

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VICTOR HUGO GRANDE MILDENBERGER**

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE TRAJETÓRIA NO DESGASTE DA  
FERRAMENTA E NA RUGOSIDADE DA PEÇA NO FRESAMENTO DO  
AÇO HARDOX®**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2021**

**VICTOR HUGO GRANDE MILDENBERGER**

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE TRAJETÓRIA NO DESGASTE DA  
FERRAMENTA E NA RUGOSIDADE DA PEÇA NO FRESAMENTO DO  
AÇO HARDOX®**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia Mecânica, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Sílvia do Nascimento Rosa.

**GUARAPUAVA**

**2021**



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### **Influência do tipo de trajetória no desgaste da ferramenta e na rugosidade da peça no fresamento do aço Hardox®**

por

Victor Hugo Grande Mildenberger

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Prof.(a) Orientador(a)

---

Aldo Przybysz  
Membro da banca

---

Hipólito Domingo Carvajal Fals  
Membro da banca

---

Dr. Sérgio Dalmás  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, por ter me dado forças para ultrapassar todos os obstáculos até aqui.

À professora Silvia do Nascimento Rosa, pela orientação e dedicação em todas as etapas desse trabalho, e pela oportunidade de aprendizado.

Ao técnico de Engenharia Mecânica Lucas Franco Wrenge pelo auxílio nos ensaios de usinagem.

À UTFPR campus Guarapuava por toda estrutura de laboratório e equipamentos.

À minha namorada Arieny Gerino por todo o suporte e apoio nesse período.

À toda minha família, em especial meus pais Cely Grande Mildenberger e José Luiz Mildenberger que me proporcionaram educação e condições durante todos esses anos.

## RESUMO

MILDENBERGER, Victor Hugo Grande. **Influência do tipo de trajetória no desgaste da ferramenta e na rugosidade da peça no fresamento do aço Hardox®.** 2021. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021).

Esta pesquisa investigou o comportamento de duas técnicas de trajetória no fresamento de um aço avançado de alta resistência, o aço Hardox® 500 da marca SSAB. Objetivou-se no trabalho medir a dureza do material, verificando se é o mesmo informado pela fabricante, e então eleger a melhor estratégia de usinagem através das análises de rugosidade, desgaste da ferramenta e taxa de corrosão. No fresamento foram realizadas réplicas para então ser realizada a medição de rugosidade. A análise de desgaste foi realizada através de microscopia ótica, a taxa de corrosão foi realizada a partir de ensaios conforme norma ASTM G59-97. Considerando os parâmetros utilizados, a estratégia que apresentou o melhor desempenho foi a Zig-Zag.

Palavras-chave: fresamento; rugosidade superficial; desgaste mecânico; taxa de corrosão.

## ABSTRACT

MILDENBERGER, Victor Hugo Grande. **Influence of trajectory type on tool wear and workpiece roughness in Hardox® steel milling.** 2021. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mechanical Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

This research investigated the behavior of two trajectory techniques in the milling of an advanced high-strength steel (AHSS), Hardox® 500 steel of the SSAB brand. The objective of this work was to measure the hardness of the material, verifying if it is the same informed by the manufacturer, and then choose the best machining strategy through the analysis of roughness, tool wear and corrosion rate. In milling, rejoiners were carried out so that the roughness measurement could be performed. The wear analysis was performed using optical microscopy, the corrosion rate was performed from tests according to ASTM G59-97 standard. Considering the parameters used, the strategy that showed the best performance was the Zig-Zag.

Keywords: milling; surface roughness; mechanical wear; rate corrosion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Profundidade de trabalho e penetração de trabalho no fresamento frontal e tangencial.....	8
<b>Figura 2</b> – Fresamento concordante e discordante.....	9
<b>Figura 3</b> – Trajetória do tipo waveform.....	10
<b>Figura 4</b> – Trajetória do tipo leceform.....	10
<b>Figura 5</b> – Trajetória do tipo spiral.....	11
<b>Figura 6</b> – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta.....	12
<b>Figura 7</b> – Trincas térmicas na ferramenta de corte.....	14
<b>Figura 8</b> – Exemplos de aplicações de aços Hardox®:.....	16
<b>Figura 9</b> – Princípio de funcionamento do aparelho rugosímetro digital.....	18
<b>Figura 10</b> – Percorso de medição da rugosidade média (Ra).....	18
<b>Figura 11</b> – Altura total do perfil (Rt).....	19
<b>Figura 12</b> – Altura máxima do pico do perfil.....	19
<b>Figura 13</b> – Profundidade máxima do vale do perfil.....	20
<b>Figura 14</b> – Gráfico de desgaste da ferramenta em função do volume removido.....	21
<b>Figura 15</b> – Gráfico da evolução do desgaste em relação ao tempo de usinagem...	21
<b>Figura 16</b> – Gráfico do desgaste em função do tempo de corte.....	22
<b>Figura 17</b> – Corpo de prova.....	24
<b>Figura 18</b> – Dimensões do corpo de prova.....	25
<b>Figura 19</b> – Centro de usinagem ROMI D 600.....	25
<b>Figura 20</b> – Cabeçote e pastilhas para o experimento.....	26
<b>Figura 21</b> – Especificações dos parâmetros de corte da pastilha.....	26
<b>Figura 22</b> – Rugosímetro Mitutoyo SJ-410.....	27
<b>Figura 23</b> – Experimento de corrosão.....	29
<b>Figura 24</b> – Microscópio Olympus BX51.....	30
<b>Figura 25</b> – Resultado da rugosidade média do perfil nas trajetórias.....	31
<b>Figura 26</b> – Resultado da altura máxima do perfil nas trajetórias.....	32
<b>Figura 27</b> – Resultado da altura máxima do pico do perfil nas trajetórias.....	32
<b>Figura 28</b> – Resultado da profundidade máxima do vale do perfil nas trajetórias.....	33
<b>Figura 29</b> – Resultado da altura total do perfil nas trajetórias.....	33
<b>Figura 30</b> – Retirada de material da ferramenta.....	35
<b>Figura 31</b> – Deformação ocasionada na ferramenta.....	36

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Propriedade do aço Hardox®.....	15
<b>Tabela 2</b> - Composição química de diferentes classes de aço Hardox®.....	16
<b>Tabela 3</b> - Tempo de usinagem de cada operação.....	23
<b>Tabela 4</b> – Composição química do aço Hardox® 500.....	24
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros de corte .....	26
<b>Tabela 6</b> – Análise de desgaste .....	35
<b>Tabela 7</b> – Resultado dos ensaios de corrosão .....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABBL	Aços de alta resistência e baixa liga
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ap	Profundidade de trabalho
ae	Penetração de trabalho
Cr	Cromo
DIN	Instituto Alemão para Normalização
ISO	Organização Internacional de Padronização
JIS	Normas Industriais Japonesas
le	Comprimento de amostragem
lm	Comprimento de medição ou de avaliação
Mn	Manganês
n	Rotação
NBR	Normas Brasileiras
Ni	Níquel
Ra	Rugosidade média
Rp	Altura máxima do perfil
Rt	Altura total do perfil
Rv	Profundidade máxima do vale do perfil
Si	Silício
SSAB	Swedish Steel AS
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>6</b>
1.1 Objetivo geral.....	7
1.2 Objetivo específicos.....	7
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Fresamento.....	8
2.2 Desgaste da ferramenta.....	12
2.3 Aços de baixa liga e alta resistência.....	14
2.4 Rugosidade.....	17
2.5 Estudos de caso.....	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
3.1 Materiais utilizados.....	24
3.2 Teste de dureza.....	28
3.3 Preparação do corpo de prova.....	24
3.4 Processo de fresamento.....	25
3.5 Análise de rugosidade.....	27
3.6 Teste de dureza.....	28
3.7 Ensaio de corrosão.....	28
3.8 Análise de desgaste das pastilhas.....	29
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>31</b>
4.1 Teste de dureza .....	34
4.2 Parâmetros de rugosidade .....	31
4.3 Teste de dureza .....	34
4.4 Análise de desgaste da ferramenta .....	34
4.5 Análise de corrosão.....	36
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>39</b>

## 1.INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é utilizado em vários setores da indústria, como agrícola, aeronáutico, petroleiro, automotivo e metalúrgico, sendo cada vez mais utilizado com os avanços tecnológicos obtidos em máquinas e ferramentas (GROOVER, 2002). Para acompanhar este cenário é necessária uma constante evolução na elaboração de processos de usinagem que buscam uma melhoria para atender padrões de qualidade cada vez mais rígidos e com o menor custo possível e menor tempo de produção (ALMEIDA, 2019).

Dentre os principais processos de fabricação, o fresamento constitui um dos mais importantes devido a sua produtividade e versatilidade, e para garantir sua importância o processo está constantemente sujeito a ações de melhorias. Para garantir um melhor desempenho no fresamento é importante, além do conhecimento dos parâmetros de usinagem, da avaliação dos mecanismos de desgaste, ter o conhecimento das propriedades do material e de uma estratégia de usinagem relacionada à trajetória da ferramenta durante o corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

No processo de fresamento diferentes técnicas de trajetórias podem ser utilizadas, sendo três delas as denominadas de trajetória de Waveform, trajetória Laceform e trajetória Spiral. Essas estratégias se diferem basicamente no modo que a ferramenta entra na peça e o tempo de usinagem. Em situações em que há necessidade de se trabalhar com peças fabricadas com materiais de alta resistência, essas trajetórias podem trazer benefícios na usinagem (CHAGAS, 2017).

Um exemplo seria a utilização de aços de alta resistência e baixa liga, que possuem uma composição similar às do aço carbono, diferenciando apenas pelos elementos de liga presente. Esses aços devido à sua boa tenacidade, custo relativamente baixo, elevada resistência e boa disponibilidade no mercado, têm sido muito utilizados (HIPPERT 2004; CALLISTER, 2011; CHIAVERINI, 2005). Um aço dessa classe, denominado comercialmente de Hardox®, possui ótimas propriedades mecânicas e grande resistência ao desgaste abrasivo e o seu uso possibilita a diminuição do peso. Devido a esses fatores a utilização desse aço pode prolongar a vida útil em aplicações que possuam um desgaste extremo e por esse motivo está

sendo muito utilizado em projetos que possuem essa necessidade, como por exemplo, em caminhões de lixo e máquinas agrícolas (SSAB, 2019).

Como Guarapuava está localizado em uma região agrícola e possui empresas que trabalham com nutrição animal e farinhas, viu-se uma oportunidade de estudar a usinabilidade desse material de alta resistência ao desgaste. Isso porque esse material pode estar presentes nas máquinas agrícolas e mesmo nos martelos dos moinhos de grãos.

Com os resultados do trabalho, pode-se oferecer informações de uma melhor forma para realizar a usinagem desse material e que obtenha um menor desgaste da ferramenta e uma adequada rugosidade da peça usinada. Além de contribuir para uma melhor compreensão da usinagem desse material, o trabalho ainda pode despertar nos projetistas dessas empresas, o interesse de utilizar o Hardox® em seus projetos.

Baseado nessas informações, esse trabalho foi planejado para o estudo do aço Hardox® no processo de fresamento, para obter respostas quanto à influência das técnicas Toroidal e Zig-Zag no desgaste da ferramenta e na rugosidade da peça.

### **1.1 Objetivo geral**

Analisar dois tipos de trajetória de usinagem no processo de fresamento utilizando centro de usinagem e aço Hardox® 500 como matéria prima.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o efeito das trajetórias Zig-Zag e Toroidal na corrosão do material.
- Avaliar os efeitos das trajetórias na rugosidade superficial.
- Avaliar os efeitos das trajetórias no desgaste das ferramentas.
- Realizar a medição de dureza do aço Hardox e comparar com a informada pelo fabricante.

## 2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

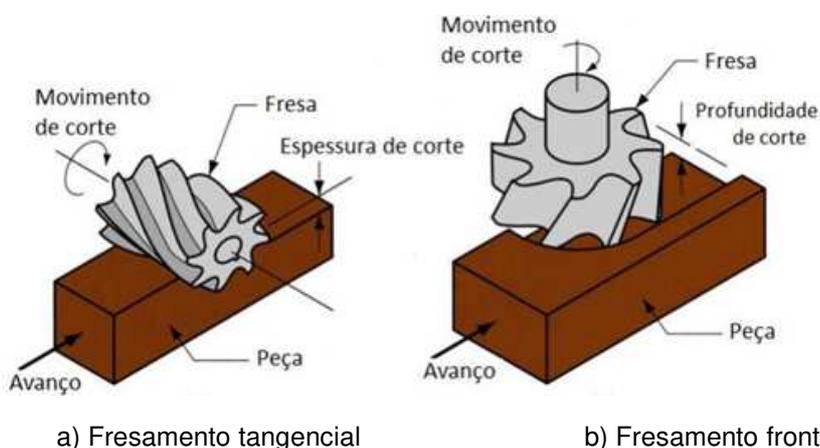
### 2.1 Fresamento

O processo de fresamento é um dos métodos de usinagem mais utilizados na indústria metalmeccânica. Isso acontece devido a sua utilização na confecção de peças simples até peças de alta complexidade, destacando dos outros métodos de usinagem. Quando comparado a outros processos de usinagem podem se destacar ainda pelo corte interrompido, os cavacos do tipo lascas ou pedaços e variação cíclica da temperatura (ALMEIDA, 2019).

O fresamento é um processo que faz o uso de ferramentas multicortantes (fresas), que possuem arestas cortantes em torno de um eixo. No processo, a ferramenta possui rotação e o material que passará pelo processo, terá um movimento desejado até entrar em contato com a fresa, ocasionando uma remoção de material (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

O processo de fresamento pode ser dividido de duas formas, o fresamento tangencial e fresamento frontal. Uma diferença dessa classificação pode ser realizada considerando a profundidade de trabalho ( $a_p$ ) e a penetração de trabalho ( $a_e$ ), como mostrada na Figura1. O fresamento tangencial acontece na maioria da sua parte na superfície cilíndrica da ferramenta ( $a_p > a_e$ ) e o fresamento frontal acontece na superfície frontal da ferramenta ( $a_p < a_e$ ) (ALMEIDA, 2019).

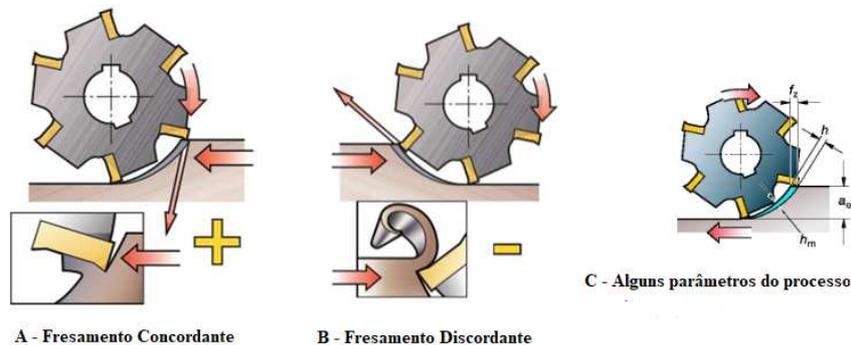
**Figura 1: Profundidade de trabalho (a) e penetração de trabalho (b) no fresamento frontal e tangencial.**



Fonte: Groover, 2014

O fresamento também pode ser classificado de acordo com as direções de corte e de avanço, como fresamento concordante e o fresamento discordante, ilustrados na Figura 2. No fresamento concordante os movimentos de corte se encontram no mesmo sentido do avanço da peça. Já no fresamento discordante o movimento de avanço da peça se encontra em sentido oposto ao movimento de corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

**Figura 2: Fresamentos concordante e discordante**



**Fonte: Sandvik, 2017**

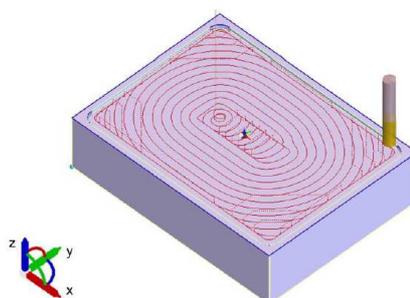
Também pode ser verificado se o fresamento é concordante ou discordante pela variação de espessura de corte ( $h$ ), como indicado na Figura 2c. No fresamento concordante a espessura  $h$  inicia em um valor máximo e vai diminuindo até próximo a valor de zero, no fresamento discordante a espessura  $h$  inicia de um valor próximo de zero aumentando até a um máximo  $h$ . No fresamento concordante acontece uma força de usinagem máxima no início e uma força mínima ao final do movimento, devido à espessura de corte  $h$ . Dessa forma, a força resultante final varia de um valor máximo até um valor mínimo, e como o movimento de corte está no mesmo sentido do movimento de avanço, essa variação de força pode ocasionar vibração na máquina. No fresamento discordante devido se iniciar com uma espessura de corte próxima de zero, o dente da fresa é forçado para dentro da peça, ocasionando um excessivo atrito e assim ocorrerá uma deformação plástica ao invés da formação de cavaco. Assim o próximo dente sempre entrará em contato com uma região encruada do material, ocasionada pelo corte do dente anterior, e devido a esses fatores ocasionará um maior desgaste na ferramenta. Porém, diferente do fresamento concordante as forças de usinagem empurram a peça no sentido

contrário ao do movimento de avanço, e assim elimina-se folgas não causando vibrações (ALMEIDA, 2019).

No processo de fresamento diferentes técnicas de trajetórias podem ser utilizadas para a realização da usinagem. Entre essas técnicas podem-se citar os tipos *Spiral*, *Waveform* que também é conhecida como Toroidal, e *Laceform*, também chamada de Zig Zag. As principais diferenças dessas técnicas são o modo que a ferramenta entrará na peça, o tempo de usinagem de cada trajetória e a quantidade de eixos que se movimentaram simultaneamente.

A trajetória do tipo *Waveform* ou Toroidal tem como principal objetivo diminuir o desgaste da ferramenta, devido à carga da ferramenta se manter o mais constante possível e sua espessura de corte será praticamente uniforme em toda a sua trajetória. Nessa técnica se utiliza de uma combinação de movimentos trocoidais e em espiral, como pode ser visto na Figura 3.

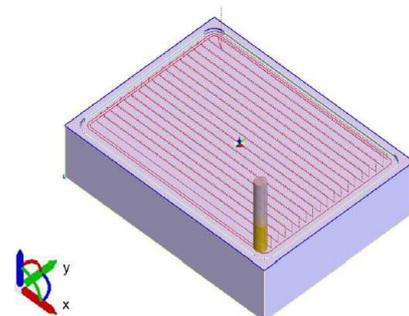
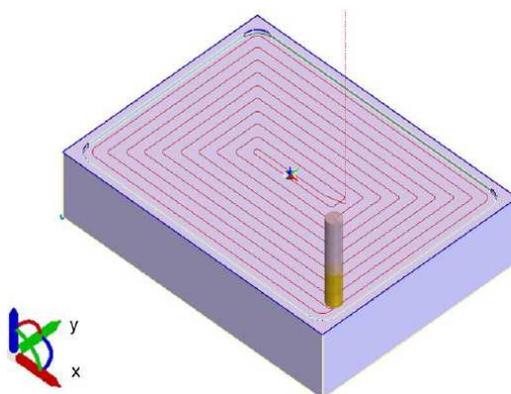
**Figura 3 - Trajetória do tipo *Waveform*.**



**Fonte: Chagas (2017)**

Na trajetória *Laceform* ou como também é conhecida Zig-Zag, como mostrado na Figura 4, o percurso da ferramenta acontece em linhas paralelas. A entrada acontece no eixo Z, e o deslocamento acontece no eixo X e Y com as linhas sendo paralelas no eixo X.

No modo de trajetória *Spiral*, a entrada da ferramenta acontece no centro da peça, acompanhada então de uma trajetória em espiral e a mudança de sentido entre os eixos X e Y é suavizada com uma leve trajetória circular, como mostrado na Figura 5. Nesse método se busca uma redução de tempo de usinagem devido a fresa estar sempre realizando remoção de material, sem a perda de tempo com aproximação e afastamento da ferramenta (CHAGAS, 2017).

**Figura 4 - Trajetória do tipo laceform****Fonte: Chagas (2017)****Figura 5 - Trajetória do tipo spiral.****Fonte: Chagas (2017)**

Além da escolha correta da técnica no processo de fresamento, para se conseguir uma melhor eficácia no processo é necessária também a escolha correta do material utilizado para ferramenta de corte. A escolha deste material depende de vários fatores como: a operação de usinagem que será realizada (desbaste ou acabamento), o material a ser usinado, a condição da máquina, custo do material para ferramenta, entre outros (FERRARESI, 2018). No processo de fresamento frontal o tipo da fresa também é uma escolha importante (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

O material escolhido para a ferramenta deve ter propriedades como: alta resistência ao desgaste abrasivo, alta dureza, alta resistência ao choque térmico, ser inerte quimicamente, alta resistência ao impacto, alta resistência à compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas as altas temperaturas. Sabe-se que não existe um material que tenha todas essas propriedades agregadas,

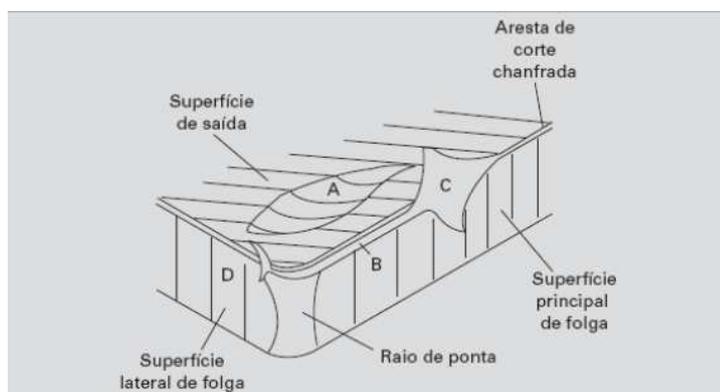
por isso deve-se apoiar em hipóteses de comportamento do material usinado para escolher materiais que garanta a melhor confiabilidade da ferramenta (MACHADO 2009; SOARES, 2017).

## 2.2 Desgaste da ferramenta

O desgaste de uma ferramenta se dá pela combinação de diversos fatores: químico, mecânico, abrasivo esses que atuam diretamente na aresta de corte (NOURI, 2015). Toda ferramenta sofrerá desgaste independente da situação, podendo ser um desgaste lento ou rápido e conseqüentemente alterando a geometria original da ferramenta de corte (SILVA, 2010). Durante a usinagem a ferramenta estará submetida a um elevado atrito, ocasionando altas temperaturas, trazendo vários riscos ao processo, danificando a própria ferramenta, e também danificando a peça que está sendo usinada (ALMEIDA, 2019).

Os fenômenos que alteram a geometria da ferramenta são divididos em três classes desgaste, deformação plástica e avaria. O desgaste é definido como sendo a mudança da sua forma original durante o corte, ocasionada da perda gradual de material e são basicamente de três tipo: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe, como ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta: A) Desgaste de cratera, B) Desgaste de flanco, C e D) Desgaste de entalhe.**



**Fonte: Machado (2015).**

O desgaste de flanco é o desgaste mais comum, ocorrendo na superfície de folga da ferramenta, ocasionada pelo contato entre ferramenta e peça. Essa forma

de desgaste pode alterar a geometria original da aresta de corte da ferramenta e assim promove uma deterioração do acabamento superficial da peça. O desgaste de cratera acontece na superfície de saída, devido o contato entre a ferramenta e o cavaco, e o desgaste de entalhe ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

Os mecanismos de desgaste são os fatores que levam as ferramentas a sofrerem o desgaste e podem ser a abrasão, aderência, difusão e deformação plástica. O mecanismo de desgaste por abrasão envolve a perda de material por microlascamentos, microcorte ou microsulcamento, causado por partícula duras contidas no material da peça ou da própria ferramenta arrancadas por atrito (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

O desgaste por aderência ocorre em baixas velocidades de corte, quando o fluxo de material sobre a superfície de saída não é contínuo. A aresta postiça de corte (APC) pode aparecer, e assim o contato se torna menos contínuo. E assim fragmentos microscópicos são arrancados das ferramentas e são levados juntos com o fluxo de material. A zona de escorregamento, a profundidade de corte irregular, o corte interrompido causa o fluxo irregular de material e conseqüentemente o mecanismo de desgaste por aderência (MACHADO, 2015).

O mecanismo de desgaste por difusão envolve a transferência de átomos de um material para outro. Isso é dependente da solubilidade dos materiais na zona de cisalhamento, da duração de contato e da temperatura de corte. Este mecanismo acontece no geral na superfície de saída e na superfície de folga. A difusão é responsável pelo desgaste de cratera (BARRIOS, 2013).

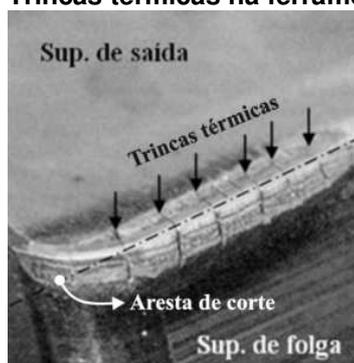
A deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão é um processo que acontece em geral na usinagem de material com alta dureza, devido à combinação de altas temperaturas e altas tensões de compressão na superfície de saída podem provocar a deformação plástica da ferramenta (ALMEIDA, 2019).

Já as avarias podem ser de origem térmica ou mecânica e ocorrem de maneira inesperada, ocasionada por quebra ou trincas, podendo causar a inutilização da ferramenta (MACHADO, 2009).

A trinca é um tipo de avaria e pode ocasionar lascamento, sulcos e até mesmo a quebra da ferramenta. Podem ser ocasionadas pela variação de temperatura

(origem térmica) ou pelos esforços mecânicos (origem mecânica). As trincas de origem mecânicas são paralelas à aresta de corte, e podem ser causadas por choques mecânicos durante a entrada e saída da aresta de corte. Já as trincas de origem térmicas, como mostrado na Figura 7, são perpendiculares à aresta de corte e é gerada por fatores como: distribuição não uniforme do fluido de corte e corte interrompido (BARRIOS, 2013)

**Figura 7 - Trincas térmicas na ferramenta de corte.**



**Fonte: Metals Handbook, 1989.**

Devido a fatores como trincas térmicas e aceleração de mecanismos de desgaste a temperatura é um fator preocupante para as ferramentas de corte (MACHADO, 2009). Desse modo, a medida da temperatura é fator crucial na usinagem, podendo então controlar fatores que afetam no desgaste e na vida útil da ferramenta, já que altas temperaturas também podem afetar nas tolerâncias desejadas e acabamento superficial da peça. Porém, o aumento de temperatura colabora para reduzir as forças e potências de usinagem (SUAREZ, 2009).

Vários métodos de medição e modelagem vêm sendo desenvolvido, como sensores de infravermelho, câmeras de calor e métodos de elementos finitos, porém a confiabilidade desses métodos ainda é questionada (CARVALHO, 2006).

### **2.3 Aços de baixa liga e alta resistência**

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) possuem uma composição bem similar às dos aços carbono, diferenciando apenas pelos elementos de liga presente, como o cromo, níquel, cobre, manganês, silício e molibdênio utilizados em diferentes concentrações. Se forem comparados com os aços-carbono

comuns com baixo teor de carbono apresentam uma maior resistência, que se dá por meio de tratamentos térmicos (HIPPERT 2004; CALLISTER, 2011).

As principais vantagens dos aços ARBL são a sua boa tenacidade, custo relativamente baixo, elevada resistência, boa disponibilidade no mercado se comparado a outras ligas e podem ser fabricados de acordo com cada aplicação, adicionando elementos de liga para melhorar propriedades necessárias no material (CHIAVERINI, 2005).

Um exemplo de aço ARBL disponível no mercado é o aço de nome comercial Hardox®. Essa classe de aço foi inserida no mercado em 1974 pela empresa sueca com sede em Estocolmo Swedish Steel SA (SSAB), trazendo uma ótima combinação entre dureza e resistência a abrasão. Primeiramente o material foi produzido para ser uma placa de desgaste, porém possuía uma maleabilidade considerável e assim podendo ser utilizado em diversas aplicações (SSAB, 2014).

De acordo com a SSAB os aços Hardox® são aços com grande resistência ao desgaste abrasivo, ótimas propriedades mecânicas, e se comparado a outros aços possui uma ótima relação às cargas de impacto. Ainda segundo a fabricante, se comparado a outros aços, os aços Hardox®, diminuem o peso do equipamento e prolongam a vida útil em aplicações como implementos agrícolas, caçambas graneleiras, carrocerias de caminhões basculantes, escavadoras, betoneiras, ou em qualquer aplicação que possua um desgaste extremo (SSAB, 2019).

O Hardox® é classificado e nomeado de acordo com a as suas propriedades mecânicas, sobretudo na sua dureza, como mostra na Tabela 1.

**Tabela 1: Propriedades dos aços Hardox®**

Classe Hardox®	Espessura (mm)	Dureza (HBW) Min - Max	Limite de escoamento (MPa)	Resistência ao impacto, teste longitudinal, charpy e corpo de prova 10mm x 10mm
Hardox® 400	4,0-130,0	370-430	1100	45J/-40°C
Hardox® 450	3,2-80,0	425-475	1250	50J/-40°C
Hardox® 500	4,0-32,0	470-530	1400	37J/-40°C
Hardox® 550	8,0-65,0	525-575	1400	30J/-40°C

**Fonte: SSAB, 2019**

Os aços Hardox® possuem microestrutura totalmente martensítica. Este aço passa primeiramente por um processo de têmpera e após é revenido. Como indicado na Tabela 2, o aço combina a adição de carbono e de elementos de liga como o cromo (Cr), níquel (Ni), manganês (Mn), silício (Si) entre outros.

A utilização do aço Hardox® tem sido observada em diversas empresas, como é o caso de três empresas citadas a seguir. A companhia Indutar, uma empresa da área de engenharia de implementos agrícolas do Rio Grande do Sul, realizou a troca das navalhas do rolo de facas Katrina, um produto próprio, removendo o aço comum SAE 1045 de 6,35mm de espessura e substituindo por Hardox® 450/500 de 5 mm. Com essa troca o produto ficou 140 kg mais leve, cerca de 20% a menos do seu valor inicial e sua vida útil teve um aumento de 300% (SSAB, 2020).

**Tabela 2: Composição química de diferentes classes de aço Hardox®**

Classe Hardox®	C max%	Si max%	Mn max%	P max%	S max%	Cr max%	Ni max%	Mo max%	B max%
Hardox® 400	0,32	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,004
Hardox® 450	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,005
Hardox® 500	0,30	0,70	1,60	0,020	0,010	1,50	1,50	0,60	0,005
Hardox® 550	0,44	0,50	1,30	0,020	0,010	1,40	1,40	0,60	0,004

**Fonte: SSAB 2019**

A Figura 8 ilustra algumas aplicações do aço Hardox® em implementos agrícolas e em caminhões.

A empresa Acoplados Salto situada na Argentina, fabricante de carretas, utiliza placas Hardox® no assoalho de seus produtos, fazendo com que a manutenção do produto seja mais tardia se comparada aos outros aços e também reduzindo o peso de suas unidades em cerca de 1,8 toneladas a 2 toneladas. Isso também faz com que se consiga uma maior capacidade de carga devido ao peso máximo permitido para transporte, e também uma possível redução de consumo do caminhão (SSAB, 2019).

**Figura 8 - Exemplos de aplicações de aços Hardox®: (a) rolo de facas Katrina, (b) carreta basculante e (c) carrocerias de caminhões de lixo.**



Fonte: SSAB 2019

A empresa Fanalca, com sede na Colômbia fabrica equipamentos e containers para coleta de resíduos sólidos utilizando a chapa antidesgaste Hardox®. A utilização desse produto fez com que se conseguisse uma redução no peso total dos compactadores de lixo, suportando cargas maiores, sendo mais resistente a abrasão reduzindo a frequência de substituição de peças, tornando o produto mais rentável (SSAB, 2019).

## 2.4 Rugosidade

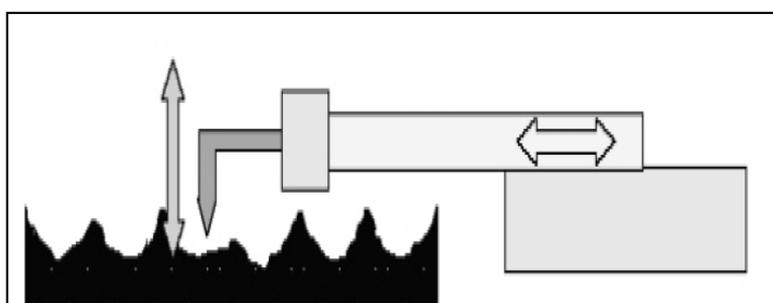
A rugosidade de uma peça é definida pelas irregularidades finas ou dos erros microgeométricos ocasionados pelo processo de fabricação. No processo de usinagem especialmente, a rugosidade se dá por meio da ação da ferramenta inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postíça de corte, desgaste da ferramenta, etc.) (ESPANHOL, 2008; MACHADO *et al.*, 2011).

A rugosidade é uma característica de grande importância na usinagem, pois influencia em fatores como, capacidade de deslizamento, resistência à fadiga, desgaste, corrosão e escoamento de fluidos, e alterando parâmetros como rotação, avanço e profundidade de corte é possível modificar a rugosidade de superficial (FERRARESI, 2018).

O aparelho que quantifica essas irregularidades é chamado de rugosímetro e a medição pode ser feita com ou sem contato entre o apalpador e a peça. A medição mais utilizada atualmente é e com contato devido a sua

simplicidade e menor custo. Nessa medida o apalpador do rugosímetro digital percorre o comprimento de medição de forma linear com velocidade constante, como ilustra a Figura 9. As saliências presentes na superfície ocasionam movimentos verticais no apalpador, esses são convertidos em sinais elétricos e então amplificados e por fim seus resultados podem ser apresentados na forma numérica ou pelo gráfico do perfil da amostra. (NICOLA, 2008; MACHADO *et al.*, 2011).

**Figura 9: Princípio de funcionamento do aparelho rugosímetro digital.**

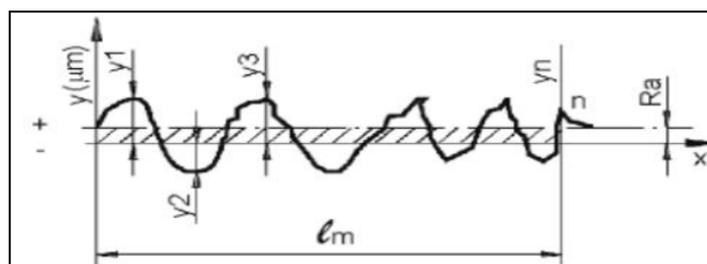


Fonte – Nicola, 2008.

Diversas organizações, como ISO, DIN e JIS, possuem normas técnicas para a avaliação da rugosidade. Um dos parâmetros mais utilizados em superfícies técnicas e que estão de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) são os parâmetros de rugosidade média, altura total do perfil, altura máxima do perfil, profundidade máxima do vale e altura máxima do pico.

A rugosidade média ( $R_a$ ) será a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação à linha média no comprimento de amostragem. A Figura 10 ilustra as coordenadas que compõem o cálculo desta rugosidade.

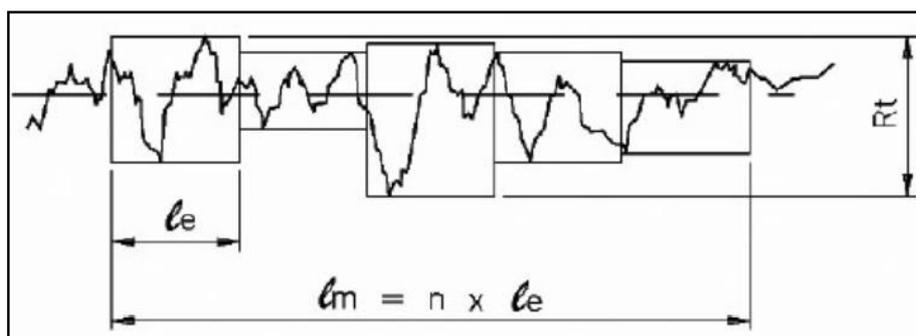
**Figura 10 - Percurso de medição da rugosidade média ( $R_a$ ).**



Fonte – Espanhol, 2008

A altura total do perfil ( $R_t$ ), como mostrado na Figura 11, é definido como a soma das maiores altura de pico com as maiores alturas de vale no comprimento de amostragem. Na mesma figura é representado o comprimento de amostragem ( $l_e$ ) e o comprimento de medição ou de avaliação ( $l_m$ ). A norma estabelece que o comprimento de medição pode ser de três a cinco vezes o comprimento de amostragem (a letra  $n$  representa essa equivalência).

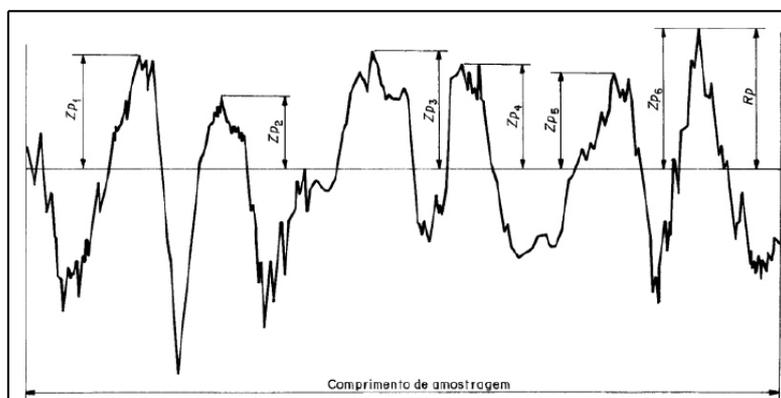
**Figura 11- Altura Total do Perfil ( $R_t$ ).**



**Fonte- Espanhol (2008)**

A altura máxima do pico do perfil ( $R_p$ ) será a maior altura de pico no comprimento de amostragem, e a profundidade máxima do vale do perfil ( $R_v$ ) será a maior profundidade do vale no comprimento de amostragem, sendo a altura máxima do perfil ( $R_z$ ) a soma de  $R_p$  e  $R_v$  (ESPAÑHOL, 2018). A Figura 12 os valores das alturas dos picos ( $Zp_i$ ) e a maior entre elas, no caso, representada por  $R_p$ .

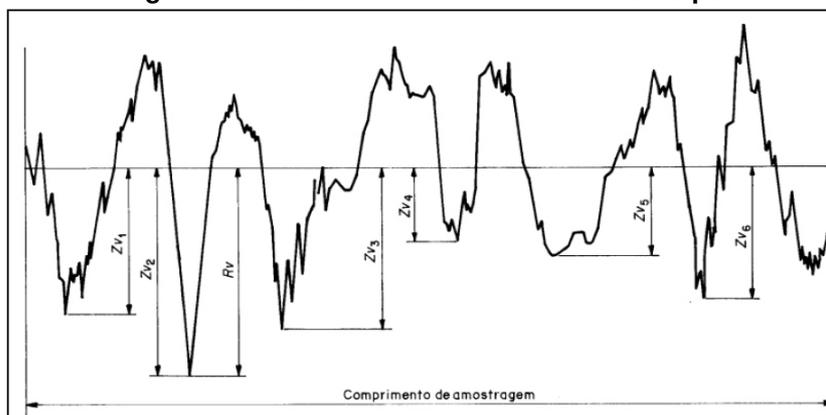
**Figura 12 - Altura máxima do pico do perfil**



**Fonte - ISO 4287/2002**

Da mesma forma, a Figura 13 ilustra os valores das profundidades dos vales ( $Z_v$ ) de um dado perfil e a maior profundidade medida no comprimento de amostragem ( $R_v$ ).

**Figura 13 - Profundidade máxima do vale do perfil.**



**Fonte - ISO 4287/2002**

Entre todos esses parâmetros citados o mais utilizado na indústria na análise de rugosidade é a rugosidade média da amostra ( $R_a$ ). Quando se quer analisar algum defeito ou irregularidade específicos em pontos específicos se analisa os parâmetros  $R_t$  e  $R_z$  (MACHADO *et al.*, 2011).

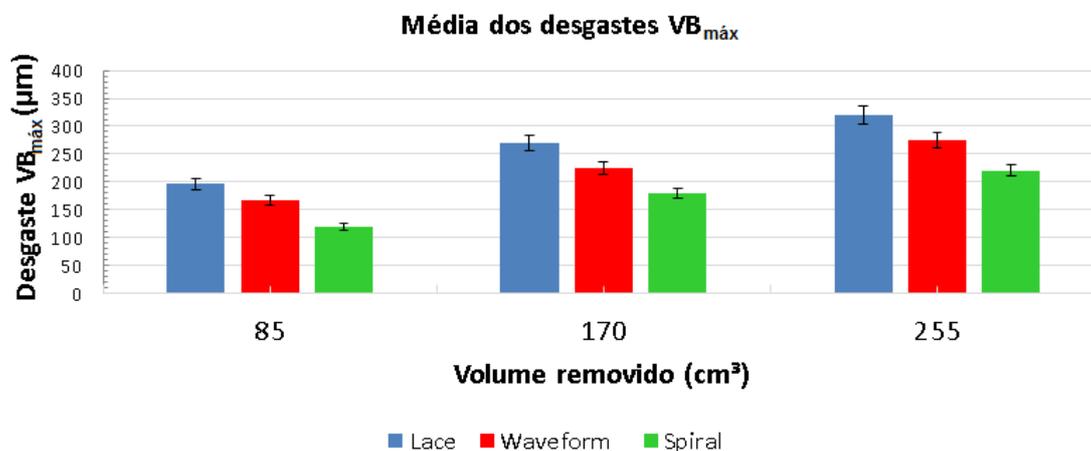
## 2.5 Estudos de caso

Chagas et al. (2017) realizaram ensaios de fresamento em cavidades de geometria retangular no material AISI P20, para verificar a influência no desgaste de três estratégias de usinagem (*Spiral*, *Wabeform*, e *Laceform*). Para o ensaio foram utilizados velocidade de avanço ( $v_f$ ) de 2000 mm/min, profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 3mm, penetração de trabalho ( $a_e$ ) de 2mm, rotação de ferramenta ( $n$ ) de 6600 rpm e velocidade de corte ( $v_c$ ) de 200 m/min. O movimento de corte foi o concordante e a lubrificação foi uma solução miscível em água. Os autores também realizaram a medição do desgaste de flanco máximo  $VB_{máx}$ , medida na superfície de folga central.

A Figura 14 mostra os valores do desgaste máximo de flanco das três estratégias, para três diferentes volumes de remoção de material. Pelos resultados percebe-se que a estratégia de maior desgaste é a de *Laceform*, seguida da

estratégia de *Waveform*, e a que apresentou o menor desgaste foi a estratégia de *Spiral*.

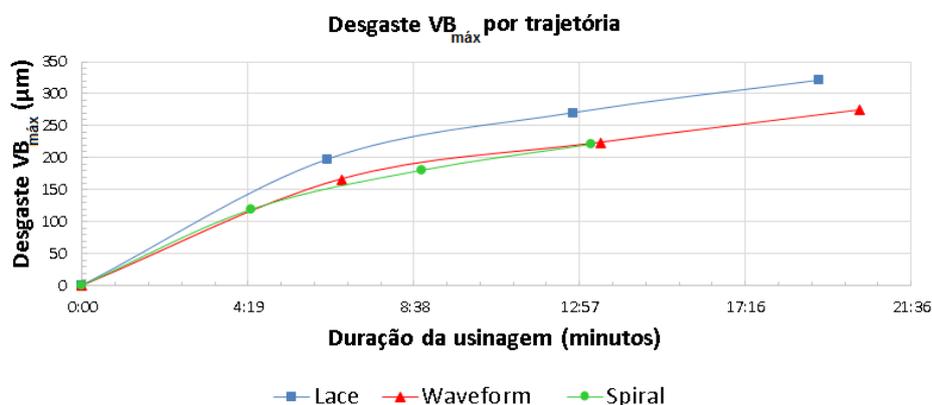
Figura 14 - Gráfico do desgaste da ferramenta em função do volume removido.



Fonte - Chagas et al. 2017

A Figura 15 mostra a evolução do desgaste em relação ao tempo de usinagem. Pode-se observar que a linha da estratégia de *Laceform* se apresenta acima das outras duas, devido principalmente a um maior número de entradas e saídas da ferramenta no processo. Já as linhas das estratégias *Waveform* e *Spiral* se assemelham, porém é possível verificar que o tempo de usinagem do tipo *Spiral* foi consideravelmente menor, e assim tendo um menor desgaste.

Figura 15 - Gráfico da evolução do desgaste em relação ao tempo de usinagem



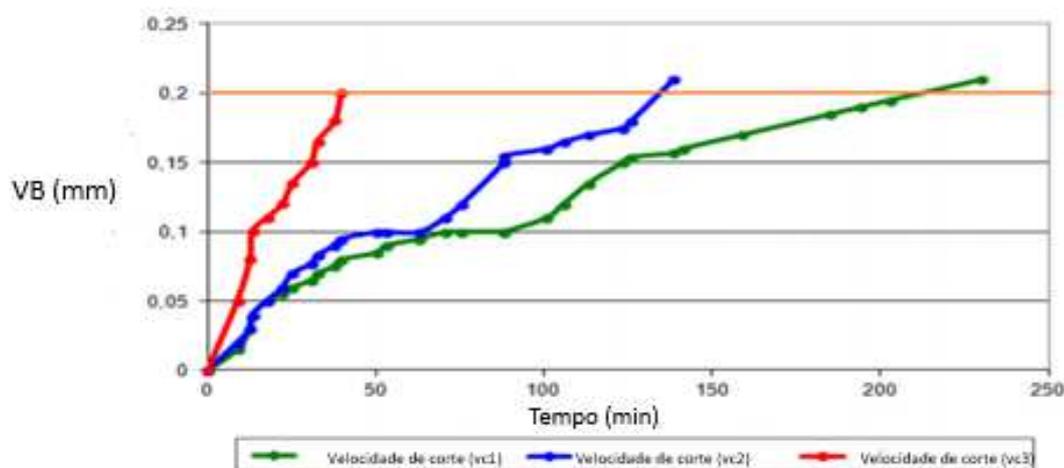
Fonte - Chagas et al. 2017

Assim, os resultados dos ensaios mostraram que estratégia do tipo *Spiral* apresentou um desempenho superior quanto à redução do desgaste da ferramenta se comparado as outras duas estratégias estudadas (CHAGAS, 2017).

Majerik (2016) utilizou em seu trabalho pastilhas intercambiáveis de metal duro revestidas para análise de desgaste da ferramenta no processo de fresamento no aço Hardox®. Para o estudo foram utilizadas três velocidades de corte de ( 55,78 e 111 m/min), mantendo constante a profundidade de corte de 2 mm e o avanço de 0,056 mm/dente

A Figura 16 mostra os resultados obtidos pelo autor. Observa-se que na velocidade de 55 m/min teve o menor desgaste, e a que apresentou o maior desgaste foi a velocidade de 111 m/min. A maior velocidade de corte teve um desgaste equivalente à de menor velocidade em um tempo aproximadamente 4 vezes menor (MAJERIK, 2016).

**Figura 16 - Gráfico do desgaste em função do tempo de corte.**



**Fonte - Majerik 2016**

Kara (2019), realizou um estudo com o objetivo de otimizar os parâmetros de corte para analisar o acabamento no aço Hardox® 400. Para o estudo o autor utilizou pastilhas de metal duro com revestimento de TiAlN + TiN. O corpo de prova possuía dimensões de 180 x 150 x 15 mm, e a fresadora utilizada foi a de modelo Delta Seiki 1050 com acionamento de 15 kW. Para analisar a melhor condição de corte o autor utilizou duas velocidades de corte (60 m/min e 120 m/min), com fluido de corte e sem fluido, comparando a rugosidade média.

Os resultados obtidos foram uma média do Ra de 0,598  $\mu\text{m}$  sem fluido e 0,4915  $\mu\text{m}$  com fluido a velocidade de corte 60 m/min, já para a velocidade de corte de 120 m/min a média do Ra foi de 0,3895  $\mu\text{m}$  sem fluido e 0,328  $\mu\text{m}$  com fluido. Observa-se que com o aumento da velocidade de corte, ocorreu uma diminuição no valor de Ra, devido à diminuição de atrito, e o valor de Ra é menor com a utilização de fluido de corte. Assim, para este estudo foi concluído que a melhor forma para um bom acabamento no aço Hardox® 400 é a utilização de altas velocidades com adição de fluido de corte (KARA, 2019).

Reinke (2017) apresentou um estudo sobre a influência das estratégias Zig-Zag e Espiral no acabamento superficial e no tempo de usinagem de uma peça de aço VP100, considerado de média usinabilidade. Para a realização dos ensaios foi utilizado um centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760, ferramentas com pastilhas de metal duro de ponta esférica, com revestimento de TiAlN e as variáveis analisadas foram a rugosidade superficial e o tempo de usinagem. As estratégias diferentes foram utilizadas no desbaste, e no acabamento foi utilizado a técnica de Zig-Zag para as duas amostras.

Reinke apresentou os valores de rugosidade em função da estratégia de usinagem utilizada, sendo a média das cinco medidas 0,60 $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 0,60 $\mu\text{m}$ , já na estratégia Espiral teve uma média dos Ra de 0,66 $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 0,09 $\mu\text{m}$  na qual é possível observar que os valores na técnica de Zig-Zag apresentaram valores ligeiramente menores

Já na Tabela 5 são mostrados os tempos de usinagem em função de cada estratégia para o tempo de desbaste e também para o tempo de acabamento.

**Tabela 3 – Tempo de usinagem de cada operação**

<b>Tabela - Tempo de usinagem de cada operação</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Zig-Zag</b>	<b>Espiral</b>
Tempo de desbaste	1:55'43"	1:28'24"
Tempo de acabamento	1:12'47"	
Tempo total de usinagem	3:08'30"	2:41'11"
Números de linhas do programa	6329	6665

**Fonte: Reinke 2017**

Percebe-se que o tempo de acabamento foi o mesmo, pois houve apenas mudança na estratégia de desbaste, e que a técnica Espiral foi aproximadamente 14% mais rápida que técnica de Zig-Zag.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais utilizados

O material a ser fresado é um aço de alta resistência da marca SSAB™, cuja composição fornecida pelo fabricante esta apresentada na Tabela 4. As porcentagens correspondem aos teores dos elementos presentes no material.

**Tabela 4 - Composição química do aço Hardox® 500**

<b>Elementos</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>B</b>	<b>Mn</b>
<b>%</b>	<b>0,26</b>	<b>0,23</b>	<b>0,007</b>	<b>0,001</b>	<b>0,70</b>	<b>0,07</b>	<b>0,026</b>	<b>0,001</b>	<b>0,90</b>

Fonte – Ferro Extra 2020

#### 3.2 Ensaio de dureza

A dureza do aço foi medida em um durômetro Digimess, equipamento pertencente a UTFPR câmpus Guarapuava, localizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos. O experimento foi repetido 10 vezes em locais diferentes do corpo de prova (superfície não foi usinada com as trajetórias propostas nesse trabalho), utilizando a escala Rockwell.

#### 3.3 Preparação do corpo de prova

O material para o corpo de prova foi adquirido na empresa Ferro Extra, localizada em Ponta Grossa - Paraná, cortados a jato d'água nas dimensões 50 x 20 x 130 mm. A Figura 17 mostra a forma que o material foi recebido.

**Figura 17 - Corpo de prova**

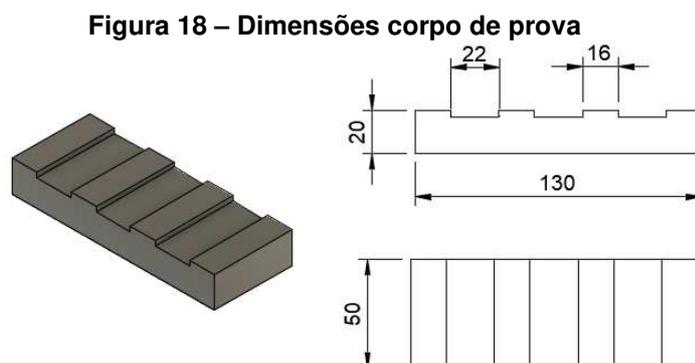


Fonte: Autoria própria

Antes do processo de fresamento, a proteção do aço com coloração marrom mostrado na Figura 17 A foi retirada utilizando uma fresa de metal duro de 50 mm.

### 3.4 Processo de fresamento

Com o auxílio de um software de Engenharia Auxiliada por Computador, Fusion 360 da Autodesk, foi desenvolvidos dois códigos de fresamento para a realização de um canal de 22 mm de comprimento e 3 mm de profundidade, utilizando as trajetórias da forma Zig-Zag e Toroidal. Em cada corpo de prova foram realizados 3 canais como indicado na Figura 18.



**Fonte: Autoria própria**

Para o fresamento foi utilizado o laboratório de Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Guarapuava, e a máquina ferramenta utilizada foi o centro de usinagem ROMI D600. O centro de usinagem mostrado na Figura 19 tem capacidade para 20 ferramentas no magazine e rotação máxima de 8000 r.p.m.

O cabeçote da marca Black Tools de 16 mm de diâmetro, com duas pastilhas de corte intercambiáveis, do modelo APKT 100308PDR CH, foi utilizado nos experimentos. As pastilhas foram adquiridas do fabricante KLP. As Figuras 20 e 21 mostram o cabeçote utilizado e as pastilhas, respectivamente, assim como os parâmetros de corte recomendado pelo fabricante. Vale ressaltar que, o comprimento da ferramenta fora da pinça foi de 55 mm.

Figura 19 - Centro de usinagem ROMI D 600.



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Cabeçote e pastilhas para os experimentos.



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 - Especificações dos parâmetros de corte da pastilha



Fonte: Autoria própria

Na trajetória Zig-Zag, os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte de 90 m/min, avanço por dente de 0,05 mm, rotação de 1790 rpm e profundidade de corte de 0,5 mm. A fresa realizou 12 passadas (para que o canal de 22 mm fosse usinado) totalizando um percurso de avanço de 600 mm. Em seguida foi realizado o fresamento de mais dois canais usando os mesmos parâmetros a fim de ter repetibilidade. Em cada canal foram utilizadas arestas novas. Podemos ver os parâmetros utilizados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Parâmetros de corte**

Tipo de Trajetória	Parâmetros					
	$v_c$ (m/min)	$v_f$ (mm/min)	$n$ (r.p.m.)	$f_z$ (mm)	$a_p$ (mm)	Percurso (mm)
Zig-Zag	90	179	1790	0,05	0,5	600
Toroidal 1 mm	90	179	1790	0,05	1	150
Toroidal 2 mm	90	179	1790	0,05	2	150
Toroidal 2 mm	90	358	1790	0,10	2	50

**Fonte: Autoria própria**

Para a técnica Toroidal foram utilizados os mesmos parâmetros de corte anteriores alterando apenas a profundidade de corte para 1 mm. Dessa forma, a fresa realizou uma trajetória de 150 mm. O processo também foi repetido por 2 vezes e em cada canal foram utilizadas arestas novas. Também foi realizado o fresamento utilizando a técnica Toroidal, mantendo os parâmetros de cortes, porém com profundidade de corte de 2 mm na primeira passada e 1 mm na segunda passada (para totalizar 3 mm de profundidade do canal).

Como mostrado na tabela, um quarto teste foi iniciado, porém a ferramenta quebrou na primeira passada no canal, mostrando que ao dobrar a velocidade de avanço com  $a_p$  de 2 mm, a ferramenta não suportou o corte.

### 3.5 Análise de rugosidade

Após a usinagem dos corpos de prova foi realizado uma análise da rugosidade. Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro, modelo SJ-410 da fabricante Mitutoyo, apresentado na Figura 22, do Laboratório de Metrologia da UTFPR campus Guarapuava.

As medições foram realizadas próxima a entrada ferramenta de cada canal e próxima a saída de cada canal, totalizando duas medições para cada teste das trajetórias.

Os parâmetros utilizados foram rugosidade média ( $R_a$ ), altura máxima do perfil ( $R_z$ ), altura máxima do pico do perfil ( $R_p$ ), profundidade máxima do vale ( $R_v$ ) e altura total do perfil ( $R_t$ ).

**Figura 22 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-410**



**Fonte: Autoria Própria**

As medições não foram realizadas ao final de cada teste, mas finalizadas todo o processo de usinagem as amostras foram levadas ao Laboratório de Metrologia e efetuadas todas as medições.

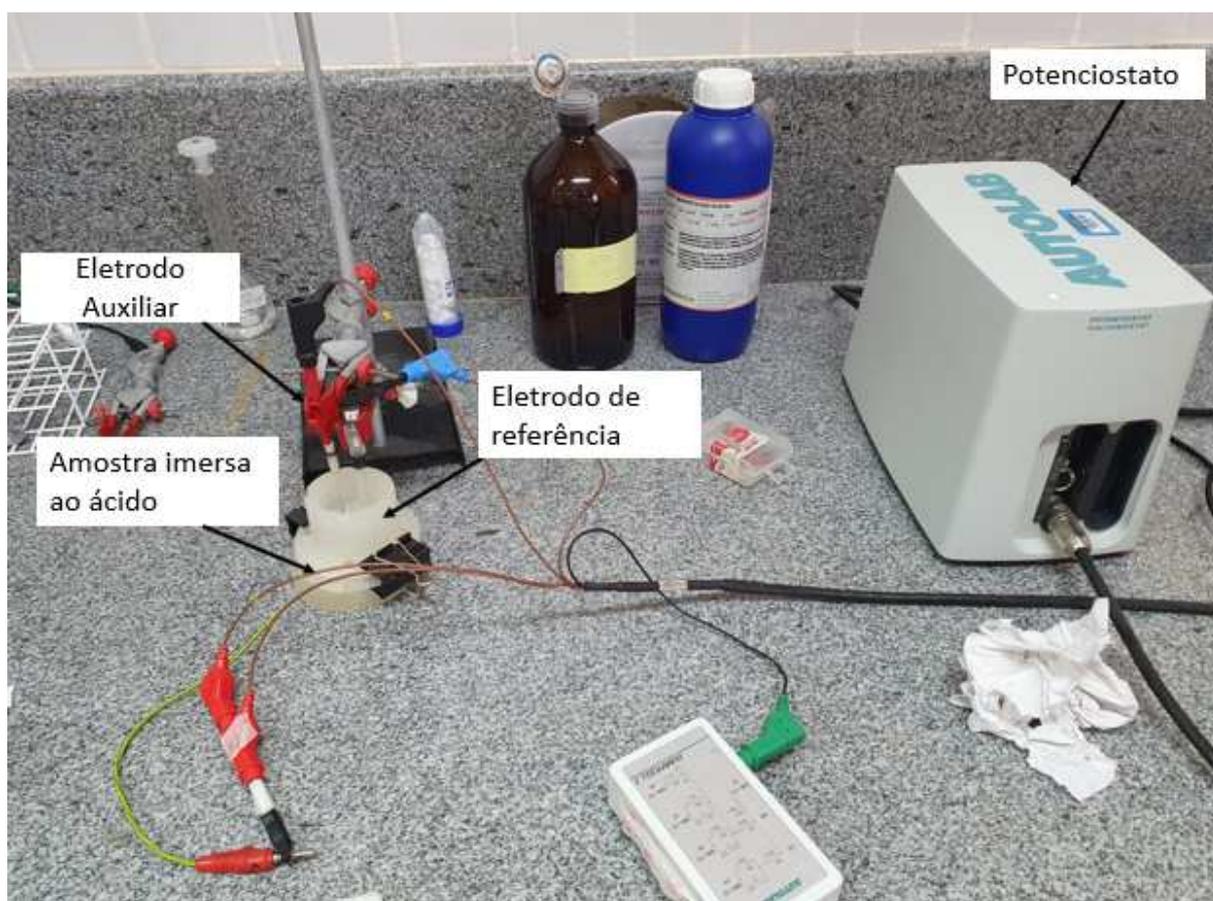
### 3.6 Ensaio de corrosão

Os ensaios de corrosão foram realizados no Laboratório de Química da UTFPR campus Guarapuava. Antes do ensaio, as amostras usinadas foram limpas com uso de álcool e água destilada e secas, já a amostra que não recebeu

usinagem foi lixada com uma lixas 400 e 600 mesh e limpa com água destilada e álcool.

O experimento foi montado conforme Figura 23. O experimento tinha duração de 55 min, sendo realizado um ensaio para cada estratégia de fresamento e um para amostra usinagem.

**Figura 23 - Experimento de corrosão**



**Fonte – Autoria própria**

O equipamento utilizado foi o potenciostato / galvanostato PGSTAT204 da AutoLab. A célula eletroquímica foi montada utilizando eletrodo auxiliar de platina e eletrodo de referência H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Foram realizados ensaios para medição de potencial de corrosão ( $E_{cor}$ ) e polarizações. O potencial de circuito aberto (OCP – *Open Circuit Potential*) foi medido conforme norma ASTM G59-97, 2009. A polarização foi realizada em duas etapas, sendo a primeira uma micropolarização, realizada com uma variação de tensão entre  $\pm 10$  mV em torno do potencial de corrosão ( $E_{cor}$ ) e na segunda etapa realizou-se a macropolarização, com variação de  $\pm 100$  mV, em torno

do Ecor. Os resultados obtidos, foram a corrente de corrosão (I<sub>cor</sub>) e a taxa de corrosão, em mm/ano.

### 3.7 Análise de desgaste das pastilhas

A análise de desgaste foi realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UTFPR campus Guarapuava. Primeiramente as pastilhas foram lavadas utilizando a lavadora ultra-sônica digital da marca Sanders Medical, por 15 minutos. Após a limpeza as pastilhas eram secas com soprador térmico e analisadas no microscópio da marca Olympus modelo BX51, conforme Figura 24.

**Figura 24 - Microscópio Olympus BX51**



**Fonte - Autoria própria**

Vale ressaltar que, não foi confeccionado dispositivo para a visualização das arestas da pastilha no microscópio. A pastilha foi posicionada na própria base do microscópio, de forma que aresta de corte analisada ficava ortogonal em relação a lente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

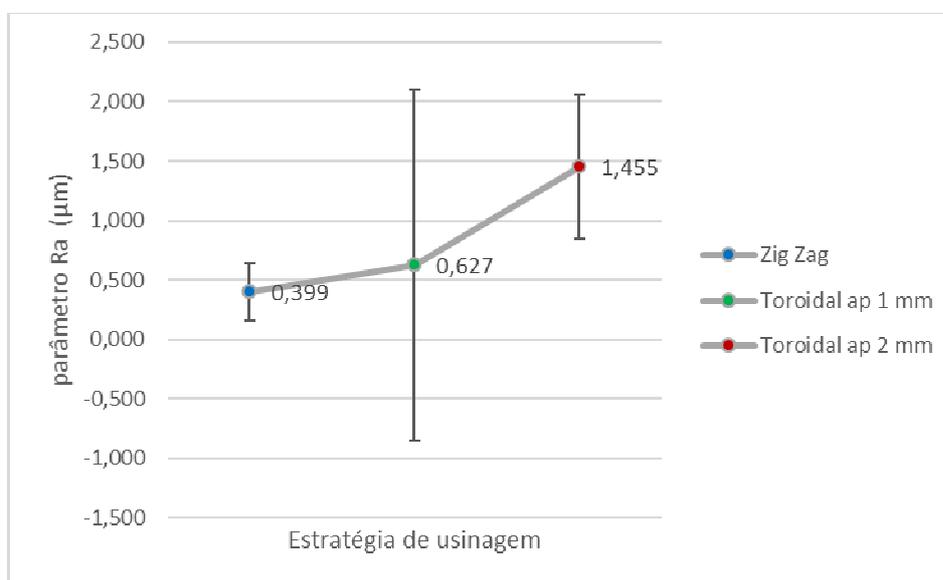
### 4.1 Teste de Dureza

Com as 10 medições de dureza realizadas e utilizando uma tabela de comparação para conversão de dureza, e a dureza informada pelo fabricante de 470 – 530 HBW, foi calculado o valor médio da dureza de  $481 \pm 22,44$  HBW. Pelo resultado, percebe-se que o valor está dentro do intervalo informado pelo fabricante.

### 4.2 Parâmetros de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade foram obtidos próximo a entrada de ferramenta e a saída da ferramenta de cada canal, totalizando seis medições para cada estratégia de usinagem. A Figura 25 a seguir apresentam as médias dos parâmetros Ra para as três estratégias de usinagem.

**Figura 25 - Resultado da rugosidade média nas trajetórias**



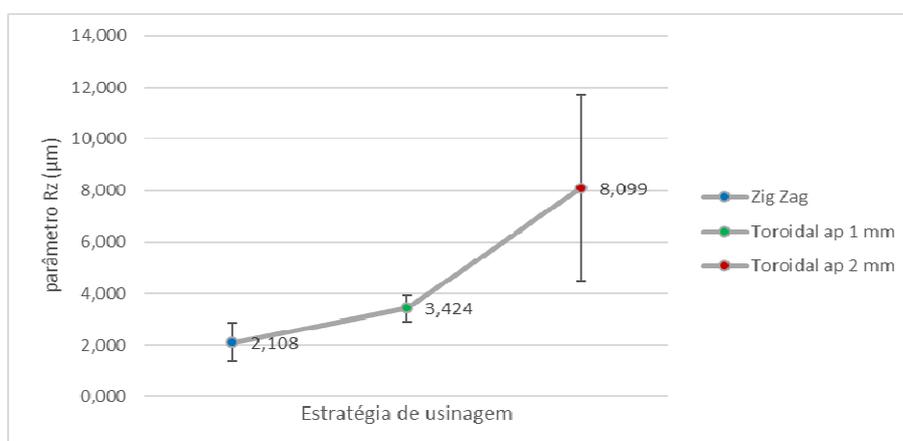
**Fonte: Autoria própria**

É possível observar que a estratégia que apresentou a menor rugosidade média foi a Zig-Zag, apresentando um valor quase duas vezes menor que Toroidal com ap de 1 mm e quase quatro vezes menor na condição com 2 mm, os valores

encontrados na estratégia Toroidal ap 1mm tiveram grande variação, dessa forma seu desvio padrão apresentou o maior resultado.

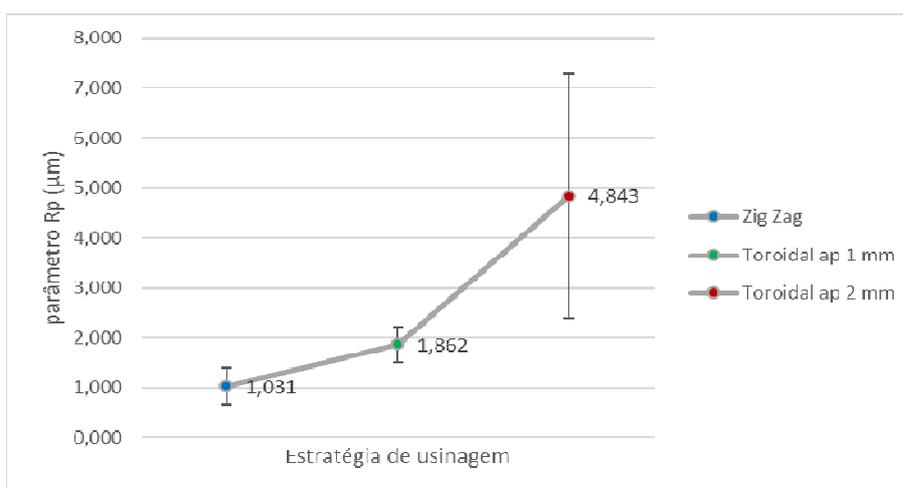
Ao analisarmos a altura máxima do perfil (Figura 26), é possível observar que a estratégia Toroidal com ap de 2 mm apresentou um valor médio de 8,099  $\mu\text{m}$ , um valor 384% maior que a estratégia Zig-Zag. Também é possível observar que os valores de desvio padrão das estratégias Zig-Zag e Toroidal com ap de 1 mm foram menores do que na condição de 2 mm de ap.

**Figura 26 – Resultado da altura máxima do perfil nas trajetórias**



Fonte: Autoria própria

**Figura 27 – Resultado da altura máxima do pico do perfil nas trajetórias**



Fonte: Autoria própria

A Figura 27 mostra que a média da altura máxima dos picos do perfil foi no máximo de 4,843  $\mu\text{m}$  na estratégia Toroidal com ap de 2 mm, um valor 469% maior que a estratégia Zig-Zag, e um desvio padrão de 2,443  $\mu\text{m}$ . Os valores variam significativamente, mas o desvio padrão para a amostra na trajetória Toroidal com 1mm de ap, novamente foi menor. Segundo ESPANHOL (2016) isso possivelmente pode ter ocorrido devido a diferença de ap nas estratégias (maiores valores de ap foram utilizados nessa estratégia).

Os valores médios de Rv teve uma diferença de 2,178  $\mu\text{m}$  entre a estratégia Zig-Zag e a Toroidal 2 mm, e é possível observar que o desvio padrão foi menor na estratégia de toroidal ap 1mm.

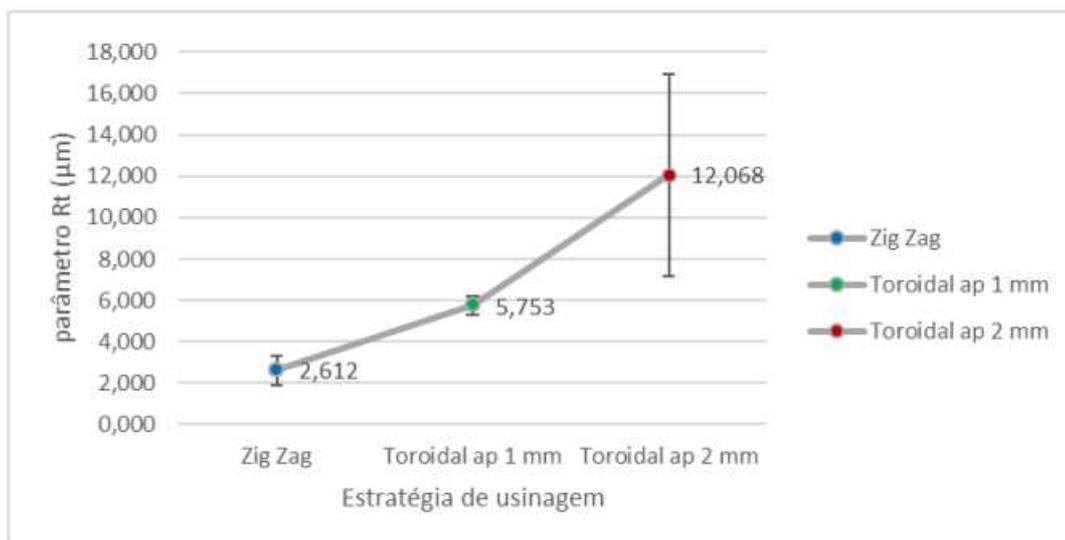
**Figura 28 – Resultado da profundidade máxima do vale do perfil nas trajetórias**



**Fonte: Autoria própria**

Os valores médios das alturas máxima do perfil, mostrados na Figura 29, tiveram diferenças significantes entre as três estratégias, a estratégia que teve os menores valores foi a Zig-Zag, já a estratégia Toroidal 1 mm teve um aumento de 3,141  $\mu\text{m}$  e a Toroidal 2 mm um aumento de 9,456  $\mu\text{m}$ . Como a estratégia toroidal é uma estratégia de desbaste (ESPANHOL, 2016), dessa forma a estratégia não busca um bom acabamento, e possivelmente essa foi a causa de termos encontrado valores maiores de rugosidade para esse tipo de estratégia.

**Figura 29 – Resultado da altura total do perfil nas trajetórias**



**Fonte: Autoria própria**

Analisando os parâmetros de rugosidade pode se observar que a estratégia que possui os melhores parâmetros é a do tipo ZIG-ZAG, já a trajetória que teve os resultados maiores de rugosidade foi a estratégia Toroidal com profundidade de corte de 2 mm. Se analisarmos a rugosidade média Ra é possível verificar que a trajetória ZIG-ZAG teve um resultado próximo a três vezes menor em relação a estratégia Toroidal com ap de 2 mm. Outro parâmetro importante encontrado foi em relação à altura máxima do perfil Rz, em que na trajetória Toroidal, a média dos valores ficou 9,456 µm acima da estratégia de melhor resultado.

Durante a trajetória Zig-Zag a peça se desloca somente no eixo X, ao passo que na trajetória Toroidal, a mesa trabalha com os dois eixos (X e Y) para que os movimentos circulares sejam possíveis. Dessa forma, na abertura do canal com a estratégia Toroidal a superfície gerada está sujeita a quantidades maiores de impactos, e isso era nítido pelo ruído que gerava nessa trajetória. Nessa trajetória, possivelmente a peça está sujeita a mais vibrações do que na Zig-Zag, tornando a superfície com valores maiores de rugosidade. De qualquer forma, pelo menos os valores de rugosidade média, estão compreendidos no intervalo esperado para o processo de fresamento, que é entre 1 a 6 µm (GROOVER, 2014).

### **4.3 Análise de desgaste da ferramenta**

Para cada ensaio o desgaste foi medido nas duas arestas utilizadas durante a usinagem. Como indicado na Tabela 5, em algumas arestas não foi observado desgaste significativo (marcado com \*\*), ou que fosse possível de ser diferenciado no microscópio utilizado. Porém, nesses casos a aresta apresentou uma pequena deformação. Percebe-se que a trajetória Zig-Zag apresentou o maior desgaste médio com desvio padrão também maior. A trajetória Toroidal com ap 1 mm apresentou o menor desvio, mas a Toroidal com ap 2 mm menor desgaste.

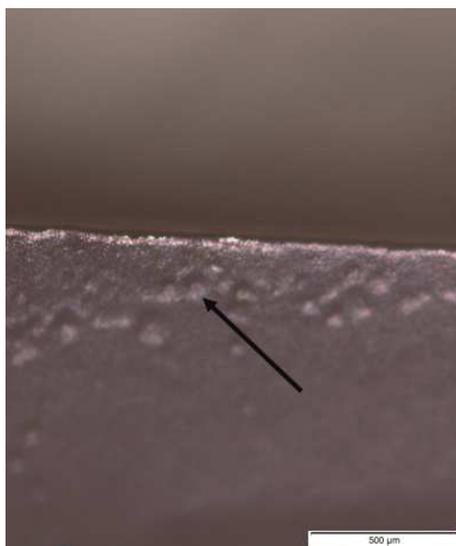
**Tabela 6 – Análise de desgaste.**

Experimentos		Valores de desgastes nas estratégias ( $\mu\text{m}$ )		
		Zig-Zag	Toroidal ap 1mm	Toroidal ap 2 mm
1º teste	1ª aresta	39,52	55,3	25,03
	2ª aresta	**	52,7	64
2º teste	1ª aresta	**	51,38	**
	2ª aresta	104,45	40,84	**
3º teste	1ª aresta	88,27	48,75	**
	2ª aresta	94,86	35,57	21,08
Média		81,77	47,42	36,70
Desvio padrão		28,94	7,63	23,72

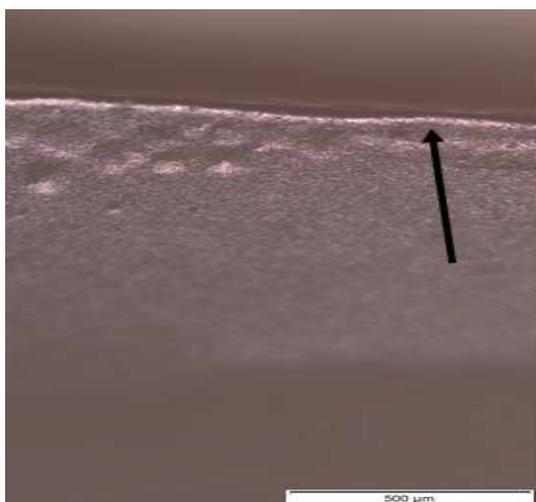
**Fonte: Autoria própria**

A Figura 30 representa a aparência de desgaste da maioria das arestas. Provavelmente houve retirada de parte do revestimento da ferramenta, que ocorreu sempre próximo da aresta de corte.

É possível observar que nas trajetórias ZIG-ZAG e Toroidal com ap de 2 mm algumas ferramentas não apresentaram desgaste da ferramenta, porém nesses caso ocorreram deformações, como indicado na Figura 31.

**Figura 30 - Retirada de material da ferramenta**

Fonte: Autoria própria

**Figura 31 - Deformações ocasionadas na ferramenta**

Fonte: Autoria própria

Mesmo a trajetória ZIG-ZAG não ocasionando desgaste em duas arestas de corte, foi a estratégia que apresentou o maior valor médio (81,77  $\mu\text{m}$ ). Já a estratégia Toroidal com ap de 2 mm apresentou o menor valor de desgaste (36,70  $\mu\text{m}$ ), porém foi a trajetória com o maior número de deformações. Já a trajetória Toroidal com ap de 1mm apresentou um desgaste médio de 47,42  $\mu\text{m}$  e sem deformações aparentes, sendo um valor próximo da estratégia ZIG-ZAG. Segundo REINKI (2017), isso possivelmente aconteceu pelo tempo de usinagem, e pelo percurso, em que na estratégia Zig-Zag foram maiores.

Como a penetração de trabalho é o segundo parâmetro de corte que mais interfere na vida da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013), o menor desgaste nas trajetórias Toroidais possivelmente estão relacionadas a esse parâmetro ( $a_e$ ). Isso porque, quando a fresa trabalha com  $a_e$  diferente do diâmetro da ferramenta o ângulo de contato é menor, o que gera menor temperatura e menor tempo de contato aresta e peça. Dessa maneira, o desgaste tende a ser menor. Já as arestas deformadas, que apareceram na Zig-Zag e Toroidal com maior valor de  $a_p$  (2 mm), podem estarem relacionadas a deformação plástica devido à maior temperatura (Zig-Zag possui maior ângulo de contato) e esforço (maior valor de  $a_p$  na Toroidal).

#### 4.4 Análise de corrosão

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos no ensaio de corrosão, para as três superfícies (lixada, nomeada como “sem usinagem” e usinadas de acordo com as trajetórias).

**Tabela 7 - Resultado dos ensaios de corrosão**

	<b>Ecorr (V)</b>	<b>Icorr (A)</b>	<b>Taxa de corrosão (mm/ano)</b>
<b>Sem usinagem</b>	-0,90927	0,00036625	5,4194
<b>Zig-Zag</b>	-0,90544	0,00017056	2,5237
<b>Toroidal ap 1 mm</b>	-0,90686	0,00042599	6,3033
<b>Toroidal ap 2 mm</b>	-0,90582	0,00028713	4,2486

**Fonte: Autoria própria**

Pela tabela percebe-se que, o processo de usinagem utilizando a trajetória ZIG-ZAG ocasionou uma redução na taxa de corrosão de 2,8957 mm/ano em relação ao metal base. Essa diminuição representa uma redução de 114,7% da taxa de corrosão anual, sendo assim um aumento considerável na vida útil da superfície. Na sequência a trajetória Toroidal com  $a_p$  de 2 mm também proporcionou uma superfície mais resistente à corrosão, se comparada com a superfície sem usinagem.

Por outro lado, a trajetória Toroidal com  $a_p$  de 1 mm ocasionou um aumento na taxa de corrosão, em que resultou um aumento de 0,8839 mm/ano, representando um aumento de 16%.

No fresamento, por se tratar de um processo com corte interrompido, a aresta de corte e a peça estão sujeitas a variações de carga (entrada e saída da aresta de corte na peça) e de temperatura (tempo ativo aquece e no tempo inativo resfria) (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013; MACHADO et al., 2009). Devido a isso, surge na superfície da peça tensão residual (de tração ou de compressão), que é composta por tensão mecânica, tensão térmica e tensão de transformação.

SOUZA e CÂMARA (2020), trabalhando com fresamento de aço ABNT 4340, perceberam que a tensão residual ao longo da profundidade a partir da superfície da amostra tende a ser compressiva. Normalmente, a tensão residual compressiva pode prolongar a vida de fadiga do material e melhorar o desempenho, enquanto a tensão residual de tração reduz a resistência do material e resistência à corrosão (ZHU et al., 2017). Possivelmente, a tensão residual da peça ao ser usinada pela trajetória Zig-Zag resultou em uma tensão de tração maior que nas demais superfícies, o que resultou numa menor taxa de corrosão.

## 5 CONCLUSÃO

Baseados nas aplicações do material, inicialmente se formulou a hipótese de que o fresamento do material seria muito difícil, ocasionando quebra nas ferramentas. No entanto, como mostrou os resultados, não foram observadas avarias, mas em alguns casos deformações, o que sugere ser necessário utilização de parâmetros de cortes conservadores (parâmetros de corte mais próximos ao mínimo recomendado).

Quanto à estratégia, a Zig-Zag apresentou os melhores resultados referente a rugosidade e taxa de corrosão, porém foi a estratégia que apresentou o maior desgaste médio da ferramenta. Também foi possível verificar que, com o fresamento em Zig-Zag e Toroidal com ap de 2 mm, a taxa de corrosão foi menor se comparado com o material sem usinagem. A estratégia Toroidal com ap de 2 mm não apresentou um bom resultado referente a rugosidade do material, obteve resultados significativamente maiores que as outras estratégias, porém em relação a taxa de corrosão foi superior a estratégia Toroidal 1mm, e apresentou o menor valor médio de desgaste da ferramenta.

Destaca-se então que para um melhor fresamento do aço Hardox®500, nas condições propostas neste trabalho, visando uma boa rugosidade e uma baixa taxa de corrosão, a trajetória Zig-Zag seria a indicada, mesmo apresentando o maior valor de desgaste médio.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.A.M. **Monitoramento das forças e desgaste da ferramenta durante o fresamento concordante e discordante do aço ABNT-4140**. 2019. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- BARRIOS, A.N.S. **Modelagem térmica para avaliação da temperatura no fresamento de aços para moldes e matrizes**. 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira, 2013
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. John Wiley e Sons., Inc, 2002.
- Carvalho, S.R.; Silva, S.M.M.L.; Machado, A.R.; Guimarães, G. "Temperature Determination at the Chip-Tool Interface Using an Inverse Thermal Model Considering the Tool and the Tool Holder", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 179, 2006, pp 97 – 104.
- CHAGAS, G. M. P.; BORGES, R. G.; CARLINI, G. C.. Influência da variação da trajetória no desgaste de flanco durante o fresamento do aço AISI P20 com fresa inteiriça de metal duro. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. DOI:10.26678/ABCM. COF2017-0706. 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2005. 600p.
- DINIZ, A.E; MARCONDES. F.C; COPPINI, N.L. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**, Edição: 8ª. São Paulo: Artliber, 2013.
- ESPANHOL, V., "**Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra cavaco**". 2008, Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil
- FERRARESI, D., **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, [s.l.]: Editora Blucher, 2018.
- FERRO EXTRA. **Certificado de inspeção**. WhatsApp: [Vendas 03]. 10 de agosto de 2021. 13:36. 1 mensagem de WhatsApp
- FUAT, K. Optimization of Cutting Parameters in Finishing Milling of Hardox 400 Steel. **International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEFEA)**, Issue. 3, Vol. 5, Oct 2018.

GROOVER, M. P. “**Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, processes, and systems**”. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons 2002.

GROOVER, M.; P. “**Fundamentos da manufatura moderna**”. 5ª Edição, LTC, 2014.

HIPPERT JR., E., **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J- $\Delta a$  para previsão de colapso em dutos**. 2004. 167 f., Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.; T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2015.

Machado, A.R.; e Da Silva, M.B. ; Coelho, R. T; Abrão, A. M.- “**Teoria da Usinagem dos Materiais**” 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MAJERIK. J . Experimental investigation into tool wear of cemented carbide cutting inserts when machining wear resistant steel Hardox 500. **Engineering Review**. Vol. 36, n. 2, p. 167-174, 2016.

NOURI, M.; FUSSEL; B.K.; ZINITI; L.B.; LINDER,E. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 89, p. 1-13. 2015

REINKI G. **Trajatória da ferramenta no acabamento superficial e no tempo de usinagem para o fresamento do aço VP100 | MM**. 26, set. 2017 Disponível em: <[https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2017/07/04/trajetoria\\_da\\_ferramenta.html](https://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2017/07/04/trajetoria_da_ferramenta.html)>. Acesso em: 1 jul. 2020.

SILVA, R. H. L Da. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

SOUZA, A.; CÂMARA, M.A. Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento do aço ABNT 4340 sob variação da velocidade de corte, ângulo de posição e tratamento térmico. **Matéria** (Rio J.) 25 (2). 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1032>

SSAB. **Equipamento agrícola fica mais leve e mais produtivo com uso de aço de alta resistência**. 9, mar. 2020 Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/noticias/2020/03/equipamento-agricola-fica-mais-leve-e-mais-produtivo>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

SSAB. **Equipamento agrícola fica mais leve e mais produtivo com uso de aço de alta resistência.** 09, set. 2019 Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/noticias/2020/03/equipamento-agricola-fica-mais-leve-e-mais-produtivo>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

SSAB. **Hardox 450 sheet.** 19, abr 2017. Disponível em:<<https://www.ssav.com.br/products/brands/hardox-450>>. Acesso em: 17 mai. 2020.

SSAB. **Hardox 550 sheet.** 4, ago.2015. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-550>>. Acesso em: 14 maio. 2020.

SSAB. **Hardox 600 sheet.** 4, ago.2015. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-600>>. Acesso em: 14 maio. 2020.

SSAB. **Redução de peso de até 10% para os novos caminhões de lixo da Fanalca usando os aços Hardox® e Strenx®.** 28, fev. 2019 Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/noticias/2019/08/fanalca-new-garbage-trucks>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

Suarez, M.P., “**Precisão Dimensional em Canais Usinados na Liga de Alumínio 7075 – T7**”, V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 14 a 17 de Abril de 2009, Belo Horizonte, MG.

ZHU, J.; YAN, P.; JIAO, L. PENG, Z.; WANG, P. WANG, X.; RONG, Y. Effect of cutting fluids on corrosion properties and turning surface quality of Fe-based superalloy. **Advances in Mechanical Engineering**. Vol. 9(11), p. 1–9. 2017.