

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**GIOVANNI FAORO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI H13 APÓS  
PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO**

**CAXIAS DO SUL  
2019**

**GIOVANNI FAORO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI H13 APÓS  
PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290) apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Professor Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**GIOVANNI FAORO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI H13 APÓS  
PROCESSO DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso (MEC0290)  
apresentado à Universidade de Caxias do Sul  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
Engenheiro Mecânico. Área de concentração:  
Processos de fabricação.

**Aprovado em 10/07/2019**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Sandro Tomaz Martins  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais Sidnei Faoro e Marilise Barazzetti Faoro, a minha namorada Gabrielle Pedroni e a minha avó Maria Helena Barazzetti, por toda a compreensão, incentivo e apoio durante toda esta jornada de estudo, não somente na realização deste trabalho, mas durante todo o curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me proteger e iluminar meus passos durante toda minha vida, e nessa caminhada.

Ao professor Rodrigo Panosso Zeilmann, pela orientação e acompanhamento indispensável para a correta realização deste trabalho.

Aos meus pais Sidnei Faoro e Marilise Barazzetti Faoro e a minha avó Maria Helena Barazzetti, pelo amor incondicional, educação e apoio, onde muitas e muitas vezes abdicaram de si, e do bem próprio por mim.

A minha namorada Gabrielle Pedroni por todo amor, apoio e incentivo dedicados a mim desde o início do curso e sempre.

À Universidade de Caxias do Sul por disponibilizar o Laboratório de Tecnologia e Pesquisa para a realização dos ensaios.

A todos os colegas e funcionários da UCS que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”*

**Isaac Newton**

## RESUMO

Com a finalidade de estudar o processo de Eletroerosão por penetração, e aplicar os conhecimentos obtidos na construção de moldes de injeção de polímeros que obtenham um melhor desempenho, qualidade, resistência e vida útil, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a qualidade superficial obtida no aço AISI H13, geralmente aplicado em cavidades de moldes. A avaliação foi realizada aplicando o processo de erosão no aço em duas condições, sendo elas, normalizado e temperado, e para isto utilizado Cobre Eletrolítico como material do eletrodo ferramenta. Foram avaliadas a rugosidade, a textura e as camadas subsuperficiais afetadas nos corpos de prova. Obtiveram-se então valores e imagens, que possibilitaram a comparação entre os distintos resultados apresentados, onde comprovou-se que a rugosidade e textura são semelhantes para ambos os corpos de prova, devido aos parâmetros utilizados. Também a diferença entre as camadas afetadas resultantes, havendo a aparição de uma maior espessura da camada branca e um maior número de trincas no material normalizado, quando em comparação ao temperado.

**Palavras chaves:** Eletroerosão, Qualidade superficial, AISI H13, Temperado, Normalizado.

## ABSTRACT

For the purpose of studying the EDM process by penetration, and apply the knowledge obtained in the construction of injection molds of polymers that obtain a better performance, quality, strength and useful life, the present study aims to evaluate the surface quality obtained in AISI H13 steel, generally applied in mold cavities. The evaluation was performed by applying the erosion process in the normalized steel and quenched steel, and for this purpose Electrolytic Copper was used as the electrode material. The roughness, texture and subsurface layers affected in the test pieces were evaluated. Values and images were then obtained, which enabled the comparison between the different results presented, where it was proven that the roughness and texture are similar for both test pieces, due to the parameters used. Also the difference between the resulting affected layers, with the appearance of a greater thickness of the white layer and a greater number of cracks in the normalized material, when compared to the quenched one.

**Key words:** EDM process, Surface quality, AISI H13, Quenched steel, Normalized steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da evolução de pesquisa e mercado no processo de EDM.....	19
Figura 2 – Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração .....	20
Figura 3 – Representação das principais fases do processo de EDM.....	21
Figura 4 – Fenômeno de descarga no processo de eletroerosão. ....	23
Figura 5 – Representação das camadas afetadas após processo de eletroerosão.....	25
Figura 6 – Exemplo de textura obtida pelo processo de EDM.....	26
Figura 7 – Representação das camadas da zona afetada termicamente. ....	26
Figura 8 – Metalografia da camada branca em condições de erosão. ....	28
Figura 9 – Definição de rugosidade (Ra).....	30
Figura 10 – Definição de rugosidade máxima (R <sub>máx</sub> ).....	31
Figura 11 – Representação de rugosidade (R <sub>z</sub> ).....	31
Figura 12 – Equipamento de microscopia ótica.....	32
Figura 13 – Desenho esquemático dos componentes de um MEV .....	33
Figura 14 – Sequência de procedimentos.....	35
Figura 15 – Formato dos corpos de prova e eletrodo.....	36
Figura 16 – Máquina de eletroerosão por penetração ROBOFORM 23 .....	38
Figura 17 – Estereoscópio trinocular.....	38
Figura 18 – Sistema de aferição de rugosidade .....	39
Figura 19 – Microscópio ótico NIKON EPIPHOT 200.....	39
Figura 20 – Posição do bico de lavagem .....	40
Figura 21 – Resultado da eletroerosão nos corpos de prova .....	41
Figura 22 – Medição de rugosidade.....	42
Figura 23 – Corpo de prova embutido em resina acrílica .....	42
Figura 24 – Corpos de prova desembutidos e atacados .....	43
Figura 25 – Representação gráfica da rugosidade “Ra” obtida .....	45
Figura 26 – Representação gráfica da rugosidade “R <sub>máx</sub> ” obtida.....	46
Figura 27 – Representação gráfica da rugosidade “R <sub>z</sub> ” obtida .....	46
Figura 28 – Textura obtida nas cavidades normalizadas .....	47
Figura 29 – Textura obtida nas cavidades temperadas.....	48
Figura 30 – Microestruturas dos corpos de prova. ....	49
Figura 31 – Camada afetada após usinagem por EDM.....	50
Figura 32 – Defeitos gerados pelo processo de eletroerosão. ....	52
Figura 33 – Representação gráfica dos resultados de dureza. ....	54

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Composição química do AISI H13.....	37
Tabela 2 – Propriedades físicas do Cobre eletrolítico .....	37
Tabela 3 – Parâmetros do processo de eletroerosão por penetração .....	41
Tabela 4 – Valores médios de rugosidade .....	44

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Rugosidade média $R_a$ .....	31
Equação 2 – Rugosidade $R_z$ .....	32

## SIGLAS, TERMOS E ABREVIACOES

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas)
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
MO	Microscopia tica
Nm	Nanmetro
$\mu\text{m}$	Micrometro
$\mu\text{s}$	Microssegundos
UCS	Universidade de Caxias do Sul
GUS	Grupo de Usinagem
ZAT	Zona Afetada Termicamente

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ra	Rugosidade Média Aritmética ( $\mu\text{m}$ )
Rmáx	Rugosidade Máxima ( $\mu\text{m}$ )
Rz	Rugosidade Média Quadrática ( $\mu\text{m}$ )
TON	Tempo de Descarga ( $\mu\text{s}$ )
TOFF	Tempo de Pausa ( $\mu\text{s}$ )
Ue	Tensão de Trabalho (V)
Ie	Corrente de Trabalho (A)
Yi	Valor absoluto dos desvios da linha média do perfil de rugosidade ( $\mu\text{m}$ )
pi	Valores dos picos mais altos do intervalo de medição ( $\mu\text{m}$ )
vi	Valores dos vales mais profundos do intervalo de medição ( $\mu\text{m}$ )
n	Número de intervalos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO.....	16
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
1.3.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE QUALIDADE SUPERFICIAL EM EDM</b> ..	<b>18</b>
2.1	PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO .....	18
2.1.1	<b>Histórico do Processo</b> .....	<b>18</b>
2.1.2	<b>Fenômenos Físicos do Processo de Eletroerosão</b> .....	<b>20</b>
2.2	QUALIDADE SUPERFICIAL EM PROCESSOS DE EDM.....	24
2.2.1	<b>Rugosidade e Textura</b> .....	<b>25</b>
2.2.2	<b>Zona Afetada Termicamente (ZAT)</b> .....	<b>26</b>
2.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DO MATERIAL USINADO POR EDM .....	30
2.3.1	<b>Rugosidade</b> .....	<b>30</b>
2.3.2	<b>Camada Afetada e Textura</b> .....	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	MATERIAIS.....	36
3.2	EQUIPAMENTOS .....	37
3.3	MÉTODOS E ESTRATÉGIAS.....	40
3.3.1	<b>Estratégia de Usinagem por Eletroerosão</b> .....	<b>40</b>
3.3.2	<b>Estratégia de Análise dos Resultados</b> .....	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>44</b>
4.1	RUGOSIDADE DA PEÇA .....	44
4.2	TEXTURA .....	47
4.3	MICROGRAFIA.....	49
4.4	DEFEITOS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS .....	52
4.5	DUREZA .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>58</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO AISI H13 .....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE B – CERTIFICADO DE DUREZA APÓS PROCESSO DE TÊMPERA .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE C – RELATÓRIO DE RUGOSIDADE CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE D – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DAS MICROESTRUTURAS DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE E – RELATÓRIO DE DUREZA DA CAMADA BRANCA .....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Produtos fabricados em polímeros estão cada vez mais inseridos no nosso dia a dia. A crescente demanda por novos conceitos e inovações tecnológicas faz com que este nicho de mercado continue a crescer, sendo cada vez mais necessárias ferramentas complexas para a produção destes novos produtos.

A grande maioria das peças plásticas disponíveis no mercado provém de ferramentas intituladas moldes e matrizes. Por meio destas é possível obter-se uma grande gama de produtos, partindo de artigos de utilidade doméstica, brinquedos e acessórios, até complexas peças de veículos, aviação e indústria aeroespacial (AMORIM, 2002).

Um maior nível de exigência no formato e dimensões do produto culmina na maior complexidade da ferramenta que o produzirá. Na maioria das ocasiões isto implica na necessidade de um maior número de processos, e por vezes novas tecnologias, resultando no valor final elevado do molde ou matriz (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

O processo com a maior taxa de utilização na fabricação de ferramentas é a usinagem, sendo de grande importância para obtenção desde partes menos precisas, até partes principais, como cavidades, insertos, alojamentos, entre outros (AMORIM, 2002).

Segundo König e Klocke (1997), a categoria de processos de usinagem é dividida em três grupos: Processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida e processos de usinagem não convencionais.

Dentre os processos usinagem não convencionais, o de eletroerosão por penetração, é o mais popular e utilizado deste grupo (SANTOS, 2010). A capacidade de realizar formatos complexos de superfícies e usinar materiais de alta dureza se torna um diferencial, sendo uma excelente opção para produção de moldes (LEE e TAI, 2003).

Peças usinadas pelo processo de eletroerosão apresentam uma superfície termicamente afetada. Esta é denominada camada branca, e tem grande influência sobre a integridade, propriedades mecânicas e tempo de vida destas peças fabricadas. (LEE, HSU e TAI, 2004). Segundo Santos (2010), micro trincas e modificações metalúrgicas são gerados nesta camada, e conforme a posterior aplicação da peça não é possível a retirada da parte afetada, mesmo que realizado polimento e processos de pouca remoção de material da superfície.

Tratando-se de peças destinadas a moldes de injeção de polímeros em que é utilizado eletroerosão nas cavidades, há ocasiões em que não são realizados retrabalhos para remover a camada branca. O acabamento já é obtido no próprio processo, sendo ele texturizado e tendo diferentes rugosidades superficiais conforme a aplicação. Nestes casos, as exigências mecânicas provenientes do processo de injeção e a fragilidade da superfície

acarretam na diminuição da vida útil das peças. Por vezes, isto resulta na necessidade de produzir cavidades novamente, ocasionando ao proprietário do molde custos extras, possivelmente não planejados.

O presente trabalho busca avaliar a qualidade superficial gerada após o processo de eletroerosão por penetração no aço AISI H13, em estado normalizado e temperado. O mesmo é geralmente aplicado em cavidades de moldes. O estudo terá foco no entendimento dos resultados gerados na peça, quantificando camada branca, textura e rugosidade da superfície gerada.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o aperfeiçoamento e melhor entendimento dos resultados gerados pelo processo de eletroerosão por penetração, tornou-se indispensável estabelecer uma ligação entre o processo e a qualidade superficial gerada na peça. O estudo também se torna de suma importância para a avaliação da qualidade do produto (molde), pois é possível verificar a influência que o tratamento térmico tem no resultado final da usinagem, como espessura da camada afetada, rugosidade e textura. Em posse destes resultados, é possível estabelecer por exemplo cronogramas e métodos de fabricação, que entre outros aspectos, podem decidir se a peça será submetida ao processo de EDM antes ou depois do material ser temperado (se este for o caso da aplicação).

Para tal, foi necessário ser elencado os parâmetros de maior utilização para acabamento de cavidades texturizadas, aplicadas em moldes de injeção de polímeros e manufaturados pela empresa Usimagi Indústria Metalúrgica LTDA. Também foi elencado o material AISI H13, de maior utilização para estes fins, e as condições (normalizado e temperado) mais utilizadas.

Apresentados os argumentos anteriores, esta avaliação se torna imprescindível para que possam ser apresentados melhores resultados no processo.

## 1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

Este referido estudo está sendo desenvolvido em conjunto com a empresa Usimagi Indústria Metalúrgica LTDA., fundada em 22 de dezembro de 2005 por Sidnei Faoro, Marilise Barazzetti Faoro e Giovanni Faoro, localizada na cidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

A empresa tem como atividade principal a fabricação de moldes para injeção de polímeros. Também produz moldes para injeção de Alumínio, Zamak, matriz de corte e estampo, e presta serviço de usinagem para terceiros. Possui em sua área de produção oito

máquinas, sendo elas: Três centros de usinagem, eletroerosão por penetração, eletroerosão a fio, retífica, furadeira de bancada e rosqueadeira.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo do presente trabalho é avaliar a qualidade superficial do aço AISI H13 após processo de eletroerosão por penetração.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Utilizar eletrodos de cobre eletrolítico para a erosão do aço H13 normalizado e temperado;
- b) Medir as rugosidades “Ra”, “R<sub>máx</sub>” e “Rz” da superfície da peça após processo de EDM no aço H13 normalizado e temperado;
- c) Avaliar e medir a camada afetada após processo de *Electrical Discharge Machining* (EDM) no aço H13 normalizado e temperado;
- d) Analisar os defeitos e textura gerados pelo processo de EDM;
- e) Comparar os resultados obtidos na eletroerosão do aço H13 normalizado e temperado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE QUALIDADE SUPERFICIAL EM EDM

Esta sessão destina-se à explicação do processo de eletroerosão por penetração como um todo. Primeiramente será abordado o contexto histórico do processo de EDM, apresentando as generalidades e curiosidades sobre o processo e uma breve descrição da evolução da máquina de eletroerosão por penetração. Posteriormente serão abordados os fenômenos físicos, contendo a descrição e fases do processo, bem como qualidade superficial, modificações geradas e os métodos de avaliação das mesmas.

### 2.1 PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO

#### 2.1.1 Histórico do Processo

O primeiro relato sobre o fenômeno de descargas elétricas no espaço entre dois materiais foi de Boyle em 1694. Já em 1751 e 1766, Benjamin Franklin e Josef Priestley observaram a remoção de material e analisaram o efeito erosivo em metais que sofreram descargas elétricas (Schumacher e Dauw, 1989).

Os equipamentos que faziam a utilização de descarga elétrica somente foram construídos na década de 1930, período entre a primeira e segunda guerra mundial, em busca de obter-se conhecimento sobre o efeito gerado entre o eletrodo e a peça a ser erodida. O processo ainda pouco conhecido e desenvolvido tinha como finalidade a remoção de brocas e ferramentas que acabavam quebrando na execução de rosqueamento, furação e entre outros processos de usinagem convencional. Estes primeiros equipamentos eram chamados de “Desintegradores por arco” e sua operação era difícil, pois o controle da distância de trabalho entre o eletrodo peça e o eletrodo ferramenta eram feitos manualmente, gerando arcos e curtos-circuitos os quais desgastavam ambos os eletrodos igualmente (CAMPOS, 2014; KÖNIG e KLOCKE, 1997; HO e NEWMAN, 2003).

Após estudo deste processo, em 1944, os cientistas russos Boris R. Lazarenko e Natalie I. Lazarenko da universidade de Moscou na Rússia, perceberam o potencial da descarga elétrica para a aplicação na usinagem de materiais. Desenvolveram então um trabalho de investigação, com o objetivo de eliminar o desgaste de contatos elétricos. Para tal, ampliaram pesquisas com o intuito de aumentar a capacidade de controle sobre os parâmetros que interferem no processo, e canalizar o efeito destrutivo da descarga elétrica (AMORIM, 2002; KUMAR et al., 2009).

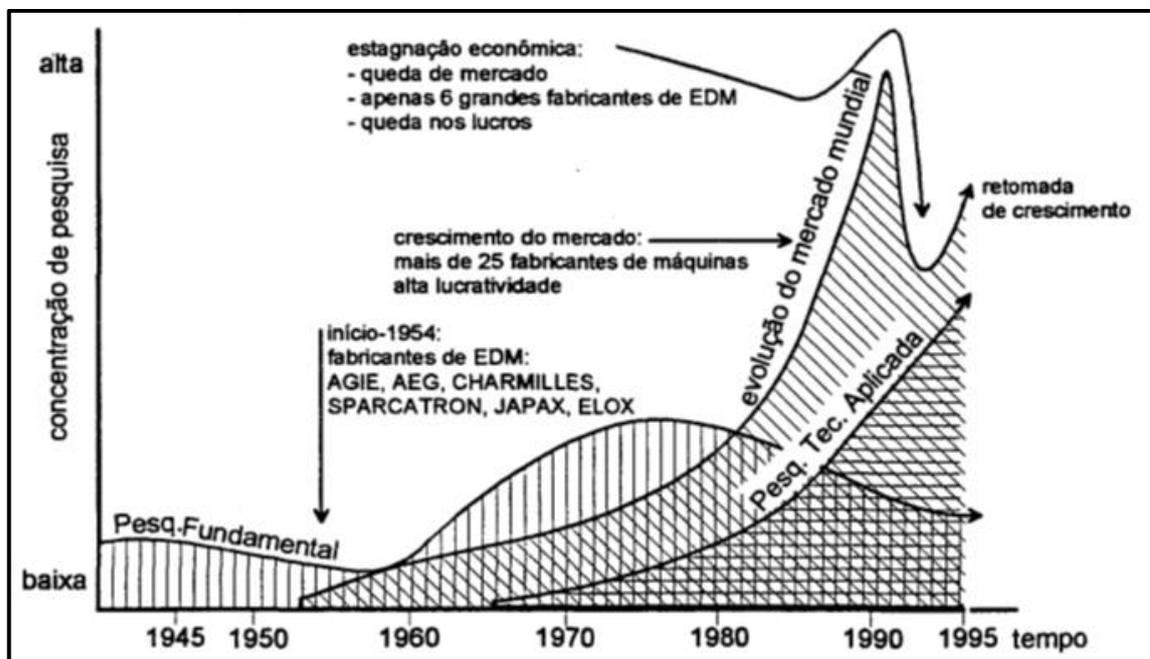
Próximo ao ano de 1950, já com certo grau de aperfeiçoamento no processo de EDM, surgiu a primeira aplicação de uma máquina ferramenta confiável da categoria em âmbito industrial. Esta máquina tinha como método a aplicação de sucessivas faíscas elétricas entre

dois eletrodos imersos em fluido, por meio de um gerador de descargas elétricas, batizado de “circuito Lazarenko” (circuito de relaxação RC) (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Com o passar dos anos e avanços da tecnologia, em meados de 1980 o controle numérico computadorizado (CNC) começou a ser implantado no segmento de EDM, agregando recursos ao processo, aumentando a eficiência de operação, a precisão no controle sobre os parâmetros do mesmo e resultando no crescimento do interesse da indústria por esta forma de usinagem (HO e NEWMAN, 2003).

A tecnologia mais avançada para o processo de eletroerosão permite por meio da utilização de softwares CAD/CAM, a fabricação de superfícies tridimensionais complexas partindo de eletrodos (ferramenta) de geometria simples, por exemplo. Isto só é possível, pois o próprio software define o número de eletrodos e a trajetória de trabalho que serão utilizados já no momento do projeto, resultando em ganho de tempo e qualidade na fabricação de peças (RAJURKAR E YU, 2000). Na figura abaixo é possível observar a evolução no número de pesquisas realizadas tendo como tema o processo de eletroerosão, e o crescimento do mercado mundial no período entre os anos de 1945 e 1995, período de maior estudo e influência no desenvolvimento desta tecnologia.

Figura 1 – Representação da evolução de pesquisa e mercado no processo de EDM



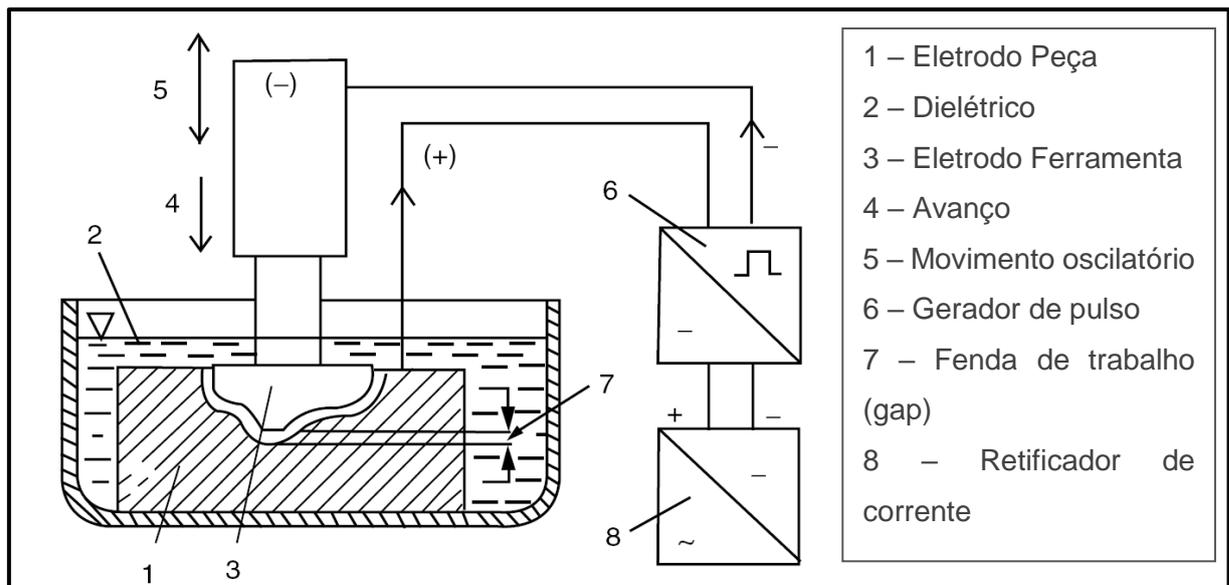
Fonte: Adaptado de Dauw et al., (1995).

O desenvolvimento da tecnologia para a melhora das taxas de remoção de material, tornou o processo competitivo e ampliou suas aplicações. Hoje o processo é muito difundido na fabricação de moldes e matrizes, também nos setores aeroespaciais, automotivo, médico e de componentes cirúrgicos, de ferramentas, óptico e joalheria (HO e NEWMAN, 2003).

### 2.1.2 Fenômenos Físicos do Processo de Eletroerosão

A eletroerosão por penetração, é um processo em que o eletrodo ferramenta reproduz sua geometria na peça a ser produzida (KÖNIG e KLOCKE, 1997; ZEILMANN, 2011). A remoção do material é realizada mediante a aplicação de descargas elétricas não estacionárias (faíscas), controladas para fundir e vaporizar pequenas parcelas do material usinado. O fenômeno acontece no espaço entre o eletrodo e a peça conhecido como “*gap*”, o qual tem valores que variam entre 5 e 100  $\mu\text{m}$  normalmente. Todo este processo ocorre em meio a fluído dielétrico, que quando sujeito a um campo elétrico que iguala sua rigidez, possibilita a descarga elétrica e conseqüentemente a usinagem da superfície. O método também é conhecido como processo termoelétrico (GUITRAU, 1997). Na figura 2 é possível observar uma representação da estrutura do processo.

Figura 2 – Esquema da usinagem de eletroerosão por penetração



Fonte: Santos (2010).

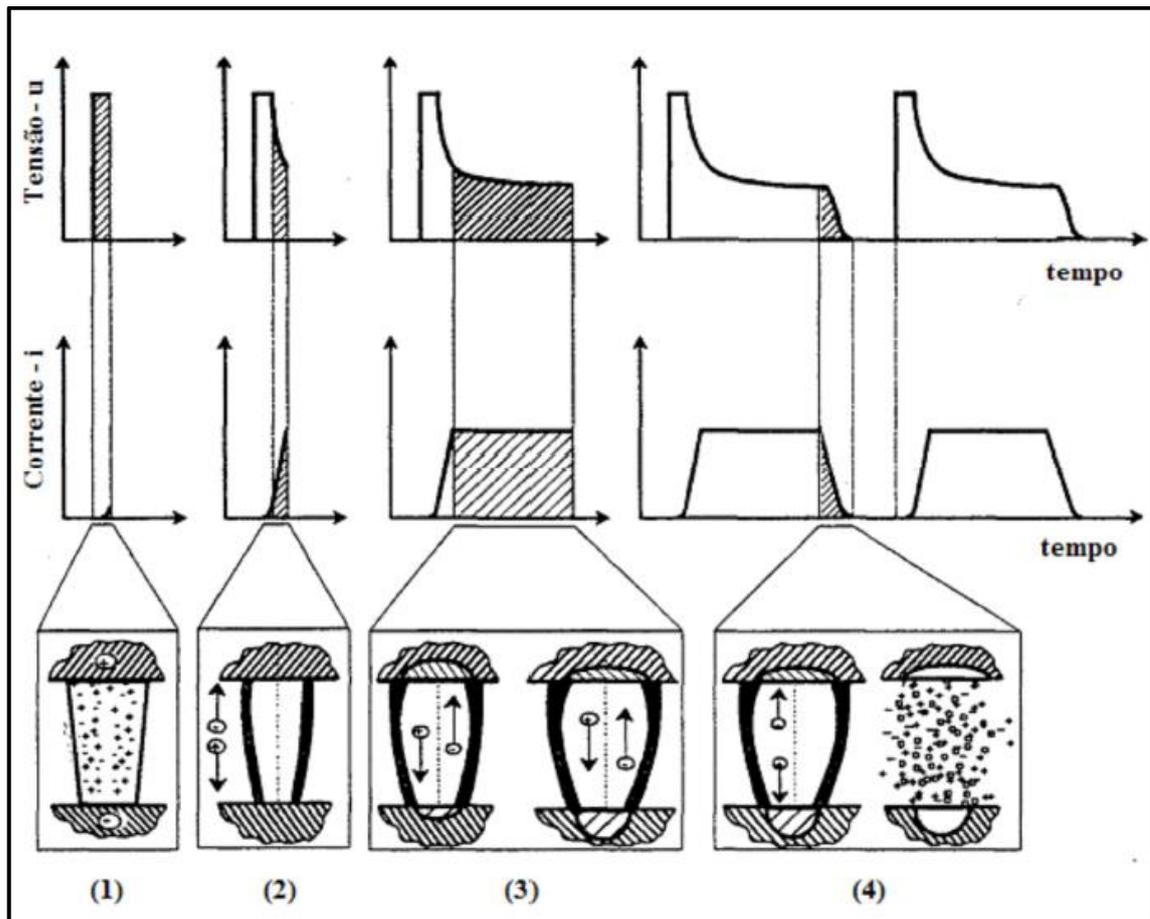
A figura demonstrada contém os principais sistemas necessários para o processo de eletroerosão. Dentre eles se destacam, o gerador de pulsos que é responsável pela geração de tensão e corrente elétrica, o sistema de controle de posicionamento do eixo Z, que exerce o movimento oscilatório do cabeçote e o fluído dielétrico. Outro sistema, que não está demonstrado na imagem, porém é de suma importância para o processo, são os servos motores. Eles são responsáveis pela movimentação dos eixos X-Y, e conseqüentemente exercem o posicionamento do eletrodo em relação a peça nas coordenadas cartesianas.

Segundo König e Klocke (1997), a seqüência do processo de usinagem pode ser explicada por intermédio das quatro fases representadas a seguir:

- a) Fase de ignição da faísca (1).
- b) Formação do canal de plasma (2).
- c) Fusão e evaporação de parcelas do material da peça e eletrodo (3).
- d) Ejeção do material fundido (4).

Na figura 3, são representados os fenômenos físicos descritos acima, que ocorrem durante a descarga elétrica no processo de eletroerosão, e posteriormente explicados.

Figura 3 – Representação das principais fases do processo de EDM



Fonte: Adaptado König e Klocke, (1997).

Na fase de ignição da faísca, quando a aproximação entre o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça atinge a distância do *gap*, ocorre o aumento do campo elétrico entre as superfícies, resultando na aceleração das cargas da ferramenta em direção à peça. Durante seu trajeto, os elétrons chocam-se com as moléculas do fluido dielétrico, liberando novos elétrons e formando partículas positivas. Estes são juntamente acelerados no campo, resultando numa reação em cadeia denominada ionização por impacto, que multiplica o transporte de energia elétrica (AMORIM, 2002; KÖNIG e KLOCKE, 1997; GUITRAU, 1997).

A segunda fase consiste na formação do canal de plasma, que deriva da velocidade das colisões, provenientes do fenômeno de ionização por impacto e do superaquecimento do dielétrico (SANTOS, 2010; GUITRAU, 1997; CAMPOS, 2014; KÖNIG e KLOCKE, 1997). Segundo Amorim (2002), a partir do superaquecimento do fluido, observa-se um aumento da corrente elétrica e a evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico, gerando “túneis” de transporte de energia elétrica, que são formados pelo canal de plasma circundado por uma bolha de vapor, e tudo por líquido dielétrico. A bolha e o fluido por sua vez tendem a restringir o crescimento do canal, fazendo com que a energia de descarga se dê em um pequeno volume. O fluxo de corrente elétrica se estabelece próximo a periferia do canal, e este conjunto de acontecimentos é denominado efeito *skin*. De acordo com alguns autores estes eventos podem ocorrer inclusive na parcela de fluido dielétrico evaporado, pelo efeito Joule (SCHUMACHER, 2004; KÖNIG e KLOCKE, 1997).

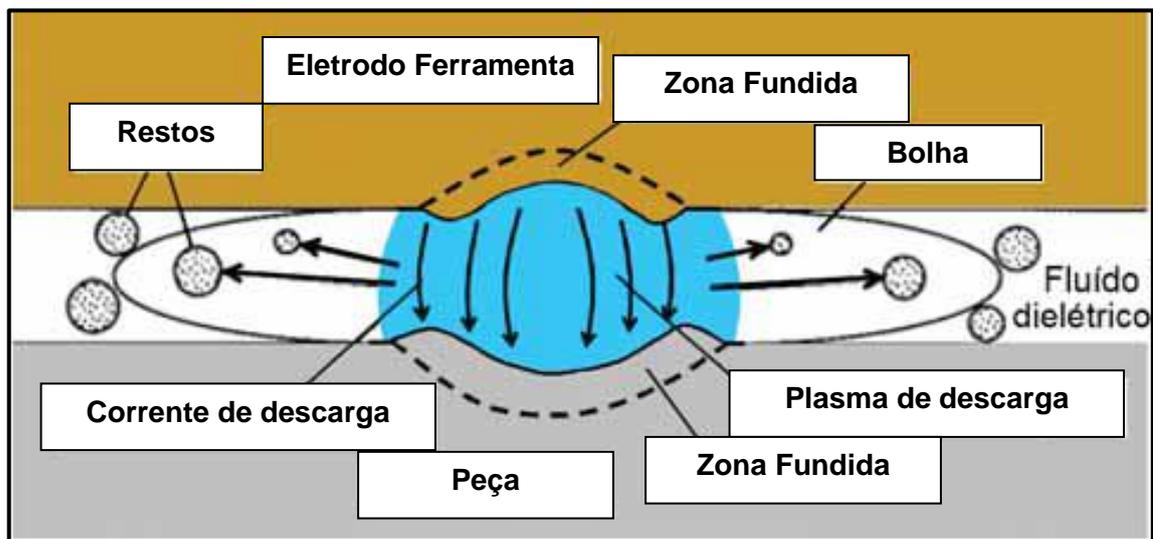
Um aspecto importante a ser ressaltado é de que o eletrodo ferramenta (ânodo) é o elemento positivo e o eletrodo peça (cátodo) é o elemento negativo. Sendo que os elétrons se deslocam sempre da menor energia para a maior, razão pela qual os elétrons passam do elemento negativo para o positivo, estando a quantidade de material fundido sujeita ao número de elétrons e de íons que atingem as superfícies dos eletrodos e resultando em maiores níveis de erosão na parte da cavidade do cátodo (RAMOS, 2016). Pelos íons positivos ter maior inércia, devido sua maior massa em relação aos elétrons, é necessário um maior tempo para que atinja determinada velocidade, resultando em um maior bombardeamento de elétrons no ânodo (eletrodo ferramenta) logo no início da descarga elétrica (CAMPOS, 2014; DIBITONTO et al, 1989).

Na etapa de fusão e evaporação de parcelas do material, um tempo de descarga é determinado pelo operador, para que ocorra a passagem da corrente elétrica entre os eletrodos, o que acontece através do canal de plasma recém-formado, e é conhecido por efeito *pinch*. Devido aos altos níveis energéticos, são ocasionados picos de alta temperatura que segundo alguns autores podem alcançar faixas entre 8.000 e 12.000°C (HO e NEWMAN, 2003; GUITRAU, 1997), e segundo outras fontes, esta faixa de temperatura pode atingir de 15.000 a 40.000°C (AMORIM, 2002; DIBITONTO et al, 1989). No transcorrer da aplicação do tempo de descarga, e devido as temperaturas geradas, ocorre a fusão de material, o aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma e um intenso bombardeamento de elétrons e íons positivos nas superfícies do cátodo e do anodo. Para que não haja a formação curtos circuitos e arcos, o sistema de controle da máquina de eletroerosão controla a amplitude da fenda de trabalho para que se mantenha equilibrada, sendo a mesma dependente diretamente do nível de energia da corrente de descarga (KÖNIG e KLOCKE, 1997; AMORIM, 2002)

Ao final do tempo de descarga a energia elétrica então é desligada e a bolha formada colapsa, lançando o material na fenda de trabalho (gap), onde é rapidamente resfriado e

removido na forma de cavacos microscópicos pelo fluido dielétrico, que quando aplicado adequadamente assume também a tarefa de transporte do material indesejado. O material fundido não é totalmente removido da superfície erodida, sendo que parte dele permanece sobre a mesma e se solidifica, formando nos aços a camada superficial chamada camada branca (HO e NEWMAN, 2003; GUITRAU, 1997; AMORIM, 2002). Na figura 4 são ilustrados os detalhes do processo na decorrência da descarga elétrica, onde observar-se o acontecimento das fases como descrito acima.

Figura 4 – Fenômeno de descarga no processo de eletroerosão.



Fonte: Adaptado de Kunieda et. al (2005).

A totalidade da descarga elétrica se dá em um tempo que normalmente está situado entre 10 e 1000  $\mu\text{s}$  (microssegundos). Cada faísca retira uma pequena quantidade de material, que varia entre  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$   $\text{mm}^3$ . Porém, este processo é muito rápido e muitas faíscas são disparadas em um curto espaço de tempo, tendo uma remoção de material considerável, mas que não pode ser comparada aos processos de usinagem convencionais. A taxa de remoção normalmente se situa entre 2 e 400  $\text{mm}^3/\text{min}$  (HO e NEWMAN, 2003).

Para finalizar a apresentação dos fundamentos físicos do processo, é importante acrescentar que outros mecanismos também desempenham importante influência na parcela de remoção do material no ciclo, sendo elas de origem termodinâmica, hidrodinâmica, elétrica, propriedades físicas dos materiais, a polaridade dos eletrodos e entre outros (AMORIM, 2002).

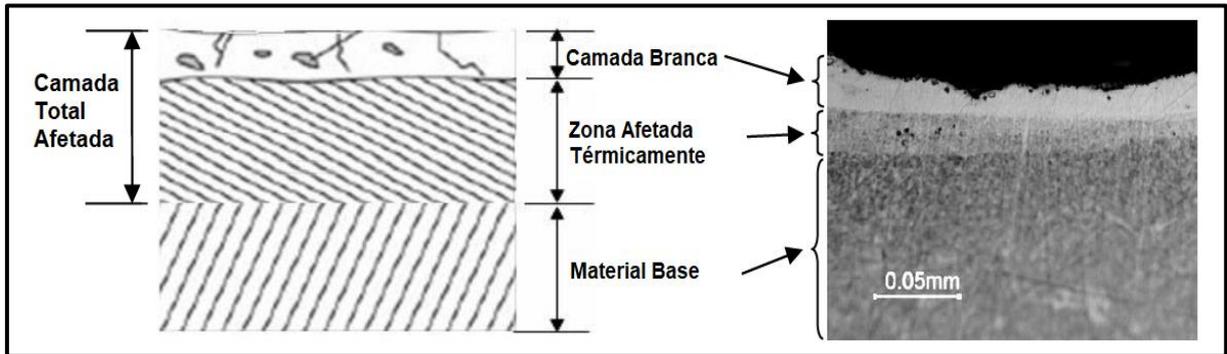
## 2.2 QUALIDADE SUPERFICIAL EM PROCESSOS DE EDM

Um dos parâmetros mais importantes na escolha do tipo de usinagem (seja ele convencional ou não) para a fabricação de superfícies técnicas, é justamente a qualidade da superfície que poderá ser obtida pelo mesmo. A qualidade além de se referir a rugosidade e textura geradas na superfície, também faz referência a subsuperfície, a qual engloba camada branca e zona afetada termicamente. Estes resultados originados têm grande influência sobre o desempenho da peça produzida, sendo quanto ao aspecto visual requerido e/ou quanto a solicitação mecânica que a mesma é posteriormente submetida, como em aplicações que necessitam de resistência a fadiga. (HIOKI, 2006; SABBO, 2017).

Superfícies obtidas por meio de eletroerosão e planos localizados abaixo da mesma, estão suscetíveis a aparição de microfissuras, devido a severidade do processo de EDM (LEE e TAI, 2003). Também são possíveis grandes variações estruturais, devido a exposição a altas temperaturas e repetitivos ciclos de aquecimento e resfriamento que a superfície está exposta (RAJURKAR et al., 2013). Analisando estes fatos e as principais aplicações da eletroerosão, torna-se importante a avaliação da integridade superficial. Em um molde, por exemplo, as condições da superfície são de suma importância, pois a rugosidade e textura das cavidades do molde serão transferidas para o produto. Igualmente importante de serem analisadas, as alterações subsuperficiais geradas como, camada branca, trincas e zona afetada termicamente, diminuem a vida útil das cavidades, tendo em vista a exposição a fadiga e carregamentos cíclicos (CRUZ, 2015; AMORIM, 2002; MARADIA et al., 2018).

Segundo Ho e Newman (2003), após a realização do processo, devido ao mesmo fazer uso da remoção térmica em altíssimas temperaturas, a camada subsuperficial do material é modificada devido às transformações metalúrgicas, e gera três fases (camadas) distintas, conhecidas como camada branca ou camada ressolidificada, zona afetada termicamente “ZAT” e material base não afetado (núcleo do material). De acordo com Amorim (2002), no caso de aplicação da eletroerosão em aços, utilizando-se dielétrico de hidrocarboneto, a dureza e fragilidade da camada branca são mais elevadas em comparação a eletroerosão utilizando água como fluido. Estas características resultam da incorporação do carbono, que interage quimicamente com o ferro, formando cementita ( $Fe_3C$ ) e também devido à rápida solidificação do material. Cada uma das camadas possui propriedades distintas, sendo de suma importância o conhecimento destas para um bom desempenho da peça. Também é importante ressaltar que diferentes condições de usinagem afetam diretamente a qualidade superficial gerada e a espessura da mesma, tornando-se necessário o correto conhecimento e aplicação dos parâmetros, conforme necessidade. A figura 5 representa as fases formadas após a realização do processo de EDM em uma peça.

Figura 5 – Representação das camadas afetadas após processo de eletroerosão.



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2013).

Abaixo serão apresentadas as alterações superficiais geradas na peça devido a aplicação do processo de eletroerosão, sendo subdivididas em dois aspectos. Primeiramente serão apresentadas as modificações superficiais, sendo elas rugosidade e textura e posteriormente as alterações subsuperficiais, que englobam camada branca e zona afetada termicamente.

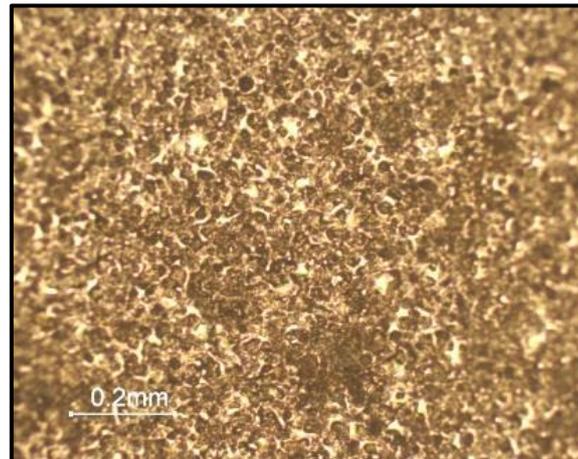
### 2.2.1 Rugosidade e Textura

Superfícies geradas por processos de fabricação não são perfeitas, existem detalhes que só podem ser observados quando estas são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. As modificações superficiais são caracterizadas pela textura e rugosidade superficial, que podem ser mensuradas utilizando-se recursos e equipamentos apropriados.

Os erros geométricos nas superfícies usinadas, podem ser classificados em desvios macro geométricos, ondulações e desvios micro geométricos. Estes desvios se estendem por toda a superfície a ser testada, e são geralmente admitidos dentro das tolerâncias de usinagem especificadas pelo projetista. A análise de rugosidade é realizada para identificar as irregularidades, como relevos ou depressões originadas pela retirada de material durante um processo de fabricação (CHIAVERINI, 1986).

Para peças usinadas por eletroerosão, a textura e rugosidade estão relacionadas à energia média da descarga elétrica. A elevação do nível de energia aplicado ocasiona por consequência um aumento das mesmas, isto porque crateras mais profundas e largas são produzidas na superfície da peça após a interrupção da descarga elétrica. As modificações consistem nas características geométricas variadas de uma superfície, a qual contém picos e vales, e que são usualmente quantificadas por meio de equipamentos que produzem perfis bidimensionais e tridimensionais (AMORIM, 2002). A figura abaixo demonstra a textura em uma superfície obtida por EDM, na qual foram utilizados parâmetros de acabamento.

Figura 6 – Exemplo de textura obtida pelo processo de EDM



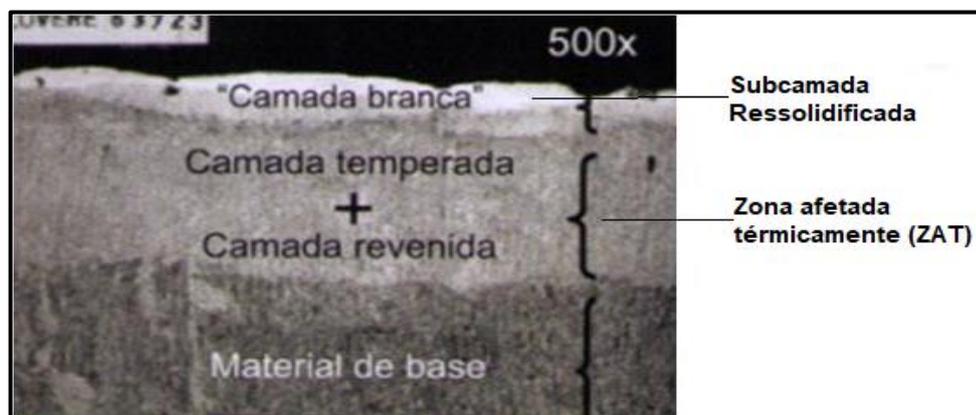
Fonte: Zeilmann (2013).

Segundo Zeilmann (2013), a partir de cada descarga uma cratera é formada na peça de trabalho, devido a remoção de material. Apenas 15% ou menos deste material removido é levado pelo fluido dielétrico, e o restante solidifica novamente, formando uma superfície ondulada. As marcas que podem ser observadas nas superfícies são formadas por gases retidos que escapam do material ali depositado, como demonstrado na figura 6.

### 2.2.2 Zona Afetada Termicamente (ZAT)

A zona afetada termicamente consiste em toda a camada da superfície que sofre alterações metalúrgicas devido a exposição a altas temperaturas, englobando camada branca e a zona abaixo dela que também é denominada “ZAT”, como demonstrado anteriormente. Nesta, ocorre a presença da camada temperada e depois da camada revenida, como pode ser observado na figura 7.

Figura 7 – Representação das camadas da zona afetada termicamente.



Fonte: Adaptado de Sabbo (2017).

Apesar de não haver contato com o dielétrico, o calor irradiado pelo plasma é suficiente para promover modificações na estrutura e composição na zona abaixo da camada branca. Isto se deve a difusão de átomos de áreas com maior concentração para aquelas de menor concentração atômica. A espessura da zona gerada depende da intensidade da corrente e da frequência das descargas utilizadas (CRUZ, 2015; AMORIM, 2002).

Devido a temperatura atingida e o arrefecimento rápido, originam-se estas camadas subsuperficiais de elevada dureza, porém frágeis, abaixo da camada branca. Quando exposto a estas condições, o material entra no domínio austenítico devido a temperatura e após resfria gerando por consequência uma microestrutura martensítica, mesma que a gerada no processo de têmpera de aço (RAMOS 2016; KÖNIG e KLOCKE, 1997; SODRÉ e MORAIS, 2017).

Na camada branca, como o citado anteriormente, após a interrupção da descarga elétrica o material fundido que não foi expelido pelo fluxo do dielétrico, fica depositado na cavidade e solidifica-se novamente. Esta região é a mais superficial da peça e recebe esse nome devido a sua resistência ao ataque químico, que por consequência quando observada e analisada microscopicamente revela uma aparência branca. Possui propriedades mecânicas inferiores em comparação ao material base, resultado da aplicação de tensões térmicas superiores à resistência a fratura do material, o que ocasiona a geração micro trincas em consequência do resfriamento rápido (ZEILMANN, 2011; EKMEKCI, 2009; HO e NEWMAN, 2003).

A camada em questão apresenta mudanças químicas resultantes da interação com fluido dielétrico e o próprio eletrodo ferramenta. Também modificações estruturais devido a rápida solidificação do material. Esta zona é considerada uma danificação da superfície, dado que o material nesta região difere consideravelmente do material inicial, tanto na sua composição química quanto nas propriedades mecânicas. A micro dureza dessa camada é bem elevada devido a exposição a alto teor de carbono proveniente do dielétrico e altas temperaturas do processo, o que provoca a criação de carbonetos complexos e estes resultam no ganho de algumas propriedades mecânicas. Em contraponto esta zona também acaba se tornando frágil (ZEILMANN, 2014; RAMOS, 2016; CRUZ, 2015; KÖNIG e KLOCKE, 1997).

A espessura da camada branca gerada é principalmente influenciada pelos valores elevados de intensidade de corrente e tempo de duração da descarga elétrica, sendo que quão maiores forem estes parâmetros, mais espessa é a camada. Isso é explicado pelo fato de que existe uma quantidade de material fundido que não é removido pelo colapso da bolha e posteriormente fluido dielétrico, permanecendo no mesmo ponto da peça. Por consequência disso o material acaba solidificando novamente sobre a superfície e ocasiona esta danificação (ZEILMANN, 2014; SABBO, 2017).

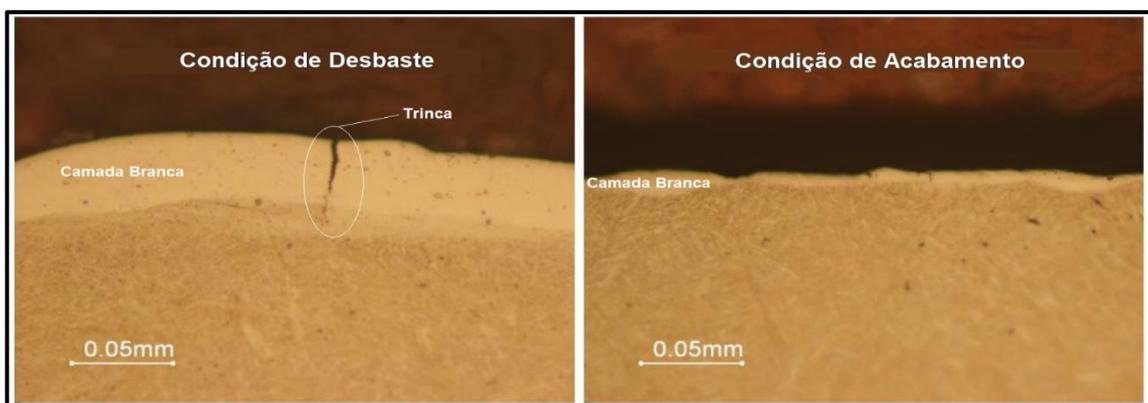
Há uma diferenciação entre espessuras de camada branca resultantes do processo de EDM conforme o regime usinagem imposto sobre a peça. Quando aplicadas condições de desbaste, observa-se uma maior espessura e formação de micro trincas, como o citado anteriormente, devido a utilização de parâmetros mais robustos. Estas trincas podem ocorrer devido ao estresse térmico e tensão de tração no componente usinado, ambos ocasionados pelas descargas elétricas. Essas fissuras normalmente são do tamanho da zona que foi afetada pelo calor e se propagam na direção vertical, no sentido do material base (LEE e TAI, 2003; ZEILMANN, 2011; AMORIM, 2002; MUTHURAMALINGAM, 2019).

Na condição de acabamento, devido a utilização de um regime de menor energia de descarga comparado ao desbaste, ocorre uma menor transferência de calor para a cavidade erodida. Isto resulta em uma menor espessura da camada branca quando confrontada com a resultante no processo de desbaste. Esta condição de baixa energia possui uma separação entre o eletrodo e a peça menor (*gap*), originando faíscas mais curtas e resultando numa melhor precisão dimensional da peça eletroerodida (AMORIM, 2002; ZEILMANN, 2011; MUTHURAMALINGAM, 2019).

É possível concluir então, que conforme os parâmetros de usinagem utilizados, pode-se diminuir consideravelmente a camada branca, porém a zona afetada termicamente nunca pode ser eliminada (HO e NEWMAN, 2003).

Na figura 8 são apresentadas imagens de metalografias realizadas em situações de desbaste e acabamento. Observa-se a diferença entre espessuras de camadas, devido ao regime de usinagem aplicado, e o aparecimento de micro trincas na condição de desbaste.

Figura 8 – Metalografia da camada branca em condições de erosão.



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2011).

Segundo Yang et al. (1996) e Sodr e e Morais (2017), a espessura da camada branca decresce linearmente com o aumento da dureza do material base, que existe por baixo da zona afetada termicamente. Também afirmam que existe linearidade entre a resistência ao desgaste e a dureza do material, sendo que a presença da camada branca leva   diminui o

da resistência ao desgaste. Quanto maior for a espessura da camada, maior é o desgaste, e apesar de alguns investigadores concluírem que existem algumas vantagens na presença da camada branca, Yang et al. (1996) afirmam que a presença da camada branca apenas traz prejuízos quanto a resistência ao desgaste.

Yang et al. (1996) e Ramos (2016), afirmam que a camada branca também pode ser dividida em zonas distintas, sendo elas:

- a) Zona fundida e ressolidificada: Possuem uma microestrutura e metalografia diferente do material base;
- b) Zona afetada quimicamente: Depende da quantidade de energia utilizada na usinagem, a qual causa a decomposição do fluido dielétrico e a transferência do Carbono do dielétrico para a superfície da peça;
- c) Zona de tensões residuais (macro e micro): Resultado das elevadas temperaturas geradas e aplicadas durante o processo.

A formação de uma zona de tensão residual, ocorre devido ao alto gradiente de temperatura promovido pelo aquecimento e refrigeração do material, e pela diferença de dureza e volume entre as distintas camadas. Esta zona de tensão começa na camada superficial da peça e chega a áreas próximas do material base, podendo causar microfissuras que sob demanda de carregamento podem ser propagadas, e até causar a falha por completo da peça (AMORIM, 2002).

Esta tensão que se instala pode ser eliminada mediante a realização de tratamentos térmicos extras, sendo aconselhado um revenimento de curta duração de tempo. Porém, caso não seja possível o alívio da tensão existente entre as camadas é aconselhado a remoção destas por completo, utilizando operações complementares, por exemplo polimento (SABBO, 2017).

A influência térmica da eletroerosão na vida de uma ferramenta de moldagem, está fortemente ligada a questão de tensões residuais geradas no processo de EDM. Estas tensões podem gerar microfissuras, que ao serem expostas a um carregamento transformam-se em trincas e reduzem a resistência do material à fadiga (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Em relação à textura e rugosidade resultantes do processo de eletroerosão, pode-se afirmar que com o aumento da energia da descarga, observa-se uma elevação proporcional das mesmas (AMORIM, 2002, ZEILMANN, 2011).

O entendimento da influência do fenômeno físico de eletroerosão sobre a qualidade superficial final da peça, permite atuar de forma mais adequada sobre os parâmetros aplicados e controle do processo, gerando resultados mais apropriados e assertivos conforme demanda de aplicação.

## 2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DO MATERIAL USINADO POR EDM

Segundo Arantes (2007), o estudo do resultado do processo de eletroerosão por penetração em função das alterações é dividido nos aspectos de textura e rugosidade (superfície), e de integridade superficial (subsuperfície), que é associada às mudanças microestruturais provocadas pelo processo. A modificação da superfície e subsuperfície de uma peça têm impacto direto no desempenho e vida útil dela, levando em consideração a aplicação de esforços mecânicos, a sujeição a ambientes corrosivos e agressivos a mesma.

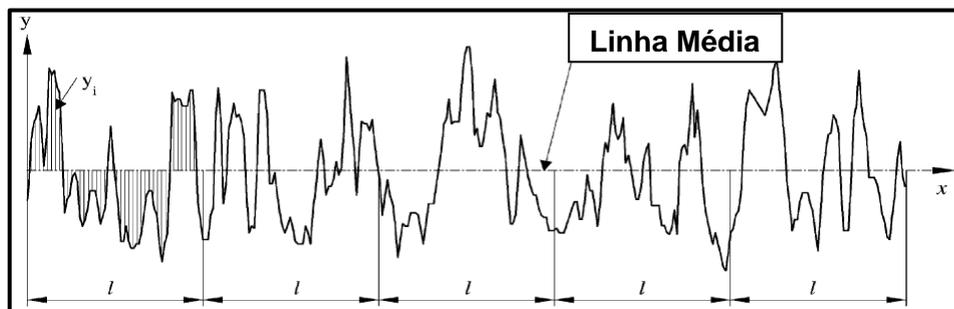
Há várias formas de aferição da qualidade superficial, indo desde o simples contato com a pele até as microscopias ótica e eletrônica de varredura (MEV). Os equipamentos podem ser divididos em duas classes, sendo equipamentos utilizados na indústria e laboratoriais (GRIFFITHS, 2001).

### 2.3.1 Rugosidade

Determina-se rugosidade por uma técnica conhecida por perfis periódicos e não-periódicos, sendo que os perfis periódicos estimam os parâmetros como Ra, Rmáx e Rz, que são os mais importantes para a caracterização e representação topográfica (WHITEHOUSE, 2004; GRIFFITHS, 2001; SANTOS e JÚLIO, 2013). Os parâmetros provenientes de perfis periódicos descritos anteriormente serão apresentados abaixo, para um melhor entendimento.

Parâmetro de rugosidade Média (Ra) consiste na média aritmética dos valores absolutos de todos os desvios de perfis de rugosidade da linha média do comprimento de medição, e tem como objetivo avaliar as variações dos parâmetros de um processo de usinagem (CHIAVERINI, 1986). A figura abaixo representa e esclarece o conceito de rugosidade Ra.

Figura 9 – Definição de rugosidade (Ra)



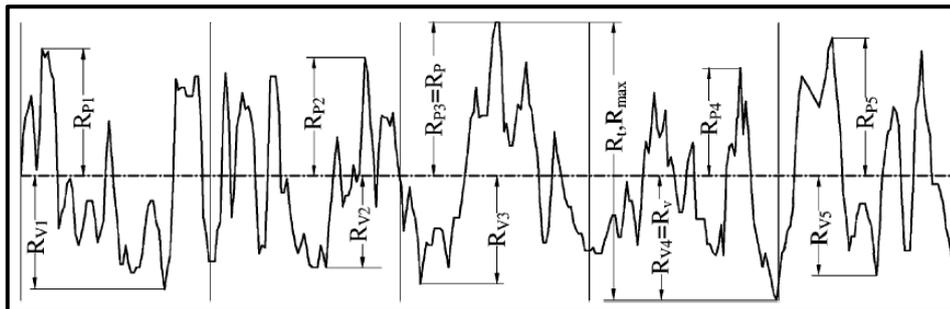
Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al., (2002).

A seguir é demonstrada equação (1), utilizada para calcular a rugosidade média Ra, que consiste no somatório dos valores de “Y<sub>i</sub>” e após a divisão pelo número de intervalos “n”.

$$Ra = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (1)$$

Outro parâmetro de perfis de rugosidade é o  $R_{m\acute{a}x}$ , que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo em um comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial. O valor é obtido da soma do valor do pico mais alto somado ao do vale mais profundo da região medida. A obtenção deste parâmetro é corretamente demonstrada pela cota de  $R_{m\acute{a}x}$  representada na figura 10.

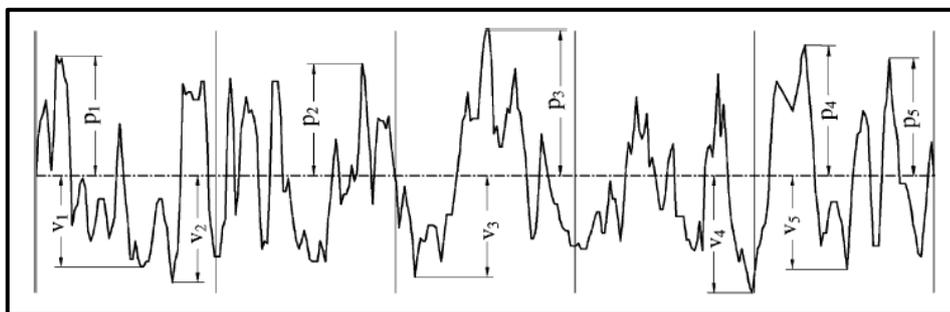
Figura 10 – Definição de rugosidade máxima ( $R_{m\acute{a}x}$ )



Fonte: Gadelmawla et al., (2002).

O parâmetro ( $R_z$ ) possui maior sensibilidade para analisar a ocorrência de picos altos e vales profundos. Consiste na soma dos cinco maiores picos e vales ao longo da medição de rugosidade, segundo a norma *DIN 4766*. É muito utilizado para informar a distribuição média da superfície vertical e dos perfis. (BET, 1999; GADELMAWLA et al., 2002). A figura 11 demonstra os picos e vales levados em consideração para a avaliação da rugosidade  $R_z$ .

Figura 11 – Representação de rugosidade ( $R_z$ )



Fonte: Gadelmawla et al., (2002).

A analogia matemática utilizada para calcular o perfil de rugosidade  $R_z$  está descrita na equação (2) apresentada a seguir, que consiste no somatório dos valores dos picos mais altos “ $p_i$ ”, somados aos valores do somatório dos vales mais profundos “ $v_i$ ” e dividido pelo dobro do valor do número de intervalos “ $n$ ”.

$$Rz = \frac{1}{2 \cdot n} * (\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i) \quad (2)$$

### 2.3.2 Camada Afetada e Textura

Para a análise da subsuperfície do material submetido ao processo de EDM, se faz necessária a análise micrográfica do mesmo. Esta análise é realizada por um processo denominado metalografia, que com o auxílio dos microscópios ótico (MO) e eletrônico de varredura (MEV) observa as formas e espessuras das camadas afetadas e defeitos gerados pelo mesmo. Segundo Amorim (2002) e Santos (2010), para a realização da análise metalográfica do material é necessário primeiramente que o material avaliado seja corretamente preparado, e isso implica na realização dos processos de corte de uma ou mais frações de material, posteriormente o embutimento destas em baquelite, o lixamento e o polimento. Após realizada a preparação da amostra de material, é feito o ataque químico da mesma e a observação utilizando os microscópios citados anteriormente. Abaixo será abordada uma sucinta explicação sobre os microscópios utilizados para esta avaliação.

O microscópio é um instrumento utilizado para ampliar e possibilitar a observação de pequenas estruturas, que não são possíveis de serem observadas a olho nu. Também visa tornar mais fácil e nítida a observação da microestrutura do material em questão, e para isso, exige equipamento muito preciso, altamente especializado e cuidados especiais quanto a operação. Na figura a seguir é possível observar um microscópio ótico e posteriormente uma breve explicação sobre o mesmo.

Figura 12 – Equipamento de microscopia ótica



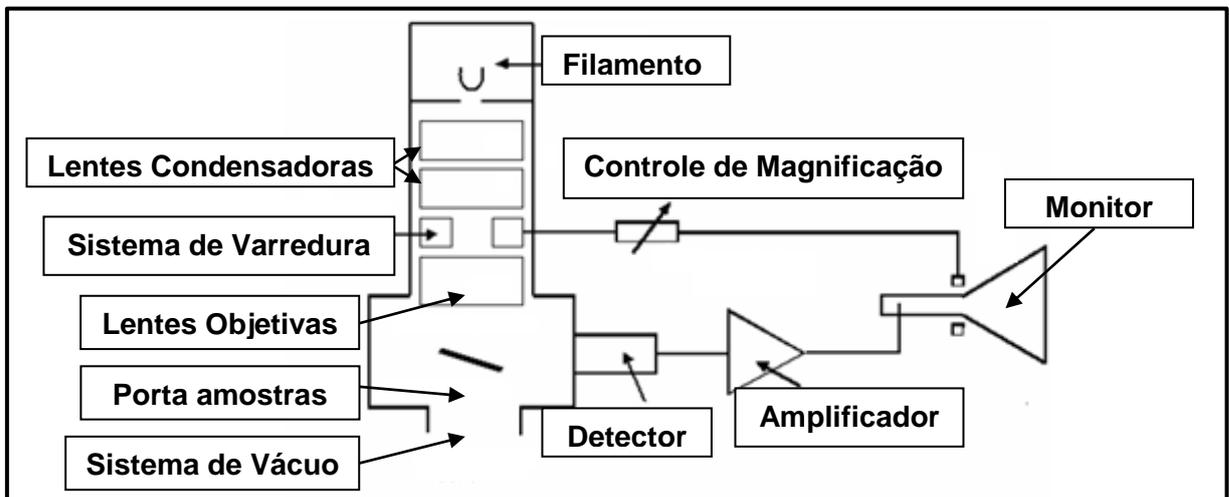
Fonte: Ferreira, (2016).

Segundo Ferreira (2016) e Moreira (2013), os microscópios óticos têm funcionamento simples. A ampliação é feita por um conjunto de lentes de vidro ou de cristal e uma fonte de luz. Para formar a imagem aumentada da amostra, os microscópios são constituídos por uma combinação de componentes mecânicos e óticos, sendo a resolução da imagem dependente da qualidade das lentes e do comprimento de onda, que varia de 400 a 700 nanômetros.

O funcionamento do microscópio ótico, se dá pela luz que incide sobre um condensador, atravessa o objeto e é encaminhada para o canhão de lentes convergentes, que por sua vez é formado pelas lentes objetiva e ocular. Quando este feixe luminoso atinge a lente objetiva, forma-se uma imagem intermediária e aumentada do objeto. Por fim, a lente ocular funciona como uma lupa que amplia e produz a imagem final do material analisado.

A microscopia eletrônica de varredura MEV também tem sido utilizada para revelar características das superfícies e tornar possível a sua caracterização, pois possibilita a observação materiais em escala micro ( $\mu\text{m}$ ) e nano (nm) (RAMOS, 2016). Segundo Goldstein et al. (1992), o método consiste na utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, capaz de explorar a superfície de uma determinada peça ponto a ponto. Isto é repetido por sucessivas linhas e o sinal transmitido do detector para uma tela catódica, permitindo que seja solucionado o problema de resolução relacionado a fonte de luz branca, ocasionado por um microscópio óptico convencional por exemplo. Os elétrons utilizados no feixe são gerados através de um filamento aquecido e em alto vácuo. Após a geração, os mesmos são acelerados em direção a um ponto da amostra, realizando a varredura da superfície e gerando sinais de elétrons secundários (ou emissão de fótons), retro espalhamento dos elétrons, e raios X característicos. Dentre estes citados, os mais utilizados para obtenção de imagem são os secundários e/ou elétrons retro espalhados. A figura 13 ilustra esquematicamente o funcionamento de um equipamento de microscopia eletrônica de varredura MEV.

Figura 13 – Desenho esquemático dos componentes de um MEV



Os elétrons retro espalhados são aqueles que sofreram espalhamento elástico, gerando imagens que fornecem diferentes informações conforme o contraste que apresentam. Por intermédio deles é possível a geração de imagem topográfica (contraste em função do relevo) e imagem de composição (contraste em função dos elementos presentes na amostra). Enquanto isso, os elétrons secundários formarão imagens com alta resolução, na ordem de 3 à 5 nm. Utilizando-se de qualquer um dos dois sinais de elétrons comentados (retro espalhados e secundários), é possível modular o brilho e também gerar uma imagem da amostra. Esta imagem pode apresentar diferentes características, uma vez que mesma resulta da amplificação de um sinal obtido da interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra, possibilitando a análise da microestrutura, morfologia e a textura do material usinado, devido à capacidade de scanear a superfície em 3D (DEDAVID et al., 2007).

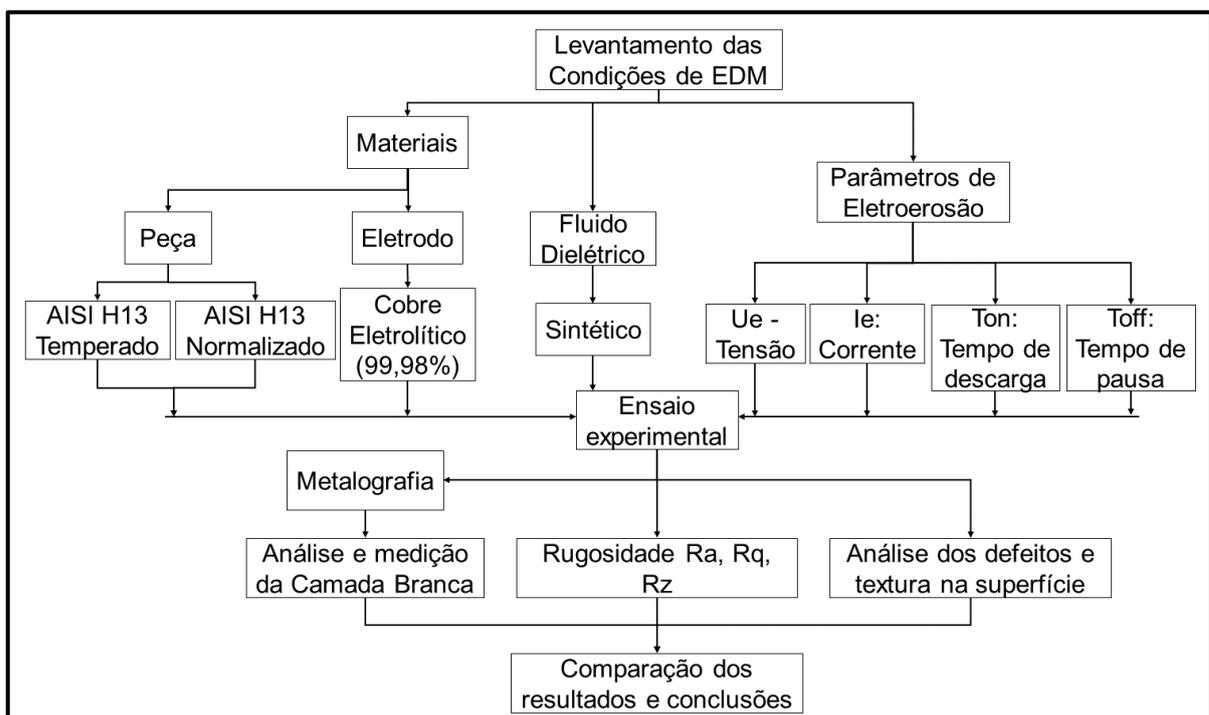
A riqueza de detalhes estruturais revelados pelos microscópios, permite que sejam avaliadas informações importantes nos mais diversos campos de aplicação, e independente da área de pesquisa que solicite conhecimentos de topografia superficial, a microscopia será sempre de grande valia (DEDAVID et al., 2007).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se a apresentar o procedimento de eletroerosão, materiais e equipamentos utilizados para a realização do experimento, o qual foi conduzido em conjunto com a empresa Usimagi Indústria Metalúrgica e o Grupo de Usinagem (GUS) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Foram elencados os parâmetros de maior utilização da empresa Usimagi para a obtenção de cavidades com acabamento texturizado, aplicadas em moldes de injeção plástica e obtidas pelo processo de EDM. Após definidos estes parâmetros, foi realizado o processo de eletroerosão em dois corpos de prova, que tem geometria conforme definido na sequência deste capítulo, apenas distinguindo-se pelo estado em que o material se encontra, sendo um em AISI H13 temperado e outro normalizado. Posteriormente ao ensaio, o corpo de prova foi preparado para a análise, passando por processo de corte da parte a ser embutida, embutimento, polimento e ataque químico. Realizados estes procedimentos, em seguida iniciou-se as análises metalográficas, avaliação e medição da camada branca. Em conjunto com estas investigações, simultaneamente, foram medidas a rugosidade e obtidas imagens da textura e defeitos gerados pela eletroerosão. Todos estes procedimentos de análise posteriores ao processo de EDM foram realizados junto ao laboratório da UCS. A figura 14 mostra o organograma com a sequência de procedimentos utilizados para a realização do ensaio experimental.

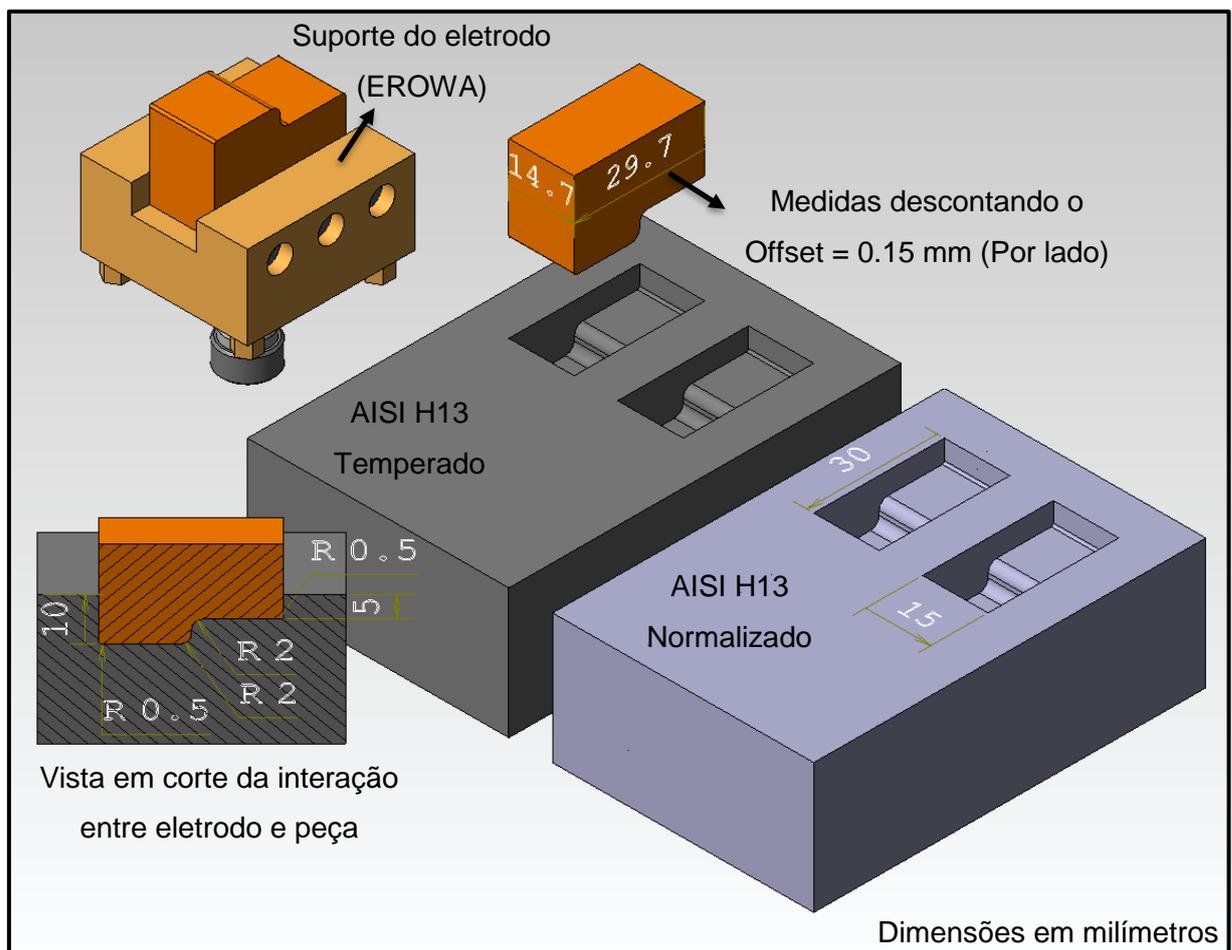
Figura 14 – Sequência de procedimentos



### 3.1 MATERIAIS

Conforme as necessidades da empresa e para que seja possível a análise e comparação proposta por este trabalho, foram utilizados corpos de prova confeccionados de aço AISI H13. O formato do corpo de prova elegido foi obtido fazendo um estudo das geometrias geralmente empregadas em cavidades, e procura se aproximar ao máximo do formato das mesmas, para que se obtenha um comportamento semelhante ao ocorrido na confecção dos moldes. A figura 15 demonstra a geometria do corpo de prova e do eletrodo utilizado, também o sistema de fixação do eletrodo. Posteriormente a esta é abordado um breve apanhado sobre os materiais utilizados para a confecção dos mesmos.

Figura 15 – Formato dos corpos de prova e eletrodo



Fonte: O autor, (2019).

O aço AISI H13 é fornecido em estado recozido, possui excelentes propriedades mecânicas, alta resistência a trincas motivadas por fadiga térmica, alta capacidade de polimento, usinabilidade e resistência ao desgaste. Quando submetido a tratamento térmico

possui uma boa estabilidade dimensional e pouca sensibilidade a choques térmicos provocados por resfriamentos abruptos.

O material em questão foi utilizado em dois estados, sendo eles normalizado e temperado. Em estado normalizado, conforme adquirido, possui uma dureza de 226 HB (Brinell) (conforme o Apêndice A), e para o estado temperado, foi estipulada e utilizada a dureza de 512 HB, geralmente aplicada nas cavidades de moldes de injeção de polímeros, e certificada pela empresa *Tecno Vacuum* conforme o Apêndice B. A composição química do aço AISI H13 segundo o fabricante *Villares Metals*, e certificada pela distribuidora *Diferro Aços Especiais LTDA* conforme o Apêndice A, é apresentada na tabela abaixo.

Tabela 1 – Composição química do AISI H13

<b>AISI H 13</b>	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P máx.</b>	<b>%S máx.</b>	<b>%Si</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Mo</b>	<b>%V</b>
	0,390	0,340	0,011	0,001	1,020	5,140	1,330	0,950

Fonte: *Diferro Aços Especiais*, (2019).

O material do eletrodo ferramenta utilizado no processo de EDM é o Cobre eletrolítico C11000, com 99,98% de pureza e cujo as propriedades físicas, segundo a distribuidora *Coppermetal*, estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas do Cobre eletrolítico

<b>Densidade a 20°C (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	8890,00
<b>Ponto de Fusão (°C)</b>	1083,00
<b>Condutividade elétrica a 20°C ((<math>\Omega</math>.m)<sup>-1</sup>)</b>	5,82 x 10 <sup>7</sup>
<b>Condutividade térmica a 20°C (W/m.K)</b>	389,11
<b>Calor específico (J/Kg.K)</b>	385,18
<b>Resistividade Elétrica (<math>\Omega</math>.m)</b>	1,78 x 10 <sup>-8</sup>

Fonte: *Coppermetal*, (2019).

### 3.2 EQUIPAMENTOS

Para a realização do processo de EDM, foi utilizada uma máquina de eletroerosão 4 eixos, de modelo ROBOFORM 23 da marca Agie Charmilles. O equipamento possui cabeçote com porta eletrodo de troca rápida (EROWA), movimento nos eixos X, Y, Z realizado por servo motores e orientado por guias lineares, e movimento eixo C realizado por sistema de servo motor e encoder. Sua programação é feita junto ao painel da própria máquina, por meio de microprocessador, controlado por um teclado de membrana com teclas individuais, e display

para visualização de parâmetros de controle. A figura 16 representa o equipamento de eletroerosão de propriedade da Usimagi Indústria Metalúrgica.

Figura 16 – Máquina de eletroerosão por penetração ROBOFORM 23



Fonte: O autor, (2019).

A visualização da textura bidimensional foi realizada utilizando o Estereoscópio Trinocular (Microscópio Ótico). O equipamento pode ser observado na figura 17.

Figura 17 – Estereoscópio trinocular



Fonte: O autor, (2019).

Para a aferição de rugosidade foi utilizado um sistema de aferição composto por rugosímetro da marca MITUTOYO e modelo SJ-301 e computador contendo software próprio para esta finalidade, conforme a figura abaixo.

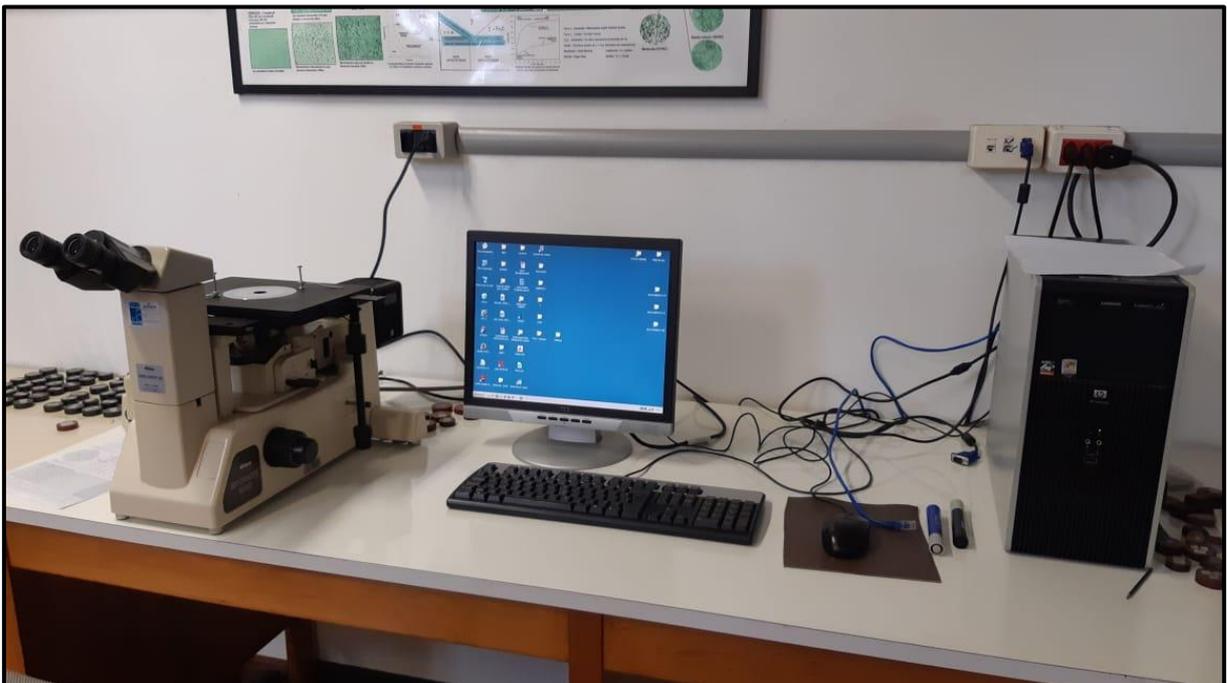
Figura 18 – Sistema de aferição de rugosidade



Fonte: O autor, (2019).

Já a análise e medição da camada branca da peça eletroerodida, foram realizadas utilizando o Microscópio Ótico NIKON EPIPHOT 200 em conjunto com um software utilizado para esta finalidade, que está instalado em um microcomputador. Os equipamentos podem ser observados na figura a seguir.

Figura 19 – Microscópio ótico NIKON EPIPHOT 200



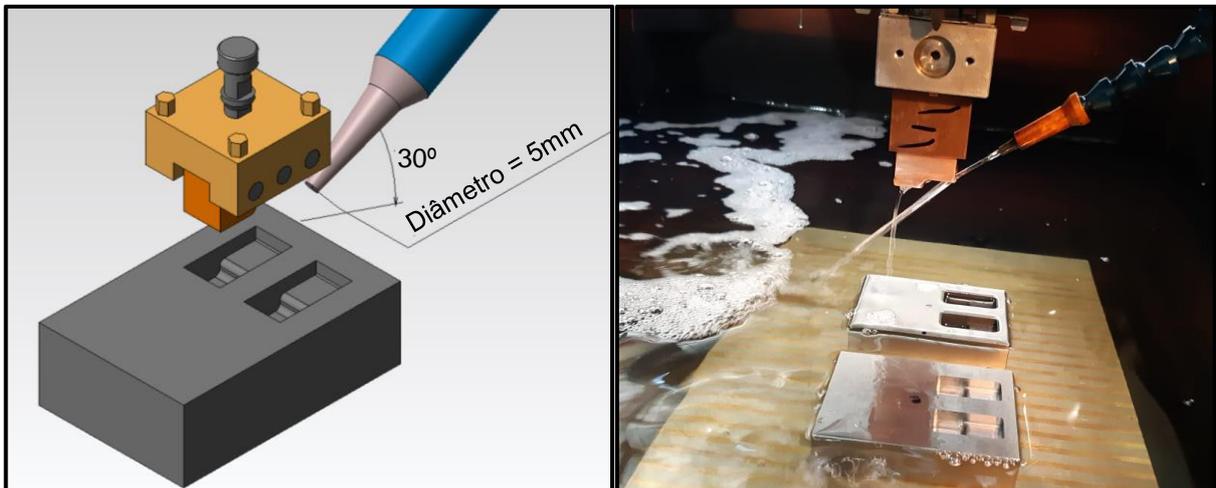
Fonte: O autor, (2019).

### 3.3 MÉTODOS E ESTRATÉGIAS

#### 3.3.1 Estratégia de Usinagem por Eletroerosão

No processo de eletroerosão o corpo de prova foi submerso por completo em fluido dielétrico. Em conjunto a isto, foi utilizada lavagem forçada através de um bico de lavagem (já contido na máquina) posicionado a 30° da face superior da peça, facilitando a retirada do material removido pelo processo de EDM. A disposição proposta e a executada podem ser observadas na figura abaixo. É importante salientar que os blocos foram primeiramente preparados (esquadrejados e retificados) e as cavidades desbastadas. Para isso foi utilizado o processo de fresamento, deixando um sobremetal de 0,3 mm em cada face da cavidade.

Figura 20 – Posição do bico de lavagem



Fonte: O autor, (2019).

Foram usinadas quatro cavidades, duas no corpo de prova temperado e outras duas no corpo de prova normalizado, utilizando apenas um conjunto de parâmetros, que foram mantidos iguais para ambas as aplicações. Para tal foram utilizados três eletrodos no processo, que usinaram todas as cavidades igualmente, sendo o primeiro até se aproximar das medidas finais estipuladas e os dois últimos para finalizar o processo e garantir a geometria usinada. Partindo deste pressuposto, foi possível a observação da diferença no comportamento da usinagem nos corpos de prova. Quando aplicado este conjunto de parâmetros escolhidos, obtém-se uma determinada textura superficial, a qual é amplamente difundida na maioria das cavidades de moldes produzidos para empresas do ramo de injetados. Tendo em vista esta grande demanda por parte dos clientes por cavidades que possuem textura com estas características, esta condição também é a mais utilizada pela Usimagi.

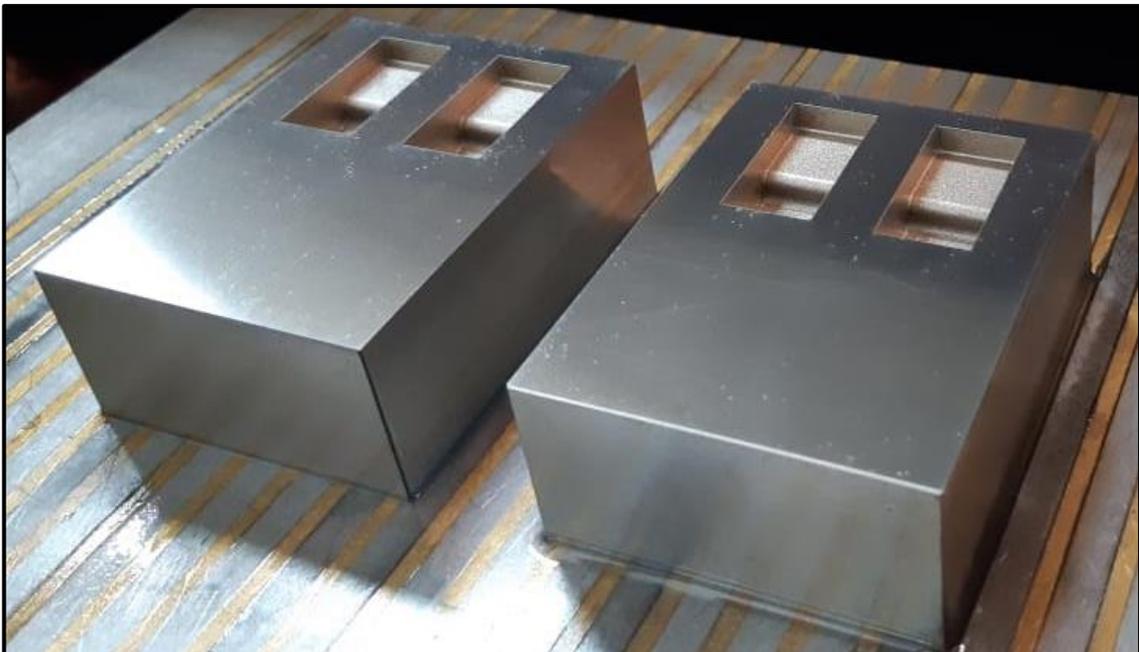
Fazem parte dos parâmetros elegidos, o tempo de descarga (TON), a tensão de trabalho (Ue), o tempo de pausa (TOFF) e a corrente de trabalho (Ie). A tabela 3 demonstra os parâmetros utilizados no processo e posteriormente a figura 21 apresenta o resultado obtido da eletroerosão em ambas as cavidades.

Tabela 3 – Parâmetros do processo de eletroerosão por penetração

Cavidades	Profundidade (mm)	TON ( $\mu$ s)	Ue (V)	TOFF ( $\mu$ s)	Ie (A)	GAP por lado (mm)
Todas	10mm	100	160	100	8	0,15

Fonte: O autor, (2019).

Figura 21 – Resultado da eletroerosão nos corpos de prova



Fonte: O autor, (2019).

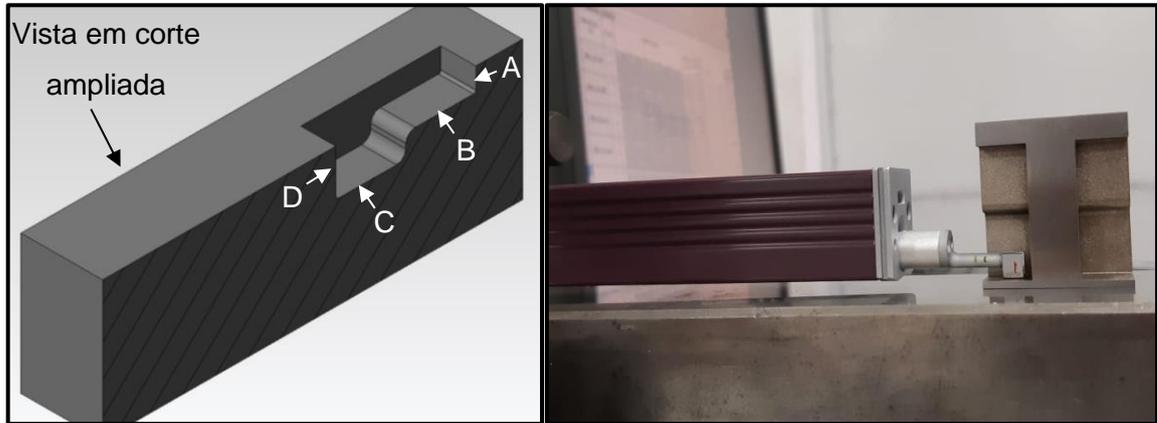
### 3.3.2 Estratégia de Análise dos Resultados

A análise da qualidade superficial do aço AISI H13 temperado e normalizado foi observada na base da superfície, e as imagens da textura obtidas pelo estereoscópio trilocular com 20 vezes de magnificação.

As rugosidades Ra, Rmáx e Rz foram obtidas por medição, fazendo a utilização do rugosímetro Mitutoyo SJ -301 com N = 5 e cut-off de 0,8 mm, que definem os parâmetros utilizados para varrer mecanicamente as superfícies. No processo de varredura das superfícies realizado pelo equipamento, a ponteira é posicionada em 4 regiões distintas da peça, sendo elas A, B, C e D. Foram executadas 5 medições em cada região, podendo os resultados serem observados no Apêndice C. A figura 22 salienta as regiões de medição

conforme o citado anteriormente. Também exibe a aferição realizada em um ponto da peça, fazendo alusão ao demais executados.

Figura 22 – Medição de rugosidade



Fonte: O autor, (2019).

Para a realização da metalografia foi executado o corte transversal do corpo de prova utilizando eletroerosão a fio disponível na empresa Usimagi. Posteriormente foi feito o embutimento do material em resina acrílica devido a maior fluidez da mesma. Após as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, utilizando lixas d'água 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200, respectivamente. Realizado o lixamento, as amostras passaram por um processo de polimento, utilizando pano especial e pasta diamantada 3  $\mu\text{m}$ , obtendo-se o acabamento desejado. A figura 23 demonstra o resultado final do embutimento após a realização destes processos citados.

Figura 23 – Corpo de prova embutido em resina acrílica



Fonte: O autor, (2019).

Para a correta visualização dos resultados, foi realizado ataque químico utilizando Nital a 2%, e posteriormente analisadas a morfologia e camada afetadas pelo processo de EDM nas amostras, por meio do microscópio ótico (MO).

Ao realizar o procedimento citado acima, foram descobertos alguns problemas quanto a visualização das amostras. O problema se tratava de uma fenda localizada na interface entre a resina acrílica e as regiões a serem analisadas. Este espaço era preenchido de Nital quando feito o ataque da amostra, fazendo que não fosse possível a secagem correta posteriormente a este procedimento, pois o Nital contido na fenda migrava para a superfície analisada por capilaridade, dando continuidade ao ataque. Devido a estes fatos, não era possível uma correta visualização das camadas subsuperficiais das cavidades conforme proposto. Foi então pensada uma nova forma para prosseguir corretamente com a análise, sem que se interferisse no resultado almejado. A alternativa encontrada para sanar o problema, foi a de ser realizada toda a preparação dos corpos de prova embutidos, conforme a figura 23, e após desembutir todos eles cuidadosamente, para que fossem levemente polidos, atacados e finalmente analisados. Esta técnica foi utilizada em todas as amostras, podendo-se observar o resultado na figura 24. A medição da camada branca foi realizada em todos os pontos estipulados nos corpos de prova, por intermédio de software disponibilizado pela UCS, que opera em conjunto com o microscópio ótico.

Figura 24 – Corpos de prova desembutados e atacados



Fonte: O autor, (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem finalidade de apresentar os resultados e discussões referentes as modificações superficiais e subsuperficiais, juntamente aos defeitos causados pelo processo de eletroerosão. Os resultados são apresentados em forma de comparação entre os valores e dados obtidos no aço AISI H13 temperado e normalizado, para que sejam evidenciadas diferenças ou mesmo igualdades de comportamento após a aplicação do processo de EDM. Realizaram-se avaliações investigativas e análises das peças (cavidades) usinadas. Os dados obtidos foram avaliados e compilados para confecção de gráficos, tabelas e imagens que descrevem e representam a integridade superficial e subsuperficial dos corpos de prova, após a submissão a usinagem por eletroerosão.

### 4.1 RUGOSIDADE DA PEÇA

Após a execução do ensaio experimental foram realizadas as medições de rugosidade em todas as cavidades, conforme o descrito no capítulo anterior. Por se tratar de quatro cavidades usinadas, as mesmas foram separadas entre duas normalizadas e duas temperadas, devidamente identificadas. Na tabela abaixo estão descritos os valores de rugosidade médios encontrados para cada região de cada cavidade, podendo ser observado o relatório completo da medição de rugosidade junto ao Apêndice C.

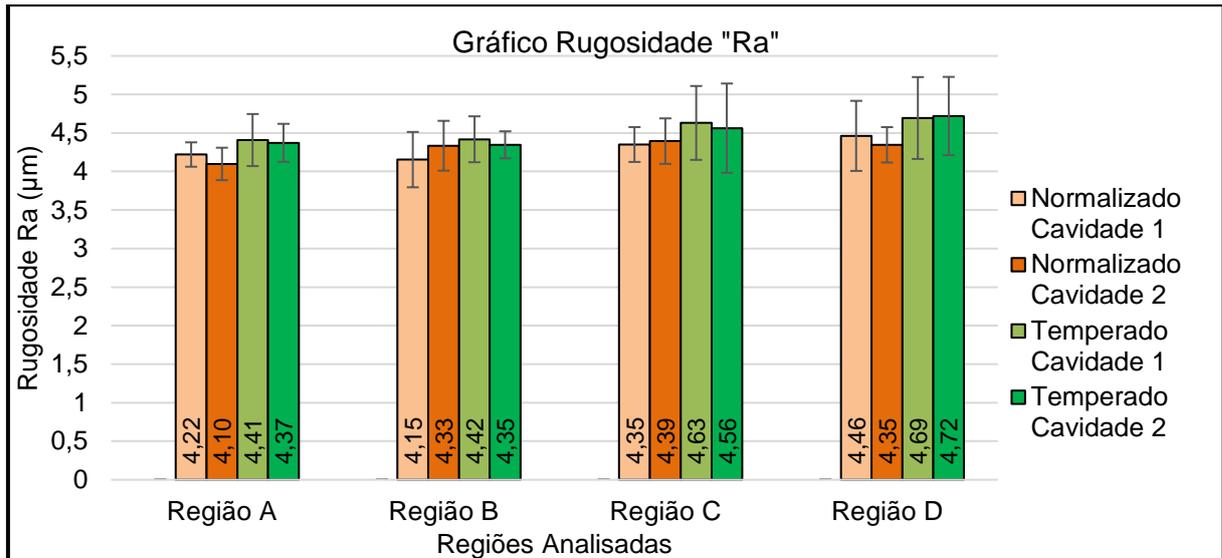
Tabela 4 – Valores médios de rugosidade

Corpo de Prova Medido	Parâmetros Medidos	Valores de Rugosidade Média de Cada Região Medida			
		A	B	C	D
Normalizado Lado 1	Ra	4,30	4,15	4,11	4,46
	Rmáx	25,92	25,44	26,54	28,21
	Rz	22,00	21,97	21,51	23,17
Normalizado Lado 2	Ra	3,90	4,33	4,23	4,32
	Rmáx	27,69	27,12	26,99	28,49
	Rz	21,64	22,31	23,34	23,41
Temperado Lado 1	Ra	4,41	4,36	4,63	4,69
	Rmáx	28,83	28,15	31,24	31,15
	Rz	22,99	22,75	24,17	24,47
Temperado Lado 2	Ra	4,37	4,35	4,56	4,72
	Rmáx	28,90	27,43	28,77	29,73
	Rz	22,59	22,51	24,03	25,45

Fonte: O autor, (2019).

As representações gráficas a seguir demonstram o comportamento dos parâmetros de rugosidade após a realização do processo de EDM. É possível observar a variação dos resultados para ambas as regiões das cavidades usinadas e condições do material, estando todos os valores referentes a cada região dispostos lado a lado, para uma melhor visualização e comparação.

Figura 25 – Representação gráfica da rugosidade “Ra” obtida



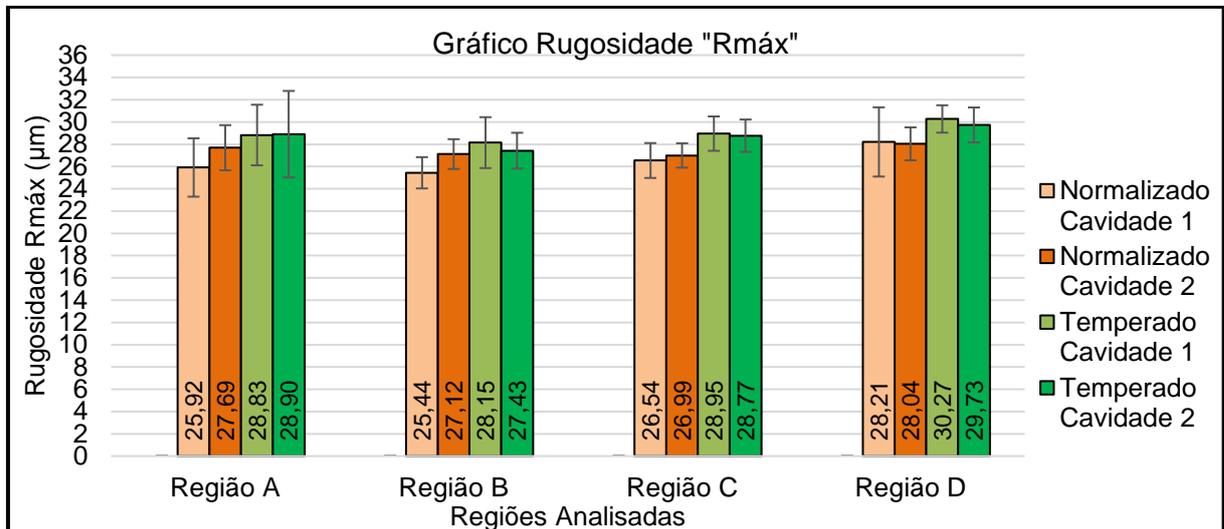
Fonte: O autor, (2019).

Observando a tabela 4 e o gráfico da figura 25, constatou-se que não houve uma mudança significativa nos resultados da rugosidade “Ra” obtida em ambas as configurações do material. Este comportamento era esperado, devido aos parâmetros utilizados para a realização da usinagem serem os mesmos para ambas as cavidades. Porém, observa-se que em todos os parâmetros de rugosidade medidos, os valores para as cavidades de aço AISI H13 temperado são superiores, mas não significativamente maiores. Outro comportamento que pode ser observado, é o aumento da rugosidade gerada com o aumento da profundidade da cavidade erodida. Verifica-se que há um leve aumento nos valores de rugosidade nas regiões “C” e “D”, que pode estar relacionada a ineficiente lavagem nestas superfícies.

Ramos (2016) afirma que uma lavagem mais eficiente da zona de descarga, diminui o efeito capacitivo originado pela pequena distância entre eletrodo e peça, devido as partículas localizadas entre os mesmos. Com isso, consegue-se diminuir a profundidade das crateras na superfície usinada, o que acarreta em melhores acabamentos superficiais. Tendo em vista que com o aumento da profundidade das cavidades nas regiões “C” e “D” a lavagem se torna menos eficiente, conclui-se que é esperado o aumento da rugosidade nestas mesmas áreas, ainda que pouco significativo, como nos valores encontrados nos ensaios realizados.

Assim como no parâmetro “Ra”, o comportamento de aumento nos valores de rugosidade nas regiões “C” e “D” se repete para os parâmetros “Rmáx” e “Rz”. É possível observar-se isso nas figuras 26 e 27, situadas abaixo.

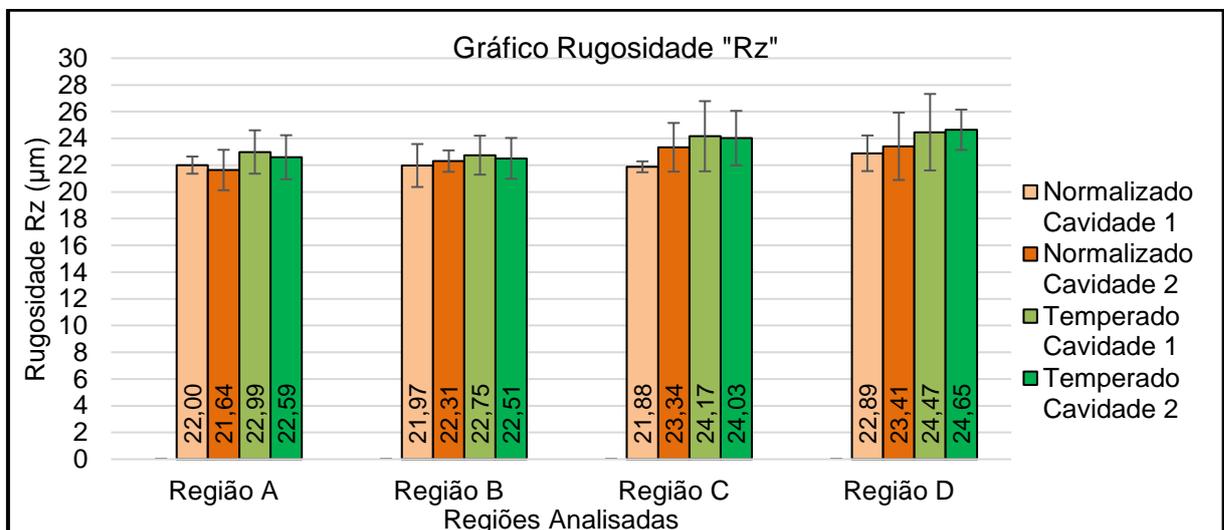
Figura 26 – Representação gráfica da rugosidade “Rmáx” obtida



Fonte: O autor, (2019).

Os valores encontrados para rugosidade “Rmáx”, conforme a tabela localizada no apêndice C, demonstram as características da superfície. É possível observar a ocorrência de picos e vales com valores dispersos, mesmo dentro da mesma região medida. Porém a média obtida com estes valores é homogênea na maior parte das medições, não havendo modificações significativas entre os valores encontrados em cada região, e estando dentro de uma mesma faixa de valores.

Figura 27 – Representação gráfica da rugosidade “Rz” obtida



Fonte: O autor, (2019).

O parâmetro “Rz” possui uma maior sensibilidade na análise da ocorrência de picos altos e vales profundos. Os resultados encontrados neste parâmetro de rugosidade também resultam em um padrão homogêneo, novamente não havendo modificações significativas, e seguindo o mesmo comportamento de aumento dos valores para as regiões “C” e “D”.

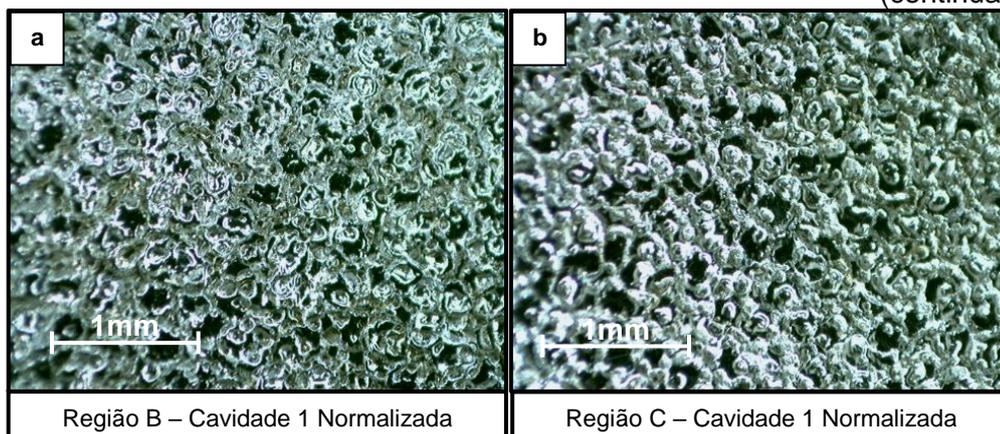
A rugosidade de peças usinadas por EDM é profundamente relacionada à energia média da descarga elétrica. Segundo Amorim (2002), o aumento desta energia acarreta em maiores valores de rugosidade, devido a formação de crateras mais largas e de maior profundidade na superfície erodida, e sendo a ampliação deste nível de energia causada pelo aumento da duração da descarga ou da corrente de descarga. Levando-se em consideração que os parâmetros utilizados nesta pesquisa são iguais para ambas configurações de material, é esperado um comportamento semelhante entre as cavidades quanto a rugosidade. Isso fica evidenciado nos resultados e representações gráficas apresentados anteriormente, onde são constatadas pequenas alterações nas rugosidades. Considerado o desvio padrão obtido em todos os gráficos, pode-se afirmar que estes valores são iguais dentro das margens possíveis (estão em uma mesma faixa de valores), resultado este satisfatório e que atende o almejado e o estipulado pela tabela de parâmetros.

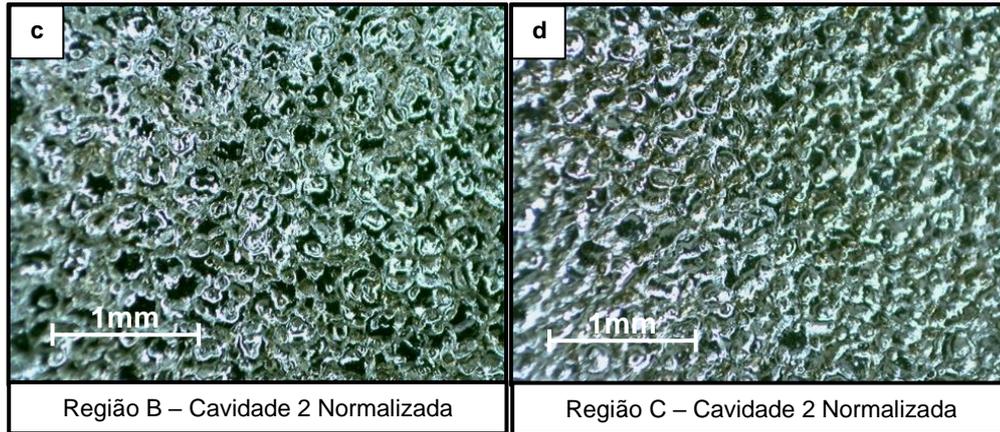
#### 4.2 TEXTURA

Posteriormente a medição da rugosidade, foram feitas fotografias bidimensionais da textura das superfícies usinadas, para ser possível a avaliação da mesma. As regiões “B” e “C” foram fotografadas por serem as duas maiores contidas na cavidade, também por a região “A” ter um comportamento muito próximo a região “B” e a região “D” muito próxima a “C”. A principal diferença entre as superfícies retratadas é a profundidade em que se encontram, como mencionado anteriormente. As fotografias obtidas encontram-se representadas abaixo nas figuras 28 e 29, onde cada região fotografada é identificada.

Figura 28 – Textura obtida nas cavidades normalizadas

(continua)

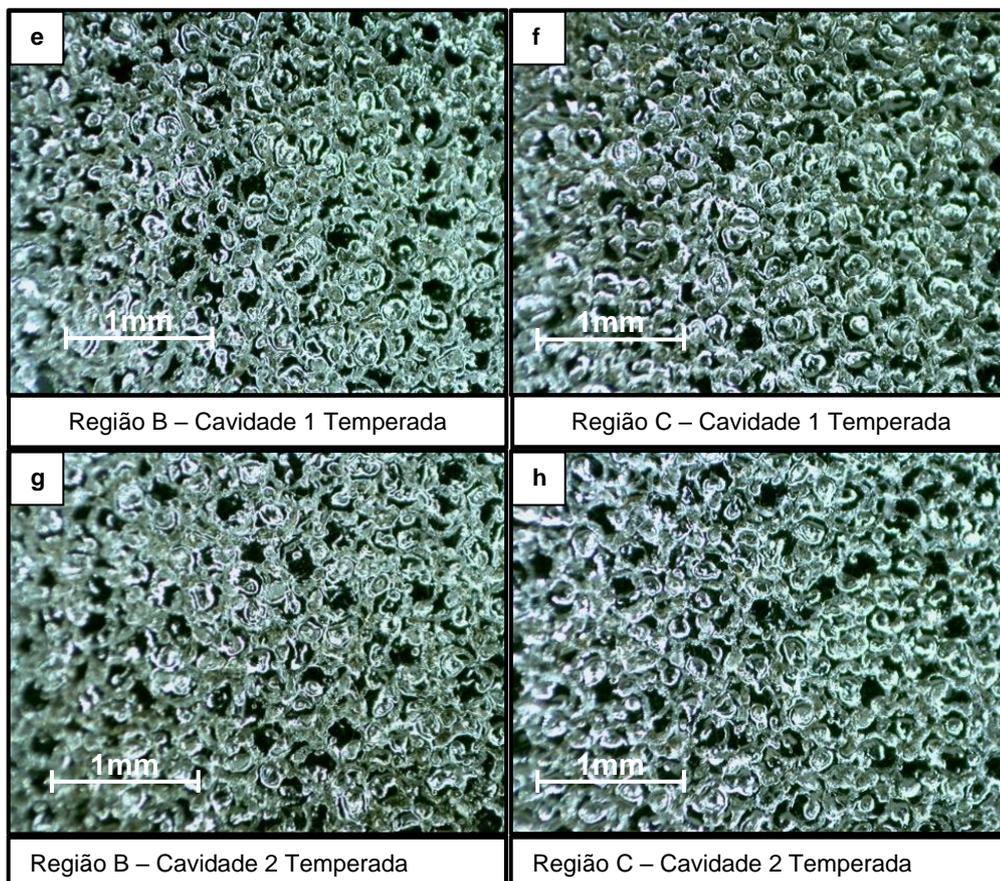




Fonte: O autor, (2019).

Nas figuras 28 e 29 é possível observar que as superfícies têm texturas semelhantes. Porém devido ao aumento na profundidade há aparentemente uma pequena alteração na textura das cavidades das imagens (b), (d), (f) e (h) em comparação as demais, por estarem nas regiões com lavagem menos eficiente. Isso acarreta na geração de marcas mais largas e profundas (como explicitado anteriormente) em comparação as geradas nas regiões (a), (c), (e) e (g), o que também foi constatado na medição de rugosidade.

Figura 29 – Textura obtida nas cavidades temperadas



Fonte: O autor, (2019).

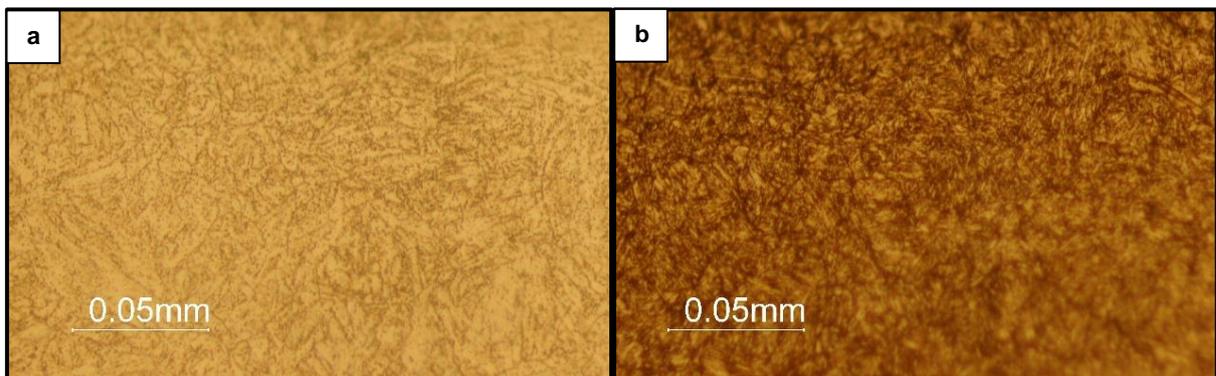
Segundo Amorim (2002) e Zeilmann (2013), existem regiões que definem a superfície do material erodido. Na mais externa, o material liquefeito que não foi expelido ao final da descarga elétrica acaba por se solidificar nas crateras formadas e nas regiões vizinhas a elas, caracterizando a textura da superfície. As marcas observadas também são formadas por gases retidos que escapam do material ali depositado. Este comportamento fica evidente nas cavidades usinadas, conforme o esperado, e pode ser observado e verificado nas figuras 28 e 29, onde há a presença das características resultantes do processo conforme os citados acima.

### 4.3 MICROGRAFIA

Os corpos de provas fabricados têm diferentes microestruturas, conforme o proposto. Um deles foi mantido normalizado e o outro submetido ao processo de têmpera, a fim de se observar o comportamento de cada um após o processo de EDM. Na figura 30 estão representadas as microestruturas dos corpos de prova, estando explicitadas abaixo as diferenças entre os corpos temperados e normalizados.

Na imagem (a) cujo o material está em condição de normalizado, o mesmo apresenta uma matriz ferrítica de baixa dureza (fundo de cor amarela), na qual está presente uma quantidade considerável de carbonetos secundários (marcas finas na cor marrom). Já na imagem (b), a qual trata do material em estado temperado, a microestrutura contém martensita revenida de elevada dureza (cor marrom) em maior quantidade, juntamente a uma matriz ferrítica (cor amarelo).

Figura 30 – Microestruturas dos corpos de prova.

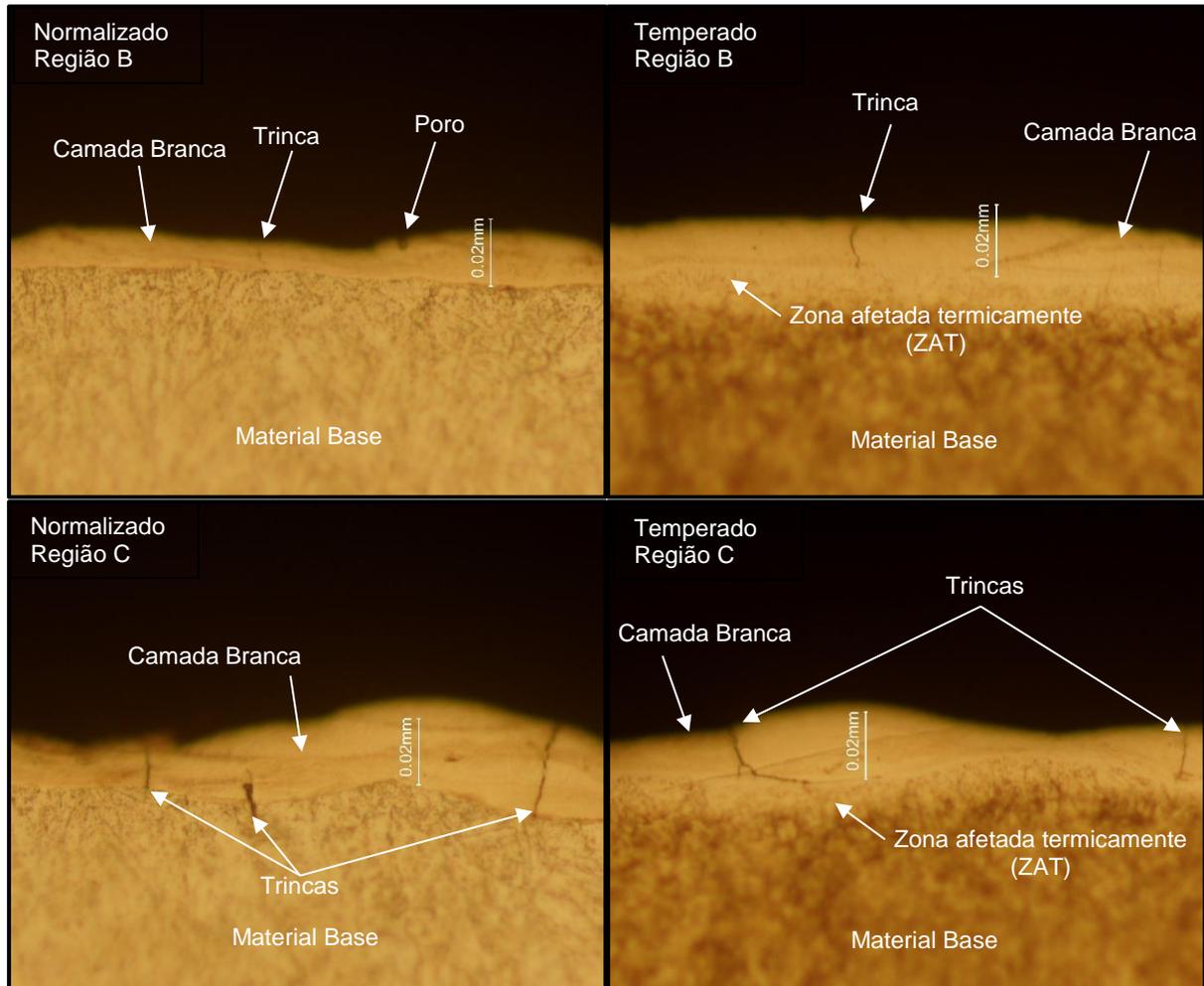


Fonte: O autor, (2019).

Após serem submetidas ao processo de EDM, as cavidades apresentam uma camada subsuperficial afetada, conforme o fundamentado ao longo deste trabalho. Nela acontecem alterações estruturais do material usinado devido à fadiga térmica, que é

intermitente no processo de eletroerosão. As imagens da camada afetada resultante, foram obtidos a partir do MO. As imagens contêm escalas dimensionais de 0,02mm posicionadas acima da camada branca, sendo possível a comparação com a espessura da referida camada, para uma melhor observação e entendimento. A figura 31 corresponde as microestruturas após usinagem por EDM nas regiões “B” e “C” das cavidades em ambos os materiais.

Figura 31 – Camada afetada após usinagem por EDM.



Fonte: O autor, (2019).

Foram representadas na figura anterior apenas estas duas regiões devido as mesmas terem uma maior distinção entre elas, que é a profundidade da cavidade. Nestas superfícies ocorrem as maiores diferenças em comparação uma com a outra. Porém o relatório fotográfico completo pode ser observado junto ao apêndice D deste trabalho, possibilitando a visualização do comportamento da camada resultante do processo de EDM.

Na figura 31 é possível verificar que na região “B” (menos profunda) das cavidades não há uma distinção significativa na espessura da camada branca, estando os valores muito próximos, quando comparados as diferentes condições do material. Já para a região “C”

observa-se um aumento da camada branca em ambos os materiais, devido a esta região estar localizada na parte mais profundas da cavidade, e no lado oposto da entrada do fluido dielétrico que faz a lavagem. Isso faz com que diminua a eficiência na retirada do material da fenda de trabalho, e por consequência destas piores condições, resulta no aumento da camada branca.

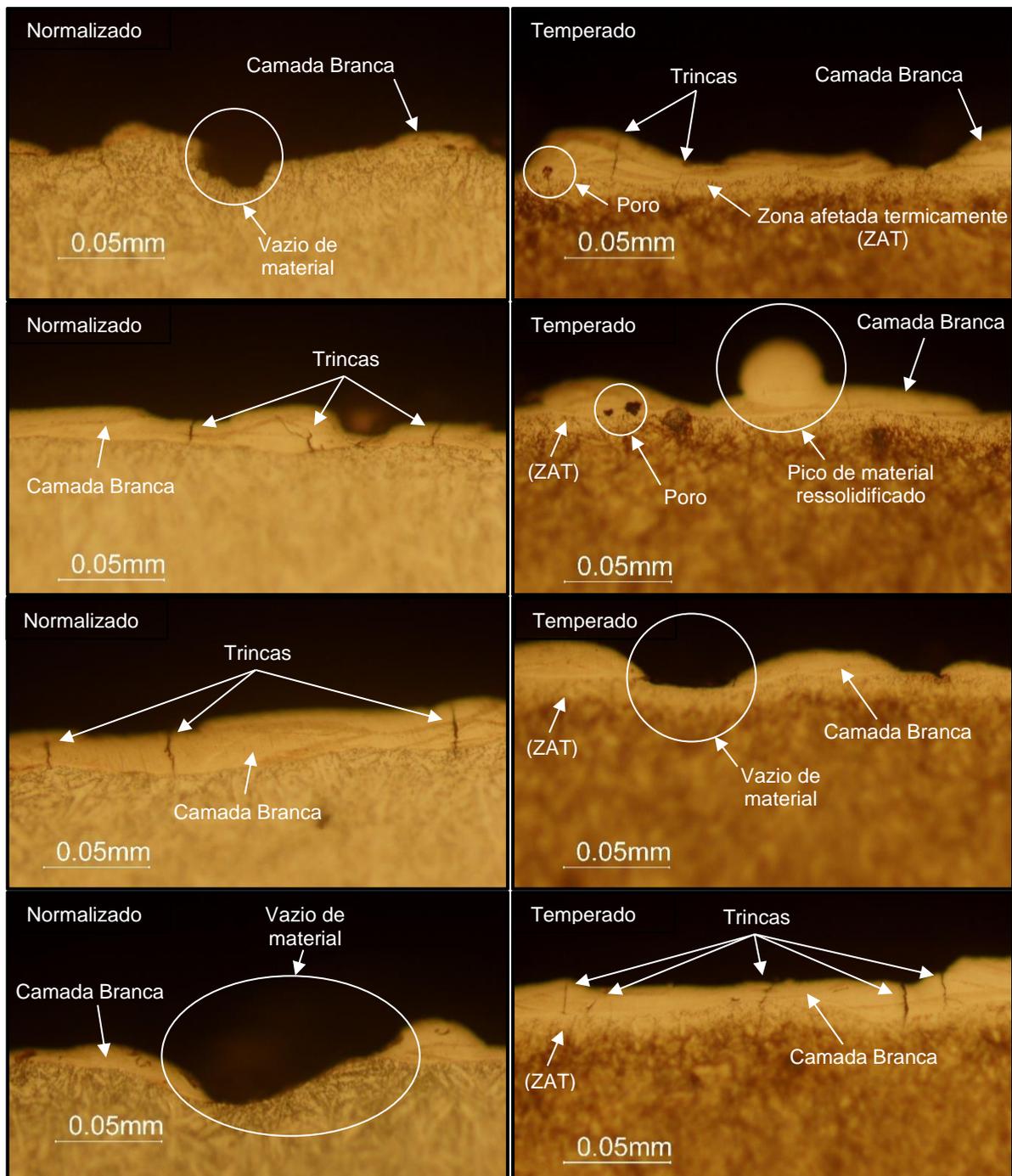
Segundo König e Klocke (1997), devido a condições de lavagem não satisfatórias, o material não é retirado corretamente da fenda de trabalho completamente, causando instabilidade na erosão, tendo em vista que as descargas deixam de ser estáticas e passam a ser contínuas (arco elétrico). Isso faz com que a duração do intervalo não seja mais suficiente para deionizar o canal de descarga, e então ocorrem descargas sucessivas em um ponto da peça e do eletrodo ferramenta. O resultado disso é uma maior quantidade de material fundido e, portanto, o aumento da camada afetada e da geração de fissuras (trincas). A máquina por vezes realiza pequenas modificações nos parâmetros, geralmente alterando os intervalos de descarga e de pausa, em busca da estabilização do processo e/ou melhor rendimento, porém não excede muito os valores estipulados. A capacidade de arrefecimento também influencia no tamanho da camada gerada, pois com um resfriamento mais rápido e eficaz das partículas retiradas da superfície usinada, evita-se que as mesmas voltem a se solidificar sobre a superfície, diminuindo assim a espessura da camada. Por consequência destes fatos apresentados, observa-se a diferenciação entre as espessuras das camadas afetadas em superfícies com diferentes condições de lavagem.

A espessura da camada branca no AISI H13 normalizado demonstra-se maior em comparação ao material em estado temperado. Porém como citado anteriormente, nas regiões menos profundas (região "A" e "B"), não há uma diferença significativa nos valores de espessura, sendo que a diferença máxima observada foi de aproximadamente 0,005mm maior nas cavidades normalizadas. Já para as regiões mais profundas das cavidades (região "C" e "D") constata-se um pequeno aumento desta diferença de espessura, sendo encontrados valores com até 0,01mm maior aproximadamente em alguns pontos que ocorrem picos de material ressolidificado (camada branca). Segundo Yang et al. (1996), a espessura da camada branca tende a decrescer com o aumento da dureza do material base, mesmo comportamento que o constatado nos testes demonstrado neste trabalho, sendo assim este comportamento dentro do previsto. Algumas destas diferenças entre espessuras de camada afetada nas cavidades analisadas podem ser observadas na figura 31 e no relatório fotográfico contido no apêndice D. É importante ressaltar que nas cavidades temperadas é nítida a aparição da ZAT, sendo que a mesma não foi considerada quando observada a espessura da camada branca.

#### 4.4 DEFEITOS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS

Devido a necessidade da utilização de parâmetros robustos para a obtenção da textura almejada, a camada gerada acaba sendo desuniforme, semelhante a obtida por parâmetros de desbaste. Ocorre a aparição de pontos com vazios e picos de material ressolidificado, além de uma elevada quantidade de trincas e poros, em ambas as cavidades. Estes defeitos e fragilizações podem ser observados na figura abaixo.

Figura 32 – Defeitos gerados pelo processo de eletroerosão.



Fonte: O autor, (2019).

Lee e Tai (2003), Amorim (2002) e Zeilmann (2011), afirmam que quando aplicadas condições de desgaste, observa-se uma maior espessura de camada afetada e formação de micro trincas, em decorrência da utilização de parâmetros mais robustos. Estas trincas ocorrem devido ao estresse térmico e tensão de tração no componente usinado, ambos ocasionados pelas descargas elétricas. Normalmente são do tamanho da zona que foi afetada pelo calor e se propagam na direção vertical, no sentido do material base. Segundo Cruz (2015), as trincas surgem do interior do material e se propagam em direção à superfície.

Na figura 32 é possível observar a ocorrência destas trincas que atravessam toda a camada afetada e chegam ao material base, como afirmado no parágrafo anterior. Também se constata a aparição de trincas que partem do material base no sentido da camada afetada, e a aparição de poros, confirmando o proposto pela literatura. Apesar dos defeitos aparecerem em grande quantidade, tanto no material normalizado, quanto no temperado, nota-se que as cavidades erodidas no aço normalizado apresentam um maior número de trincas e são mais desuniformes em comparação as feitas em aço temperado. Santos (2007) afirma que esta diferença no número de trincas geradas pode estar relacionada a microestrutura do material normalizado ser heterogênea em comparação a do material temperado que foi homogeneizada. Cruz (2015) afirma também que no material com grãos refinados, caso do material temperado, a espessura da camada branca é menor, e conseqüentemente a espessura das trincas são menores. Comprova-se então o comportamento do processo para ambas as configurações dos aços por meio dos resultados obtidos em comparação a bibliografia, conforme o demonstrado.

Segundo Oliniki (2009), as trincas são concentradores de tensões e podem ocasionar a falha catastrófica das cavidades de um molde por baixa resistência ao impacto de injeção ou fadiga térmica. A integridade superficial tem maior chance de estar comprometida principalmente quando as trincas ultrapassam a camada afetada e atingem o material base. Esse tipo de defeito é indesejado quando o foco é a durabilidade da peça usinada, principalmente por ser utilizada em um processo com carregamentos cíclicos como o de injeção de polímeros. Quando possível, a eliminação dos defeitos superficiais é realizada por processos subsequentes ao de eletroerosão. Estes processos eliminam a camada afetada e os defeitos contidos nela, porém os defeitos que atingiram o material base nem sempre são totalmente eliminados, podendo provocar futuras falhas na peça. Tendo em vista que a maioria das cavidades produzidas pela empresa Usimagi, tem a necessidade de manter a superfície com o acabamento obtido no processo de EDM (texturizada), os resultados obtidos neste estudo e o entendimento dos prejuízos causados pelos defeitos, são de suma importância para um correto *feedback* sobre o produto fornecido (molde de injeção plástica) pela empresa e para a avaliação de possíveis melhorias futuras.

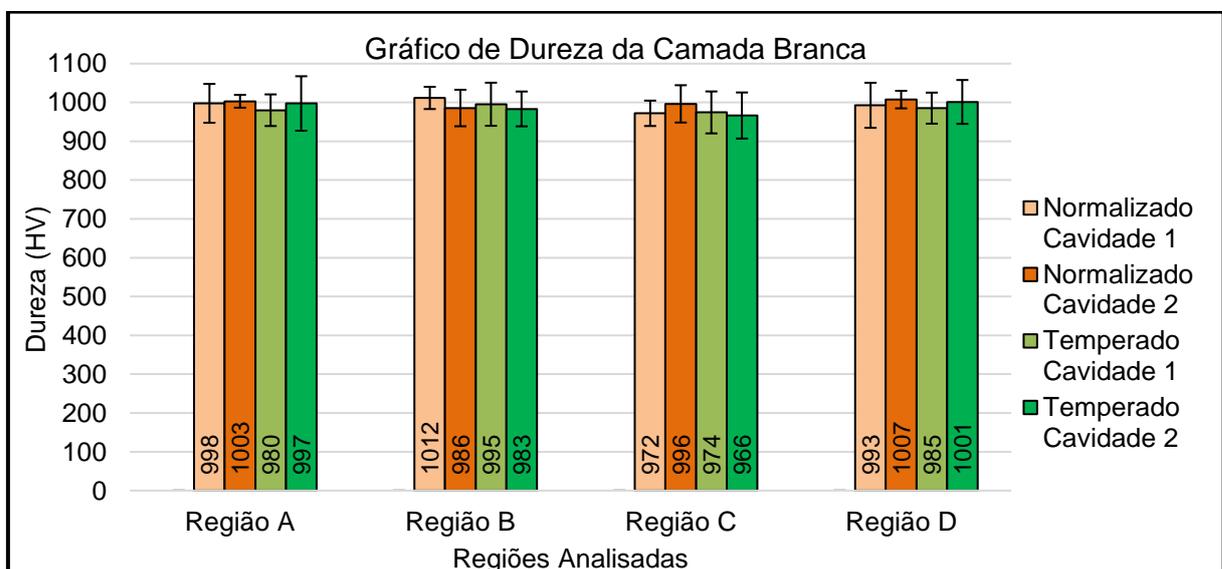
#### 4.5 DUREZA

Além das outras medições e análises apresentadas no decorrer deste capítulo, foi feita a medição da dureza por microindentação da camada afetada, com o intuito de complementar os resultados obtidos.

Os parâmetros apresentados neste trabalho para a realização da eletroerosão produziram uma camada branca no aço AISI H13 com espessura em torno de 0,02 mm. Para ser possível a correta medição da dureza, e para a obtenção de uma impressão compatível com a dimensão de camada gerada, foi utilizada uma carga de 0,025 Kgf (Quilograma força) no durômetro Vickers. Foram encontradas dificuldades na medição, uma delas foi a mínima distância entre o centro de cada impressão e a borda da peça, que é de 0,02 mm (para este caso) segundo a norma NBR NM 188-1. Outra dificuldade é a de posicionar o penetrador do durômetro, pois a camada afetada é na borda da amostra, e na maioria das vezes apresenta um leve arredondamento devido à dificuldade de preparação. Santos (2007), afirma que esse arredondamento da borda pode gerar deformações nas impressões, causando imprecisões nas leituras das medidas de dureza. Estas dificuldades podem ser observadas no experimento apresentado, principalmente pelos corpos de prova terem sido retirados da resina acrílica após a preparação, o que dificulta ainda mais a medição.

Em posse destas informações, as impressões foram feitas com a distância de 0,02 mm, procurando ficar dentro da faixa da camada branca. Os valores médios das medições de dureza obtidos para cada região e o desvio padrão dos mesmos são apresentados no gráfico da figura 33. Já os valores originais medidos são apresentados junto ao relatório das medições de dureza, incluso no apêndice E.

Figura 33 – Representação gráfica dos resultados de dureza.



Fonte: O autor, (2019).

Por meio dos resultados obtidos e levando em consideração as durezas dos corpos de prova normalizado de 237 HV (aproximadamente 20 HRC) e temperado de 543 HV (aproximadamente 52 HRC), verifica-se que a camada branca possui uma dureza muito superior quando comparada com o restante do material. Os valores médios encontrados são da ordem de 1000 HV (aproximadamente 69 HRC), não havendo distinções significativas entre os valores encontrados para o aço em estado temperado e normalizado e estando os valores em uma mesma faixa. Segundo Ramos (2016) e König e Klocke (1997), devido a temperatura atingida e o arrefecimento rápido, origina-se uma camada branca de elevada dureza. Quando exposto a estas condições, o material entra no domínio austenítico e após sofre um resfriamento forçado, gerando por consequência uma microestrutura martensítica, mesma que a gerada no processo de têmpera de aço. Para as camadas subsequentes (ZAT temperada e revenida), a alteração da dureza é originada pela dissipação do calor que foi gerado na superfície em direção ao núcleo do material. Outro fator que influencia na dureza é a difusão de carbono do fluido dielétrico para a peça, também devido a exposição á altas temperaturas, elevando ainda mais os valores de dureza resultantes. Este comportamento é corretamente observado nos resultados de dureza obtidos neste trabalho, confirmando o comportamento do aço quando submetido a eletroerosão e estando de acordo com as bibliografias consultadas, tendo uma faixa de valores satisfatórios e semelhantes aos encontrados nestas obras científicas estudadas.

## 5 CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, observou-se o comportamento do aço AISI H13 após ser submetido ao processo de eletroerosão por penetração, utilizando eletrodos de cobre. O estudo teve foco na avaliação da integridade superficial do material (AISI H13) normalizado e temperado, analisada mediante aos aspectos apresentados a seguir.

A aferição dos valores de rugosidade obtidos demonstrou que não houveram variações significativas da rugosidade Ra, Rmáx e Rz comparando-se as mesmas regiões de ambos materiais analisados. Porém pode-se observar que as cavidades obtidas em aço temperado tiveram valores de rugosidade sempre sobressalentes em comparação as mesmas feitas em aço normalizado. Também houveram mudanças nos valores de rugosidade com o aumento da profundidade das cavidades, podendo-se concluir que a piora da lavagem acarreta no aumento da rugosidade.

Quanto a textura gerada, não ocorreram modificações significativas entre as cavidades analisadas, podendo-se constatar uma homogeneidade na usinagem por eletroerosão realizadas, e estando dentro do padrão de textura que é amplamente utilizado pela empresa Usimagi.

Na camada afetada originada no processo de EDM, observou-se variações na dimensão resultante. As cavidades em aço normalizado apresentaram regiões com valores maiores de espessura em comparação ao material temperado, mesmo que em proporções que não configuram alterações significativas. Também foi observado o aumento na espessura da camada com o aumento da profundidade das cavidades usinadas. Tendo em vista estas informações obtidas e em confrontação a resultados de outros trabalhos estudados, conforme explanado no capítulo anterior, foi possível chegar a duas conclusões. Primeiramente concluiu-se que o processo de eletroerosão aplicado no aço AISI H13 normalizado gera uma maior camada branca em comparação ao mesmo aço em condição de temperado. Em segundo lugar foi possível concluir que com a piora da condição de lavagem na fenda de trabalho, há um aumento na espessura da camada branca.

Realizando a investigação e análise dos defeitos superficiais e subsuperficiais, constatou-se que há uma elevada ocorrência de trincas em todas as cavidades produzidas. Isso se deve a utilização de parâmetros de usinagem robustos, para a geração da textura almejada. Apesar de todas as cavidades apresentarem defeitos superficiais, as cavidades em aço normalizado apresentam um maior número de trincas, e heterogeneidade da camada afetada em comparação as cavidades obtidas no aço temperado. Concluiu-se então que quando submetido ao processo de EDM o aço AISI H13 normalizado, tem um pior desempenho no quesito defeitos superficiais, por gerar maior número de defeitos.

A partir dos valores obtidos no ensaio de dureza, foi possível comprovar as alterações metalúrgicas no aço AISI H13 derivadas da usinagem por EDM. Também foi possível evidenciar o aumento da dureza da camada branca, sendo assim o resultado do processo satisfatório e conforme o previsto pela literatura.

Em posse destes resultados obtidos, conclui-se que a realização da usinagem por eletroerosão no aço AISI H13 após o processo de tempera é a melhor opção, pois apresenta resultados mais satisfatórios em comparação ao mesmo aço em estado normalizado, principalmente se tratando da fabricação de cavidades para moldes de injeção de polímeros.

Conclui-se também que a remoção da camada afetada após o processo de EDM seria a melhor solução para a produção de cavidades de moldes com uma maior vida útil, principalmente por remover a maior parte das trincas geradas, estas que expostas a carregamentos cíclicos podem levar a falhas catastróficas. Porém em casos como o apresentado neste trabalho, onde há a necessidade da manufatura de peças com presença de textura obtida por eletroerosão, se possível, a solução mais coerente seria a utilização de parâmetros menos robustos, como os de acabamento, diminuindo-se então a rugosidade, textura, camada branca e os efeitos gerados, consequentemente aumentando a vida útil da peça.

Por intermédio deste estudo e investigação realizados, também foi possível ter conhecimento do comportamento e da qualidade superficial resultante em aplicações com estas características de material e parâmetros. Isto retornou para a empresa Usimagi a compreensão dos resultados obtidos em cavidades já fabricadas, e o correto entendimento do processo para a realização de trabalhos futuros, garantindo assim a importância deste estudo.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os estudos desta pesquisa foram direcionados ao aço AISI H13, que como já citado, é utilizado em grande escala na fabricação de moldes de injeção plástica. Tendo em vista as conclusões apresentadas, e para dar continuidade a esta linha de pesquisa, é possível sugerir alguns tópicos para ser abordados em trabalhos futuros e/ou complementares, visando a melhora dos resultados obtidos no processo de EDM e a qualidade dos moldes de injeção, sendo eles:

- a) A repetição desta análise utilizando diferentes parâmetros para o processo de eletroerosão;
- b) Utilizar os mesmos parâmetros desta pesquisa, porém modificando as condições de lavagem e analisar os resultados obtidos quanto a qualidade superficial e rendimento do processo de EDM;
- c) Fazer uso de outros métodos para análise da camada afetada pela eletroerosão, e a composição da mesma;
- d) Aplicar o conhecimento obtido na otimização dos parâmetros desta pesquisa e construção de cavidades de molde em aço AISI H13. Após submetê-las ao processo de injeção de polímero e realizar a comparação com as cavidades confeccionadas pelos parâmetros utilizados neste trabalho, com intuito de analisar a durabilidade e eventuais falhas que possam vir a ocorrer.
- e) Fazer a análise da camada afetada e do material base utilizando EDS e comparar teor de carbono encontrado nos mesmos.
- f) Por fim, analisar o efeito da eletroerosão sobre o eletrodo, quando utilizado os mesmos parâmetros propostos neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Fred Lacerda. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2002.

ARANTES, Luciano José. **Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM)**. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Minas Gerais, 2007.

CAMPOS, José Alexandre. **Avaliação experimental do desgaste de canto durante o processo de eletroerosão do AISI H13**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

CHIAVERINI, Vicente., **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**, 2. ed., São Paulo, SP: McGraw-Hill, 1986. 334 p. ISBN 978-0074500903.

CRUZ, Eli Jorge Junior. **A Influência do Tamanho de Grão Ferrítico da Peça na Integridade Superficial de Peças Erodidas**. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP). Ilha solteira, 2015.

DAUW, D. F.; VAN COPPENOLLE, B. On the evolution of EDM research - Part 2: From fundamental research to applied research. *In: International symposium for electromachining*, 11., 1995, Lousanne. Proceedings...Lousanne: EPFL, 1995, v. 2, p. 133-142.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras: Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores**. Porto Alegre, RS: EDIPUCRS, 2007. 60 p. ISBN 8574307025.

DIBITONTO, D. D.; EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A. Theoretical models of the electrical discharge machining process I. A simple cathode erosion model. **Journal of Applied Physics**, College Station, v. 66, ed. 9, p. 4095-4103, nov. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.343994>. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.343994>. Acesso em: 12 de setembro de 2018.

EKMEKCI, Bülent. White layer composition, heat treatment, and crack formation in electric discharge machining process. **Metallurgical and Materials Transactions**, Zonguldak, v. 40, ed. 1, p. 70-81, fev. 2009. ISSN 1543-1916. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9220-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-008-9220-0>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

FERREIRA, Hélia Henriques. **Importância do estudo em Microscopia Eletrônica de Varrimento de amostras incluídas em parafina para fins de diagnóstico**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Biomédicas) - Universidade Técnico Lisboa. Lisboa, 2016.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, ed. 1, p. 133-145, 2002. ISSN 0924-0136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000602>. Acesso em: 7 de outubro de 2018.

GRIFFITHS, Brian. **Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance**. New York: Taylor & Francis Books, 2001. 256 p. ISBN 156032970X.

GUITRAU, E. Bud. **The EDM Handbook**. 1. ed. USA: Hanser Gardner Publications, v.305, 1997. 312 p. ISBN 978-1569902424.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; ECHLIN, P.; JOY, D. C.; ROMIG Jr., A. D.; LYMAN, C. E.; FIORI, C.; LIFSHIN, E. **Scanning Electron Microscopy and x-ray Microanalysis: A text for Biologists, Materials Scientists, and Geologists**. 2. ed. New York: Springer US, 1992. 840 p. ISBN 978-1-4612-7653-1.

HIOKI, Daniel. **Influência dos parâmetros de corte HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido**. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art Electrical Discharge Machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 13, p. 1287-1300, 2003. ISSN 0890-6955. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503001627> . Acessado em 12 de setembro de 2018.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia de Fabricação**. Tradução: Dr. Eng. Walter Lindolfo Weingaertner. Springer Berlin, v. 3, 1997. 390 p. Título original: Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung. ISBN 978-3-540-23492-0.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B.L. Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, ed. 8, p. 3675-3687, abril 2009. ISSN 0924-0136 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360800705X>. Acessado em 20 de setembro de 2018.

KUNIEDA, M.; LAUWERS, B.; RAJURKAR, K. P.; SCHUMACHER, B. M. Advancing EDM through fundamental insight into the process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, ed. 2, p. 64-87, 2005. ISSN 0007-8506. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600201>. Acessado em 20 de setembro de 2018.

LEE, H. T.; HSU, F. C.; TAI, T. Y. Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode. **Materials Science and Engineering A364**, v. 364, ed. 1-2, p. 346-356, jan. 2004. ISSN 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.046>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509303007548>. Acessado em 15 de setembro de 2018.

LEE, H. T.; TAI, T. Y. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142, ed. 3, p 676-683, dez. 2003. ISSN 0924-0136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00688-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00688-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603006885>. Acessado em 15 de setembro de 2018.

MARADIA, U.; FILISETTI, E.; BOCCADORO, M.; ROTEN, M.; DUTOIT, J. M.; HENGESBERGER, S. Increasing the injection moulding productivity through EDM surface modulation. **Procedia CIRP**, v. 68, p.58–63, 2018. ISSN 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117309630>. Acessado em 15 de outubro de 2018.

MOREIRA, Catarina, **Microscópio ótico**. Revista de Ciência Elementar, v.1, ed.1. Porto, Portugal: EDULOG, 2013. 84 p. ISSN 2183-1270

MUTHURAMALINGAM, Thangaraj. Measuring the influence of discharge energy on white layer thickness in electrical discharge machining process. **Measurement**, v. 131, ed. 1, p. 694-700, jan. 2019. ISSN 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.038>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118308728>. Acesso em: 7 de setembro de 2018.

OLINIKI, Ricardo, **Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido**. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

OLIVEIRA, Claudinei José de. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

RAJURKAR, K. P.; YU, Z. Y. 3D micro-EDM using CAD/CAM. **Ann CIRP**, v.49, ed.1, p.127–130, 2000. ISSN 0007-8506. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62911-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62911-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607629114>. Acesso em: 4 de setembro de 2018.

RAJURKAR, K. P.; SUNDARAM, M. M.; MALSHE, A. P. Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. **Ann CIRP**, v. 6, ed. 0, p.13–26, 2013. ISSN 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113000760>. Acesso em: 18 de agosto de 2018.

RAMOS, Gisela Filipa da Silva. **Efeito da Maquinagem por Eletroerosão no Comportamento à Fadiga do Aço AISI D2**. 340 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto. Porto, 2016.

SABBO, João Nascimento de Bivar Mello. **Análise do Estado Superficial de Aços no Processo de Eletroerosão**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto. Porto, 2017.

SANTOS, Irapuan. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2010.

SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. A State-of-the-Art Review on Roughness Quantification Methods for Concrete Surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 38, ed. 0, p. 912-923, jan. 2013. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.045>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812007076>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

SODRÉ, D. A.; MORAIS, W. A. Análise Experimental da Influência do Tratamento Térmico na Usinagem por Eletroerosão de Aços Ferramenta. **Unisanta Science & Technology**, v. 6, n. 1, p. 6-16, jul. 2017. ISSN 2317-1316. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/318340836\\_Experimental\\_Analysis\\_of\\_the\\_Influence\\_of\\_Thermal\\_Treatment\\_on\\_Electrical\\_Discharge\\_Machining\\_of\\_Tool\\_Steels](https://www.researchgate.net/publication/318340836_Experimental_Analysis_of_the_Influence_of_Thermal_Treatment_on_Electrical_Discharge_Machining_of_Tool_Steels). Acesso em: 1 de setembro de 2018.

SCHUMACHER, B.M.; DAUW, D. F. Milestones of worldwide EDM research activities. *In: International Symposium for Electromachining*, 9., 1989, Nagoya, Proceedings...Nagoya: The Japan Society of Electrical-Machining Engineers, 1989, v.1, p. 240-254.

SCHUMACHER, Bernd M., After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, ed. 1-3, p. 376–381, jun. 2004. ISSN 0924-0136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604001839>. Acesso em: 17 de setembro de 2018.

WHITEHOUSE, D. J. **Surfaces and Their Measurement**. Londres, Elsevier, 2004. 432 p. ISBN 978-1-903996-01-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-903996-01-0.X5000-2>.

YANG, Y. Y.; FANG, H. S.; HUANG, W. G. A study on wear resistance of the white layer, **Tribology International**, vol. 29, ed. 5, p. 425-428, agosto 1996. ISSN 0301-679X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00099-P](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00099-P). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301679X9500099P>. Acesso em: 20 de setembro de 2018.

ZEILMANN, R. P.; ZANOTTO, M. C.; SANGALLI, R. V.; VACARO, T.; BORDIN, F. Estudo da Qualidade Superficial de Cavidades Eletroerodidas em Aço. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; CZARNOBAY M. Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by EDM. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.18, n.04, p.1541-1548, dezembro 2013. ISSN 1517-7076. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762013000400014>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762013000400014](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762013000400014). Acesso em: 10 de setembro de 2018.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M. Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii, **Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 1, p. 93-104, março 2014. ISSN 1806-3691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0159-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-014-0159-6>. Acesso em: 02 de setembro de 2018.

## APÊNDICE A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO AISI H13



**DIFERRO AÇOS ESPECIAIS LTDA - CERTIFICADO DE QUALIDADE**

Caxias do Sul - RS  
RUA COMEND PIETRO ZANELLA, 1245  
FONE: 3224 7600  
FAX: 54 3224 - 7862  
email: recebimento.cxs@diferro.com.br

JOINVILLE - SC  
RUA OTTOKAR DOERFFEL, 1112 GALPAO CI-49  
FONE: 47 2101-1700  
FAX: 47 3438-0504  
email: recebimento.joi@diferro.com.br

CACHOEIRINHA - RS  
RUA MANOEL JOSÉ DO NASCIMENTO, 701  
FONE: 51 3303-7600  
FAX:  
email: recebimento.poa@diferro.com.br

**Cliente:** USIMAGI INDUSTRIA METALURGICA LTDA  
**Customer**  
**OC/Purchase:** 7006020A  
**Pedido:** 1050859                      **Nota Fiscal:** 0278663  
**Order**    **Invoice**

**Produto|Especificação / Product|Specification:** SAE/AISI H13 DIN 1.2344 (D) - 30 x 65 x 85 mm .2 UN  
**Peso / Weight(Kg) :** 2,6688

<b>% C</b>	<b>% Mn</b>	<b>% Si</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Cr</b>
0,390	0,340	1,020	0,011	0,001	0,050	5,140
<b>% Ni</b>	<b>% Sn</b>	<b>% Mo</b>	<b>% Al</b>	<b>% Pb</b>	<b>% W</b>	<b>% Ti</b>
0,040		1,330	0,000		0,010	0,000
<b>% Co</b>	<b>% V</b>	<b>% Nb</b>	<b>% B</b>	<b>% N</b>		
0,000	0,950					

**Corrida/Heat:** 17104056354

**Norma:** AISI H13  
**Standard**

**Tratamento Térmico:** RECOZIDO  
**Heat Treatment**

**LRT(MPa):**  
**Tensile Strength**  
**LE(MPa):**  
**Yield Strength**  
**AL(%):**  
**Enlogation**  
**Dureza:** 226,00 HB  
**Hardness**

**Observações / Remarks:**

16.01.2019

Cristiano Brunetto  
Assist Técnica

Certificamos que os produtos aqui relacionados foram ensaiados e aprovados conforme a norma ou especificação requerida.  
We Hereby certify that material here in listed was inspected, tested and approved in accordance with the standard of the especificatrion required.

**APÊNDICE B – CERTIFICADO DE DUREZA APÓS PROCESSO DE TÊMPERA**

TECNOVACUM TRATAMENTO TÉRMICO LTDA  
Fone: (54) 3013 4888  
*Etiqueta de Liberação*  
Embalagem:  
Cliente: USIMAGI  
Nº OS: 19153 Divisão: 0  
Referência: H13  
Quantidade: 2 Unid.: UN  
Dureza: 32 HRC

Fonte: *Tecnovacum Tratamento Térmico*, (2019).

## APÊNDICE C – RELATÓRIO DE RUGOSIDADE CORPOS DE PROVA

(Continua)

	<b>Relatório Dimensional</b> LNTP (FG 201 rev. 01) Laboratório de Novas Tecnologias de Produção Caxias do Sul – RS – Telefone/Fax: (54) 3218.2168	<b>LNTP</b> <b>UCS</b>									
Cliente: <b>TCC GIOVANNI FAORO</b> Endereço: <b>UCS - BLOCO D - SALA 120</b> Cidade: <b>CAXIAS DO SUL - RS</b>	<b>Nº : 000X1/19</b>										
<b>Natureza do trabalho: VERIFICAÇÃO DE RUGOSIDADE</b>		Data de emissão: 02/04/19 Temp. ambiente: 24 °C									
Informação do item de ensaio fornecido pelo cliente: <span style="float: right;">Fl: 1 de 1</span> <b>02 PEÇAS DE AÇO H13 COM CAVIDADES USINADAS POR ELETROEROSÃO IDENTIFICADAS POR:</b> <b>01 – NORMALIZADA (LADO 1 E 2 - REGIÃO A, B, C, D)</b> <b>02 – TEMPERADA (LADO 1 E 2 – REGIÃO A, B, C, D).</b>											
Procedimento: - Método de ensaio conforme procedimento LNTP-PE 005 - rev.: 00. <span style="float: right;">Data do ensaio: 02/04/19</span> Equipamentos utilizados: - Equip. utilizado: Rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest SJ-301; certificado de calibração nº: 2018/033112, validade: 27/08/21.											
<small>A incerteza expandida de medição relatada "U" é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos [Veff] corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402 [1999]. Os valores de k estão apresentados na tabela de resultados.</small>											
<b>RESULTADOS:</b>											
Medição Nº	Tipo	Leitura (µm)					Média (µm)	Desvio Padrão (µm)	U (µm)	K	Cut-Off Utilizado (mm)
		1	2	3	4	5					
01-L1-A	Ra	4,54	4,02	4,17	4,59	4,16	4,30	0,25	0,10	2,00	0,80
	Ry	25,15	25,01	29,21	27,74	22,47	25,92	2,82	0,80	2,00	
	Rz	21,62	21,53	22,46	22,91	21,50	22,00	0,64	0,80	2,00	
01-L1-B	Ra	4,55	3,92	3,67	4,41	4,22	4,15	0,36	0,10	2,00	0,80
	Ry	26,89	26,58	24,84	23,41	25,48	25,44	1,40	0,80	2,00	
	Rz	23,90	21,64	19,69	21,60	23,04	21,97	1,61	0,80	2,00	
01-L1-C	Ra	4,20	3,73	4,50	4,33	3,78	4,11	0,34	0,10	2,00	0,80
	Ry	27,73	24,56	26,02	25,90	28,49	26,54	1,57	0,80	2,00	
	Rz	21,90	19,56	22,29	21,51	22,27	21,51	1,13	0,80	2,00	
01-L1-D	Ra	4,23	4,34	4,89	4,96	3,89	4,46	0,45	0,10	2,00	0,80
	Ry	31,56	26,03	27,75	31,18	24,52	28,21	3,11	0,80	2,00	
	Rz	22,49	22,28	24,24	25,67	21,19	23,17	1,77	0,80	2,00	
01-L2-A	Ra	4,41	3,70	4,01	3,58	3,79	3,90	0,33	0,10	2,00	0,80
	Ry	30,72	28,00	26,17	28,04	25,52	27,69	2,08	0,80	2,00	
	Rz	24,06	22,02	20,81	20,15	21,15	21,64	1,51	0,80	2,00	
01-L2-B	Ra	4,71	4,86	4,52	3,81	4,24	4,43	1,51	0,10	2,00	0,80
	Ry	35,66	31,57	32,13	25,05	27,26	30,33	4,20	0,80	2,00	
	Rz	26,58	26,77	25,52	21,07	21,98	24,38	2,67	0,80	2,00	
01-L2-C	Ra	4,28	4,16	4,33	3,99	4,71	4,23	0,37	0,10	2,00	0,80
	Ry	36,58	29,43	33,56	25,34	34,96	31,97	4,56	0,80	2,00	
	Rz	24,93	23,57	23,69	20,23	24,27	23,34	1,82	0,80	2,00	
01-L2-D	Ra	4,62	5,11	3,24	4,27	4,37	4,32	0,69	0,10	2,00	0,80
	Ry	23,45	40,51	24,14	26,06	28,28	28,49	6,98	0,80	2,00	
	Rz	22,27	26,76	20,07	23,23	24,73	23,41	2,52	0,80	2,00	
02-L1-A	Ra	4,58	3,45	4,24	4,88	4,89	4,41	0,60	0,10	2,00	0,80
	Ry	30,55	29,81	24,95	27,18	31,85	28,83	2,72	0,80	2,00	
	Rz	23,66	20,73	21,89	24,00	24,65	22,99	1,62	0,80	2,00	
02-L1-B	Ra	4,34	4,36	4,01	4,21	4,86	4,36	0,31	0,10	2,00	0,80
	Ry	29,11	28,13	24,37	28,66	30,47	28,15	2,28	0,80	2,00	
	Rz	23,45	23,34	20,29	22,65	24,01	22,75	1,46	0,80	2,00	

(Conclusão)

Medição Nº	Tipo	Leitura ( $\mu\text{m}$ )					Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )	U ( $\mu\text{m}$ )	K	Cut-Off Utilizado (mm)
		1	2	3	4	5					
02-L1-C	Ra	4,20	4,95	5,23	4,11	4,68	4,63	0,48	0,10	2,00	0,80
	Ry	27,54	37,25	30,25	27,05	34,12	31,24	4,38	0,80	2,00	
	Rz	20,87	27,59	25,80	22,88	23,89	24,17	2,62	0,80	2,00	
02-L1-D	Ra	4,12	4,21	5,25	5,20	4,69	4,69	0,53	0,10	2,00	0,80
	Ry	26,43	33,38	33,53	25,56	36,84	31,15	4,91	0,80	2,00	
	Rz	21,45	22,72	28,38	23,33	26,46	24,47	2,86	0,80	2,00	
02-L2-A	Ra	4,01	4,46	4,42	4,68	4,29	4,37	0,25	0,10	2,00	0,80
	Ry	31,97	25,05	28,14	33,82	25,54	28,90	3,88	0,80	2,00	
	Rz	21,73	21,59	22,23	25,51	21,91	22,59	1,65	0,80	2,00	
02-L2-B	Ra	4,29	4,59	3,88	3,59	3,85	4,04	0,40	0,10	2,00	0,80
	Ry	25,54	29,46	26,72	28,70	23,84	26,85	2,29	0,80	2,00	
	Rz	21,91	23,05	22,64	20,53	18,83	21,39	1,72	0,80	2,00	
02-L2-C	Ra	4,48	4,56	4,18	5,53	4,06	4,56	0,58	0,10	2,00	0,80
	Ry	28,23	26,92	30,58	29,86	28,26	28,77	1,45	0,80	2,00	
	Rz	22,75	23,79	23,93	27,44	22,22	24,03	2,04	0,80	2,00	
02-L2-D	Ra	4,20	5,39	4,60	5,09	4,32	4,72	0,61	0,10	2,00	0,80
	Ry	27,27	30,74	29,17	31,21	30,27	29,73	1,57	0,80	2,00	
	Rz	22,76	27,66	24,76	26,96	25,11	25,45	1,94	0,80	2,00	

**Observações:**

- Ra = Rugosidade Aritmética, Rz = Rugosidade máxima média ISO 4287:2002, Ry = Rugosidade máxima ISO 4287:2002.
- Padrão de referência utilizado para verificação/ajuste do equipamento, (Ra): 2,94  $\mu\text{m}$ .
- Os resultados têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo autorizado reprodução parcial deste documento.
- O critério de amostragem adotado foi determinado pelo cliente sobre o qual assume a responsabilidade.
- Verificações realizadas conforme norma ABNT NBR ISO 4288:2008.

José Adair de O. Giubel  
Eng. Materiais CREA RS215725  
Signatário Autorizado

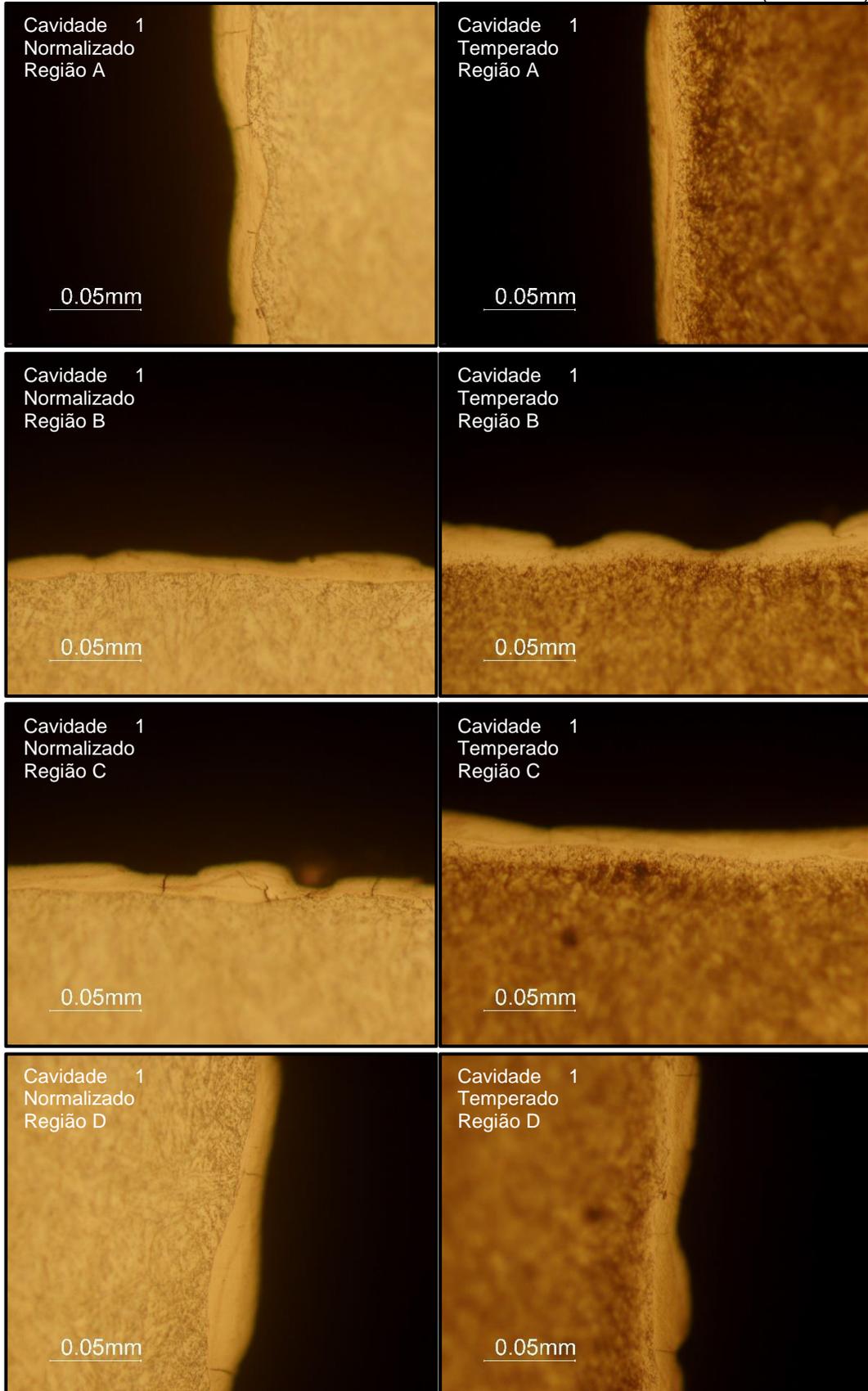
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

---

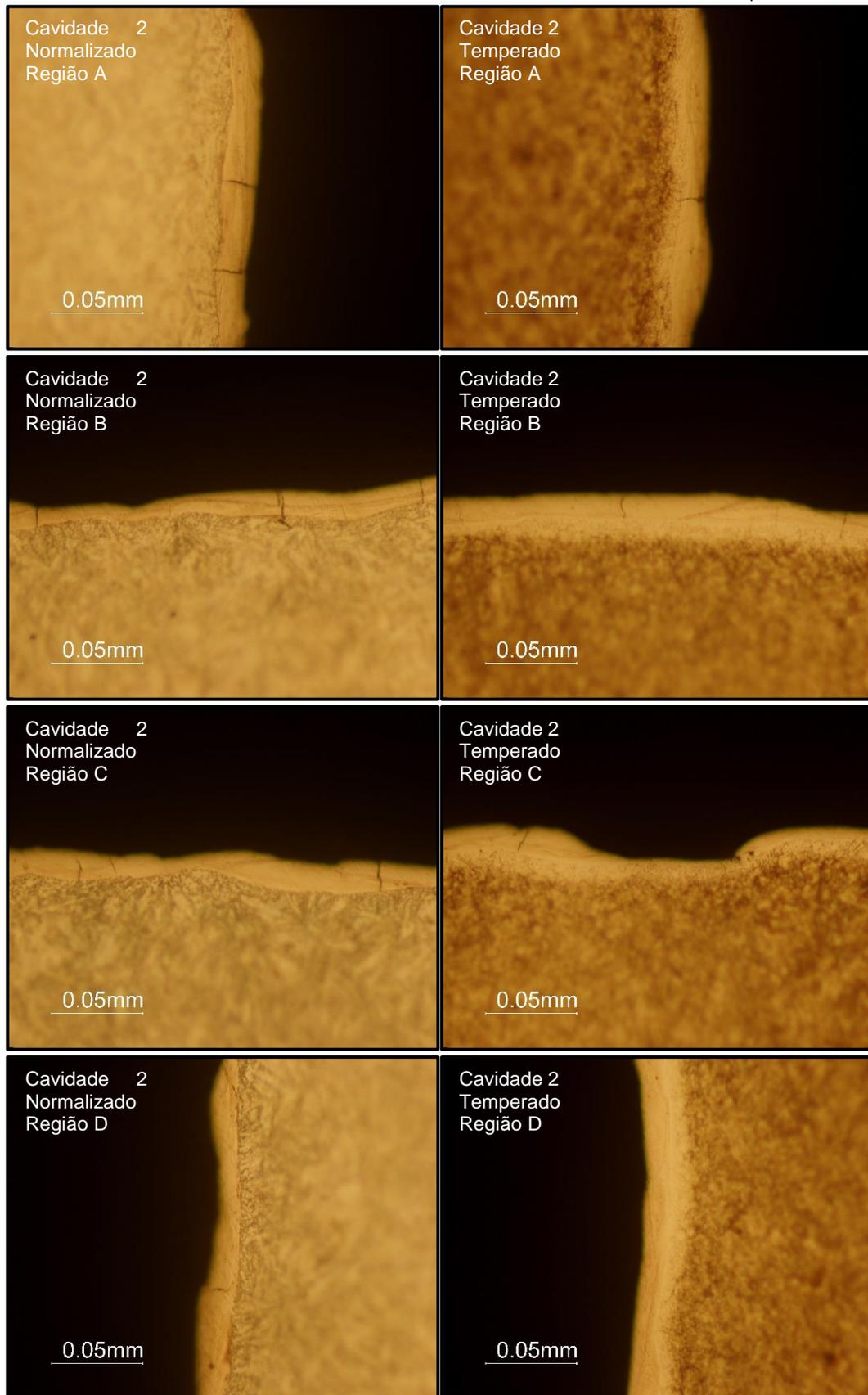

 UCS Serviços Tecnológicos | Universidade de Caxias do Sul | Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 | CEP: 95070-560 |  
 Caxias do Sul-RS | Bloco D | Sala 101  
 Telefone: (54) 3218.2100 ou (54) 3218.2168 | email: lamec@ucs.br | http://www.ucs.br/site/servicos-tecnologicos/lamec

# APÊNDICE D – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DAS MICROESTRUTURAS DOS CORPOS DE PROVA

(Continua)



(Conclusão)



Fonte: O autor, (2019).

## APÊNDICE E – RELATÓRIO DE DUREZA DA CAMADA BRANCA

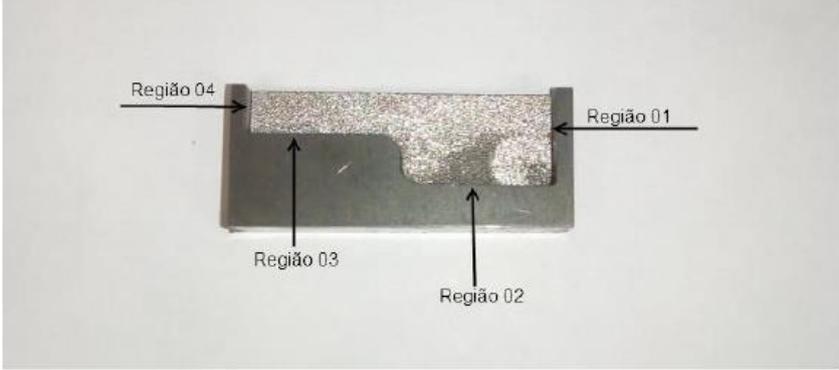
(Continua)

Relatório de Dureza HV			
<b>Carga Utilizada:</b>	245,2 mN	0,025 Kg	01/07/19
<b>Aluno:</b>	Giovanni Faoro		
Amostra TEMP 01			
Região 01		Região 02	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância:	Dureza (HV):
0,02	973	0,02	913
0,02	953	0,02	1015
0,02	1030	0,02	995
Região 03		Região 04	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância (mm):	Dureza (HV):
0,02	983	0,02	975
0,02	947	0,02	1023
0,02	1056	0,02	942
Amostra TEMP 02			
Região 01		Região 02	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância (mm):	Dureza (HV):
0,02	1043	0,02	899
0,02	1024	0,02	1011
0,02	937	0,02	989
Região 03		Região 04	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância (mm):	Dureza (HV):
0,02	955	0,02	1012
0,02	960	0,02	921
0,02	1035	0,02	1059
Amostra NORM 01			
Região 01		Região 02	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância (mm):	Dureza (HV):
0,02	994	0,02	984
0,02	1050	0,02	997
0,02	934	0,02	935
Região 03		Região 04	
Distância (mm):	Dureza (HV):	Distância (mm):	Dureza (HV):
0,02	987	0,02	1048
0,02	1043	0,02	948
0,02	1005	0,02	997

(Conclusão)

<b>Amostra NORM 02</b>			
<b>Região 01</b>		<b>Região 02</b>	
<b>Distância (mm):</b>	<b>Dureza (HV):</b>	<b>Distância (mm):</b>	<b>Dureza (HV):</b>
0,02	1005	0,02	1043
0,02	986	0,02	947
0,02	1031	0,02	999
<b>Região 03</b>		<b>Região 04</b>	
<b>Distância (mm):</b>	<b>Dureza (HV):</b>	<b>Distância (mm):</b>	<b>Dureza (HV):</b>
0,02	997	0,02	1020
0,02	1026	0,02	1002
0,02	934	0,02	987



Fonte: LAMEC- Laboratório de Ensaio Mecânicos - UCS, (2019).