150           | 1          | 2,28         | 2,16         | 2,21         |
| FRI  | 200           | 1          | 1,90         | 1,72         | 1,70         |
| FRI  | 250           | 1          | 1,45         | 1,63         | 1,48         |
| FSRI | 150           | 1          | 2,45         | 2,31         | 2,34         |
| FSRI | 200           | 1          | 1,84         | 1,93         | 1,86         |
| FSRI | 250           | 1          | 1,68         | 1,62         | 1,81         |
| FRI  | 150           | 1,5        | 2,21         | 2,14         | 2,06         |
| FRI  | 200           | 1,5        | 2,05         | 1,89         | 1,90         |
| FRI  | 250           | 1,5        | 1,64         | 1,55         | 1,71         |
| FSRI | 150           | 1,5        | 2,62         | 2,55         | 2,71         |
| FSRI | 200           | 1,5        | 2,16         | 2,23         | 2,05         |
| FSRI | 250           | 1,5        | 1,79         | 1,75         | 1,98         |