

**EMANUELE SCHNEIDER CALLISAYA**

**Análise do desempenho de ferramentas cerâmicas  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  no  
torneamento do aço AISI 4340 endurecido**

**Emanuele Schneider Callisaya**

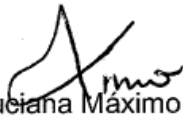
**Análise do desempenho de ferramentas cerâmicas  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  no  
torneamento do aço AISI 4340 endurecido**

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

Orientador: Manoel Cléber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP  
2017

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C162a | <p>Callisaya, Emanuele Schneider</p> <p>Análise do desempenho de ferramentas cerâmicas A1203-MgO no torneamento do aço AISI 4340 endurecido / Emanuele Schneider Callisaya – Guaratinguetá, 2018.</p> <p>83 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 78-83</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves</p> <p>1. Usinagem. 2. Aço de alta resistência. 3. Material cerâmico. I.Título</p> <p>CDU 621.9</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

  
Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

**EMANUELE SCHNEIDER CALLISAYA**

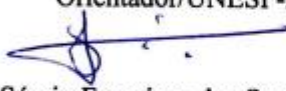
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO  
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS "**

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

  
Profº Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos  
UNESP-FEG

  
Prof. Msc. Marcel Yuzo Kondo  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **EMANUELE SCHNEIDER CALLISAYA**

|                   |                                                                                                                                                            |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 11.12.1995 – Guaratinguetá / SP                                                                                                                            |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Abraham Guillermo Callisaya Contreras<br>Alma Augusta Schneider Callisaya                                                                                  |
| <b>2010/2012</b>  | Técnica em Mecânica Industrial – Técnico<br>Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá<br>Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"        |
| <b>2015/2016</b>  | Graduação em Engenharia Mecânica – Bacharelado<br>(Programa de Intercâmbio Universitário)<br>Universität Duisburg-Essen                                    |
| <b>2013/2018</b>  | Graduação em Engenharia de Materiais – Bacharelado<br>Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá<br>Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" |

dedico este trabalho de modo especial,  
à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida, minha ciência e minha família, ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* que sempre me auxiliou e incentivou. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado não seria possível.

aos meus pais *Abraham Callisaya e Alma Schneider*, que sempre acreditaram em mim e incentivaram meus estudos.

aos funcionários e técnicos da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pelo auxílio no desenvolvimento dos projetos.

*“Na natureza nada se cria, nada se perde,  
tudo se transforma.”*

Antoine Lavoisier

## RESUMO

Este projeto possui como tema vários pontos que se destacam no contexto da utilização de ferramentas cerâmicas no processo de torneamento de aços endurecidos, cujo estudo é necessário para o aprofundamento do conhecimento da usinagem por torneamento à seco com objetivo da substituição do processo de retificação. No presente trabalho buscou-se estudar o torneamento do aço AISI 4340 endurecido (dureza 56 HRC), avaliando sua usinabilidade com ferramentas cerâmicas de óxido de alumínio dopadas com óxido de magnésio recentemente desenvolvidas, analisando o comportamento da potência consumida, da emissão acústica, da vibração, rugosidade final e do desgaste das ferramentas nas diferentes condições adotadas além de realizar o estudo dos tipos e formas dos cavacos gerados durante os ensaios. A utilização da usinagem à seco do aço AISI 4340 endurecido foi introduzida com o viés de realizar uma usinagem mais econômica, mais limpa e segura, com menos riscos ao ambiente e ao trabalhador, quando comparada com a lubrificação convencional. Além da aplicação da usinagem a seco, o torneamento duro também proporciona diversos benefícios como: a redução do custo por produto, bom acabamento superficial mais próximo da retificação, alta produtividade e redução dos tempos de *setup*. Entretanto, dentre as desvantagens está o aumento dos desgastes da ferramenta, levando, portanto, à diminuição da sua vida. Dessa forma, viabilizar a usinagem de aços endurecidos com ferramentas cerâmicas poderá ter impacto econômico grandioso nos processos de usinagem quando comparadas com ferramentas mais tradicionais. Atualmente o material tido como apropriado para ferramenta nestas condições de usinagem é o PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino), porém cada pastilha pode custar em torno de 15 a 20 vezes o preço das cerâmicas mais simples. Dos fatores estudados, o avanço e profundidade de corte têm se mostrado mais influentes, sendo o avanço o fator mais crítico na avaliação da qualidade superficial final. Melhor qualidade superficial foi encontrada para utilização de menores avanços em conjunto a menores valores de profundidade de corte. Foram encontradas diversas avarias e desgastes nas ferramentas como o lascamento e a ruptura da aresta de corte. Desgaste de flanco  $V_b$  máximo foi na ordem de 0,9mm.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinagem. Aço AISI 4340 Endurecido. Alumina. Rugosidade. Potência de Corte. Vibração. Emissão acústica.

## **ABSTRACT**

This Project theme approaches several points that stand out in the context of the utilization of ceramic tools in the turning process of hardened steels, which study is necessary to develop the knowledge of the machining by turning with the objective of replacing the grinding process. In the present study, we studied the turning of hardened AISI 4340 steel (56 HRC hardness), evaluating its machinability with recently developed aluminum oxide ceramic tools, analyzing the behavior of the power consumed, acoustic emission, vibration, final roughness, and tools wear in all different conditions adopted. And also the study of the types and shapes of the chips generated during the tests. The use of the dry machining of hardened AISI 4340 steel was introduced in order to achieve a more economical, cleaner and safer machining with less risk to the environment and to the worker when compared to conventional lubrication. In addition to the application of dry machining, the hard turning also offers several benefits such as: reduction of cost per product, good surface finish closer to grinding, high productivity and reduction of setup times. However, among the disadvantages is the increase of the wear of the tool, leading, therefore, to the decrease of its life. In this way, making the machining of hardened steels with simple ceramic tools possible, we can have a great economic impact on the machining processes when compared to more traditional tools. Currently the material considered as suitable for machining in these conditions is the PCBN (polycrystalline cubic boron nitride), however, it can cost around 15 to 20 times the price of the ceramics. From the studied factors, the advance and depth of cut have been shown to be more important, with the advance being the most critical factor in the evaluation of the final surface quality. Better surface quality was found to use smaller advances together at lower depth of cut values. Several breakdowns and tools wear were found. Such as chipping and breaking of the cutting edge. Flank wear  $V_b$  maximum was on the order of 0.9mm.

**KEYWORDS:** Turning. 4340 Hardened Steel. Alumina based tools. Dry machining. Roughness. Cutting power. Vibration. Acoustic Emission.

## SUMÁRIO

|              |                                                           |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>11</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS .....</b>                                    | <b>14</b> |
| 2.1          | OBJETIVOS GERAIS.....                                     | 14        |
| 2.2          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                               | 14        |
| <b>3</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                         | <b>15</b> |
| 3.1          | AÇO AISI 4340.....                                        | 15        |
| 3.2          | PROCESSO DE TORNEAMENTO .....                             | 18        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Grandezas físicas no processo de torneamento .....</b> | <b>19</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Torneamento de aços endurecidos.....</b>               | <b>19</b> |
| 3.3          | MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....                  | 21        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Materiais cerâmicos .....</b>                          | <b>26</b> |
| 3.3.1.1      | Cerâmicas a base de alumina.....                          | 27        |
| 3.4          | CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS .....           | 27        |
| 3.5          | VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO .....       | 28        |
| <b>3.5.1</b> | <b>Rugosidade.....</b>                                    | <b>29</b> |
| 3.5.1.1      | Rugosidade Média ( $R_a$ ) .....                          | 29        |
| 3.5.1.2      | Rugosidade Total ( $R_t$ ).....                           | 30        |
| <b>3.5.2</b> | <b>Potência de corte.....</b>                             | <b>30</b> |
| <b>3.5.3</b> | <b>Emissão acústica .....</b>                             | <b>32</b> |
| <b>3.5.4</b> | <b>Vibração .....</b>                                     | <b>32</b> |
| 3.6          | DESGASTE DA FERRAMENTA.....                               | 33        |
| <b>3.6.1</b> | <b>Vida da ferramenta .....</b>                           | <b>33</b> |
| 3.7          | CAVACOS.....                                              | 35        |
| <b>4</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                           | <b>38</b> |
| 4.1          | PROCESSO DE TORNEAMENTO .....                             | 38        |
| 4.2          | FERRAMENTAS.....                                          | 39        |
| 4.3          | SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....                       | 40        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Potência consumida.....</b>                            | <b>41</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Vibração .....</b>                                     | <b>42</b> |
| <b>4.3.3</b> | <b>Emissão acústica .....</b>                             | <b>43</b> |
| 4.4          | METODOLOGIA DE ENSAIOS .....                              | 43        |
| <b>4.4.1</b> | <b>Ensaio definitivos .....</b>                           | <b>43</b> |
| 4.5          | TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS.....                 | 44        |

|                |                                                         |           |
|----------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.5.1</b>   | <b>Fatorial completo.....</b>                           | <b>44</b> |
| <b>4.5.2</b>   | <b>Teste de normalidade .....</b>                       | <b>45</b> |
| <b>4.5.3</b>   | <b>Análise de variância (ANOVA) .....</b>               | <b>46</b> |
| <b>4.6</b>     | <b>INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....</b>                     | <b>47</b> |
| <b>4.6.1</b>   | <b>Rugosidade.....</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>4.7</b>     | <b>DESGASTE DAS FERRAMENTAS .....</b>                   | <b>48</b> |
| <b>4.8</b>     | <b>TIPOS E FORMAS DE CAVACOS .....</b>                  | <b>48</b> |
| <b>5</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                     | <b>50</b> |
| <b>5.1</b>     | <b>ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>                         | <b>50</b> |
| <b>5.1.1</b>   | <b>Rugosidade.....</b>                                  | <b>50</b> |
| <b>5.1.1.1</b> | <b>Rugosidade Média (Ra).....</b>                       | <b>50</b> |
| <b>5.1.1.2</b> | <b>Rugosidade Total (Rt) .....</b>                      | <b>55</b> |
| <b>5.1.2</b>   | <b>Potência de corte.....</b>                           | <b>58</b> |
| <b>5.1.3</b>   | <b>Vibração .....</b>                                   | <b>61</b> |
| <b>5.1.4</b>   | <b>Emissão acústica .....</b>                           | <b>63</b> |
| <b>5.2</b>     | <b>ANÁLISE QUALITATIVA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA .....</b> | <b>66</b> |
| <b>5.3</b>     | <b>DESGASTE DA FERRAMENTA.....</b>                      | <b>67</b> |
| <b>5.4</b>     | <b>CAVACOS.....</b>                                     | <b>73</b> |
| <b>6</b>       | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                 | <b>79</b> |
|                | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                | <b>81</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é caracterizada por ser um processo de fabricação cujo formato da peça ou componente produzido é dada pela retirada de material na forma de cavaco pela ação de uma ferramenta de corte. O processo de fabricação por usinagem é de extrema importância industrial, pois é o método mais utilizado na indústria metal mecânica quando se desejam peças e componentes mecânicos com alta qualidade superficial, geométrica e dimensional elevada.

Dentre os processos de usinagem, o torneamento merece destaque, por ser o dos mais utilizados na indústria o que motiva o aprofundamento de estudos nesta área. Somando a isso, o trabalho propõe o estudo de um material extremamente aplicado industrialmente, o aço AISI 4340, que é muito utilizado no setor automobilístico e aeronáutico, por possuir características favoráveis para componentes solicitados a esforços dinâmicos, como virabrequins e trens de pouso para aviões, tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Este aço apresenta alta resistência à fadiga, elevada temperabilidade, boa forjabilidade e tenacidade.

Atualmente, as indústrias de usinagem estão enfrentando um grande desafio para alcançar alta qualidade, bom acabamento superficial e alta taxa de remoção de material e ao mesmo tempo atingir baixos custos operacionais. O objetivo das indústrias modernas é, portanto, a fabricação de baixo custo resultante em produtos de alta qualidade em curto espaço de tempo.

Em resposta a essa necessidade recorrente, a usinagem de aços endurecidos está cada vez mais em foco do setor industrial devido à possibilidade de eliminação do processo de retificação, permitindo a redução de custo e tempo de fabricação. Para que isso seja possível é necessário que o processo de usinagem seja realizado em uma máquina rígida combinada com ferramentas de corte com elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. Como desvantagem, a usinagem de aços endurecidos diminui a vida das ferramentas de corte.

A possibilidade de eliminar etapas de usinagem como é o caso da usinagem de aços endurecidos que, se conseguida de forma eficiente, pode eliminar o processo final de acabamento que é a retificação, é um ponto crítico, que poderá trazer muitos benefícios do ponto de vista econômico no processo.

Em conjunto ao estudo da possibilidade de eliminação do processo de retificação, este trabalho estuda também a aplicação da usinagem à seco no torneamento. Com o viés de

realizar uma usinagem mais econômica, mais limpa, mais segura, com menos riscos ao ambiente e ao trabalhador, quando comparada com a lubrificação convencional.

Em geral, os processos de torneamento necessitam de muita energia para a remoção de material fazendo com que haja um aquecimento excessivo da peça e ferramenta. Este aquecimento, se não controlado, prejudica a vida da ferramenta e a qualidade superficial e dimensional dos componentes produzidos. Por isso, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas para analisar o desempenho da usinagem à seco nos mais variados processos de usinagem. Entretanto, para que estas técnicas sejam vantajosas para a indústria elas não podem afetar de forma significativa as variáveis de saída do processo (rugosidade da peça, vida da ferramenta, etc.) e principalmente a produtividade.

Devido a esta necessidade em relação às ferramentas, há um constante aprimoramento e desenvolvimento de novos materiais para ferramentas e revestimentos para ferramentas de corte, a fim de contribuir para a usinagem de aços nestas condições. Um grande esforço tem sido observado para melhorar as propriedades destes materiais para que mantenham alta dureza a quente, tenacidade, resistência ao desgaste, e possam trabalhar com maiores velocidades de corte.

As cerâmicas, por exemplo, apresentam elevada resistência ao desgaste, dureza em altas temperaturas sendo ainda insensíveis quanto a oxidação. Estas características fazem com que o material cerâmico substitua com vantagens o metal duro principalmente quando são empregadas altas velocidades de corte na usinagem contínua de materiais endurecidos. Por outro lado, quando sofrem intensas solicitações mecânicas, as ferramentas podem sofrer fratura sem aviso prévio reduzindo o seu tempo de vida e gerando complicações na usinagem.

Para suprir essa deficiência, enormes avanços têm ocorrido no campo de ferramentas cerâmicas com diferentes dopantes. Viabilizar a usinagem de aços endurecidos com ferramentas cerâmicas mais simples poderá, portanto, impactar economicamente nos processos de usinagem quando comparadas com ferramentas mais tradicionais, como por exemplo o PCBN. Que é tido como o material mais indicado para usinagem nessas condições de processo (torneamento), material (aço endurecido) e lubrificação (usinagem à seco).

Não obstante, é importante destacar que os processos de usinagem, no caso o torneamento, por ser um dos processos de fabricação mais utilizado no mundo moderno, consome bilhões de dólares anualmente. E sabe-se que entre os elementos que mais influenciam nos resultados e nos custos de usinagem, destacam-se as ferramentas de corte. A relação entre as ferramentas e os materiais a serem usinados é, portanto, extremamente crítica, devido a geração de cisalhamentos e atritos entre a ferramenta, a peça e o cavaco que

promovem altas temperaturas, vibrações, forças de corte, emissão acústica, além de outros mecanismos que interfere nos resultados de acabamento superficial das peças e nos desgastes das ferramentas. No Brasil, as ferramentas cerâmicas utilizadas são em sua totalidade importadas, fato que limita a sua utilização. Importantes avanços poderiam ser alcançados se o Brasil desenvolvesse sua própria tecnologia de fabricação de ferramentas, reduzindo custos e dotando o país de novos avanços científicos e tecnológicos, a qual é proposta deste projeto, ao analisar o desempenho das ferramentas cerâmicas experimentais desenvolvidas no departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP.

Não obstante, este trabalho tem como principal justificativa o potencial inovador, ao analisar a performance de ferramentas experimentais nacionais, em substituição as ferramentas mais tradicionais. Uma vez que, segundo Machado et al (2011), atualmente o material tido como apropriado para ferramenta na usinagem de aços endurecidos é o PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino), porém cada pastilha pode custar em torno de 80 vezes uma pastilha de metal duro e cerca de 15 a 20 vezes o preço da cerâmica.

Portanto, em função do cenário atual apresentado, o desafio deste trabalho foi estabelecer condições de usinagem que possam contribuir simultaneamente para as questões apontadas. Ou seja, viabilizar o torneamento do aço AISI 4340 endurecido, sem utilização de lubrificantes (usinagem à seco), através da análise do desempenho da aplicação de ferramentas cerâmicas à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) verificando suas consequências nas variáveis de saída do processo, validando ou não a eliminação do processo de retificação.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Como objetivos gerais tem-se:

Analisar o desempenho de ferramentas cerâmicas compostas por óxido de alumínio e óxido de magnésio no torneamento do aço AISI 4340 endurecido. O desempenho será verificado analisando o acabamento superficial das peças produzidas através da rugosidade, o desgaste e a vida das ferramentas, a potência consumida, a vibração e a emissão acústica gerada e os tipos, forma e coloração dos cavacos gerados.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos tem-se:

- Viabilizar a usinagem de acabamento no processo de torneamento do aço AISI 4340 endurecido com ferramentas cerâmicas recentemente desenvolvidas utilizando usinagem a seco, contribuindo para a diminuição dos processos de fabricação como a retificação;

- Analisar o comportamento da potência consumida, da emissão acústica, da vibração, rugosidade final e do desgaste das ferramentas nas diferentes condições de usinagem do aço 4340 endurecido;

- Verificar a eficiência das ferramentas cerâmicas analisando os desgastes, avarias e vida das ferramentas. Analisar a progressão do desgaste através de análises de imagens. Analisar ainda possíveis deposições de materiais sobre a ferramenta;

- Realizar o estudo dos tipos e formas dos cavacos gerados nas diferentes condições de usinagem a serem testadas, analisando também sua coloração;

- Analisar a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) na usinagem do aço AISI 4340 endurecido para estas ferramentas;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 AÇO AISI 4340

O material selecionado para o estudo no projeto é o aço AISI 4340, que é usado comercialmente desde 1955 como um aço de alta resistência. Atualmente, esse material é empregado em aplicações estruturais críticas, nas indústrias aeroespacial e de energia nuclear. É um material que combina profundo endurecimento com alta ductilidade, elevada resistência e razoável tenacidade, além de apresentar boa soldabilidade. Este aço ultra-resistente pode atingir valores de resistência na ordem de 1900 MPa, quando devidamente temperado e revenido a 200-230°C (ABDALLA et al, 2006).

O aço 4340, é um aço de elevada temperabilidade e boa forjabilidade de grande uso industrial. Devido às suas características, o aço 4340 é aplicado para fabricação de virabrequins para aviões, tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Na indústria aeronáutica é muito utilizado, devido à sua grande resistência e tenacidade que são fundamentais em projetos aeronáuticos para diversas aplicações, desde peças utilizadas na montagem da aeronave como também em ferramentais que são utilizados para construção e montagem das aeronaves.

Segundo Chiaverini (1986), o aço AISI 4340 está classificado como aço super-resistente, desenvolvido inicialmente para o emprego em componentes de aviões e mísseis. Este grupo tem como característica teores de carbono relativamente baixos, no qual, a presença de vários elementos de liga aumenta a temperabilidade do aço. A composição química do aço 4340 é apresentada na Tabela 1.

Este aço é tratável termicamente, com alta resistência e baixa liga, resistente à fadiga em elevadas temperaturas, aplicado em estruturas críticas (BHATTACHARYA et al., 2011).

Na Tabela 2 estão representadas as propriedades mecânicas típicas de um aço AISI 4340 temperado e submetido a diferentes temperaturas de revenimento.

Tabela 1 - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340.

| <b>C</b> | <b>S</b> | <b>P</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,39     | 0,01     | 0,08     | 0,23      | 0,67      | 0,83      | 1,73      | 0,26      |

Fonte: Souza, G. A. (2008).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas de um aço AISI/SAE 4340

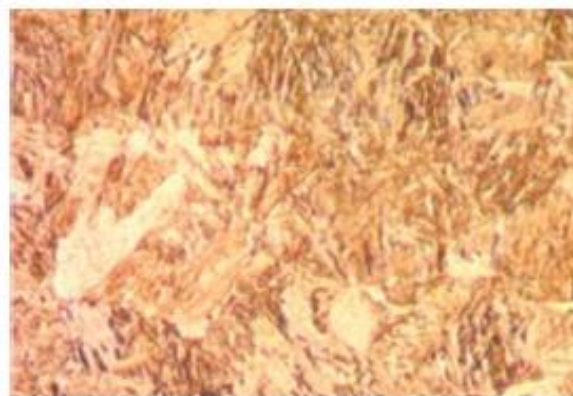
| <b>Temperatura de revenimento</b> | <b>Resistência a tração (Mpa)</b> | <b>Tensão de escoamento (Mpa)</b> | <b>Alongamento em 50mm (%)</b> | <b>Redução de área (%)</b> | <b>Dureza HB</b> | <b>Dureza HRC</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|
| 205                               | 1980                              | 1860                              | 11                             | 39                         | 520              | 53                |
| 315                               | 1760                              | 1620                              | 12                             | 44                         | 490              | 50                |
| 425                               | 1500                              | 1365                              | 14                             | 48                         | 440              | 46                |
| 540                               | 1240                              | 1160                              | 17                             | 53                         | 360              | 39                |
| 650                               | 1020                              | 860                               | 20                             | 60                         | 290              | 31                |
| 705                               | 860                               | 740                               | 23                             | 63                         | 250              | 24                |

Fonte: Souza, G. A. (2008).

A microestrutura resultante da transformação de fase tem um papel fundamental na obtenção das propriedades mecânicas dos aços, principalmente de aços com alta resistência tratados termicamente, como é o caso do aço AISI 4340.

Os vários constituintes dos aços já são conhecidos, como a ferrita, perlita, bainita, martensita e austenita. Na prática, a microestrutura resultante dessa transformação pode ter uma só fase, como por exemplo, martensita ou bainita, ou pode ser mista, contendo duas ou mais fases. Combinações destas estruturas são responsáveis por atribuir diferentes características ao material. Com a finalidade de se caracterizar essas microestruturas são empregadas várias técnicas de ataque químico. Na Figura 1 é exemplificada a microestrutura genérica do aço AISI 4340 como fornecido comercialmente.

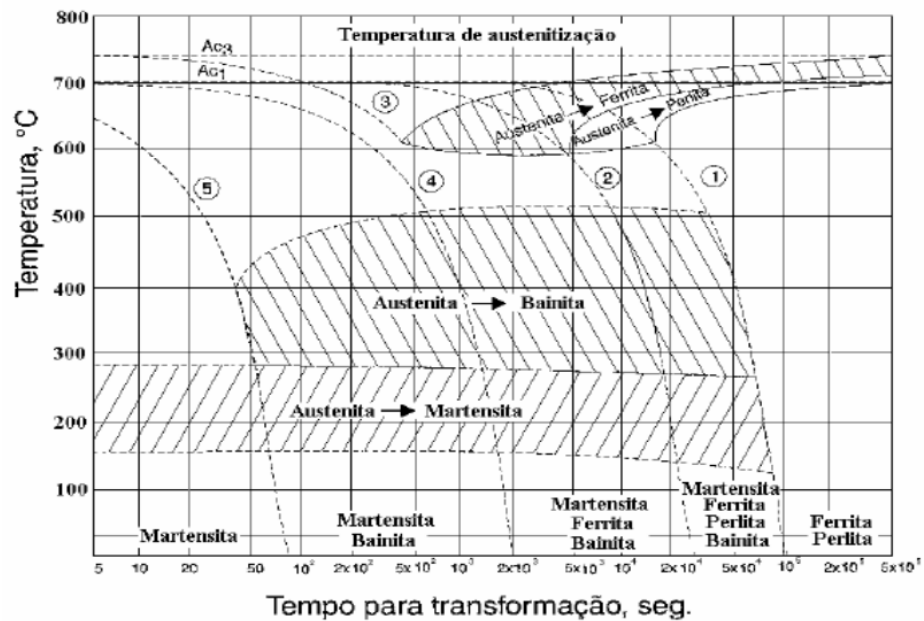
Figura 1 – Fotomicrografia aço AISI 4340 como fornecido.



Fonte: Barros et al (2015).

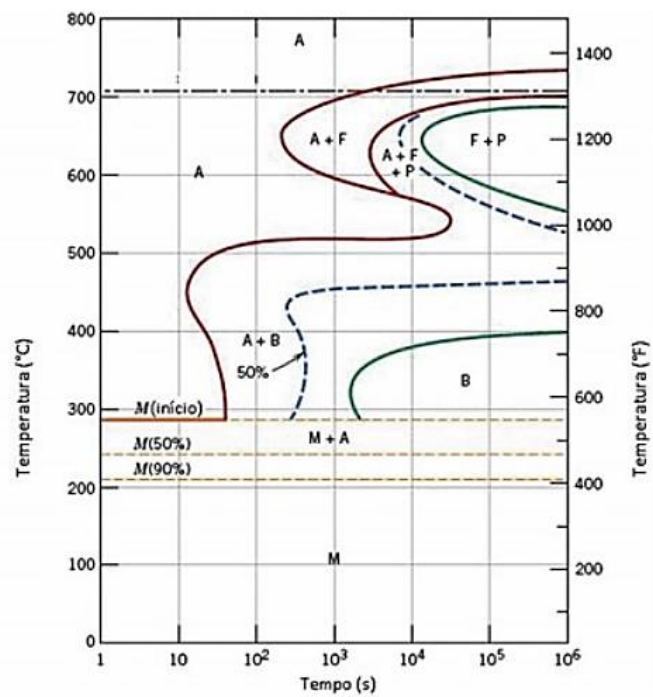
Em seguida é apresentado de forma ilustrativa o diagrama de transformação de fases por resfriamento contínuo do aço AISI 4340 (Figura 2) e o diagrama de transformação tempo-temperatura (TTT) na Figura 3, contendo as respectivas microestruturas esperadas para as diferentes faixas de temperatura e tempo de resfriamento.

Figura 2 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo do aço AISI 4340



Fonte: Chiaverini (1998).

Figura 3 – Diagrama de transformação isotérmica para o aço AISI 4340



Fonte: Callister (1997).

### 3.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO

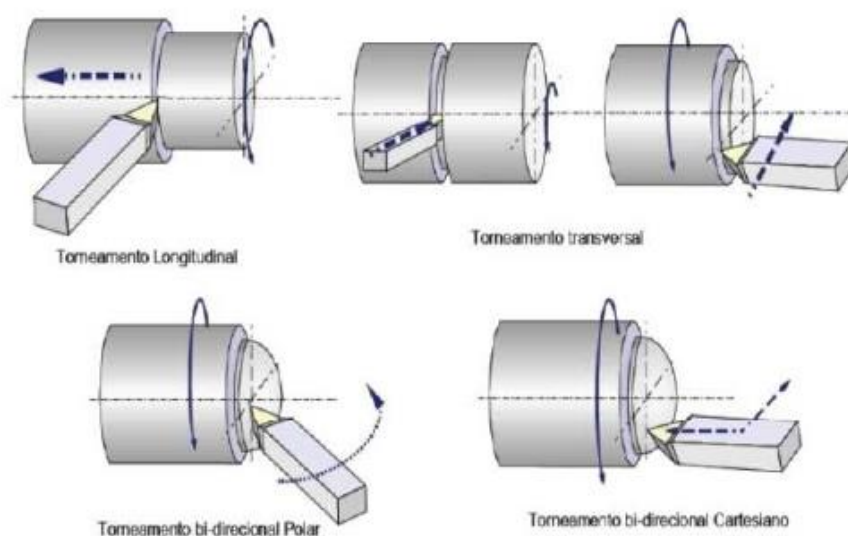
A usinagem é definida como um processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo o excesso de material na forma de cavaco (FERRARESI, 1977), sendo este um dos métodos de fabricação mais empregados.

As principais operações da usinagem consistem primeiramente no desbaste, o qual o principal objetivo é a remoção de material e logo após as operações de acabamento que consiste na operação com o objetivo de remover material para a obtenção da qualidade final da peça (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013).

O torneamento é um processo mecânico de corte, no qual a peça, em geral, executa o movimento rotativo em torno do eixo principal da máquina; e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar (KÖNIG, 1997).

O torno mecânico é uma máquina ferramenta extremamente versátil. É utilizada na confecção ou acabamento em peças dos mais diversos tipos e formas. Seu funcionamento é simples, onde a peça é fixada entre as pontas dos eixos para que possa ser trabalhada pelo torneiro mecânico, profissional qualificado para o manuseio desse equipamento de precisão (CAMARGO, 2011). Existem vários tipos de tornos mecânicos, tais como universais, automáticos, multiuso, CNC (Comando Numérico Computadorizado), etc. O torno pode executar mais operações do que qualquer outra máquina-ferramenta devido a versatilidade de sua cinemática de processo como pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Cinemática do processo de torneamento



Fonte: Stoeterau (2003).

O torneamento é um dos métodos mais comuns de corte e especialmente para o acabamento de componentes. No torneamento, para obter um elevado desempenho de corte, a seleção de parâmetros adequados é essencial. Geralmente, essa seleção ótima de parâmetros é determinada pela experiência do operador (MANDAL et al, 2015).

### **3.2.1 Grandezas físicas no processo de torneamento**

Os principais parâmetros de corte são a velocidade de corte ( $V_c$ ), isto é, a velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte; e o avanço ( $f$ ), percurso em cada volta ou em cada curso da ferramenta.

A alta velocidade de corte pode trazer alguns aspectos positivos se comparado com a baixa velocidade, que são a alta produtividade, o não aparecimento de APC (Aresta Postiça de Corte), tempo maior de produção etc. Porém, existem alguns aspectos negativos quanto à utilização de alta velocidade, como o desgaste acelerado da ferramenta, tempo ocioso para troca de ferramenta, custo elevado, etc (BONFÁ, 2013).

Com o avanço pode-se fazer uma análise análoga, onde maiores avanços, se comparados a avanços pequenos, têm-se menor tempo de corte e maior produtividade. No entanto, com avanços menores as forças de corte serão menores e os acabamentos serão melhores.

Portanto, o conhecimento destas grandezas físicas e a combinação destas com outras grandezas, como a profundidade de corte ( $a_p$ ) para a usinagem, pode favorecer a produção, tornando-a um processo mais lucrativo, com menos tempo de fabricação e maior qualidade das peças finais.

### **3.2.2 Torneamento de aços endurecidos**

Em sua definição mais ampla, peças consideradas duras possuem uma dureza acima de 45HRC, embora frequentemente sejam usinados materiais com dureza de até 68 HRC (GAITONDE et al., 2009). É um processo que utiliza altas velocidades, em média  $V_c$  igual a 250 m/min. Portanto, é necessária elevada rigidez da máquina-ferramenta para garantir que o acabamento superficial seja atingido com alta precisão (KORN, 2004).

O torneamento de aços endurecidos com dureza acima de 45 HRC surgiu desde que as cerâmicas modernas foram disponibilizadas pela primeira vez para as ferramentas de desbaste contínuo (MATSUMOTO et al, 1987) e PCBN para acabamento contínuo (LIU E MITTAL,

1996). Em operações de acabamento no torneamento de aços endurecidos, alta dureza das peças de trabalho, grandes forças de corte e altas temperaturas na interface ferramenta-peça impõem requisitos extremos para a rigidez da ferramenta e resistência ao desgaste da ferramenta (MORE et al, 2006).

O torneamento de aços endurecidos tem sido aplicado em muitas áreas, como a produção de rolamentos, engrenagens, eixos e outros componentes mecânicos e oferece uma alternativa atraente à retificação.

Muitas pesquisas buscam analisar a vida da ferramenta, comportamento e mecanismo de desgaste de ferramentas no torneamento de aço endurecido como Aslantas et al (2012), Kumar et al (2012). Bartarya e Choudhury (2012) discutiram sobre o estado da arte em torneamento de aços endurecidos. Contudo, podem também ser discutidas algumas desvantagens do torneamento de aços endurecidos: a dependência da rugosidade superficial das condições de corte (principalmente avanço), a formação de camadas brancas induzida nos estágios iniciais do desgaste da ferramenta e o alto risco de falha inesperada de ferramenta catastrófica no final da fase normal de desgaste da ferramenta, principalmente associado com a aplicação de ferramentas de cerâmica (NESLUŠAN,2010).

Porém, mesmo o processo de torneamento duro ser impressionante devido a sua capacidade de substituir a retífica quanto ao processo de acabamento, que é um processo de custo elevado, devido ao custo com máquinas, lubrificantes, instalações etc., existem algumas limitações para este tipo de processo, como por exemplo, o desgaste da ferramenta que resulta em dimensões erradas da peça, geometrias deformadas e baixa qualidade superficial (GRZESIK et al., 2007).

Pesquisas recentes trazem algumas recomendações quando tratam de torneamento de peças duras. Este tipo de processo trabalha essencialmente com velocidade de corte ( $V_c$ ) elevada, baixos valores de avanço ( $f$ ) e baixos valores de profundidade de corte ( $a_p$ ). Geralmente as velocidades de corte ficam entre 100-250 m/min, porém alguns trabalhos utilizam velocidades ainda mais altas (DINIZ e OLIVEIRA, 2008). O avanço possui valores em torno de 0,05-0,2 mm/rev, enquanto a profundidade de corte não ultrapassa o valor de 0,2 mm (ZHOU et al., 2003). Recentemente, boa parte das pesquisas tentam investigar e entender os efeitos de parâmetros como forças de usinagem, acabamento superficial, tensão residual etc., além dos diferentes formatos para ferramentas, tipos de materiais e revestimentos para ferramentas durante o processo de torneamento duro.

### 3.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

As pesquisas e desenvolvimentos na área de materiais para ferramentas de corte buscam continuamente descobrir novos materiais e melhorar as características dos já existentes (KÖNIG, 1997). Estas características são físicas, mecânicas e geométricas, como: elevada dureza a frio e a quente, tenacidade e resistência ao desgaste. Dos materiais utilizados para a fabricação de ferramentas de corte, muitas vezes, o que se sobressai em uma determinada propriedade é inferior nas outras, o que torna necessário buscar um equilíbrio entre as propriedades de uma ferramenta. As características da ferramenta escolhida influenciarão nas trocas de ferramentas, escolhas das máquinas, tempos de fabricação, custo do operador, entre outros fatores (KÖNIG, 1997; STEMMER, 1995).

Os materiais para ferramentas mais utilizados nas operações de usinagem não apresentam uma classificação geral. Porém, muitos autores os listam de acordo com sua resistência a abrasão. König (1997), classifica os materiais na seguinte ordem:

- aços-ferramentas,
- aços-rápidos;
- stellite ou ligas duras;
- metal-duro;
- cerâmica de corte;
- nitreto de boro cúbico;
- diamante.

Já na escolha do material para ferramenta, segundo Ferraresi (1977) e Diniz et al (2013), alguns fatores devem ser ponderados:

- material a ser usinado;
- processo de usinagem;
- condição da máquina-ferramenta;
- forma e dimensões da ferramenta;
- custo do material da ferramenta;
- condições da operação.

A ferramenta de corte deve possuir diversas propriedades diferentes com o objetivo de atender as diversas solicitações de corte, no entanto nenhuma das ferramentas disponíveis no mercado atendem a todas as propriedades necessárias no processo de usinagem, devendo então existir uma seleção específica para cada operação com determinado material (MACHADO et al, 2011).

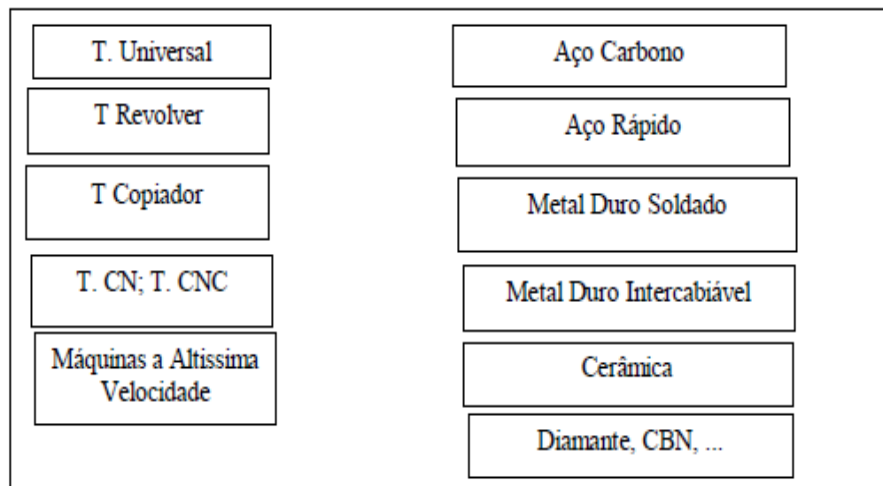
As exigências de aços extremamente duros estão aumentando continuamente, criando sempre novos desafios para operações de usinagem e colocando demandas muito altas para ferramentas de corte de alto desempenho. A tecnologia em ferramentas revestidas também continua a desenvolver novos materiais estimulada com os desenvolvimentos em filmes finos e tecnologias de deposição de revestimento (SETTINERI et al, 2008).

Grzesik (1998) relata que o objetivo da usinagem é fabricar produtos com menor custo com alta precisão dimensional e acabamento. Ao mesmo tempo, as operações de usinagem devem ser a seco ou quase seco para evitar problemas ambientais associados ao uso de fluidos de corte. O autor afirma ainda que tendências para a usinagem de materiais endurecidos, alta velocidade de usinagem, usinagem de materiais difíceis de cortar e usinagem a seco são a causa por trás do desenvolvimento de revestimentos de camada fina de alto desempenho.

Segundo Tonshoff e Mor (2000), a alta relevância industrial das operações de torneamento de materiais duros deve-se ao desenvolvimento de ferramentas, especialmente CBN e ferramentas cerâmicas para operações de torneamento a frio, bem como a concepção de novos tornos de alta rigidez e precisão.

Não obstante, o constante desenvolvimento das máquinas-ferramentas tem exigido consequentemente acompanhamento e desenvolvimento das ferramentas, possibilitando assim o emprego de parâmetros mais eficientes para a usinagem de materiais como os tratados neste trabalho. A Figura 5 apresenta um esquema que resume o desenvolvimento acima citado. Segundo Byrne et al, (2003). As máquinas-ferramentas modernas, com maior desempenho dinâmico, rigidez e potência, requerem ferramentas de corte com propriedades altamente melhoradas, em particular nas suas superfícies.

Figura 5 - Evolução das Máquinas-ferramentas e Materiais Para Ferramentas.



Fonte: Costa et al (2010).

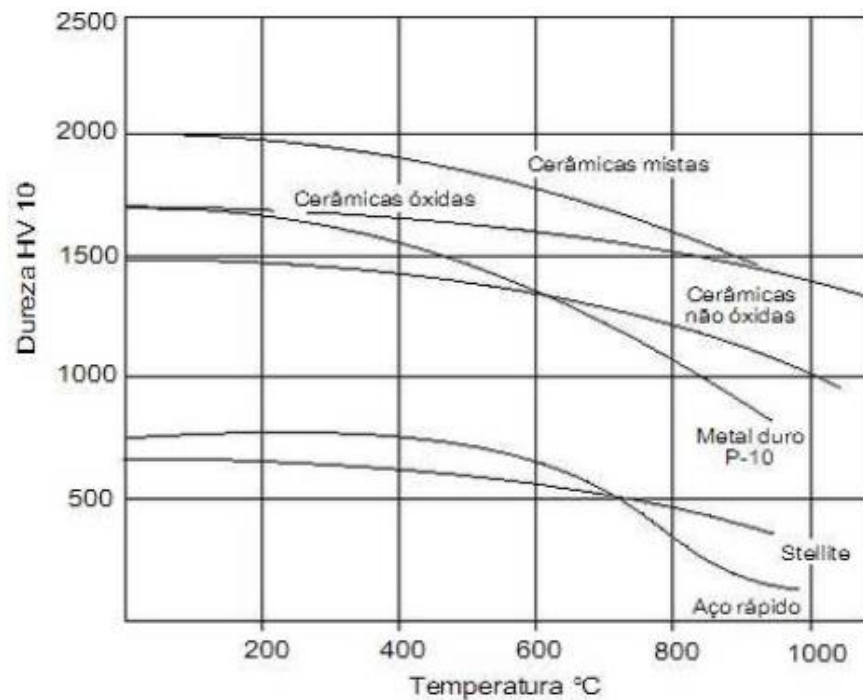
O processo de usinagem utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça. Baseado no princípio da dureza relativa é óbvio que o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Neste processo, as ferramentas de corte exercem importância fundamental, tanto no aspecto econômico quanto no resultado final das peças (DINIZ et al, 2013). Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis ou em operações de cortes interrompidos requer materiais de ferramentas tenazes o suficiente para suportar os choques e os impactos inerentes a tais processos.

Como dureza e tenacidade são propriedades opostas, em uma análise superficial, alta dureza significa baixa tenacidade e assim se torna necessário um balanço entre estas duas propriedades dos materiais de ferramentas, o que se tornou um grande desafio aos pesquisadores e fabricantes. Por isso, hoje encontramos no mercado uma infinidade destas ferramentas de corte com variados valores de tenacidade e dureza. Esta variedade de ferramentas foi obtida através de diferentes composições químicas, tamanhos de grãos e um maior controle nos processos de fabricação e tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (SOUZA et al, 2013).

Por fim, qualquer que seja o material para ferramenta em consideração, é necessário que ele apresente uma série de requisitos de maior ou menor importância. As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser especificadas como: Alta dureza; Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura; Alta resistência ao desgaste por abrasivo; Alta resistência à compressão; Alta resistência ao cisalhamento; Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas; Alta resistência ao choque térmico; Alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente (SOUZA et al 2009; COSTA 1994). Entretanto nenhum dos inúmeros materiais de ferramenta de corte disponível possui todas as qualidades no mais alto grau. Deste modo, em cada trabalho específico devem-se verificar quais as exigências primordiais de modo a se escolher o material mais adequado para cada caso (DINIZ et al, 2013).

Sabe-se que todos os materiais de engenharia têm uma queda de resistência com o aumento da temperatura. A Figura 6 mostra o comportamento da dureza dos principais grupos de ferramentas de corte com a temperatura de trabalho. Nota-se que até mesmo o metal duro e as cerâmicas têm suas propriedades reduzidas, mas numa taxa bem menor que os aços-rápidos.

Figura 6 - Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura.



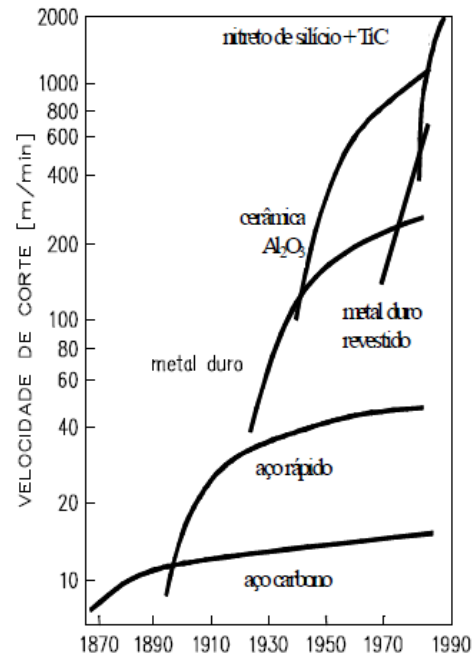
Fonte: Machado et al (2011).

As propriedades de dureza e resistência ao desgaste estão diretamente relacionadas com a capacidade de imprimir altas velocidades aos processos de corte. Nos últimos 100 anos, o aparecimento de novos grupos de ferramentas de corte possibilitou a evolução das velocidades de corte. Ferramentas de cerâmicas e de materiais chamados de ultraduros (materiais com dureza superiores a 3000 HV), surgidos na década de 80, podem apresentar velocidades superiores a 2000 m/min como pode ser visto na figura 7 (MACHADO et al., 2011).

Se fosse possível determinar o material de ferramenta ideal ele deveria conter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço-rápido e a inércia química da alumina. Deve-se considerar também que nem sempre o melhor material é aquele que garante uma maior vida à ferramenta de corte.

Às vezes, confiabilidade e previsibilidade do desempenho são mais importantes, principalmente se comparados com o custo do material da peça. Observa-se na figura 8 alguns dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte.

Figura 7 - Aumento das velocidades de corte conquistado ao longo do último século.



Fonte: Pastor (1987).

Figura 8 - Dados quantitativos dos principais materiais para ferramenta de corte.

| Propriedades do material da ferramenta                                   | Aço rápido (M2)                             | Carboneto de tungstênio (M20)     | Alumina branca                                                        | Alumina mista                                                          | Alumina reforçada com whisker                    | Cerâmica à base de nitreto de silício                                                                         | PCBN                                | Diamante natural | PCD            |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|
| Composição básica*                                                       | 0,85%pC<br>4%pCr<br>5%pMo<br>6,5%pW<br>2%pV | 80,5%pWC<br>10%pCo<br>9,5%pOutros | 90-95%<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>5-10%<br>ZrO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>30% TiC<br>5-10%<br>ZrO <sub>2</sub> | 75%<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>25% SiC | 77% Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub><br>13% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>10% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 99%CBN<br>2%AlB <sub>2</sub><br>AIN |                  | PCD<br>2-8% Co |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )                                           | 7,85                                        | 14,5                              | 3,8-4,0                                                               | 4,3                                                                    | 3,7                                              | 3,2                                                                                                           | 3,1                                 | 3,5              | 3,4            |
| Dureza à TA (HV)                                                         | 850                                         | 1600                              | 1700                                                                  | 1900                                                                   | 2000                                             | 1600                                                                                                          | 4000                                | 10000            | 8000-10000     |
| Dureza à 1000°C (HV)                                                     | n.a.                                        | ≈400                              | 650                                                                   | 800                                                                    | 900                                              | 900                                                                                                           | ≈1800                               | n.a.             | n.a.           |
| Resistência à fratura (MPa·m <sup>1/2</sup> )                            | 17                                          | 13                                | 1,9                                                                   | 2                                                                      | 8                                                | 6                                                                                                             | 10                                  | 3,4              | 7,9            |
| Condutividade térmica (W/m·°C)                                           | 37                                          | 85                                | 8-10                                                                  | 12-18                                                                  | 32                                               | 23                                                                                                            | 100                                 | 900              | 560            |
| Módulo de Young (kN/mm <sup>2</sup> )                                    | 250                                         | 580                               | 380                                                                   | 420                                                                    | 390                                              | 300                                                                                                           | 680                                 | 964              | 841            |
| Coefficiente de expansão térmica (x10 <sup>-5</sup> /K)                  | 12                                          | 5,5                               | 8,5                                                                   | 8                                                                      | 6,4                                              | 3,2                                                                                                           | 4,9                                 | 1,5-4,8          | 3,8            |
| Custo aproximado por barra** (US\$)                                      | 72,54 (barra 25x25x200 mm)                  | 0,61                              | 0,83                                                                  | 1,08                                                                   | 4,5                                              | 2,25                                                                                                          | 72-100                              | 225-252          | 54-90          |
| *por volume a menos que indicado.<br>**custo referente à ISO SNGN 120416 |                                             |                                   |                                                                       |                                                                        |                                                  |                                                                                                               |                                     |                  |                |

Fonte: Abrão (1995).

Um dos maiores problemas encontrados na usinagem é a quebra e/ou desgaste das ferramentas de corte, pois o tempo ocioso para a troca ou afiação da ferramenta é prejudicial para a produção. Neste caso têm-se dois tipos de prejuízo, 1- no tempo em que a máquina ficará parada para a troca/afiação desta ferramenta, não haverá produção; 2- os gastos com a recuperação de uma ferramenta ou a substituição por uma ferramenta nova no caso de troca por fratura.

### **3.3.1 Materiais cerâmicos**

As cerâmicas são definidas como materiais essencialmente sólidos, inorgânicos, não metálicos. As cerâmicas avançadas são iônicas ou covalentes, possuindo propriedades específicas que as levam a uma série de aplicações tecnológicas, com destaque aos óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ), nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), nitreto de boro (BN), alumínio (AlN), carbetos de silício (SiC) e carbetos de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ) (ACCHAR, 2000). Estas cerâmicas apresentam combinações de microestrutura fina, pureza e complexa combinação de estruturas cristalinas, controlada pelos aditivos. Esses materiais requerem um alto nível de processamento e excelência na engenharia de aplicação, diferenciando-se dos materiais cerâmicos convencionais. As cerâmicas avançadas destacam-se por sua resistência ao desgaste, resistência à corrosão, inércia química, estabilidade em altas temperaturas e leveza, promovendo propriedades superiores a muitos materiais, e atualmente apresentam grandes importâncias na aplicação das indústrias estratégicas. As combinações de propriedades oferecidas por esses materiais apresentam especial potencial para solução de inúmeros problemas de processos que envolvem transição de temperaturas durante o trabalho.

Acredita-se que o domínio do desenvolvimento em conjunto com a aplicação tecnológica, possa solucionar diversos problemas encontrados nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automobilística, petroquímica etc (SOUZA, 2005).

Entre as cerâmicas estruturais pode se destacar as cerâmicas a base de alumina que são consideradas materiais avançados e de baixo custo, sendo considerada como um material que constitui uma tecnologia em processo de amadurecimento com grande base em vigentes aplicações de alto potencial e com crescimento promissor em diversas áreas (OKADA, 2007).

### 3.3.1.1 Cerâmicas a base de alumina

A alumina é provavelmente um dos materiais cerâmicos mais estudados para aplicações estruturais. Vários trabalhos sobre os diferentes aspectos do seu comportamento mecânico foram publicados. A alumina apresenta módulo de elasticidade elevado, refratariedade alta, dureza alta, condutividade térmica superior à maioria dos óxidos cerâmicos, resistência ao ataque químico alto, resistência alta em altas e baixas temperaturas e rigidez dielétrica alta (GONÇALVES, 2000; XAVIER et al, 1984).

Estas propriedades permitem a utilização da alumina como material abrasivo, revestimento de fornos, componentes para implantes ortopédicos e odontológicos, ferramentas de corte e aplicações nas áreas espaciais e aeroespaciais, e outras (INÁCIO, 2010; EIGHERY, 1999).

A estrutura cristalina da alumina- $\alpha$  é conhecida como corundum, é a forma termodinamicamente estável da alumina em todas as temperaturas. A alumina apresenta estrutura cristalina romboédrica compreendendo uma rede hexagonal de empacotamento onde os íons  $Al^{3+}$  estão ordenados simetricamente em dois terços dos interstícios octaedrais (FONSECA 2007).

A ocorrência do óxido de alumínio- $\alpha$ , na natureza é pequena e este ocorre em formas de grãos ou massas uniformes, ou ainda em cristais com cor variável, apresentando dureza 9 (escala mohs), brilho adamantino a vítreo, densidade de  $3,98 \text{ g/cm}^3$ . Ocorre como acessório em rochas metamórficas, tais como calcários cristalinos, micaxistos, nos contatos de corpos peridotíticos, lamprófirios, pegmatitos e depósitos dentríticos, pode também ocorrer como gema dando origem à safira e ao rubi. Como a ocorrência natural do óxido de alumínio- $\alpha$  é pequena, ele é obtido artificialmente a partir de hidróxidos de alumínio contido em minérios pelo processo Bayer (SASSERON, 2006).

## 3.4 CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS

Muitas vezes descartada pelo custo se comparada à ferramenta de metal duro, a relação custo-benefício apresentada pelas ferramentas de cerâmica pode ser altamente vantajosa. A prática tem demonstrado uma evolução de até 100 vezes no aumento da velocidade de corte (de  $10 \text{ m/min.}$  x  $1000 \text{ m/min.}$ ) quando comparadas às ferramentas de aço rápido (BOEHS; CONSALTER e ZEILMANN, 1998). Quanto à máquina-ferramenta, esta deve estar

rigidamente instalada e em bom estado geral não possuindo de modo algum folga em seus fusos e consequentes eixos de movimentação.

As vantagens das ferramentas cerâmicas em comparação com as de aços rápidos, metal duro e outras existentes no mercado estão na estabilidade térmica e química em altas temperaturas, e na excelente resistência ao desgaste. Estes conjuntos de propriedades permitem a produção de peças usinadas dentro das tolerâncias específicas, com menor tempo de parada e uma longa vida (SOUZA, 2005). Estas características fazem com que o material cerâmico substitua com vantagens o metal duro principalmente quando são empregadas altas velocidades de corte na usinagem contínua de materiais endurecidos.

Inicialmente a cerâmica era recomendada somente para operações de acabamento; entretanto, as novas composições já permitem a utilização em desbaste leve. Conforme comentado anteriormente, ao melhorar determinada propriedade de um material tende-se a diminuir outra. No caso da cerâmica, a tenacidade e o baixo grau de condutibilidade térmica são os fatores limitantes de aplicação. Na Tabela 3 encontram-se listadas as principais classes e campos de aplicação das pastilhas de cerâmica.

Tabela 3 - Composição Básica e Campo de Aplicação.

| <b>Grupo de base</b> | <b>Composto Básico</b>                 | <b>Aplicações Principais</b>                             |
|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Óxido Puro           | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ | Fofo fundido e aço                                       |
| Cerâmica Mista       | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$   | Aço, Fofo fundido, ligas super resistentes ao calor      |
| Cerâmica Reforçada   | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ | Materiais endurecidos e ligas super resistentes ao calor |

Fonte: Sandvik (2017).

### 3.5 VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

As variáveis de saída listadas abaixo foram analisadas no trabalho buscando entender os efeitos da utilização das ferramentas cerâmicas em seu comportamento. A interação entre a ferramenta e a peça possui uma influência direta nestas variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade (HECKER et al. 2007). Foram verificadas também as correlações entre estas variáveis.

### 3.5.1 Rugosidade

A importância do estudo do acabamento superficial é bastante significativa, uma vez que a boa qualidade superficial é exigida em peças onde houver atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, entre outros.

A maior parte dos estudos de usinagem que objetivam a análise da qualidade das peças produzidas, analisam as imperfeições e a topografia deixada nestas peças. Esta topografia das peças produzidas é denominada de rugosidade e é caracterizada como erros microgeométricos, sendo um resultado do processo de usinagem (AGOSTINHO, 1981).

As superfícies de peças, quando observadas de perto, em detalhes mostram que apresentam, sempre após um tipo de usinagem, irregularidades. Estas por si causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre tal superfície da peça. Partindo disso vê-se a importância do estudo do acabamento superficial na medida da necessidade de precisão, que aumenta com a funcionalidade das peças (PALMA, 2006).

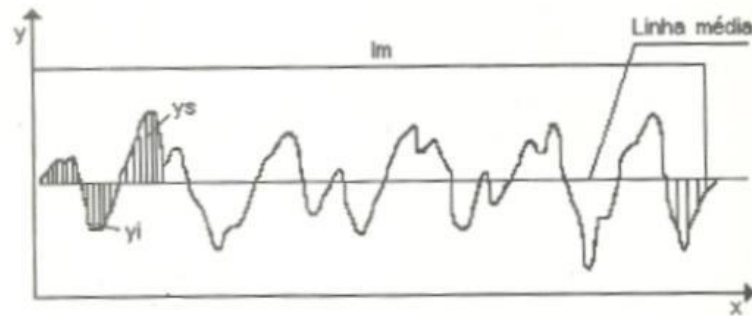
O acabamento da superfície é um importante parâmetro para avaliar a produtividade de máquinas-ferramentas, assim como componentes usinados, pois o comportamento das partes mecânicas depende de uma boa qualidade de superfície para uma funcionalidade adequada. (BERNARDOS e VOSNIAKOS, 2003).

As indústrias vêm dando grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Portanto, medir e caracterizar o acabamento das superfícies torna-se o diferencial no processo de usinagem (REDDY e RAO, 2005).

#### 3.5.1.1 Rugosidade Média ( $R_a$ )

A rugosidade média ( $R_a$ ) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). A linha média (Figura 9) é uma linha disposta paralelamente à direção o perfil, dentro do percurso de medição  $l_m$ , de modo que a soma das áreas superiores seja exatamente igual a soma das áreas inferiores (NOVASKI, 1994).

Figura 9 - Ilustração da determinação da linha média.

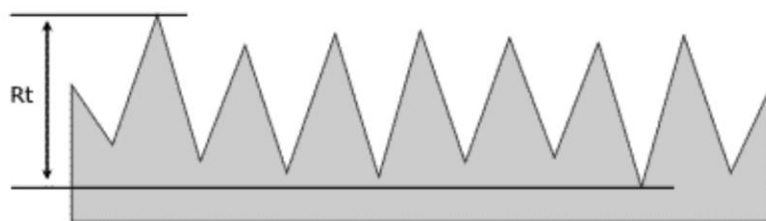


Fonte: Novaski (1994).

### 3.5.1.2 Rugosidade Total ( $R_t$ )

A rugosidade total é dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa no comprimento considerado. Pode ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação. Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial. Na Figura 10 pode-se observar que o pico mais alto e o vale mais fundo. Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_t$ . O parâmetro  $R_t$  confere maior rigidez nos resultados, pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação.

Figura 10 - Exemplo de medição da rugosidade total



Fonte: Novaski (1994).

### 3.5.2 Potência de corte

O nível de remoção de material de uma determinada peça pode ser diretamente associado ao consumo de potência do equipamento (GONÇALVES et al., 2010).

Segundo Souza (2004), o estudo das forças de usinagem é importante para assegurar a integridade do sistema máquina-ferramenta-peça, uma vez que influenciam as deflexões na

ferramenta e na peça, afetando as dimensões finais do componente usinado, sendo, ainda, responsáveis pelos fenômenos de vibração.

Há diversas maneiras de mensurar a potência de corte de um equipamento. Na usinagem com metais é comum a instrumentação dos processos de usinagem.

Para a medição do consumo de potência em seu trabalho, Gonçalves et al. (2010), instrumentou o equipamento de usinagem com aparelho de controle eletrônico microprocessado, indicado para medição e registro de grandezas da rede elétrica que alimenta a máquina. O medidor de grandezas elétricas utilizado realizou a medição direta de corrente por plugs ou por alicate tipo TC (transformador de corrente), registrando valores de potência ativa e reativa, tensão, corrente e frequência, por fase e trifásica. O sensor de potência mede a potência consumida pelo motor ou a variação de frequência do motor, onde sua medição consiste em medir a corrente e tensão do motor. Devido à fácil instalação em equipamentos, os sensores de potência são usados em grande escala no monitoramento de equipamentos de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

As componentes da potência de usinagem resultam dos produtos das componentes da força e velocidade. A Potência de Corte ( $N_c$ ), dada em cv (cavalo vapor), é representada pela Equação 1. (MACHADO et al., 2011):

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 75} \quad (1)$$

Onde  $F_c$  é a força de corte em Kgf e  $V_c$  é a velocidade de corte em m/min. A Potência Efetiva de Corte ( $N_e$ ) é representada pela Equação 2 (MACHADO et al., 2011):

$$N_e = N_c + N_f \quad (2)$$

A potência consumida na operação de usinagem é medida diretamente no motor elétrico da máquina operatriz. Nas máquinas ferramentas que apresentam um único motor para acionar o movimento de corte e o movimento de avanço, a potência fornecida pelo motor vale:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (3)$$

Onde  $\eta$  é o rendimento da máquina-ferramenta, que vale geralmente de 60% a 80%. No caso de haver um motor para acionar cada movimento, isto é, um motor para acionar o movimento de corte e outro para acionar o movimento de avanço, o cálculo de  $N_m$  é separado, e o rendimento é geralmente o maior.

### **3.5.3 Emissão acústica**

Para Reddy (2010), a emissão acústica (EA) se refere às ondas de tensão geradas por processos dinâmicos no material, cuja energia liberada pode ser mensurada por um transdutor de alta sensibilidade.

Segundo Mechefske et al. (2002), o estudo dos fenômenos de desgaste pelo monitoramento da emissão acústica tem uma grande correlação, sendo as emissões acústicas geradas em um material que está sendo usinado, provendo assim indicações do estado físico da peça. As Emissões Acústicas podem ser vistas como uma descrição do processo, que é mais estreitamente relacionado com o processo de estrutura do material ou características de sua geometria. As características do sinal de EA, tais como a frequência, amplitude, entre outras, são determinadas pelas propriedades do material.

De acordo com Webster et al. (1996), uma das melhores formas de se monitorar o sinal de emissão acústica é pelo seu valor RMS (valor quadrático médio), o qual é um valor retificado do sinal de EA em intervalos de tempo determinado, e vem sendo amplamente utilizado com sucesso para monitoramento de diversos problemas de usinagem.

### **3.5.4 Vibração**

Para Souza (2011), vibração é o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, assim como das forças a ele associadas, podendo ser quantificada de acordo com seu movimento ondulatório (deslocamento, velocidade, aceleração). Para que haja vibração é necessário que seja armazenada a energia cinética e que o corpo rígido tenha certa elasticidade, respondendo assim ao estímulo de uma fonte.

Para Zacarias (2012) vibração é um parâmetro de usinagem que pode estar relacionada ao desgaste de ferramentas de corte e falhas de componentes de máquinas, que ocorre devido à variação de forças dinâmicas. Através da análise de vibrações pode-se detectar também o desgaste de ferramentas, queima em peças, condição de lubrificação entre outros.

Para Alves et al. (2009), através da análise de vibrações pode-se detectar desgaste de ferramentas, queima em peças, condição de lubrificação, entre outros. Com a análise de vibrações é possível detectar em uma máquina quais de seus componentes apresenta defeitos relacionados a problemas elétricos, problemas com componentes como correias, engrenagens e rolamentos, folgas, excentricidade, falta de rigidez, desalinhamentos, desbalanceamentos etc.

### 3.6 DESGASTE DA FERRAMENTA

Segundo Machado e Silva (2004), a destruição da ferramenta ocorre através de 3 formas: avaria, desgaste e deformação plástica. Como este trabalho se trata do estudo do desempenho de ferramentas cerâmicas, deve-se considerar apenas as avarias e desgaste.

Avaria é o processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da mesma. A avaria promove a perda de massa da ferramenta.

O desgaste ocorre quando há mudança da ferramenta da sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. No desgaste ocorre a perda de massa de maneira contínua e progressiva e em proporções pequenas. Assim, haverá a perda gradual do poder de corte, ocasionando um aumento de potência requisitada da máquina operatriz.

#### 3.6.1 Vida da ferramenta

Segundo Ferraresi (1977), define-se vida de uma ferramenta como sendo o tempo durante o qual a mesma trabalha efetivamente, deduzidos os tempos passivos, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo-se este tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Logo, vida da ferramenta é o tempo entre duas trocas sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente.

Uma vez iniciado o processo de usinagem, inicia-se por consequência o desgaste da ferramenta, sendo que a velocidade deste processo está diretamente ligado às propriedades mecânicas e interações químicas dos materiais utilizados para a ferramenta e peça, assim como aos parâmetros de usinagem empregados. No caso da usinagem com ferramentas de cerâmica em operação de acabamento, como tratado neste trabalho, o fator principal para a determinação do momento de substituição da aresta de corte é o desgaste de flanco, que

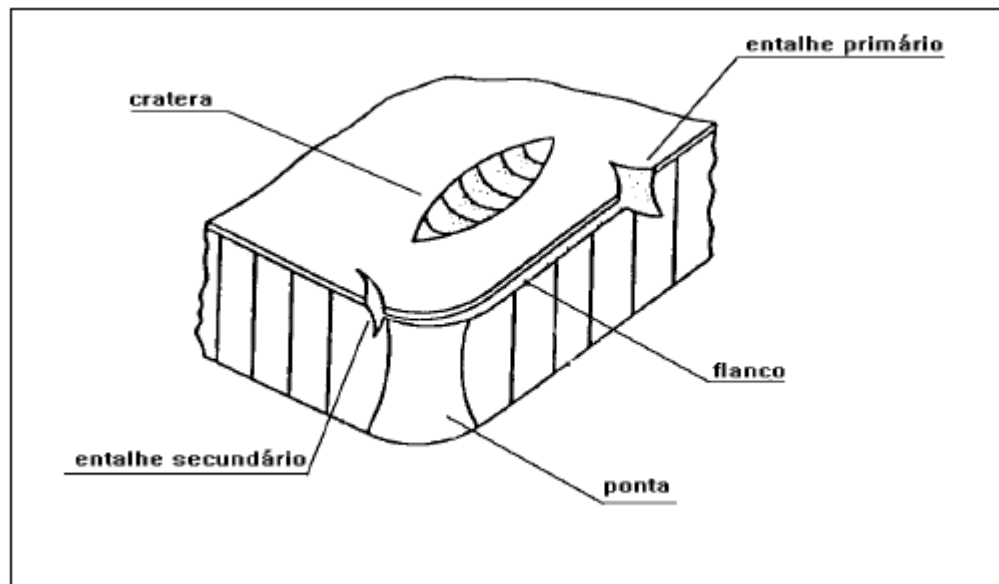
prejudica tanto o acabamento superficial como as tolerâncias especificadas, gerando não-conformidades que podem levar ao descarte da peça usinada.

Conforme comentado anteriormente, a vida da ferramenta está diretamente relacionada às características de cada processo, aos parâmetros de usinagem e a variação das características dos materiais. Conhecidas algumas das variações possíveis, a prática tem comprovado que uma infinidade de fenômenos pode ocorrer durante o processo de torneamento, provocando assim desgastes diversos ou isolados, abreviando a vida da ferramenta.

Quando duas ou mais formas de desgaste se apresentam na ferramenta, normalmente uma destas se destaca, devendo ser utilizada a fim de se determinar o critério de fim da vida da ferramenta.

Na Figura 11 apresentam-se os desgastes de flanco, de ponta, de cratera, de entalhes primário e secundário, que podem surgir nas ferramentas; cabe aqui destacar os desgastes de flanco e da ponta da aresta de corte uma vez que a operação estudada é, em geral, de acabamento, influenciada diretamente por esses tipos de desgaste.

Figura 11 - Desgastes Característicos que Podem Surgir em uma Ferramenta de Torneamento.



Fonte: Costa (1995).

O desgaste de flanco ou frontal, tipo que surge com maior frequência nas operações de torneamento, é causado, principalmente, pelo atrito da peça com a superfície de folga da ferramenta. É comumente utilizado como critério de fim de vida quando se deseja monitorar

diretamente a vida de uma ferramenta, visto a facilidade de verificação e medição da largura da região do desgaste.

Indiretamente, pode-se também acompanhar a evolução desse desgaste através do monitoramento das forças de corte e de avanço, da vibração da ferramenta e/ou da potência elétrica consumida pelo processo, uma vez que o desgaste frontal afeta tanto a superfície usinada, como aumenta a área de contato ferramenta – peça elevando os níveis de força, vibração e potência consumida no processo (COSTA, 1995).

Em operações de acabamento, como as tratadas neste trabalho, a ferramenta deve ser substituída antes que o desgaste atinja valores que possam provocar danos ao acabamento superficial ou até mesmo a quebra da ferramenta, trazendo resultados indesejáveis ao processo. De modo também já citado, a vida da ferramenta tende a diminuir com o aumento das forças de corte o que normalmente acontece quando se aumenta a velocidade de corte e/ou o avanço.

No torneamento com ferramenta de cerâmica, normalmente verifica-se a quebra de pequenos fragmentos da aresta de corte e ou lascamentos após determinado tempo de usinagem. Esse comportamento será analisado no presente trabalho.

### 3.7 CAVACOS

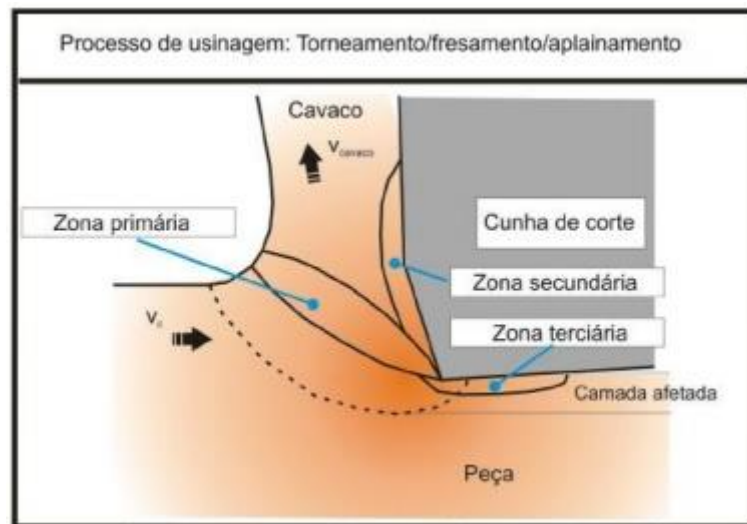
O material da peça está diretamente ligado ao tipo de cavaco que será formado. Ductilidade pode ser definida como a capacidade que um material possui de deformar sem que haja sua fratura. Neste caso, material dúctil é aquele que apresenta elevada capacidade de deformação plástica sem ocorrer fratura, caso contrário, material com baixa capacidade de deformação plástica é considerado um material frágil. Geralmente, peças dúcteis geram cavacos contínuos e longos, não sendo o tipo mais indicado para a produção, pois ocupam muito espaço e podem causar acidentes; enrolar na peça, no suporte da ferramenta ou em componentes da máquina-ferramenta; atrasando a produção além de ocasionar um acabamento inferior. Peças frágeis geram cavacos pequenos, descontínuos e quebradiços, que é o tipo mais indicado para a produção, ocupando menos espaço, ideal para ser reciclado ou fundido novamente. No torneamento de peças duras, assim como na maioria dos casos de usinagem, a maior parte do calor gerado é dissipado através do cavaco, principalmente a altas velocidades, de modo que a temperatura da ferramenta e da peça diminui substancialmente. (YALLESE et al., 2009).

A profundidade de usinagem tem um efeito dominante na estabilidade do processo, na energia utilizada no processo e na determinação da formação de cavaco (NING; RAHMAN; WONG, 2001), influenciando também, diversos outros fatores ligados ao processo de usinagem, tais como o desgaste da ferramenta e a alteração da integridade superficial do material trabalhado (ZEILMANN et al, 2004).

Uma usinagem estável proporciona diversos benefícios para o processo, entre eles, uma melhora na geração de cavaco. Para que isto ocorra, faz-se necessário utilizar a melhor combinação de variáveis, dentre elas a rotação da árvore da máquina juntamente com modificações no avanço, proporcionando uma profundidade da usinagem máxima.

Praticamente todo o trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor, sendo três as regiões geradoras de calor conhecidas, denominadas respectivamente como zona primária, secundária e terciária, que podem ser vistas na Figura 12. Na zona primária ocorre a deformação e separação de cavaco devido ao atrito do mesmo com a superfície de saída; esta zona é considerada a principal geradora de calor, seguida pela zona secundária. Por fim tem-se a zona terciária, que gera calor devido às deformações da peça e seu atrito contra a superfície de folga da ferramenta (MACHADO; DA SILVA, 2004). Sendo assim, é possível afirmar que as alterações nas características das superfícies usinadas são uma somatória dos efeitos térmicos e mecânicos provenientes da usinagem.

Figura 12 - Regiões geradoras de calor na usinagem



Fonte: Diniz et al (2013).

A velocidade de corte é o parâmetro que apresenta o maior efeito sobre a temperatura da interface cavaco/ferramenta (ABRAO; ASPINWALL; NG, 1996). Com baixas velocidades, o

desgaste da ferramenta é dominado por deformações plásticas e pela abrasão. A partir do momento em que a velocidade aumenta, a porcentagem de energia que tende a ir para a ferramenta diminui (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Entretanto, a quantidade de energia total é cada vez maior aumentando a temperatura.

KOMANDURI (1993) relata que na usinagem de materiais endurecidos há uma tendência para a formação de um cavaco cisalhado, isso ocorre em função da instabilidade da usinagem e esse fenômeno é potencializado com o aumento das velocidades de corte.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto busca viabilizar o torneamento para o aço AISI 4340 endurecido utilizando um material nacional experimental como ferramenta de corte, de maneira a analisar o desempenho das ferramentas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ .

Para que os objetivos propostos sejam alcançados o projeto foi desenvolvido através de experimentação, partindo de ensaios preliminares a fim de determinar os parâmetros e variáveis mais adequados à pesquisa como velocidade de corte, velocidade de avanço, avanço por dente, profundidade de corte, etc.

### 4.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá, utilizando um centro de torneamento CNC marca Romi modelo GL 240M com motor principal de 15 kW de potência (Figura 13) com sistema de aquisição de dados desenvolvido para captação de variáveis de saída como potência, força de corte, força de avanço, vibração e emissão acústica.

Figura 13 - Centro de torneamento CNC marca Romi modelo GL 240M



Fonte: Produção do próprio autor

Foi utilizado como corpo de prova o aço AISI 4340 cujas dimensões foram de 100mm de diâmetro e 300 mm de comprimento. O suporte para ferramentas a ser utilizado é do tipo CAPTO marca Seco, equipado com dispositivo para sensores de emissão acústica e vibração (Figura 14) para garantir maior rigidez.

Figura 14 - Suporte para ferramentas tipo CAPTO marca Seco e corpo de prova para torneamento

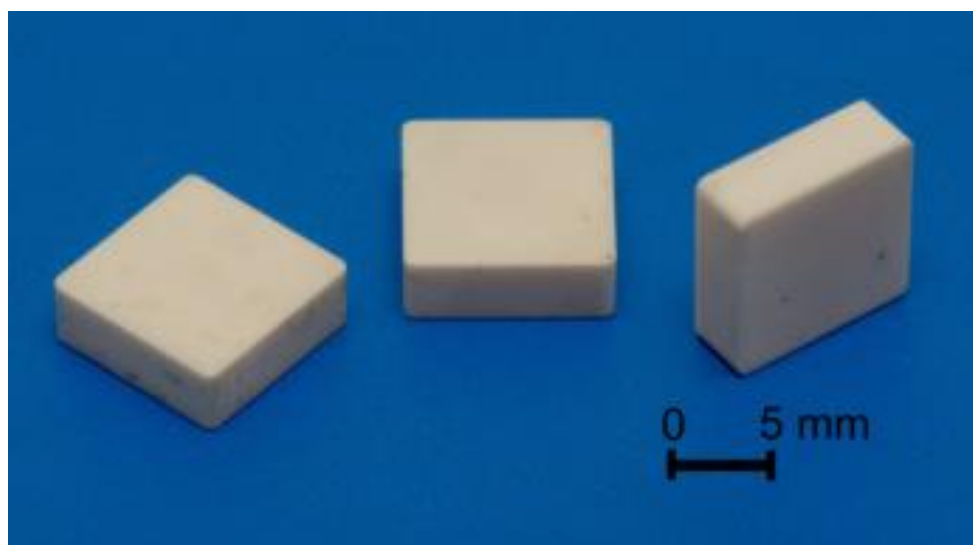


Fonte: Produção do próprio autor

## 4.2 FERRAMENTAS

As ferramentas utilizadas são as pastilhas de cerâmica de óxido de alumínio dopadas com óxido de magnésio ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ ), com 95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,25%  $\text{MgO}$ . O ângulo de saída da ferramenta é de  $-6^\circ$  com ângulo de folga e de inclinação de  $6^\circ$ . As ferramentas têm o código SNMG120408, que explicita suas propriedades, a nomenclatura “S” é *square*, ou seja é uma ferramenta quadrada, “N” de neutra, “M” que é a classe de tolerância catalogada e “G” por não possuir quebra-cavaco. Os valores encontrados no código significam respectivamente: 12 mm de aresta, 4 mm de altura e 8 mm de raio de ponta.

Figura 15 – Ferramentas  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  (SNMG120408)



Fonte: Produção do próprio autor

#### 4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados é constituído por um computador equipado com uma placa de aquisição de dados, um módulo de canais e um cabo de ligação entre a placa e o módulo de canais (Figura 16). Integram ainda o sistema de aquisição de dados dispositivos desenvolvidos para fixação dos sensores de vibração e emissão acústica.

Figura 16 – Sistema de aquisição de dados e dispositivo de fixação dos sensores



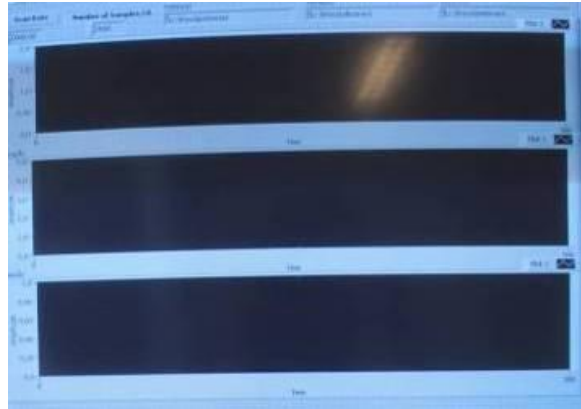
Fonte: Produção do próprio autor

O sistema de aquisição de dados apresenta sensores de potência, sensor de emissão acústica e sensor de vibração que serão descritos a seguir. Durante o processo de usinagem foram coletados dados de potência, vibração e emissão acústicas, com o auxílio deste sistema de aquisição de dados desenvolvido, que coleta os dados do processo em tempo real.

Foi desenvolvido aplicativo para a aquisição de dados através do software Labview da National Instruments para captação de potência, emissão acústica e vibração. Para isso, utilizou-se a placa de aquisição de dados, marca National Instruments, modelo NI PCI 6220.

A placa de aquisição de dados teve a função de receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software no microcomputador. O software utilizado para captação dos dados adquiridos pelos sensores foi feito no programa LabView® 7.1 da National Instruments, onde foi elaborado um programa para adquirir os dados. A tela do programa de aquisição feito no software LabView® 7.1 pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Programa de aquisição feito no software LabView® 7



Fonte: Produção do próprio autor

Foi realizada também a montagem e preparação do sistema de aquisição de dados e o Banco de ensaios, ajustando as máquinas, equipamentos, sensores. O sistema de aquisição de dados implantado é constituído por um computador equipado com uma placa de aquisição de dados, um módulo de canais e um cabo de ligação entre a placa e o módulo de canais. Este sistema permitiu a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, foram convertidos em sinais eléctricos proporcionais.

#### 4.3.1 Potência consumida

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram usados sensores de potência marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 18). O sinal do sensor (Potência) foi captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. O sensor em função da corrente eléctrica de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), que é armazenada pelo computador.

Figura 18 – Sensor de potência marca LEM modelo AT 100 B10.



Fonte: Produção do próprio autor

Onde através da Equação 4, o sinal adquirido pode ser transformado na unidade de potência (Watts). Substituindo o valor do sinal obtido e dividido por 10, pois o sensor capta amplitude de tensões na faixa de (0-10V), o valor da amplitude da corrente 100, o valor da tensão de fase do motor (220 V) e o fator de escorregamento (0,92) do motor, e multiplicando por  $3^{1/2}$  por ser um motor trifásico, que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$Potência = \frac{\text{valor}}{10} \cdot 100 \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{3} \quad (4)$$

#### 4.3.2 Vibração

Para a captação da vibração foi usado um módulo de vibração composto por um sensor piezelétrico (acelerômetro) no sentido vertical da lixadeira plana e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca VIBRO CONTROL, modelo TV100 (Figura 19).

Figura 19 – Módulo de vibração modelo TV100



Fonte: Produção do próprio autor

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 5.

$$V = \frac{25 \cdot V_{cc}}{8} \quad (5)$$

### 4.3.3 Emissão acústica

Para a aquisição da emissão acústica foi usado um módulo de emissão acústica composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000 (Figura 20).

Figura 20 - um sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION



Fonte: Produção do próprio autor

Esse sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades.

## 4.4 METODOLOGIA DE ENSAIOS

### 4.4.1 Ensaios definitivos

Os ensaios definitivos foram realizados no Laboratório de Estudos de Usinagem na Unesp, no Departamento de Materiais e Tecnologia, Guaratinguetá, utilizando um centro de torneamento CNC marca Romi modelo GL 240M. Durante os ensaios foram obtidas e armazenadas todas as variáveis de saída pelo sistema de aquisição de dados, como a Potência de Corte, Emissão Acústica e vibração.

Os parâmetros de corte utilizados foram: Velocidade de corte ( $V_c$ ) = 160 e 200m/min; avanço (f): 0,05 mm/rot, 0,10 mm/rot e 0,15mm/rot; profundidade de corte ( $A_p$ ): 0,15mm e 0,25mm.

## 4.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS

Para melhor compreensão do experimento foi feita uma análise estatística dos dados obtidos experimentalmente. Foi desenvolvido o estudo de Planejamento de experimento por fatorial completo, com a determinação de três fatores principais (Velocidade de Corte, Profundidade de corte e Avanço). Os níveis por sua vez tem a função de apresentar a variação de condição ou situação dentro do fator. Durante o experimento foram realizados ensaios utilizando duas velocidades de corte  $V_c$  (160 e 200m/min), três avanços  $f$  (0,1, 0,15 e 0,25mm/rot) e duas profundidades de corte  $a_p$  (0,15 e 0,25mm) para as ferramentas cerâmicas de  $Al_2O_3+MgO$  com duas repetições para cada condição, totalizando assim a soma de 24 ensaios.

Para análise da rugosidade realizou-se a medição em triplicata de maneira a diminuir o erro experimental e conferir maior confiabilidade aos dados. Portanto, a soma de 24 ensaios com 3 repetições para cada ensaio totalizando 72 ensaios e 12 combinações analisadas no fatorial completo. Da mesma forma foram analisadas as variáveis respostas de emissão acústica, potência de corte e vibração com 3 valores médios da amplitude máxima para os 24 ensaios originais.

A análise de variância foi aplicada aos dados tratados estatisticamente, de maneira buscar correlações e identificar tendências. Foi utilizada a repetição de 2 vezes para o estudo, totalizando 72 ensaios para os 3 fatores e níveis subsequentes.

### 4.5.1 Fatorial completo

O Experimento Fatorial Completo inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento. Assim, foram utilizados todos os tratamentos possíveis no experimento, de maneira em que a ordem das corridas é aleatorizada. A aleatorização é essencial para uma boa conclusão, pois o experimentador não pode estar certo de todas as variáveis que influenciam o experimento, portanto desta maneira certifica-se que um maior número de variáveis externas ao experimento o influenciam de maneira igual. Mesmo que alguém possa identificar e controlar algumas dessas variáveis, complicações não planejadas são comuns. Essa aleatorização não evita complicações dentro do experimento, mas oferece alguma proteção contra o erro sistemático. Deve-se trabalhar com o maior número de réplicas possíveis, pois assim, utiliza-se mais informação sobre o nível de trabalho. Desta forma vários testes permitirão estimar a variância do erro do experimento e ainda investigar a

adequabilidade do modelo ajustado. O único requisito é que seja feito um número suficiente de réplicas para obter uma estimativa satisfatória do erro experimental.

#### **4.5.2 Teste de normalidade**

Nesse projeto realizou-se o teste de normalidade para verificar se os dados se apresentam inseridos em uma população normal, ou seja, se possuem uma distribuição normal. O teste realizado é o Kolmogorov-Smirnov utilizando o software de cálculo estatístico Minitab.

Este teste compara o ECDF (função de distribuição acumulada empírica) de seus dados de amostra com a distribuição esperada se os dados foram normais. Se esta diferença observada é adequadamente grande, o teste vai rejeitar a hipótese nula de normalidade da população. Se o valor de  $p$  do teste for menor do que seus  $\alpha$  escolhidos, pode-se então rejeitar a hipótese nula e concluir que a população é não-normal.

Grande parte dos problemas encontrados na estatística são tratados com a hipótese que os dados são retirados de uma população com uma distribuição de probabilidade específica. O formato desta distribuição pode ser um dos objetivos da análise. O teste paramétrico tradicional, baseado na distribuição t-student, é obtido sob a hipótese de que a população tem distribuição normal. Nesse sentido, surge a necessidade de certificar se essa suposição pode ser assumida. Portanto, assumir a normalidade dos dados é o primeiro passo que se deve tomar para simplificar as análises. Para dar suporte a esta suposição, foi considerado, dentre outros, o teste de Kolmogorov - Smirnov. O teste de Kolmogorov - Smirnov pode ser utilizado para avaliar as hipóteses:  $H_0$ : Os dados seguem uma distribuição normal e  $H_1$ : os dados não seguem uma distribuição normal.

É importante realizar o teste de normalidade uma vez que se o conjunto de dados analisados puder ser definido como distribuído de maneira normal, então a distribuição de probabilidade associada a esse conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal o que significa que o teorema do limite central pode ser validado. O teorema do limite central é um resultado fundamental em aplicações práticas e teóricas, pois ele garante que mesmo que os dados não sejam distribuídos segundo uma normal, a média dos dados converge para uma distribuição normal conforme o número de dados aumenta.

A aplicação do teste de normalidade é importante também uma vez que para analisar os resultados segundo a análise de variância é necessário que os erros dos dados sejam normais uma vez que uma das hipóteses básicas admitidas para a validade da ANOVA é a

normalidade dos resíduos. Ou seja, quanto mais próximos os pontos estiverem da reta do teste de normalidade, maior garantia que se tem com a normalidade dos resíduos.

#### 4.5.3 Análise de variância (ANOVA)

Foi aplicada a análise de Variância para o projeto, uma vez que é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos, onde um tratamento pode ser considerado uma condição imposta a um objeto que se deseja medir ou avaliar. Para entendimento completo da análise realizada é necessário conhecimento de alguns conceitos estatísticos, explanados na Tabela 4.

Tabela 4 – Conceitos básicos ANOVA

| Conceitos                                    | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Análise de Variância (ANOVA)</b>          | Análise de variância é a técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de populações. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. |
| <b>Coefficiente de correlação de Pearson</b> | O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. O seu valor quadrado nos mostra o quanto a reta media representa os dados amostrados, e é denominado coeficiente de Determinação.                            |
| <b>Valor-P</b>                               | O valor-P ou <i>P-value</i> , que depende diretamente de uma dada amostra, tenta fornecer uma medida da força dos resultados de um teste, em contraste a uma simples rejeição ou não rejeição. Este é menor nível de significância com que não se rejeitaria a hipótese nula.  |
| <b>Valor-F</b>                               | O valor de F é a razão entre o modelo e seu erro. Para valores de F maiores que 2, deve-se investigar pois possivelmente existe interação, já que o valor-P poderá ser significativo.                                                                                          |
| <b>Hipótese Nula</b>                         | Uma hipótese nula geralmente afirma que não existe relação entre dois fenômenos medidos.                                                                                                                                                                                       |

Fonte: Produção do próprio autor

## 4.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Após a usinagem foi avaliada a integridade superficial das peças utilizadas no estudo. Para isso, foi determinada a rugosidade superficial com valores de Rugosidade Média e total das peças usinadas.

### 4.6.1 Rugosidade

Para a avaliação da qualidade superficial das peças através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 21), com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2  $\mu\text{m}$ .

Figura 21- Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf



Fonte: Produção do próprio autor

Para a rugosidade o parâmetro analisado foi o valor médio “ $R_a$ ” e o “ $R_t$ ”, por melhor se ajustar aos estudos de acabamento superficial, conforme se constatou na revisão da literatura. O comprimento de amostragem adotado foi de 0,8 mm (*cut-off*). O percurso de medição ( $l_m$ ) para *cut-off* 0,8 mm é de 4 mm.

Foram realizadas no total 3 medidas de rugosidade em cada sequência de usinagem, serão considerados os valores de  $R_a$  (Rugosidade média) e  $R_t$  (Rugosidade total), na qual a Rugosidade total ( $R_t$ ) é mais rígida na avaliação que o  $R_a$ , pois considera todo o comprimento de avaliação e não apenas o comprimento de amostragem.

#### 4.7 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Foi realizada a determinação do desgaste das ferramentas, identificando qual seria o tipo de avaria que ocorreu devido aos esforços na usinagem. Para isso, foi utilizado o estereoscópio da Marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 22).

Figura 22 - Estereoscópio da Marca Mahr, modelo MarVision MM200.



Fonte: Produção do próprio autor

#### 4.8 TIPOS E FORMAS DE CAVACOS

Para o estudo do processo de usinagem foram coletados os cavacos gerados para cada condição de ensaio. Para analisar os tipos e formas dos cavacos gerados foi utilizado um microscópio óptico da Zeiss (Figura 23).

A classificação dos tipos de cavacos gerados foi realizada segundo sua morfologia (contínuos, descontínuos, parcialmente contínuos ou segmentados) e para a classificação dos formatos dos cavacos foi utilizada as recomendações da norma ISO 3685:1993 (fita, helicoidal, espiral ou lascas).

Figura 23 - Microscópio Marca Mahr, modelo MarVision MM200.



Fonte: Produção do próprio autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos e a análise estatística das variáveis consideradas: rugosidade, potência de corte, vibração, emissão acústica, juntamente. Será apresentado também a análise dos desgastes das ferramentas e o estudo dos cavacos resultantes do processo de torneamento.

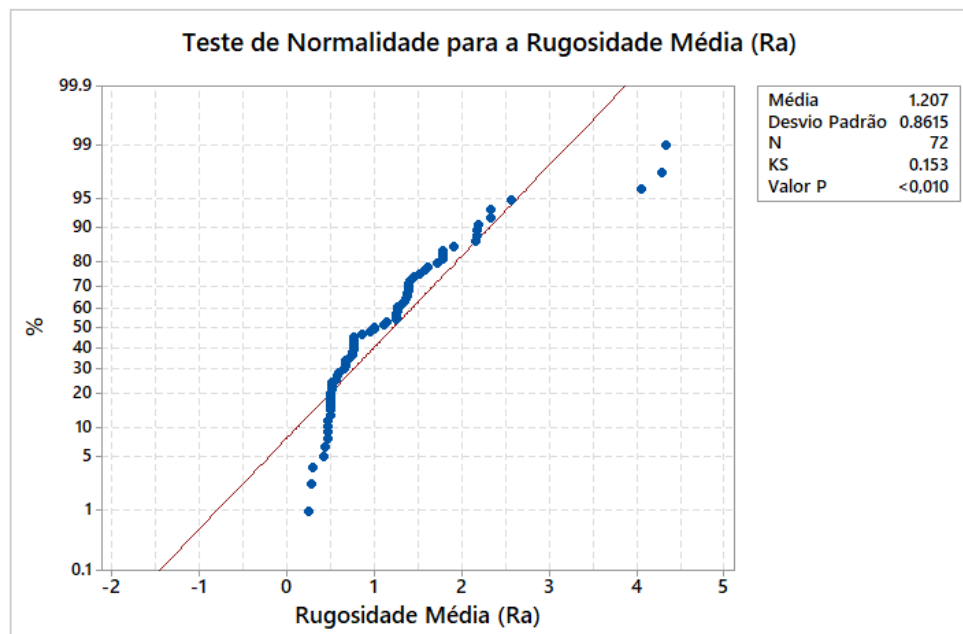
### 5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

#### 5.1.1 Rugosidade

##### 5.1.1.1 Rugosidade Média (Ra)

Para os valores de rugosidade média foi aplicado o teste de Normalidade de Kolmogorov - Smirnov que permite verificar se a distribuição de probabilidade associada a esse conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal (Figura 24).

Figura 24 – Gráfico do Teste de Normalidade de Kolmogorov – Smirnov para Ra



Fonte: Produção do próprio autor

Considerando o gráfico do teste de normalidade (Figura 24), pode-se observar que para a Rugosidade Média o valor de P encontrado é menor que 0,010 ou seja, se adotado um grau de significância de 5% os dados obtidos não poderão ser considerados como parte de uma população normal em conjunto. Uma vez que o valor de P é correspondente ao menor nível de significância no qual não se rejeita a hipótese nula  $H_0$ , com ( $H_0$ : valores são distribuídos normalmente e  $H_1$ : tal não ocorre), fornecendo assim uma medida de força dos dados do teste frente a rejeição de  $H_0$  ou aceitação de  $H_1$ . O total de dados analisados foi de 72 respostas com o desvio padrão de 0,8615 indicando assim a baixa dispersão da média populacional.

Na análise de variância para a Rugosidade média (Tabela 5) pode-se observar que a maioria dos valores de P value indicaram que os experimentos foram significativos, pois o valor-P foi menor que o nível de significância adotado de 5%. Como o valor de P pode ser difícil de ser encontrado, pode-se utilizar o valor de F, e uma tabela estatística para, através de interpolação do grau de liberdade do erro com o do fator, estimar o valor de F crítico. Dessa forma, valores de F medidos, que sejam numericamente maiores que o F crítico, indicam significância experimental.

Tabela 5 - ANOVA para Rugosidade Média

| <b>Análise da Variância para Ra</b> |           |               |               |                  |                |
|-------------------------------------|-----------|---------------|---------------|------------------|----------------|
| <i>Fonte</i>                        | <i>GL</i> | <i>Adj SQ</i> | <i>Adj QM</i> | <i>Valor F</i>   | <i>Valor P</i> |
| Modelo                              | 16        | 37,5494       | 2,3468        | 8,520            | 0,000          |
| Blocos                              | 5         | 0,8888        | 0,1778        | 0,650            | 0,666          |
| Linear                              | 4         | 29,1844       | 7,2961        | 26,500           | 0,000          |
| <i>Vc (m/min)</i>                   | 1         | 0,001         | 0,001         | 0,000            | 0,952          |
| <i>f (mm/rot)</i>                   | 2         | 24,8773       | 12,4386       | 45,180           | 0,000          |
| <i>ap(mm)</i>                       | 1         | 4,3061        | 4,3061        | 15,640           | 0,000          |
| <i>Interações de 2ª ordem</i>       | 5         | 7,4102        | 1,482         | 5,380            | 0,000          |
| <i>Vc*f</i>                         | 2         | 2,7771        | 1,3885        | 5,040            | 0,010          |
| <i>Vc*ap</i>                        | 1         | 0,0246        | 0,0246        | 0,090            | 0,766          |
| <i>F*ap</i>                         | 2         | 4,6085        | 2,3042        | 8,370            | 0,001          |
| <i>Interações de 3ª ordem</i>       | 2         | 0,0661        | 0,033         | 0,120            | 0,887          |
| <i>Vc*f*ap</i>                      | 2         | 0,0661        | 0,033         | 0,120            | 0,887          |
| <i>Erro</i>                         | 55        | 15,1415       | 0,2753        |                  |                |
| <i>Total</i>                        | 71        | 52,691        |               |                  |                |
| Coeficiente de determinação         |           |               |               | R-Sq(adj) =62,9% |                |

Fonte: Produção do próprio autor

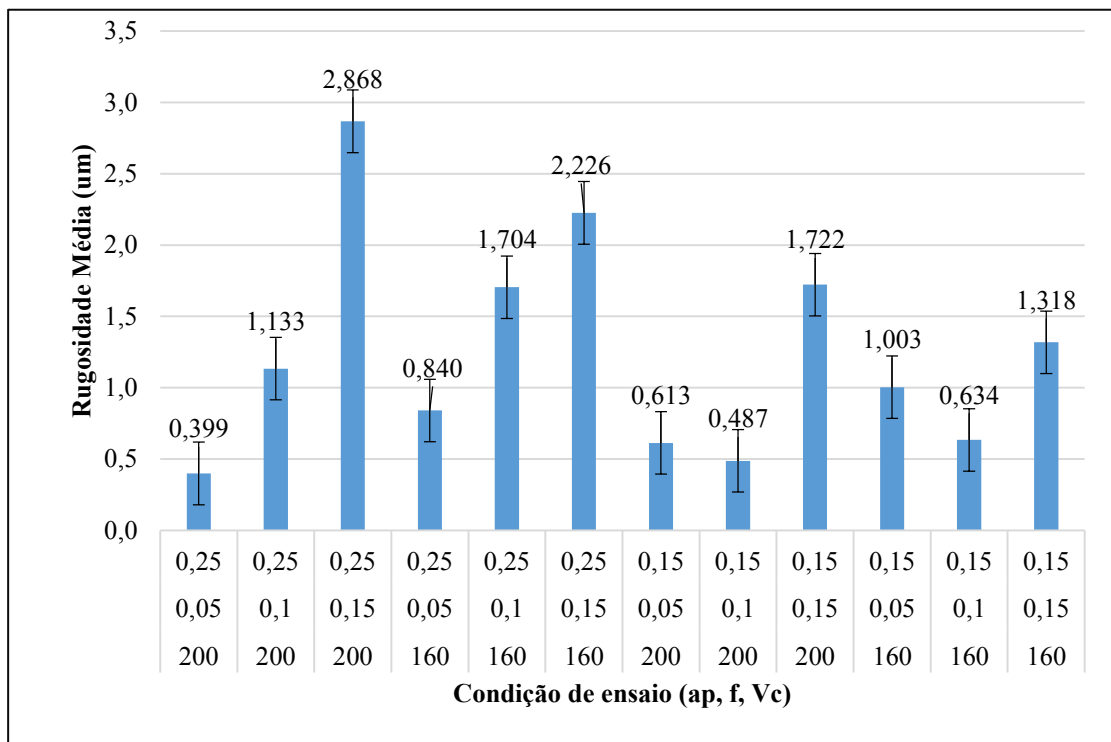
Observa-se portanto que a Velocidade de Corte não foi significativa e não interfere nos valores de rugosidade média resultante, assim como a interação da velocidade de corte ( $V_c$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). Entretanto os fatores Avanço e Profundidade de Corte foram

muito significativos interferindo na rugosidade. Pode-se concluir também que não houve interação de 3ª ordem significativa para os fatores nos resultados de  $R_a$  ao nível de significância de 5%.

Entretanto, garante-se pelo coeficiente de determinação ou valor de  $R$ -sq ajustado que as determinações finais são válidas para a maioria dos dados uma vez que o modelo explica cerca de 62,9% dos resultados os quais podem ser encontrados segundo a reta-média.

A seguir encontra-se o gráfico geral de  $R_a$  que ilustra os valores de rugosidade média para todas as condições experimentais com as combinações de valores de avanço ( $f$ ) e de profundidade de corte ( $a_p$ ).

Figura 25 – Gráfico da Rugosidade Média ( $R_a$ ) para todas as condições de ensaio

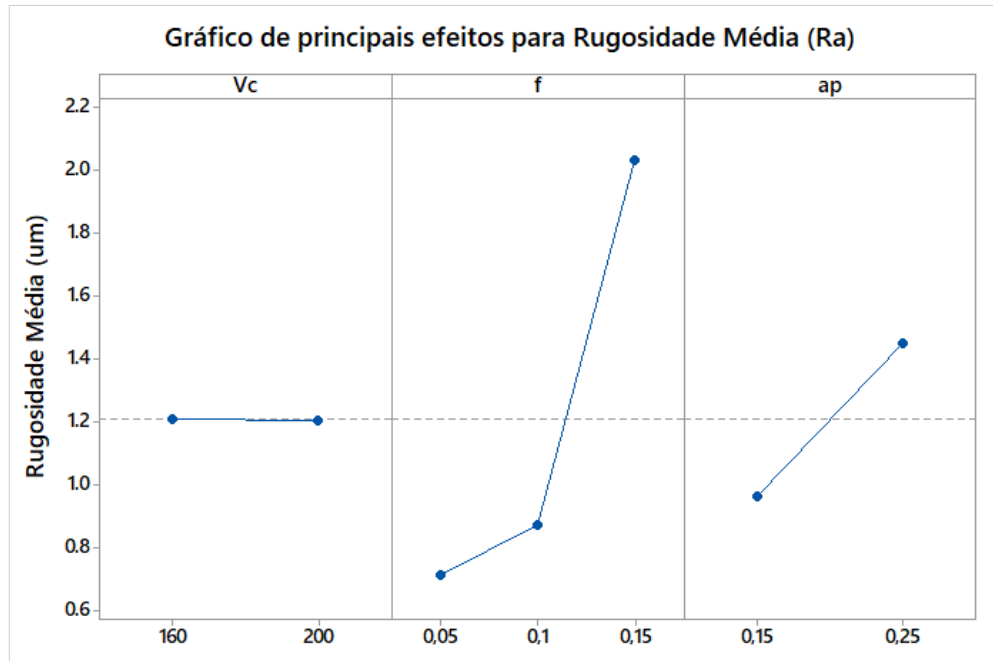


Fonte: Produção do próprio autor

No gráfico de efeitos principais para a Rugosidade média (Figura 26), para o fator velocidade de corte ( $V_c$ ) observa-se pouca mudança nos resultados da rugosidade média, como previsto pela anova com valor de  $P$  de 0,952, conclui-se, portanto, que as duas velocidades de corte utilizadas não são fatores significantes e não influenciam na análise da rugosidade média final. Já para o avanço ( $f$ ) percebe-se que quanto menor a amplitude de avanço utilizada melhor é a qualidade superficial resultante com pouca variação até 0,10mm/rot. Entretanto quando o avanço é maior que 0,10 mm/rotação se observa um grande

salto de rugosidade e considerável perda de qualidade superficial, onde a rugosidade é cerca de 3 vezes maior.

Figura 26 – Gráfico de efeitos principais para Ra



Fonte: Produção do próprio autor

Para o fator de profundidade de corte ( $a_p$ ), similarmente ao avanço, maiores valores de rugosidade foram encontrados para maiores valores de profundidade de corte como esperado, confirmando que a profundidade de corte é um fator crítico no processo de usinagem.

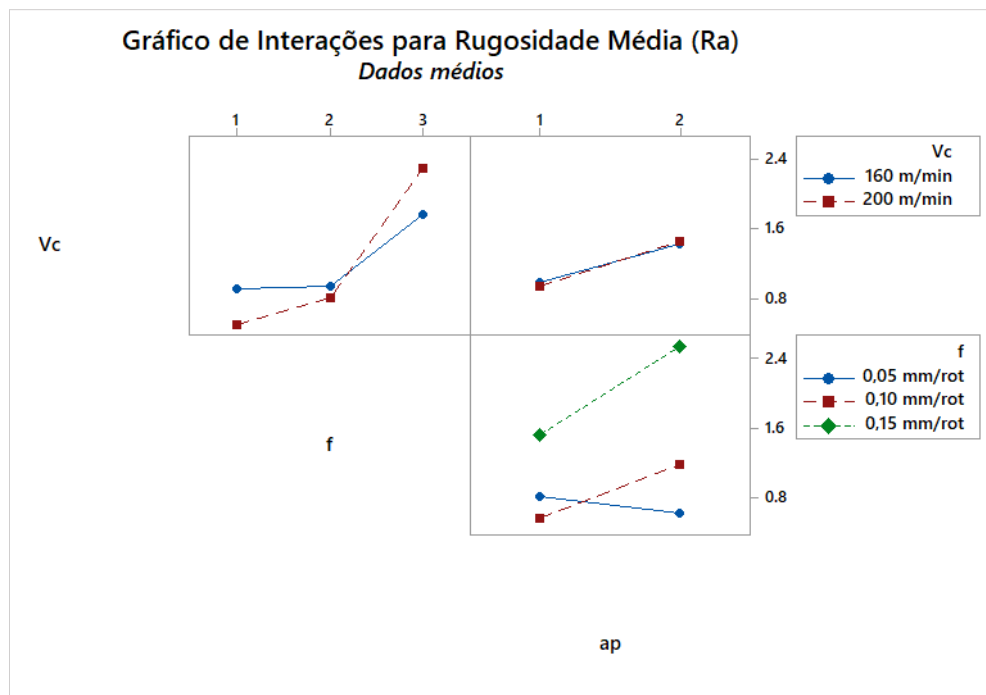
O fato da velocidade de corte ser a que menos influi no acabamento superficial se deve ao fato de que em velocidades de cortes mais elevadas o acabamento superficial se torna insensível às variações da velocidade de corte. O aumento do avanço tem efeito geométrico na rugosidade, já que contribui para o aumento da distância entre picos no perfil de rugosidade, aumentando assim o valor da amplitude da rugosidade.

É importante destacar a amplitude dos valores de Rugosidade média na ordem de 1,0  $\mu\text{m}$  para a utilização da ferramenta cerâmica. Esses valores elevados comprovam a baixa qualidade superficial resultante para os valores maiores de avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).

No Gráfico de interações para a rugosidade média (Figura 27), observa-se claramente que as interações para os fatores ( $V_c \times f$ ) e ( $a_p \times f$ ) foram significativas e somente a interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte ( $V_c \times a_p$ ) não foi significativa.

Para a velocidade de corte maior (200m/min) foram obtidos maiores valores de rugosidade, sendo o mais crítico quando  $f=0,15$  mm/rot. Percebe-se também que mesmo para a velocidade de corte mais alta, quando o avanço é menor, a rugosidade é mais baixa, o que confere com a literatura, uma vez que para ferramentas cerâmicas a usinagem de substituição do processo de retificação deve ser realizada a velocidade de corte mais altas.

Figura 27 – Gráfico de Interações para Ra



Fonte: Produção do próprio autor

Para a profundidade de corte, evidentemente quanto maior o avanço pior é a qualidade superficial resultante. Entretanto para o menor valor de avanço de 0,05 mm/rot os resultados entre as duas profundidades de corte não diferem muito, isso acontece porque o fator de avanço demonstrou-se mais crítico que a profundidade de corte, influenciando mais os resultados finais a nível de significância de 5%.

Conclui-se, portanto, para análise da rugosidade média, que os fatores que mais foram influentes foram o avanço e a profundidade de corte. Segundo Machado et al (2012), as condições de corte têm grandes efeitos sobre a rugosidade resultante, sendo o avanço um dos parâmetros mais influentes. Como foi verificado, para o torneamento do aço 4340 endurecido, o avanço foi um fator de alta significância. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço aumentam em proporção quadrática ao avanço, tornando-o assim fator geométrico de influência direta.

Pode-se também afirmar que a formação da aresta postiça de corte nas ferramentas colaborou para a pior qualidade superficial. Para as velocidades de corte utilizadas, tanto 160m/min e 200m/min, houve o aumento da incidência de arestas postiças conforme aumento do avanço utilizado. Ainda segundo Machado et al (2012), o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento, pois a aresta postiça desaparece e o aumento da temperatura diminui a resistência ao cisalhamento da peça, o que reduz as forças de usinagem.

Entretanto devido à geometria da ferramenta, como mostraram os ensaios preliminares realizados, o aumento de velocidade de corte levou também ao aumento de vibração durante a usinagem, por elevação da rotação do eixo árvore, piorando ainda mais o acabamento.

No que tange o fator profundidade de corte, maiores valores de profundidade de corte aumentam as forças, e, portanto, levam a maiores valores de rugosidade. Entretanto percebe-se claramente que para as condições de ensaio, o fator avanço foi mais crítico que a profundidade de corte.

#### 5.1.1.2 Rugosidade Total (Rt)

Tabela 6 - ANOVA para Rugosidade Total

| <b>Análise da Variância para Rt</b> |           |               |                   |                |                |
|-------------------------------------|-----------|---------------|-------------------|----------------|----------------|
| <i>Fonte</i>                        | <i>GL</i> | <i>Adj SQ</i> | <i>Adj QM</i>     | <i>Valor F</i> | <i>Valor P</i> |
| Modelo                              | 16        | 1086,98       | 2,3468            | 67,936         | 0,000          |
| Blocos                              | 5         | 35,62         | 0,1778            | 7,124          | 0,725          |
| Linear                              | 4         | 519,66        | 7,2961            | 129,916        | 0,000          |
| <i>Vc (m/min)</i>                   | 1         | 1,82          | 0,001             | 1,824          | 0,705          |
| <i>f (mm/rot)</i>                   | 2         | 367,66        | 12,4386           | 183,828        | 0,000          |
| <i>ap(mm)</i>                       | 1         | 150,18        | 4,3061            | 150,185        | 0,001          |
| <i>Interações de 2ª ordem</i>       | 5         | 531,21        | 1,482             | 106,242        | 0,000          |
| <i>Vc*f</i>                         | 2         | 218,78        | 1,3885            | 109,391        | 0,001          |
| <i>Vc*ap</i>                        | 1         | 31,50         | 0,0246            | 31,505         | 0,119          |
| <i>F*ap</i>                         | 2         | 280,92        | 2,3042            | 140,461        | 0,000          |
| <i>Interações de 3ª ordem</i>       | 2         | 0,49          | 0,033             | 0,245          | 0,981          |
| <i>Vc*f*ap</i>                      | 2         | 0,49          | 0,033             | 0,245          | 0,981          |
| <i>Erro</i>                         | 55        | 691,04        | 0,2753            |                |                |
| <i>Total</i>                        | 71        | 1778,02       |                   |                |                |
| Coeficiente de determinação         |           |               | R-Sq(adj) =49,83% |                |                |

Fonte: Produção do próprio autor

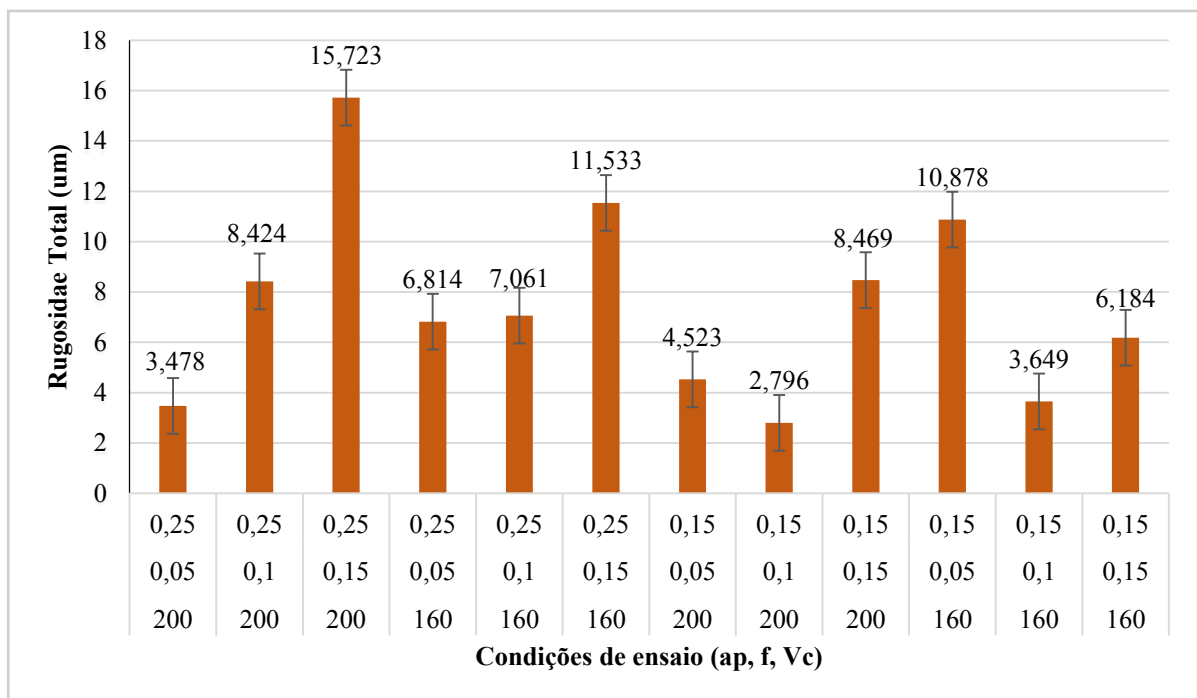
Novamente assim como para a rugosidade média o fator Velocidade de corte mostrou-se não significativo, assim como a sua interação com a profundidade de corte. Não houve

interação de 3ª ordem, o que significa que cada fator agiu isoladamente salvo as interações do avanço com a profundidade e com a velocidade de corte. Isso não quer dizer os parâmetros de corte não influenciaram no acabamento superficial, apenas significa que quando são comparados em conjunto entre eles não se observa diferença sobre a ótica estatística.

Destaca-se que o valor de  $R^2$  (ajustado) indica que a reta média, encontrada pelos pontos de  $R_t$ , não explica totalmente os dados, apresentando uma correspondência de apenas 49,83% dos valores.

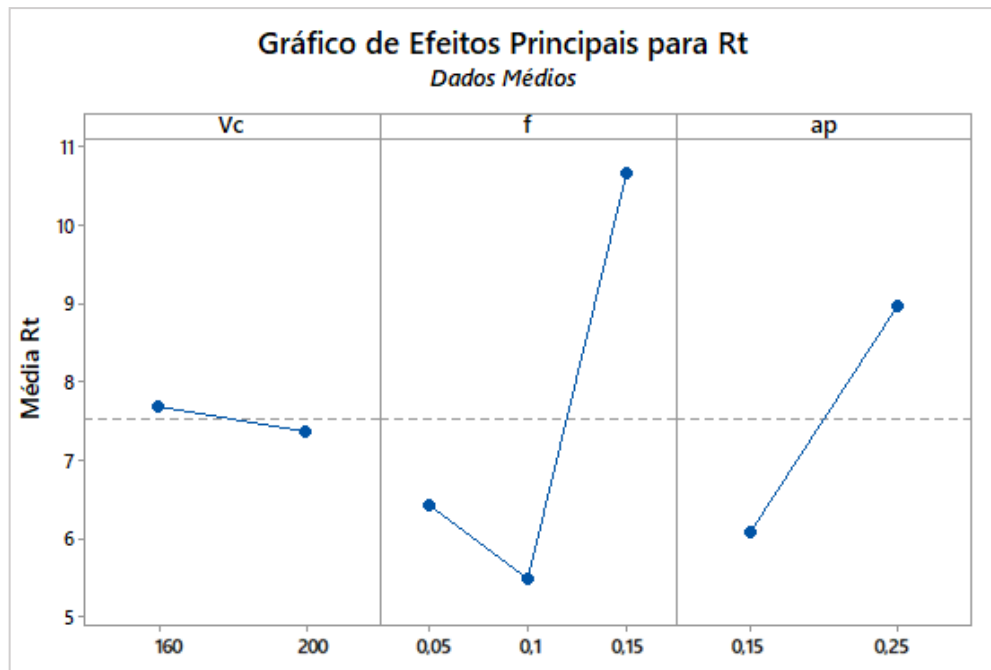
A seguir encontra-se o gráfico geral para  $R_t$  que ilustra os valores de rugosidade total para todas as condições experimentais com as combinações de valores de avanço ( $f$ ) e de profundidade de corte ( $a_p$ ).

Figura 28 – Gráfico da Rugosidade Total ( $R_t$ ) para todas as condições de ensaio



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 29 – Gráfico de Efeitos principais para Rugosidade Total ( $R_t$ )



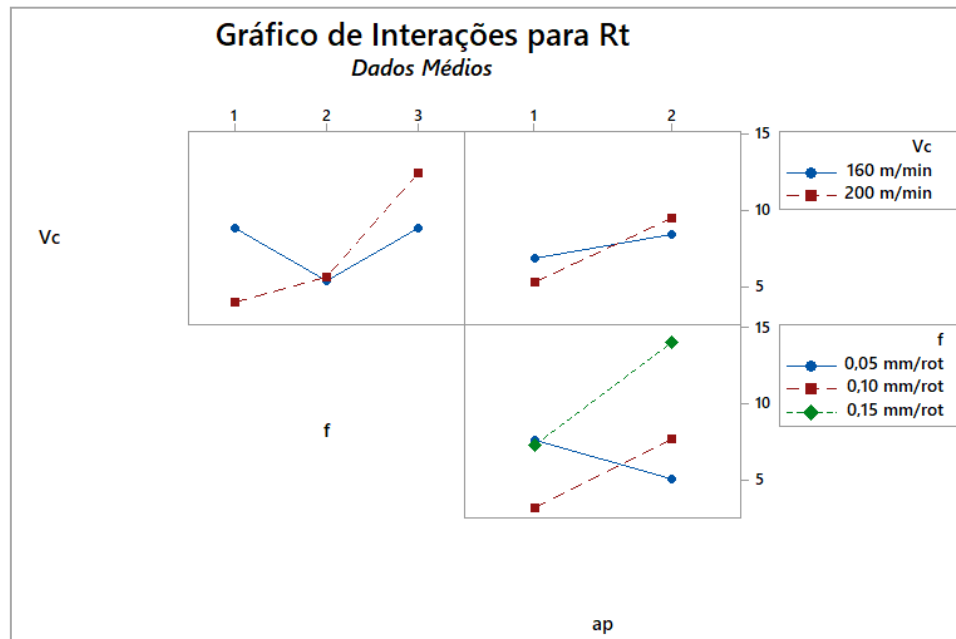
Fonte: Produção do próprio autor

Diferentemente da Rugosidade média ( $R_a$ ), para a Rugosidade total ( $R_t$ ) a variação de rugosidade com o aumento de velocidade é mais perceptível, isso ocorre pelo fato do  $R_a$  ser pouco sensível às variações das características de superfície, como por exemplo, especificar a máxima altura de picos e vales.

Analogamente, os valores de rugosidade aumentam para maiores profundidades de corte e avanços. Pode-se observar no gráfico de efeitos principais que o  $R_t$  possibilita identificar com mais clareza a interferência dos fatores na média de rugosidade total obtida. Como por exemplo no aumento de 0,05mm/rot no avanço faz a rugosidade final dobrar sua amplitude.

No gráfico de interações para a rugosidade total (Figura 30) pode-se ter uma visão mais realista da interação entre a velocidade de corte e os avanços, compreende-se que para o avanço intermediário de 0,10mm/rot ambas velocidades conferem em média a mesma qualidade superficial. Já nos valores de avanço mais críticos, sendo o menor de 0,05 mm/rot e o de 0,15mm/rot a situação é análoga à rugosidade média.

Figura 30 – Gráfico de Interações para Rt



Fonte: Produção do próprio autor

### 5.1.2 Potência de corte

Considerando a análise de variância para a Potência de corte na Tabela 7, pode-se observar que a maioria dos valores de P value indicaram que os experimentos foram significativos, pois o valor-P foi menor que o nível de significância adotado de 5%.

Tabela 7 - ANOVA para a Potência de corte

| Análise da Variância para Potência de Corte |    |          |                    |         |         |
|---------------------------------------------|----|----------|--------------------|---------|---------|
| Fonte                                       | GL | Adj SQ   | Adj QM             | Valor F | Valor P |
| Modelo                                      | 16 | 71899705 | 4493732            | 79,96   | 0,000   |
| Blocos                                      | 5  | 1801548  | 360310             | 6,41    | 0,000   |
| Linear                                      | 4  | 57262649 | 14315662           | 254,73  | 0,000   |
| $V_c$ (m/min)                               | 1  | 10815    | 10815              | 0,19    | 0,663   |
| $f$ (mm/rot)                                | 2  | 23211207 | 11605603           | 206,51  | 0,000   |
| $ap$ (mm)                                   | 1  | 34040627 | 34040627           | 605,71  | 0,000   |
| Interações de 2ª ordem                      | 5  | 12093745 | 2418749            | 43,04   | 0,000   |
| $V_c*f$                                     | 2  | 1497716  | 748858             | 13,32   | 0,000   |
| $V_c*ap$                                    | 1  | 384149   | 384149             | 6,84    | 0,012   |
| $F*ap$                                      | 2  | 10211881 | 5105940            | 90,85   | 0,000   |
| Interações de 3ª ordem                      | 2  | 741763   | 370881             | 6,60    | 0,003   |
| $V_c*f*ap$                                  | 2  | 741763   | 370881             | 6,60    | 0,003   |
| Erro                                        | 55 | 3090995  | 56200              |         |         |
| Total                                       | 71 | 74990700 |                    |         |         |
| Coeficiente de determinação                 |    |          | R-Sq(adj) = 94,68% |         |         |

Fonte: Produção do próprio autor

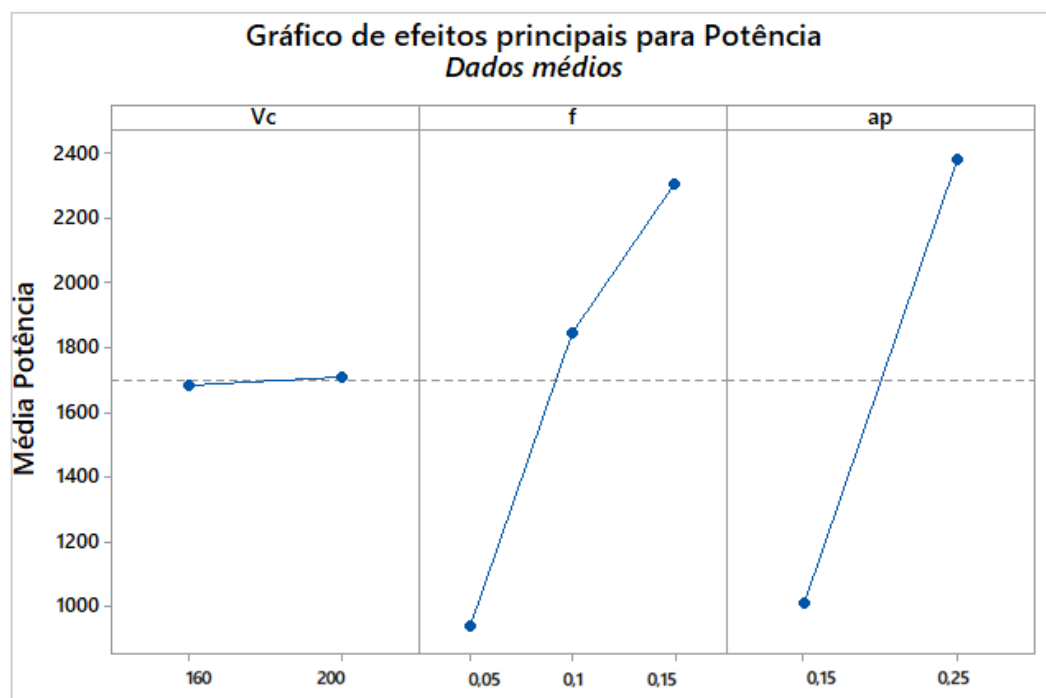
Dentre os fatores principais somente o fator Velocidade de corte que não foi significativo. Isso pode ser explicado pois a Potência de corte não é diretamente proporcional à velocidade de corte, pois seu crescimento causa decréscimo da pressão específica de corte e portanto da força de corte. Para os fatores Avanço e profundidade de corte nota-se uma extrema significância e portanto influência na potência de corte.

Todas as interações de 2ª ordem foram significativas e portanto houve também interação de 3ª ordem o que significa que os fatores combinados tiveram influência significativa na potência de corte.

Pelo valor de  $R^2$  vemos também que a reta média proveniente dos resultados os explica quase totalmente, abrangendo mais de 90% dos dados.

Pode-se observar no gráfico de efeitos principais para a Potência de corte (Figura 31) que a velocidade de corte realmente não apresentou influência direta nos resultados mesmo quando variada, muito em função da variação pequena de 160 para 200 m/min. Entretanto, para os fatores Avanço e Profundidade de corte nota-se uma extrema variação dos valores de potência, pois o aumento do avanço e da profundidade de corte aumentam a área de corte que é diretamente proporcional à potência.

Figura 31 – Gráfico de Efeitos Principais para a Potência



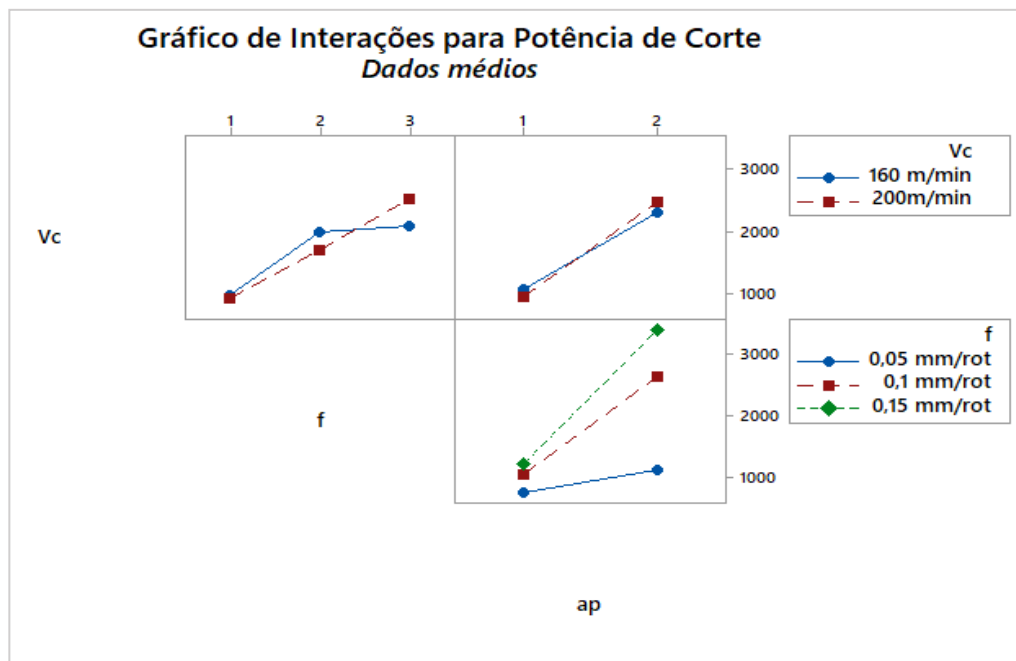
Fonte: Produção do próprio autor

Com o crescimento do avanço ( $f$ ) aumenta também o consumo de potência, percebe-se um grande aumento na potência com o aumento de apenas 0,05 mm/rot no avanço. Apesar do acréscimo do avanço proporcionar a diminuição da pressão específica, diminuindo a força de corte, o aumento da área da seção de corte devido ao avanço influencia muito mais no acréscimo da força de corte e consequentemente na potência de corte na usinagem.

Já para a profundidade de corte ( $a_p$ ) observa-se que quanto maior sua amplitude, maior será a potência consumida, também devido ao aumento da área da seção de corte, apesar do acréscimo do  $a_p$  praticamente não altera o valor da pressão específica de corte. Entretanto como se tratam de baixos valores de  $a_p$  a força de corte irá aumentar proporcionalmente elevando assim a amplitude da potência devido a maior área da seção do cavaco.

No gráfico de interações para a Potência (Figura 32) fica mais claro de observar como os maiores valores de avanço e profundidade de corte interferem na potência consumida, principalmente na interação de terceira ordem. Percebe-se que para o maior valor de avanço ambas velocidades de corte apresentaram potências parecidas. Como a potência de corte é a potência necessária na aresta de corte da ferramenta e consumida na remoção de cavacos é interessante observar os altos valores obtidos principalmente na utilização de altos avanços e profundidades de corte o que pode gerar custos adicionais quando considerada a aplicação em processos produtivos.

Figura 32 – Gráfico de Interações para a Potência de Corte



Fonte: Produção do próprio autor

### 5.1.3 Vibração

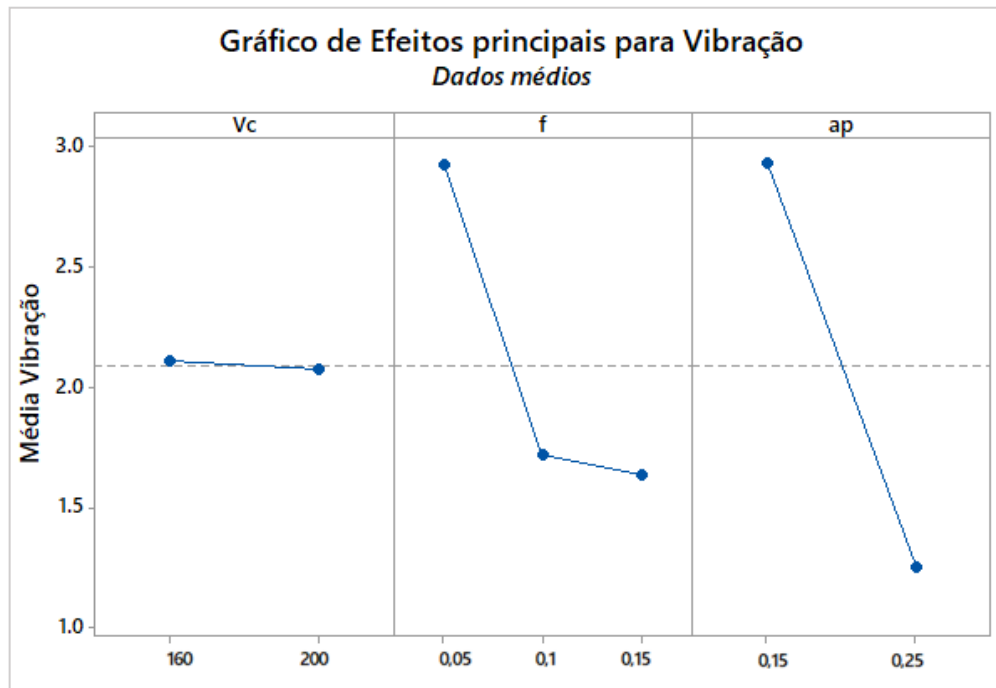
Tabela 8 - ANOVA para a Vibração

| <b>Análise da Variância para Vibração</b> |           |               |                   |                |                |
|-------------------------------------------|-----------|---------------|-------------------|----------------|----------------|
| <i>Fonte</i>                              | <i>GL</i> | <i>Adj SQ</i> | <i>Adj QM</i>     | <i>Valor F</i> | <i>Valor P</i> |
| Modelo                                    | 16        | 101,986       | 63,741            | 325,76         | 0,000          |
| Blocos                                    | 5         | 0,101         | 0,0203            | 1,04           | 0,406          |
| Linear                                    | 4         | 75,808        | 189,519           | 968,56         | 0,000          |
| <i>V<sub>c</sub> (m/min)</i>              | 1         | 0,018         | 0,0178            | 0,91           | 0,345          |
| <i>f (mm/rot)</i>                         | 2         | 24,970        | 124,850           | 638,06         | 0,000          |
| <i>ap(mm)</i>                             | 1         | 50,820        | 508,198           | 2597,21        | 0,000          |
| <i>Interações de 2ª ordem</i>             | 5         | 26,025        | 52,049            | 266,01         | 0,000          |
| <i>V<sub>c</sub>*f</i>                    | 2         | 0,034         | 0,0172            | 0,88           | 0,420          |
| <i>V<sub>c</sub>*ap</i>                   | 1         | 0,007         | 0,0065            | 0,33           | 0,566          |
| <i>F*ap</i>                               | 2         | 25,984        | 129,919           | 663,97         | 0,000          |
| <i>Interações de 3ª ordem</i>             | 2         | 0,052         | 0,0261            | 1,34           | 0,271          |
| <i>V<sub>c</sub>*f*ap</i>                 | 2         | 0,052         | 0,0261            | 1,34           | 0,271          |
| <i>Erro</i>                               | 55        | 1,076         | 0,0196            |                |                |
| <i>Total</i>                              | 71        | 103,062       |                   |                |                |
| Coeficiente de determinação               |           |               | R-Sq(adj) =98,65% |                |                |

Fonte: Produção do próprio autor

Para a vibração observa-se que a velocidade de corte não é significativa assim como a sua interação com os outros fatores. Não houve interação de terceiro grau indicando uma baixa correlação entre os fatores nos sinais de vibração. Entretanto o valor do coeficiente de determinação mostra que a reta média representa quase todos os pontos de valores de vibração, portanto conclui-se definitivamente que a velocidade de corte não foi um fator influente para os dados obtidos de vibração quando comparados estatisticamente.

Figura 33 – Gráfico Efeitos principais para a Vibração



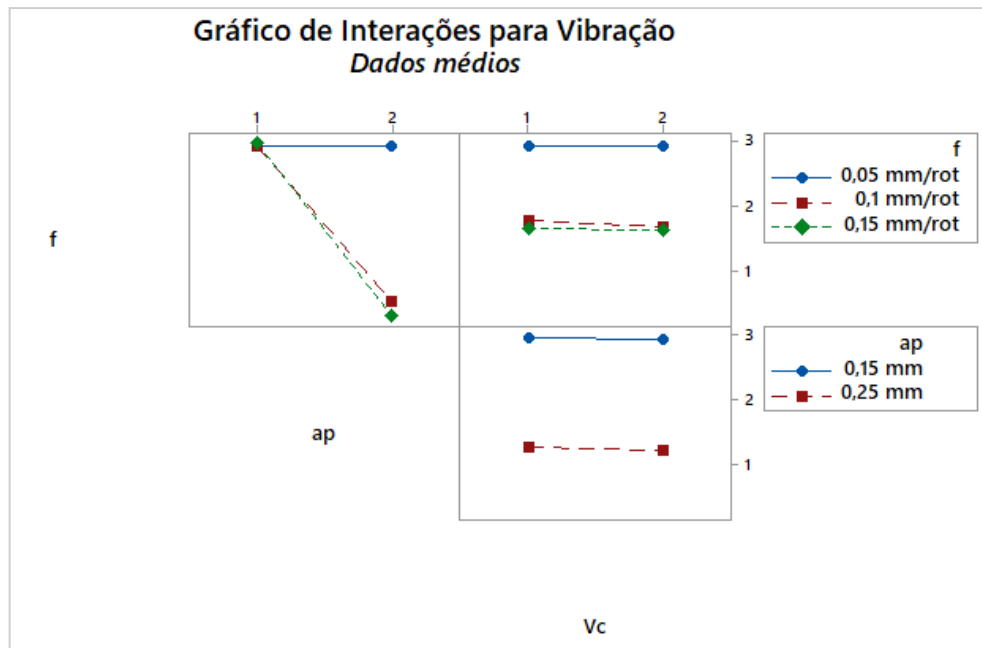
Fonte: Produção do próprio autor

Na análise do gráfico de efeitos principais para a vibração observa-se situação contrária por exemplo à potência de corte, onde com o crescimento do avanço e profundidade empregados menores os valores de vibração encontrados.

Observam-se altos valores de vibração para a ferramenta utilizada, isso pode ser explicado uma vez que o ângulo do raio de ponta é de  $90^\circ$  e o indicado seria utilizar menores raios de ponta possíveis para reduzir a tendência à vibração. Como o ângulo de ponta da pastilha é maior, irá fortalecer a pastilha a confiabilidade na usinagem, porém irá requerer mais potência de usinagem, pois uma aresta de corte maior estará com maior contato durante o corte levando assim a maiores valores de vibração, devido à maior ancoragem da ferramenta.

No gráfico de interações para a vibração (Figura 34) observa-se que para o menor avanço (0,05 mm/rot) maior vibração é obtida para todos os valores de velocidade de corte e profundidade de corte. Como o ângulo de ponta de pastilha não é pequeno, não melhorará a estabilidade da ferramenta, fornecendo bom espaço para superfície de fuga e pequenas variações da área de cavacos se a ferramenta começar a vibrar em uma direção radial.

Figura 34 – Gráfico de Interações para a Vibração



Fonte: Produção do próprio autor

Como ocorreram desgastes de flanco excessivos e diversos lascamentos durante a usinagem, a folga entre a ferramenta e a parede da peça foi alterada, causando os problemas de vibração. As ações que poderiam ser tomadas seria aumentar o avanço e alterar a velocidade de corte.

Geralmente, os melhores resultados são alcançados com velocidade de corte mais altas, respeitando a utilização de ferramentas com menores ângulos de ponta. A velocidade de corte baixa pode ter sido a causa da formação das arestas postizas, o que contribui para o aumento da vibração.

#### 5.1.4 Emissão acústica

A seguir são apresentados os resultados da análise estatística para os valores obtidos de emissão acústica.

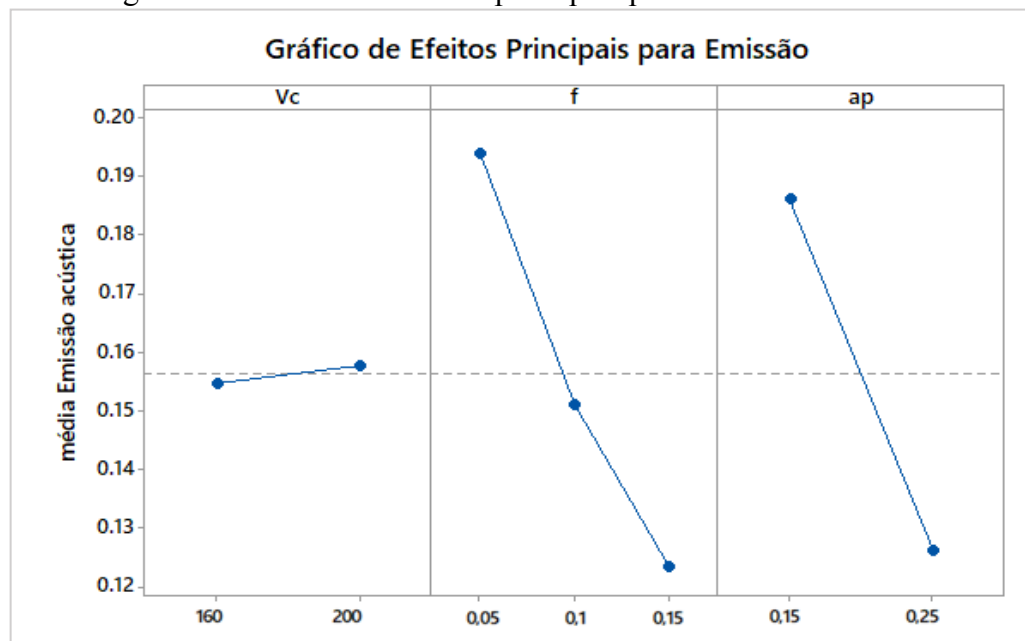
Tabela 9 - ANOVA para Emissão Acústica

| <b>Análise da Variância para Emissão Acústica</b> |           |               |                   |                |                |
|---------------------------------------------------|-----------|---------------|-------------------|----------------|----------------|
| <i>Fonte</i>                                      | <i>GL</i> | <i>Adj SQ</i> | <i>Adj QM</i>     | <i>Valor F</i> | <i>Valor P</i> |
| Modelo                                            | 16        | 0,196921      | 0,012308          | 7,93           | 0,000          |
| Blocos                                            | 5         | 0,015609      | 0,003122          | 2,01           | 0,091          |
| Linear                                            | 4         | 0,125184      | 0,031296          | 20,18          | 0,000          |
| <i>V<sub>c</sub> (m/min)</i>                      | 1         | 0,000155      | 0,000155          | 0,10           | 0,753          |
| <i>f (mm/rot)</i>                                 | 2         | 0,060171      | 0,030085          | 19,40          | 0,000          |
| <i>ap(mm)</i>                                     | 1         | 0,064858      | 0,064858          | 41,81          | 0,000          |
| <i>Interações de 2ª ordem</i>                     | 5         | 0,054949      | 0,010990          | 7,08           | 0,000          |
| <i>V<sub>c</sub>*f</i>                            | 2         | 0,005176      | 0,002588          | 1,67           | 0,198          |
| <i>V<sub>c</sub>*ap</i>                           | 1         | 0,000314      | 0,000314          | 0,20           | 0,655          |
| <i>F*ap</i>                                       | 2         | 0,049459      | 0,024730          | 15,94          | 0,000          |
| <i>Interações de 3ª ordem</i>                     | 2         | 0,001180      | 0,000590          | 0,38           | 0,685          |
| <i>V<sub>c</sub>*f*ap</i>                         | 2         | 0,001180      | 0,000590          | 0,38           | 0,685          |
| <i>Erro</i>                                       | 55        | 0,085314      | 0,001551          |                |                |
| <i>Total</i>                                      | 71        | 0,282235      |                   |                |                |
| Coeficiente de determinação                       |           |               | R-Sq(adj) =60,98% |                |                |

Fonte: Produção do próprio autor

Na análise de variância para os valores de emissão acústica, podemos perceber, pelos valores de Pvalue, que apenas o fator da Velocidade de corte é não significante e, portanto, todos os outros fatores, e combinações entre eles devem influenciar nos valores de emissão acústica. Isso pode ser avaliado com mais cuidado nos gráficos dos efeitos principais e de interação.

Figura 35 – Gráfico de Efeitos principais para a Emissão Acústica



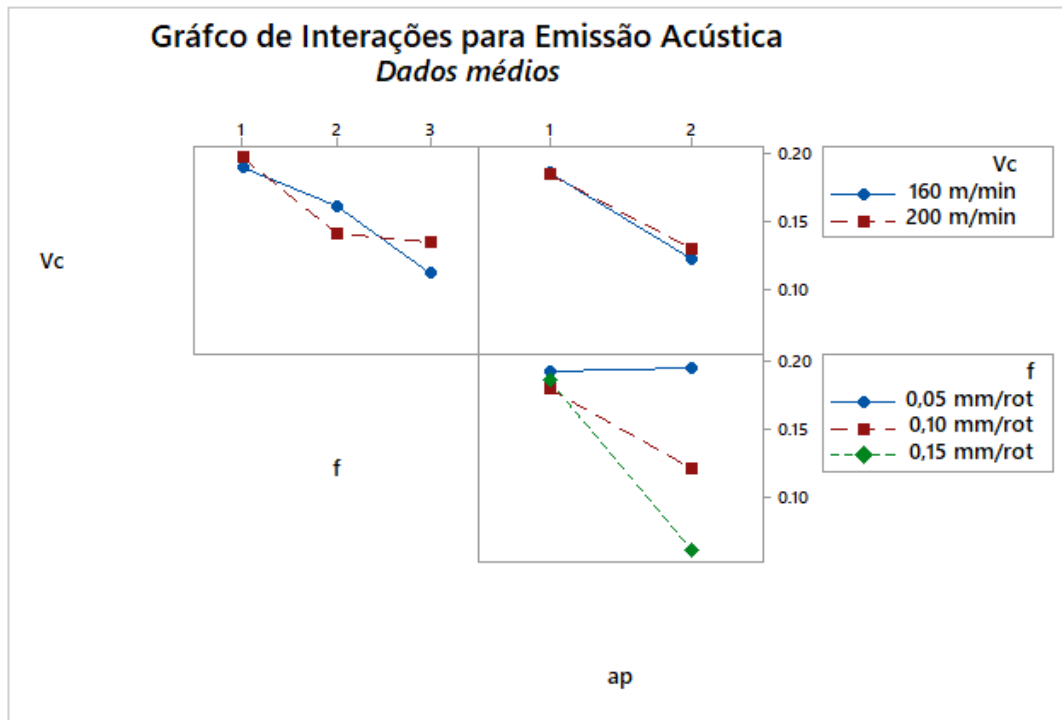
Fonte: Produção do próprio autor

Das interações somente a entre a profundidade de corte e avanço deu significativa e não houve interação de 3ª ordem. Pelo valor de  $R^2$  vemos também que a reta média proveniente desses valores explica apenas um pouco mais da metade, abrangendo cerca de 61% dos dados.

Observa-se que analogamente à vibração, a emissão acústica tende a aumentar de maneira proporcional com o aumento tanto do avanço quanto da profundidade de corte. Isso pode ter ocorrido devido ao aumento do desgaste de flanco durante a execução dos ensaios. Pois conforme o desgaste vai aumentando, vai promovendo também um crescimento do atrito na região de contato entre as duas superfícies, provocando um aumento do nível do sinal de emissão acústica.

Conforme aumenta o valor do avanço, maior a quantidade de material deformado na unidade de tempo, fazendo com que o sinal aumente de intensidade. Já o aumento do avanço faz com que esta ocorrência reduza, fazendo a emissão acústica também diminuir; esta diminuição pode ser associada ao comportamento da força de usinagem ( $F$ ), principalmente das componentes  $F_c$  (corte) e  $F_f$  (avanço).

Figura 36 – Gráfico de Interações para a Emissão Acústica

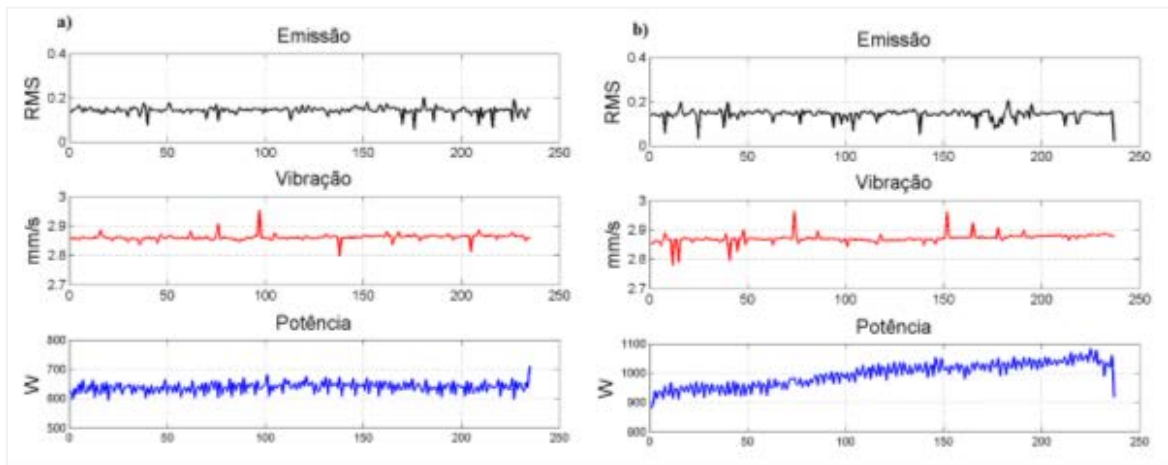


Fonte: Produção do próprio autor

## 5.2 ANÁLISE QUALITATIVA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA

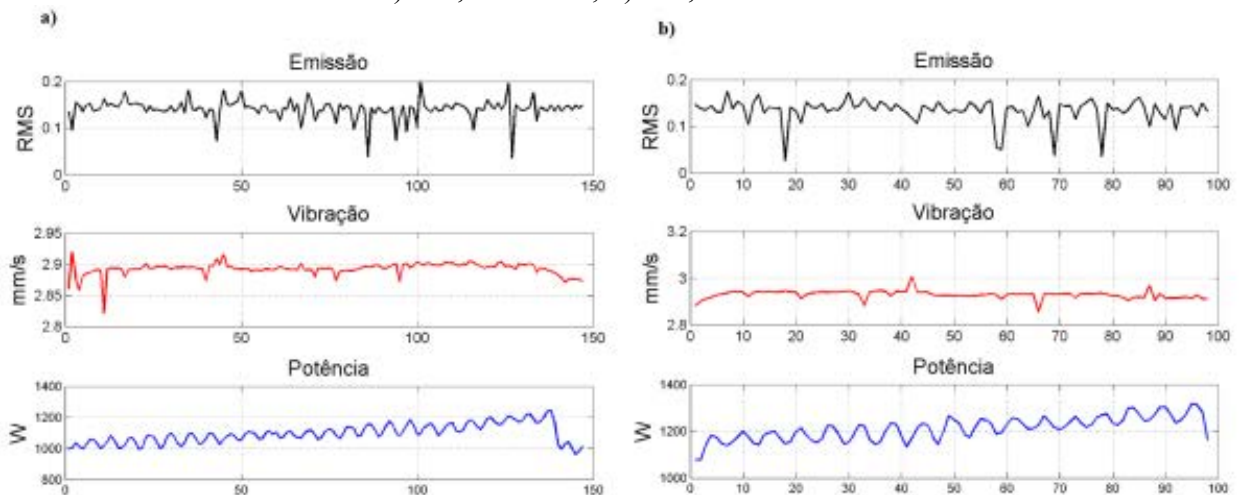
Na Figura 37 pode-se observar o efeito da mudança da profundidade de corte nos valores de Potência de corte. Para uma mesma velocidade de corte e avanço, apenas modificando os valores da profundidade de corte ( $a_p$ ) nota-se que quanto maior o valor da profundidade de corte, maior é a potência consumida, de maneira que a potência aumenta gradativamente com a execução do ensaio. A emissão acústica e vibração mantêm quase o mesmo perfil, entretanto observa-se uma tendência a oscilação ligeiramente maior nos valores para emissão acústica.

Figura 37 - Comparação dos valores das variáveis de saída para  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0,05$  a)  $a_p=0,15\text{mm}$ ; b)  $a_p=0,25\text{mm}$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 38 - Comparação dos valores das variáveis de saída para  $V_c=160\text{m/min}$ ,  $a_p=0,15\text{mm}$  a)  $f=0,10\text{mm/rot}$ ; b)  $f=0,15\text{mm/rot}$ .



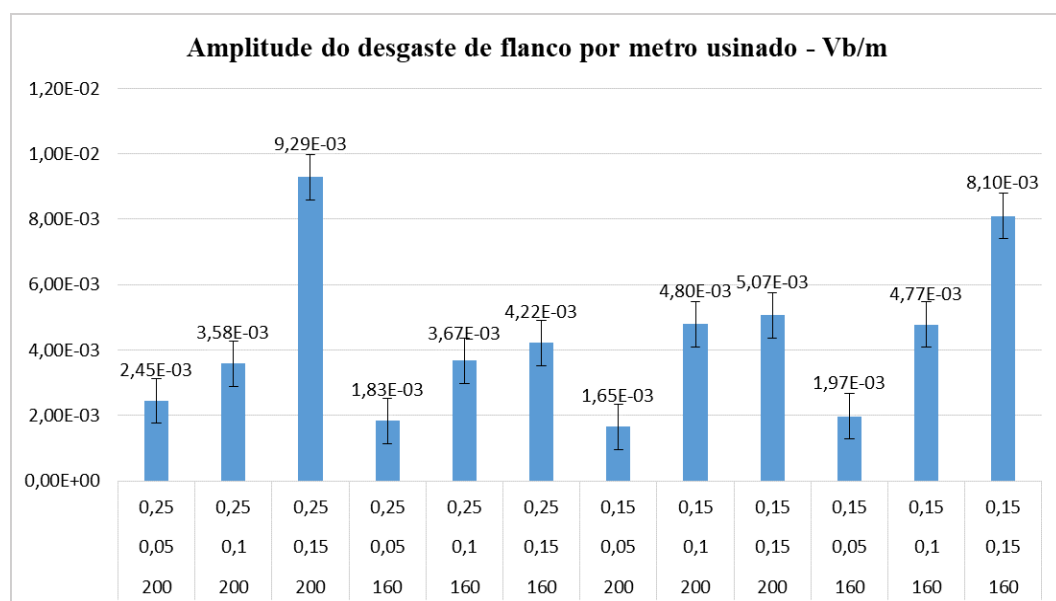
Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se estabelecer um paralelo entre o sinal de emissão acústica. O rompimento do cavaco, o lascamento, o crescimento de trincas e a quebra da ferramenta que ocorreram para maiores valores de avanço associam-se a sinais transitórios de pico de alta amplitude e curta duração. Na interface flanco-peça, o sinal de emissão acústica vai sofrendo alterações significativas conforme o desgaste vai aumentando, pois esta falha promove um crescimento do atrito na região de contato entre as duas superfícies, provocando um aumento do nível do sinal.

### 5.3 DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante o processo de torneamento a ação de cortar altera progressivamente a geometria original da ferramenta de corte. Portanto verifica-se um desgaste progressivo nas superfícies de folga e de saída da ferramenta. A seguir são avaliados quantitativamente e qualitativamente os principais desgastes e avarias encontrados nas ferramentas cerâmicas após a realização dos ensaios. (Figura 39 e 40). É importante destacar que a análise do desgaste de flanco para cada condição seja feita considerando a amplitude do desgaste máximo por metro usinado ( $V_b/m$ ), não apenas da amplitude do desgaste  $V_b$  (mm), uma vez que para menores avanços o comprimento de corte é maior. Logo mesmo que a amplitude do desgaste  $V_b$  seja menor para maiores avanços, pode ser que quando se considere o comprimento de corte maior desgaste de flanco seja encontrado, caracterizando uma situação mais crítica por exemplo para a ferramenta.

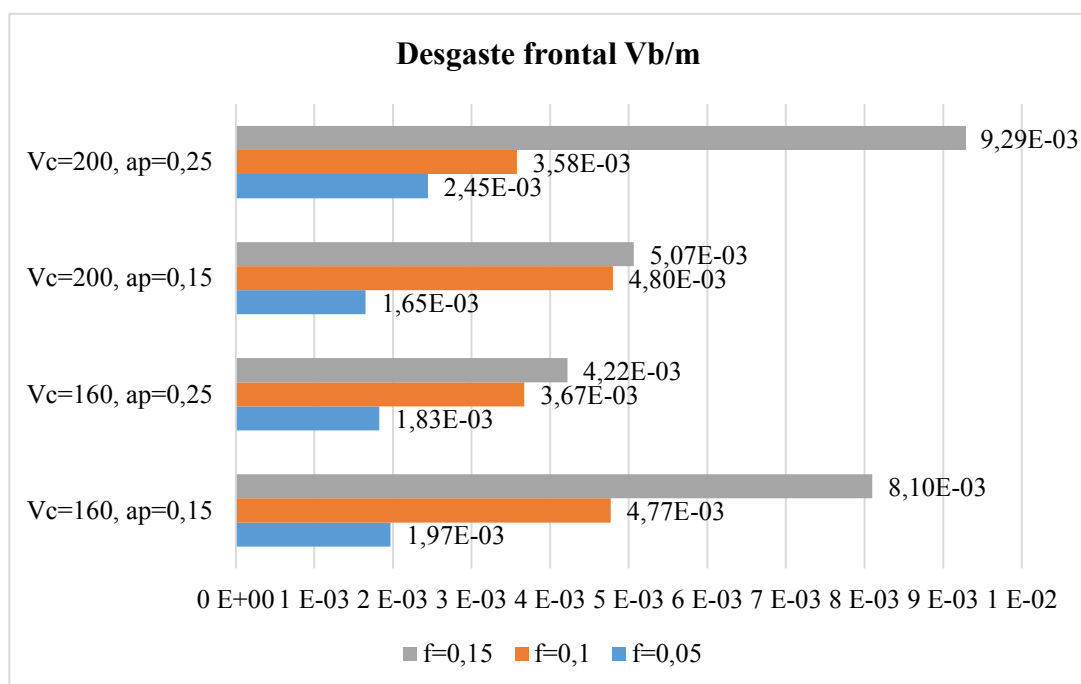
Figura 39 – Gráfico de desgaste por metro usinado para cada condição de ensaio



Fonte: Produção do próprio autor

É importante destacar que a análise do desgaste de flanco para cada condição seja feita considerando a amplitude do desgaste máximo por metro usinado ( $V_b/m$ ), não apenas da amplitude do desgaste  $V_b$  (mm), uma vez que para menores avanços o comprimento de corte é maior. Logo mesmo que a amplitude do desgaste  $V_b$  seja menor para maiores avanços, pode ser que quando se considere o comprimento de corte maior desgaste de flanco seja encontrado, caracterizando uma situação mais crítica por exemplo para a ferramenta.

Figura 40 – Gráfico de desgaste de flanco por metro usinado para cada avanço utilizado



Fonte: Produção do próprio autor

Deve-se destacar que a avaliação dos desgastes de flanco é importante uma vez que o mesmo é geralmente o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte, pois ocorre em todos os processos de usinagem. Pode-se observar pelo gráfico de variação da amplitude do desgaste por metro usinado, que os valores de desgaste de flanco aumentam progressivamente com o aumento do avanço utilizado, para todas as condições ensaiadas. O aumento do desgaste de flanco ocorre devido ao maior atrito que ocorre entre a ferramenta e a peça, à medida que a ferramenta vai perdendo seu ângulo de folga e ampliando a área de contato ferramenta-peça o que aumenta o atrito gerado.

Observa-se também que o desgaste de flanco é significativamente maior quando utilizada maior velocidade de corte, entretanto essa observação se limita apenas quando

considerada a maior profundidade de corte de 0,25mm. Já para a menor profundidade de corte de 0,15mm, os desgastes  $V_b$  por metro usinado são menores para a velocidade de 200m/min.

Para a maiores velocidades e profundidades de corte utilizadas houve até mesmo a ocorrência de trincas e lascamentos como pode ser visto na Figura 41. Pode-se concluir que trinca é de origem mecânica não térmica por ser paralela à aresta de corte, e pode ter ocorrido devido à variação excessiva de esforços na aresta de corte devido à baixa tenacidade da ferramenta. A ação que poderia ser tomada para evitar a formação de trincas poderia ser a redução do avanço para a suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça, gerando assim uma maior estabilidade para a ferramenta.

Figura 41 – Desgastes e avarias para  $V_c=200\text{m/min}$   $f=0,15\text{mm/rot}$   $a_p=0,25\text{mm}$



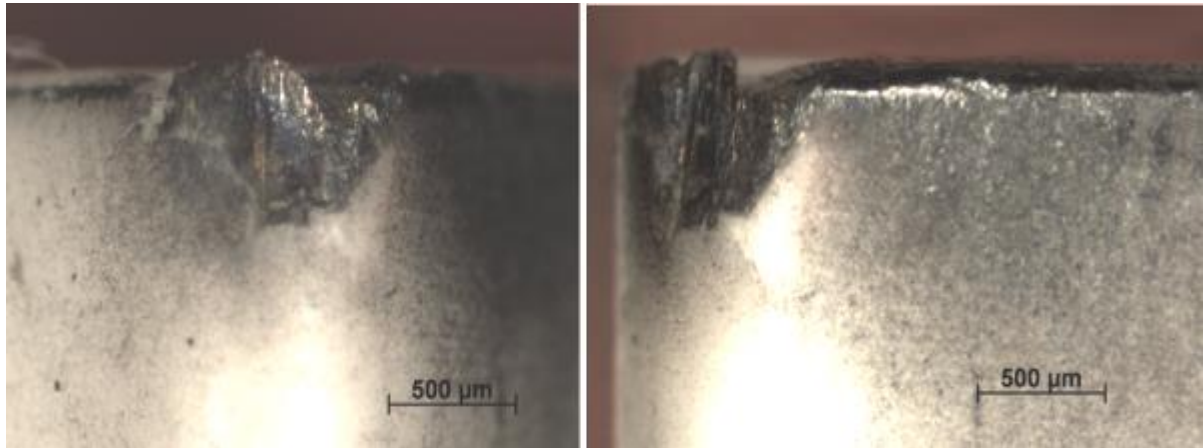
Fonte: Produção do próprio autor

Houve grande ocorrência de desgastes abrasivos para a combinação de altos valores de profundidade de corte e velocidade. Na Figura 42 pode-se observar com clareza as marcas de desgaste abrasivo nas ferramentas. O desgaste abrasivo ocorreu devido à perda de material por microlascamento causado pelas partículas de alta dureza presentes na ferramenta que foram arrancadas pela abrasão durante o torneamento.

Durante os ensaios foi constatado que com o aumento do avanço levou a maior ocorrência de desgastes abrasivos, quando mantido constante o valor da profundidade de corte (Figura 43). Em conjunto com os desgastes abrasivos observa-se também a formação da

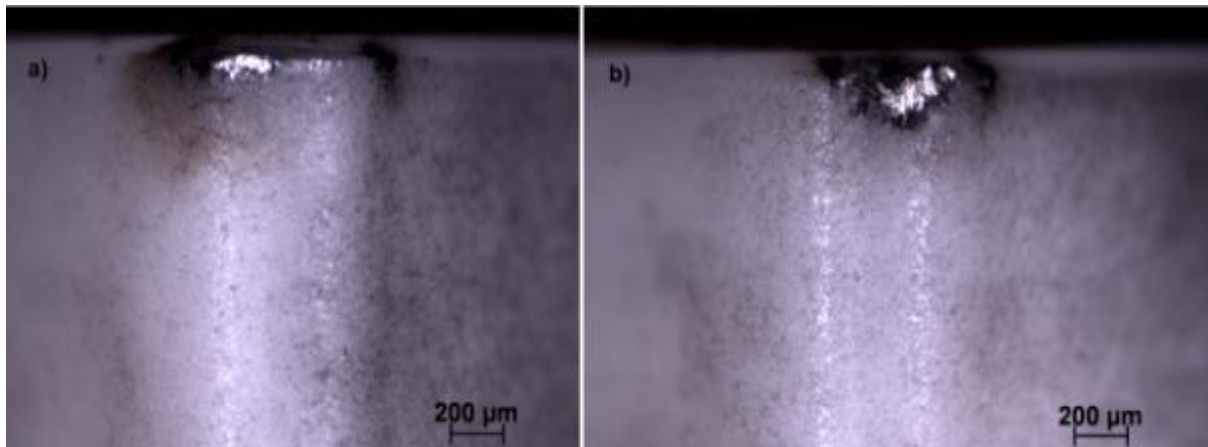
aresta postiça de corte, já discutida como grande causa e da qualidade superficial ruim e aumento da rugosidade total.

Figura 42 –  $V_c=500\text{m/min}$  e  $a_p=0,15\text{mm}$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43 – a)  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0,05$  e  $a_p=0,15\text{mm}$ . b)  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0,15$  e  $a_p=0,15\text{mm}$ .



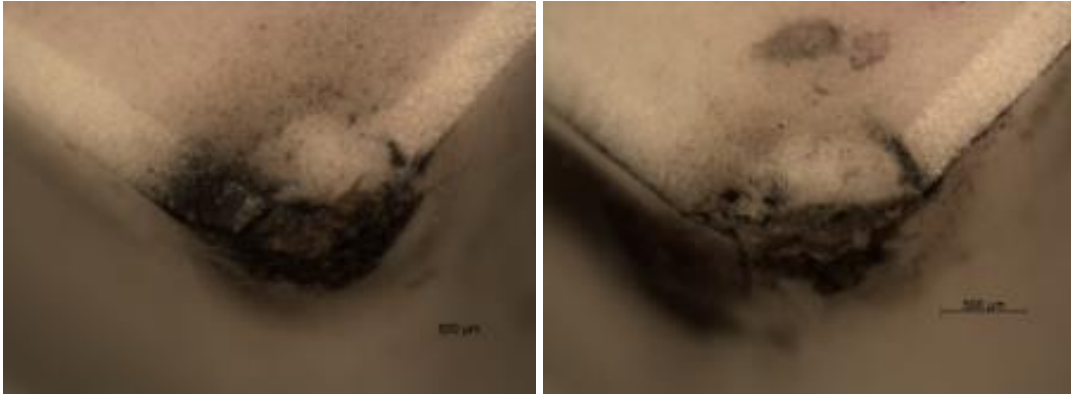
Fonte: Produção do próprio autor

Para o conjunto de maior valor de avanço e profundidade de corte observou-se alta incidência de lascamentos, como pode ser visto na Figura 44. Independentemente da velocidade utilizada, para o maior avanço utilizado de  $0,15\text{ mm/rot}$  e profundidade de corte de  $0,25\text{mm}$  foram encontrados diversos lascamentos, que ocorreram provavelmente pela combinação dos mecanismos de desgaste de adesão na superfície de saída da ferramenta durante o deslizamento do cavaco.

Mais uma vez a temperatura é a causa dominante, determinando também a posição do desgaste que pode ser visto atrás da aresta de corte, posição na qual a temperatura é

maximizada pelo contato entre o cavaco e a superfície de saída. Para os casos em que o lascamento é inexistente, observa-se que os cavacos gerados são curtos.

Figura 44 – Lascamentos para  $f=0,15$  mm/rot e  $a_p=0,25$ mm



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 45 observa-se a quebra da aresta de corte da pastilha cerâmica que ocorre inevitavelmente quando são utilizadas velocidades de corte acima de 500m/min. A avaria pode ter acontecido devido à fragilização na ocorrência dos diversos lascamentos.

Simultaneamente aos desgastes, a flutuação da temperatura na interface peça-ferramenta pode ter levado a modificação da distribuição de tensão na região de corte o que pode ter facilitado a quebra, uma vez que a ferramenta tem a característica de ser muito frágil e pouco tenaz.

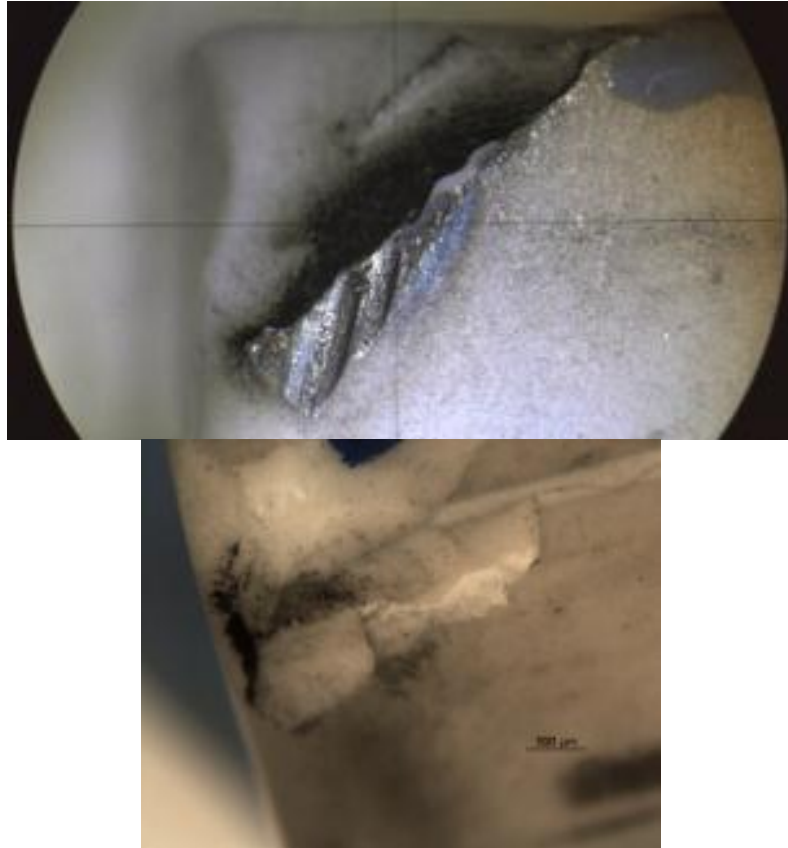
Ainda na figura 45 pode-se perceber que foi a ocorrência de diversos lascamentos na ferramenta que levou a proporcionar a quebra de aresta. Essa avaria ocorreu devido a retirada de partículas maiores de uma só vez da ferramenta, durante a usinagem. Ao contrário do desgaste frontal que ocorreu devido à retirada progressiva de pequenas partículas. Neste caso o lascamento pode ter ocorrido devido à falta de tenacidade da ferramenta cerâmica, uma vez que a sua fragilidade pode ter contribuído para a perda de material nessa região da ferramenta.

Os diversos lascamentos podem ter ocorrido também devido à geometria da ferramenta ser muito fraca de maneira a gerar vibrações durante a usinagem levando ao choque da ferramenta com a peça. É importante destacar que a geometria da aresta tem grande efeito inclusive sobre a rugosidade resultante, principalmente o raio de ponta que, por ser um valor alto (maior que duas vezes o avanço) pode ter induzido as vibrações.

As ações que poderiam ser tomadas para minimização da ocorrência dessas avarias ou até mesmo da quebra da ferramenta seria talvez estudar o tamanho do raio de ponta,

determinando um valor intermediário, para que ocorra a suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça.

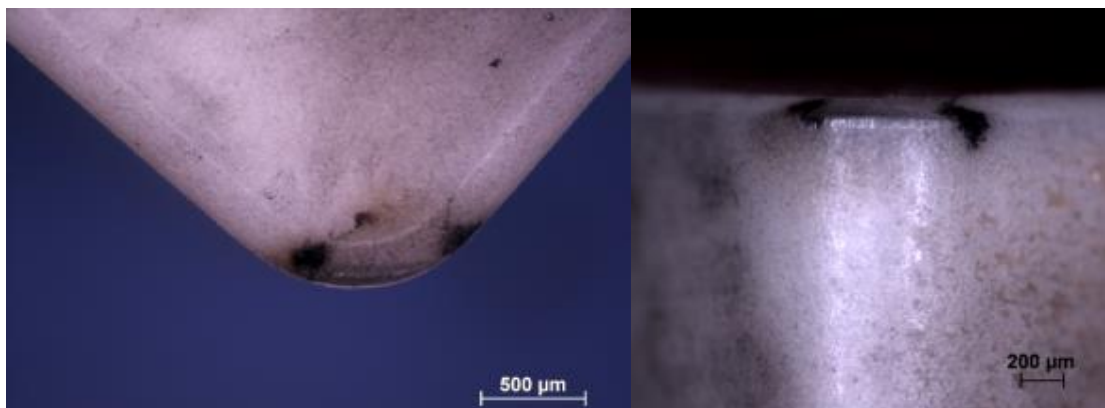
Figura 45 – Quebra de aresta para  $V_c=600\text{m/min}$  e  $500\text{m/min}$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Os menores valores de desgaste de flanco e menor ocorrência de avaria nas ferramentas foram encontrados apenas para menores valores de avanço com combinação a menores valores de profundidade de corte, como pode ser visto na figura 46.

Figura 46 – Desgaste de flanco pra  $V_c=160\text{m/min}$ ,  $f=0,05\text{mm/rot}$  e  $a_p=0,15$



Fonte: Produção do próprio autor

Entretanto, mesmo nas condições mais “favoráveis” (com menor amplitude de desgaste de flanco) pode-se ainda constatar a ocorrência de pequenos lascamentos, facilmente confundidos com entalhes, como pode ser observado na figura 47.

Figura 47 – Desgastes pra  $V_c=160\text{m/min}$  e  $a_p=0,15$



Fonte: Produção do próprio autor

#### 5.4 CAVACOS

A seguir são apresentados os cavacos resultantes do torneamento do aço 4340 com a utilização das ferramentas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dopadas com  $\text{MgO}$ . Segundo Diniz et al (2008), a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, como o desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado e outros. Portanto, conclui-se que a análise dos cavacos e estudo do seu processo de formação é muito importante, uma vez que a formação do cavaco está diretamente ligada a aspectos econômicos, segurança do operador e qualidade superficial final da peça.

Sabe-se que no processo de torneamento de aços endurecidos elevadas tensões de compressão são induzidas na peça usinada devido a ação da ponta da ferramenta contra a superfície de trabalho. Segundo Koenig et al (1990), essas elevadas tensões de compressão fazem com que a superfície da peça plastifique e cisalhe, formando assim o cavaco do tipo segmentado ou dente de serra como pode ser observado na Figura 48. Cavacos do tipo dente de serra foram observados com maior ocorrência para maiores profundidades de corte como 0,25mm e 0,5mm.

Figura 48 – Cavaco do tipo dente de serra ( $V_c=200\text{m/min}$ ,  $a_p=0,5\text{ mm}$  e  $f=0,2\text{ mm/rot}$ )



Fonte: Produção do próprio autor

Para o torneamento do aço AISI 4340, utilizando as pastilhas cerâmicas, observou-se que os cavacos obtidos foram cavacos de cisalhamento, como pode ser observado nas figuras a seguir. Para classificação quanto à forma, no geral os cavacos apresentaram forma em fita emaranhada. Como pode ser visto na Figura 49 b), a parte de trás dos cavacos é rugosa devido ao fato da deformação não ser homogênea, decorrente da presença de pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão no material usinado. Segundo Diniz et al (2008), um plano de cisalhamento que passa através de um ponto de concentração de tensão causa deformação a um valor mais baixo de tensão.

Pode-se afirmar que a formação do cavaco é periódica. Segundo Machado et al (2012), o cisalhamento para formar o cavaco começa a ocorrer em um plano de cisalhamento particular quando as tensões excedem o limite de escoamento do material na peça. A energia associada com essa deformação é transformada em calor e que se concentra e provoca o amolecimento localizado. Com o prosseguimento da deformação ocorre uma rotação no plano de cisalhamento para deformar o material em uma temperatura menor em um plano mais favorável, sendo esse processo chamado de cisalhamento termoplástico catastrófico. O cisalhamento termoplástico catastrófico resulta no processo cíclico de produção do cavaco na forma de dente de serra.

Figura 49 - Cavacos para  $V_c=200\text{m/min}$  e  $a_p=0,15\text{mm}$ . a)  $f=0,05$ ; b)  $f=0,10$ ; c)  $f=0,15$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 50 - Cavacos para  $V_c=200\text{m/min}$  e  $a_p=0,25\text{mm}$ . a)  $f=0,05$ ; b)  $f=0,10$ ; c)  $f=0,15$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51 - Cavacos para  $V_c=160\text{m/min}$  e  $a_p=0,15\text{mm}$ . a)  $f=0,05$ ; b)  $f=0,10$ ; c)  $f=0,15$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 52 - Cavacos para  $V_c=160\text{m/min}$  e  $a_p=0,25\text{mm}$ . a)  $f=0,05$ ; b)  $f=0,10$ ; c)  $f=0,15$ .



Fonte: Produção do próprio autor

A medida que foi conduzida a usinagem, os cavacos se enrolaram na superfície do corpo de prova cilíndrico, tendo que ser retirados periodicamente após a parada da máquina. Como pode ser visto na Figura 53, os cavacos não se rompem envolvendo o corpo de prova e prejudicam o acabamento superficial resultante, como pode ser confirmado com a análise estatística para a rugosidade média ( $R_a$ ). A ferramenta prende os cavacos formados e não deixa sair, arranhando a superfície. Maiores valores de avanço também influenciaram mais a qualidade superficial levando a um maior valor médio de rugosidade.

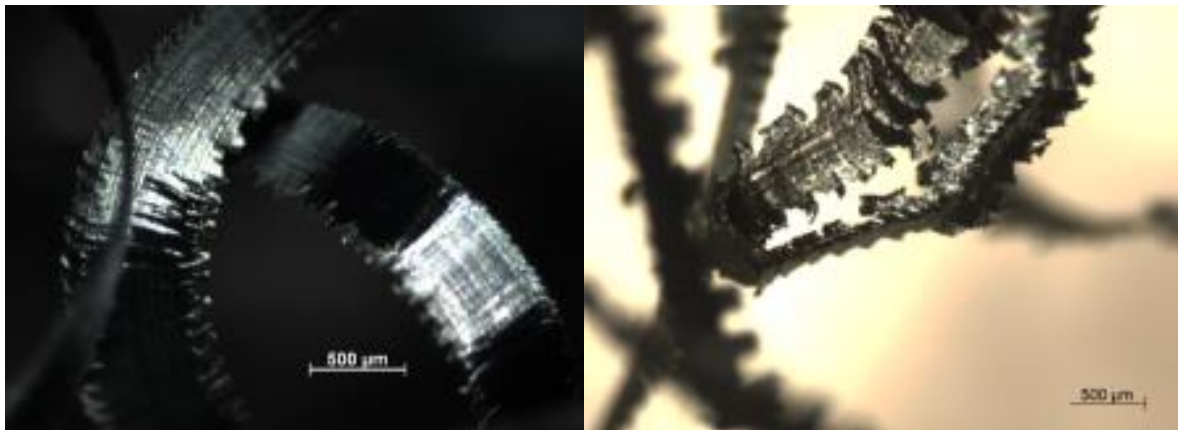
Figura 53 – Cavacos gerados para  $f=0,15\text{mm/rot}$  e  $a_p=0,25\text{mm}$



Fonte: Produção do próprio autor

Visando confrontar qualitativamente o processo de formação de cavaco em baixo e alto avanço, dois exemplares de cavaco das condições de menor e maior avanço são apresentados na Figura 54.

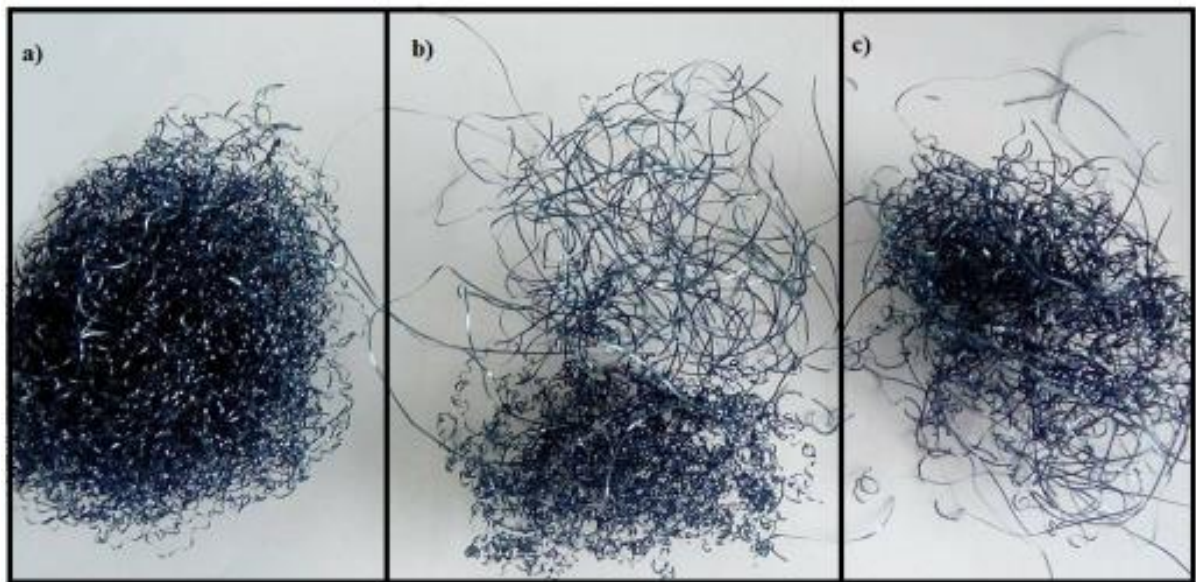
Figura 54 – Cavacos para  $f=0,05\text{mm/rot}$  (à esquerda);  $f=0,15\text{mm/rot}$  (à direita).



Fonte: Produção do próprio autor

Durante a usinagem foi observado que ao início do torneamento, os cavacos iam sendo liberados e se rompiam, entretanto principalmente para menores avanços, à medida que o ensaio ia progredindo, os cavacos se prendiam atrás da ferramenta, o que causou o esmagamento dos cavacos, fazendo com que a sua forma pudesse ser classificada erroneamente. Como se observa na figura 55, os cavacos são em forma de fita emaranhada, entretanto por ocorrência da concentração de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta a partir de um certo ponto do ensaio, pode-se pensar que o cavaco é helicoidal emaranhado.

Figura 55 – Cavacos para a)  $V_c = 200\text{m/min}$ ,  $f = 0,05\text{mm/rot}$ ;  
b)  $f = 0,10\text{ m/min}$ ; c)  $f = 0,15\text{ mm/rot}$ .



Fonte: Produção do próprio autor

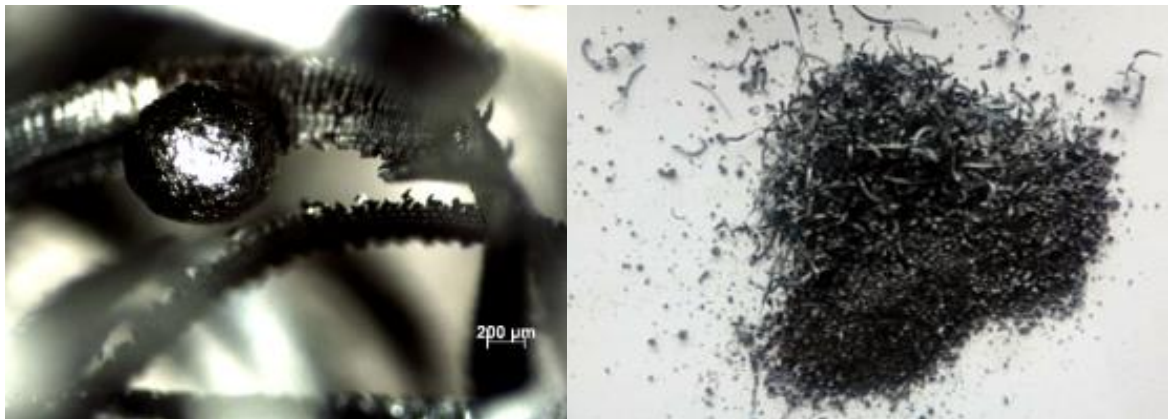
Para a utilização de maiores velocidades de corte como por exemplo  $500\text{m/min}$  (Figura 56 e 57), observa-se o aumento excessivo da temperatura na superfície de corte, levando ao superaquecimento e fusão do cavaco fazendo com que ele se depositasse em pequenas partículas esféricas.

Figura 56– Processo de torneamento para  $V_c=500\text{m/min}$ .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 57– Cavaco em partículas esféricas ( $V_c=500\text{m/min}$ )



Fonte: Produção do próprio autor

## 6 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas em função das análises realizadas do processo de torneamento do aço AISI 4340 e as variáveis de saída (rugosidade, potência de corte, emissão acústica e vibração) e o desgaste das ferramentas, são:

- O avanço mostrou ser o fator mais crítico e de grande influência nos resultados de rugosidade e, portanto, na qualidade superficial final, sendo os melhores resultados obtidos para a condição de menor avanço (0,05 mm/rot). Para as ferramentas de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  a melhor condição para rugosidade foi com  $V_c = 160$  m/min,  $f = 0,05$  mm/rot e  $a_p=0,15$ mm.

- A amplitude dos valores de Rugosidade média foi na ordem de 1,0  $\mu\text{m}$  para a utilização da ferramenta cerâmica. Esses valores elevados comprovam a baixa qualidade superficial resultante para a combinação dos valores maiores de avanço (f) e profundidade de corte (ap).

- O fator avanço (f) demonstrou-se mais crítico que a profundidade de corte para o acabamento superficial. Quando se trata da utilização de menores valores de avanço, independentemente da velocidade utilizada, os valores de rugosidade média caem para ordem de 0,399  $\mu\text{m}$ . Que é um valor aceitável quando se avalia a substituição do processo de retificação.

- As ferramentas apresentaram grande aumento da potência de corte durante a execução dos ensaios. Percebeu-se um grande aumento na potência com o aumento de apenas 0,05 mm/rot no avanço. Apesar do acréscimo do avanço proporcionar a diminuição da pressão específica, diminuindo a força de corte, o aumento da área da seção de corte devido ao avanço influencia muito mais no acréscimo da força de corte e consequentemente na potência de corte na usinagem.

- Pode-se estabelecer uma relação entre o sinal de emissão acústica e os desgastes encontrados nas ferramentas. O sinal de emissão sofreu alterações significativas conforme o aumento do desgaste de flanco. Esta falha promoveu um crescimento do atrito na região de contato entre as duas superfícies, provocando um aumento do nível do sinal.

- Observaram-se altos valores de vibração para a ferramenta utilizada, isso pode ser explicado uma vez que o ângulo do raio de ponta é de  $90^\circ$  e o indicado seria utilizar menores raios de ponta possíveis para reduzir a tendência à vibração. Como o ângulo de ponta da pastilha é maior, irá fortalecer a pastilha a confiabilidade na usinagem, porém irá requerer mais potência de usinagem, pois uma aresta de corte maior estará com maior contato durante

o corte levando assim a maiores valores de vibração, devido à maior ancoragem da ferramenta.

- Mantidos constantes a profundidade de corte e o avanço, os experimentos comprovaram que o aumento da velocidade de corte não interferiu significativamente na rugosidade superficial. Provavelmente pela diferença entre as velocidades de corte utilizadas ser pequena.

- Houve grande tendência à formação de cavacos cisalhados, o que ocorreu em função da instabilidade da usinagem. Houve também a formação de cavacos do tipo dente de serra, característicos da usinagem de materiais endurecidos, sendo esse fenômeno potencializado com o aumento da velocidade de corte.

- Durante o processo de torneamento, principalmente por ser uma operação que foi realizada à seco, observou-se a geração de elevadas temperaturas e altas pressões de corte. Esses fenômenos tiveram influência direta sobre o comportamento da ferramenta tanto no que se refere ao seu desempenho, como no que diz respeito à sua durabilidade. Para a condição de utilização de menor avanço, foi observada a maior vida da ferramenta com menor valor de desgaste de flanco por metro usinado.

- Foi observada a alta incidência de avarias graves e desgastes abrasivos, assim como o fim de vida da ferramenta por quebras de aresta, o que indica, principalmente, a necessidade de revisão dos parâmetros de usinagem (avanço, profundidade e velocidade de corte) utilizados.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. J.; ANAZAWA, R. M.; PEREIRA, M. S.; HASHIMOTO, T. M. Efeitos dos tratamentos intercríticos e isotérmicos sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura do aço 300M. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**. Bauru – SP, v. 25, n. 2, p. 93-97, 2006.
- ABRAO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; NG, E. Temperature evaluation when machining hardened hot work die steel using pcbn tooling. **Industrial Diamond Review**. Londres, Reino Unido, v. 56, n. 569, p. 40-44, 1996.
- ACARIAS, D. **Análise do Processo de Lixamento Tubular da Madeira de Corymbia Citriodora**. 2012, 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.
- ACCHAR, W. **Materiais cerâmicos: ciência e tecnologia**. EDUFRRN, Rio Grande do Norte, p. 13-14, 111 p, 2000.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981, 295 p.
- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; CATAI, R. E. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. **Revista Escola de Minas**. v. 62, p. 65-71, 2009.
- ASLANTAS, K; UCUN, I.; CICEK, A. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN mixed ceramics tools in turning hardened steel. **Wear**. v. 274-275, p. 442-445. 2012.
- BARROS, R. A.; ABDALLA, A. J.; RODRIGUES, H. L.; PEREIRA, M. S. Caracterização de um aço SAE/AISI 4340 com diferentes microestruturas. **Revista Brasileira de Aplicação de Vácuo**. Campinas, v. 34, n. 02, p. 71-74, 2015.
- BARTARYA, G.; CHODHURY, S.K. State of the art in hard turning, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 53, p 1-14, 2012.
- BERNARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. S. Predicting surface roughness in machining: a review. **Int. J. Mach. Tools Manuf**, v. 43, p. 833-844, 2003.
- BHATTACHARYA, S. et al. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science and Engineering A**. v. 528, n. 6, p. 2309–2318, 2011.
- BOEHS, L.; CONSALTER, L. A.; ZEILMANN, R. P. **Características de desgastes e avarias em ferramentas cermet no torneamento de aço ABNT 1045**. 1998
- BONFÁ, M. M.; **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 2013, 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKINA, B. Advancing cutting technology. **ICIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, n. 2, p. 483–507, 2003.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAMARGO, J. C. **Construção de um modelo para representar o desgaste de ferramenta de corte em processo de torneamento de aço beneficiado**, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, 2011, 124 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. v. III, São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda, 1986, 205 p.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S.K.; Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: wear behavior under dry and minimum quantity lubrication(MQL). **Measurement**. v. 55, p. 536-548, 2014.

COSTA B. J. Importância das características do pó no processamento das cerâmicas avançadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 38, 1994, Blumenau. **Anais...** Blumenau- SC, p. 416, 1994.

COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de torneamento via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**. Campinas, 1995. Dissertação de Mestrado, UNICAMP; pp. 3 - 13; 1995.

COSTA, C.E.; JUNIOR, M. V.; AZEVEDO, V. G. Em busca da otimização da usinagem com cerâmica tendo por ferramenta a emissão acústica. In: ABEPRO Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2010, Iracemápolis. **Anais...** Iracemápolis: ABEPRO, 2010, p. 1-14.

DINIZ, A. E.; DE OLIVEIRA, A. J. Hard Turning of Interrupted Surface Using CBN Tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, p. 275-281, 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

EIGHERY, A. J.; IRVINE, J. T. S. Effect of alumina additions upon electrical properties of 8% mol yttria-stabilised zirconia. **Solid stat ionics**. v. 121, p. 209-216, 1999.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, p. 796, 1977, 927 p.

FONSECA, S. T. **Processamento e caracterização de pós e de cerâmicas de alumina total e parcialmente nanoestruturadas**. 2007. 89 f. (INPE-15153-TDI/1285). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; LUIS FIGUEIRA, DARVIM, J. P. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**. v. 27, p. 754-763, 2009.

GONÇALVES, D. P. **Análise e investigação de impactos em blindagem composta cerâmica / metal**. São José dos Campos, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2000.

GONÇALVES, M.T.T.; CAGNON, J. A.; TIBÚRCIO, U. F de. O.; SOUZA, A. J. D. Consumo de potência no torneamento cilíndrico de madeiras de eucalipto. In: EBRAMEM, 2006, São Pedro-SP. **Anais...** São Pedro, 2006.

GRZESIK W. The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 179, p. 133–143, 1998.

GRZESIK, W.; RECH, J.; WANAT, T. Surface finish on hardened bearing steel parts produced by super hard an abrasive tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 255-262, 2007.

HECKER, R.L.; LIANG, S.Y.; WU, X.J. Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**, v. 33, p 449–459, 2007.

INÁCIO, M. A. **Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e ZrO<sub>2</sub>**. 2010. Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

JEMIELNIAK, K. Commercial tool condition monitoring systems. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 15, p. 711-721, 1999.

KOMANDURI, R. Machining and grinding: a historical review of the classical papers. **Symposium on US Contributions to Machining & Grinding Research in the 20th Century**. Oklahoma, 1993.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8.Auflage. Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 547p.

KORN, D. Hard turning might not be as hard as you think”. **Modern machine shop review**, 2004. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/archive/a2739cbb-b019-4f18-8352-b0f94df5b452>> Acesso em: 20 out. 2017.

KUMAR, M; MELKOTE, S.N.; SAOUBI, R. M. Wear behaviour of coated tools in laser assisted micro – milling of hardened steel. **Wear**. v. 296, p. 610-618, 2012.

LIU, C.R.; MITTAL, S. Single-step superfinish hard machining: Feasibility and feasible cutting conditions. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. v. 12, n. 1, p. 15-24, 1996.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. 397p.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. 8. ed. Apostila, Minas Gerais, 2004. 257 p.

MANDAL, B.; DOLOI, B.; MONDAL, R. Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina(ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis. **Measurement**. v. 44, n. 10, p. 2149-2155, 2011.

MATSUMOTO, Y.; BARASH, M.M.; LIU, C.R. Effect of hardness on the surface integrity of the surface integrity of AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 108, p. 169-175, 1987.

MECHEFSKE, C. K. G.; SUN G.; SHEASBY, J. **Using Acoustic Emission to Monitor Sliding Wear**, INSIGHT. p. 1-8, 2002.

MORE, A. S; JIANG, W; BROWN, W. D; MALSHE A. P. Tool wear and machining performance of CBN–TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, p. 253–262, 2006.

NESLUŠAN, M.; **Turning of hardened steel**. Edis, Zilina, 2010.

NING. Y., RAHMAN M., WONG Y. S. Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 113, p. 360-367, 2001.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. 1. ed. Editora Blucher, 1994. 59 p.

OKADA, A. **Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan**. Nissan Research Center. Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka, 237-8523 p, Japan, 2007.

PALMA, E. S. Tolerância de Acabamento – Rugosidade. **Apostila de Metrologia Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC MINAS, 2006. 20 p.

PASTOR, H. Present Status and Development of Tool Materials Part 1 – Cutting Tools. **International Journal of Refractory and Metals**. v. 6, n. 4, p. 196-209, 1987.

REDDY, N. S.; RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, v. 26, p. 1202-1210, 2005.

REDDY, T. S.; REDDY, C. E. Real time monitoring of surface roughness by acoustic emission in CNC Turning. **Journal of Engineering Science and Technology Review** Kavala Institute of Technology, v. 1, n. 3, p. 111-115, 2010.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement**. v. 45, p. 2153-2165, 2012.

SANDVIK. Catálogo Geral: **Ferramentas para Torneamento**, 2017, p. 656. Disponível em <[http://sandvik.ecbook.se/se/pt/turning\\_tools\\_2017/](http://sandvik.ecbook.se/se/pt/turning_tools_2017/)>. Acesso em: 20 out. 2017

SASSERON, C. O.; MARCHI, J.; BRESSANI, J. C.; et al. Sinterização de cerâmicas à base alumina, zircônia e titânia. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 50, 2006, Blumenau. **Anais...** Blumenau: CBC, 2006. p. 1-12.

SETTINERI, L.; FAGA, M.G.; GAUTIER, G.; PERUCCA, M. Evaluation of wear resistance of AlSiTiN and AlSiCrN nanocomposite coatings for cutting tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 575–578, 2008.

SILVA, L. R. e ABRÃO, A. M. Torneamento e retificação do aço 4340 temperado. In: 8º Congresso Chileno de Ingenieria Mecánica, 1998, Chile. **Anais...** Santiago: COCIM, 1998, p. 663 - 668.

SOUSA, L. F.; **Estudo da viabilidade da ferramenta cerâmica alumina e ítria (YAG) desenvolvida na usinagem do ferro fundido nodular**. Dissertação de mestrado – Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA), 2013.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem**, 2011. Disponível em <[http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem\\_Parte1.pdf](http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf)> Acesso em: 10 nov. 2017.

SOUZA, A.J. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. Florianópolis, 2004. Tese - Departamento de Engenharia Mecânica,

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica**. 2008. 161 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 2008.

SOUZA, J. V. C. **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas à base de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> para aplicações tribológicas**. 2005. 134 f. Tese Doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita filho, Guaratinguetá, 2005.

SOUZA, J. V. C.; NONO, M. C. A.; Ribeiro, M. V.; Machado, J. P. B.; Silva, O. M. M. Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. **Materials & Design**. v. 30, p. 2715-2720, 2009.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte**. 14 ed. Santa Catarina: Editora da UFSC, 1995.

STOETERAU, R. L. Fabricação por remoção de material: processo de usinagem. **Apostila Processos de Usinagem**. Rio de Janeiro: UERJ, 2003. 180p

TONSHOFF, H.K.; ARENDT, C.; MOR, R.B. Cutting of hardened steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 49, n. 2, p. 547–564, 2000.

WEBSTER, J. A.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. **CIRP: International Academy for Production Engineering**, v. 45, n. 1, p. 335-340; 1996.

XAVIER, C.; COSTA, C. R. C. Study on mechanical behavior of alumina plates under ballistic impact. *Cerâmica*, v.30, n. 175, pp.161–168, 1984.

YALLESE, M. A., CHAOUI, K., ZEGHIB, N., BOULANOUAR, L., RIGAL, J. Hard Machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. **Journal of Material Processing Technology**. v. 209, p. 1092-1104, 2009.

ZEILMANN, R. P.; VALLEJOS, R. V.; LINZMEIER, P. R.; BORBA, D.; ROVARIS, J. L.; BESUTTI, K.; KUZER, M. S.; SANTIN, R. **Ensaio experimental 03: avaliação dos critérios de usinabilidade referente ao aço AISI H13**. Caxias do Sul, 2004. Relatório de Pesquisa, UCS Departamento de Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, 2004.

ZHOU, J. M.; ANDERSSON, M.; STAHL, J. E. The monitoring of flank wear on the CBN tool in the hard turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 22, p. 697-702, 2003.