

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DANIEL ALVES SODRÉ**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA USINAGEM EM**  
**ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO NOS AÇOS ABNT NM 122 GRAU D2 E**  
**ABNT NM 122 GRAU O1**

**SANTOS/SP**

**2017**

**DANIEL ALVES SODRÉ**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA USINAGEM EM  
ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO NOS AÇOS ABNT NM 122 GRAU D2 E  
ABNT NM 122 GRAU O1**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do: Prof. Me. Willy Ank de Moraes

**SANTOS/SP**

**2017**

Autorizo a reprodução parcial ou total, deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

671 Sodré, Daniel Alves.  
S663i Influência do tratamento térmico na usinagem em  
eletroerosão por penetração nos aços ABNT NM 122 GRAU D2  
e ABNT NM 122 grau 01 / Daniel Alves Sodré.  
-- 2017.  
75. de f.

Orientador: Prof. Me. Willy Ank de Moraes

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
Santos,  
SP, 2017.

1. Eletroerosão por penetração. 2. Usinagem. 3.  
Tratamento Térmico. I. Sodré, Daniel Alves II. Moraes,  
Willy Ank de. III. Título.

*Aos meus avós João Alves de Oliveira e  
Vicentina Alves da Rocha Oliveira, que nos  
fazem muita falta.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, por me mostrar os caminhos e por estar comigo nos momentos de conquista.

Ao Prof. Me. Willy Ank de Moraes, pelo exemplo de profissionalismo, pelo apoio e orientação durante a execução deste trabalho.

A todos os docentes e colegas de sala do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UniSanta, que sem dúvida contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas Professores, Instrutores e à Direção da Escola SENAI “Manuel Garcia Filho” pela ajuda durante a execução dos experimentos.

À Escola SENAI “Nadir Dias Figueiredo”, em especial ao colega Edson Togni pela ajuda com as análises no Microscópio Eletrônico de Varredura.

Aos colegas Professores do Centro Universitário Anhanguera de Santo André - UniA pelo apoio e incentivo.

Ao amigo Gustavo Paes Rangel pela ajuda nas análises de resistividade.

Aos meus pais, Gumercindo e Angelina e à minha irmã Silvana por terem me encorajado em mais esta caminhada.

À Vanessa Samara Alves, por me tranquilizar, amparar e aconselhar.

Ao amigo Eduardo Tramontina pelo incentivo e parceria durante o curso de mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

Faça as coisas o mais simples que você puder,  
porém não se restrinja às mais simples.  
(Albert Einstein)

## RESUMO

A eletroerosão por penetração é considerada um processo de fabricação não convencional sendo utilizado na usinagem de materiais condutores, permitindo a confecção de componentes metálicos nas mais variadas condições de tratamento termo mecânico e durezas. A tecnologia de usinagem por descargas elétricas é um dos principais processos utilizados pela indústria de ferramentaria, tendo em vista que características como a precisão dimensional, rugosidade e integridade superficial interferem diretamente na qualidade de seus componentes. Entretanto, as tabelas e fórmulas tecnológicas empregadas para a regulagem das máquinas e execução deste processo não consideram o tratamento térmico ou a dureza das peças como uma variável. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento dos aços ABNT NM 122 grau D2 e ABNT NM 122 grau O1 com e sem tratamento térmico de têmpera e revenimento usinados por eletroerosão. Foram avaliadas além das características relacionadas a aplicação final das peças como: dimensão, dureza e rugosidade, também foi investigada a interferência do tratamento térmico sobre a resistência elétrica das amostras e a sua correlação com os resultados encontrados. Observou-se uma variação dimensional, de rugosidade e integridade superficial entre as amostras indicando que as alterações de resistência elétrica causadas pelo tratamento térmico interferem nos resultados de peças usinadas pelo processo de eletroerosão.

**Palavras-chave:** Eletroerosão por penetração. Usinagem. Tratamento Térmico.

## ABSTRACT

The electrical discharge machining is considered an unconventional manufacturing process being used in the machining of conductive materials, allowing the preparation of metallic components in the most varied conditions of heat treatment and hardness. Electrical discharge machining technology is one of the main processes used by the tooling industry, since characteristics such as dimensional accuracy, roughness and surface integrity directly interfere with the quality of its components. However, the tables and technological formulas used for the regulation of machines and the execution of this process do not consider the heat treatment or the hardness of the parts as a variable. In this way, the objective of this work is to evaluate the behavior of ABNT NM 122 degree D2 and ABNT NM 122 degree O1 with and without heat treatment of quenched and tempered and machined by electrical discharge machining. It was evaluated besides the characteristics related to the final application of the pieces as: size, hardness and roughness, it was also investigated the interference of the heat treatment on the electrical resistance of the samples and their correlation with the results found. It was observed a dimensional variation, roughness and surface integrity between the samples indicating that the changes of electrical resistance caused by the heat treatment interfere in the results of parts machined by the process of electrical discharge machining.

**Keywords:** EDM by penetration. Machining. Heat Treatment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática de uma máquina de eletroerosão por penetração. ....	17
Figura 2 – Representação básica de uma superfície usinada por <i>EDM</i> demonstrando os dois principais aspectos e seus fatores de influência. ....	19
Figura 3 – Representação da peça e do eletrodo ferramenta. ....	19
Figura 4 – Fases de uma descarga elétrica durante o processo de eletroerosão. ....	21
Figura 5 – Fases da descarga elétrica. ....	22
Figura 6 – Representação esquemática da (a) eletroerosão por penetração ....	24
Figura 7 – Exemplo de produtos usinados através da eletroerosão por penetração. ....	24
Figura 8 – Exemplo de peça sendo usinada por eletroerosão por penetração. ....	25
Figura 9 – Típicas aplicações da EDM por penetração. ....	26
Figura 10 – Evolução da tensão e corrente durante o ciclo de uma descarga. ....	27
Figura 11 – Representação de uma tabela Tecnológica fornecida pelo fabricante. ....	28
Figura 12 – Ciclos de têmpera para os aços SAE 1060 e AISI D2. ....	39
Figura 13 – Rugosidade média ( $R_a$ ). ....	43
Figura 14 – Rugosidade máxima ( $R_y$ ). ....	44
Figura 15 – Rugosidade total. ....	44
Figura 16 – Rugosidade média ( $R_z$ ). ....	45
Figura 17 – Fluxograma do procedimento experimental. ....	46
Figura 18 – Representação das barras para retirada dos Corpos de Prova. ....	48
Figura 19 – Laboratório de tratamento térmico. ....	49
Figura 20 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU D2 como recebido (b) aço ABNT NM 122 GRAU D2 com tratamento térmico; (c) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 com tratamento térmico e (d) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 como recebido. ....	49
Figura 21 – Eletrodo ferramenta. ....	50
Figura 22 – (a) Máquina de eletroerosão modelo ZNC 400; (b) sistema de fixação das peças; (c) alinhamento do eletrodo ferramenta. ....	52
Figura 23 – Dados da tabela tecnológica fornecida pelo fabricante. ....	53
Figura 24 – Máquina tridimensional de medir. ....	54
Figura 25 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201. ....	55
Figura 26 – Durômetro portátil TIME GROUP INC TH 160. ....	56
Figura 27 – Estereoscópio binocular ZTX-E. ....	56

Figura 28 – Microscópio Eletrônico de Varredura. ....	57
Figura 29 – Ilustração dos pontos de análise da dureza e da integridade superficial. .....	57
Figura 30 – Medição da resistência.....	58
Figura 31 – Medição da resistência.....	58
Figura 32 – Variação da dureza dentro e fora do canal usinado. ....	60
Figura 33 – Presença da Camada branca nos CPs Aço O1 (30x). ....	61
Figura 34 – Presença da Camada branca nos CPs Aço D2 (30x). ....	62
Figura 35 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU D2 sem tratamento térmico; (b) Aço ABNT NM 122 GRAU D2 com tratamento térmico. ....	63
Figura 36 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU O1 sem tratamento térmico; (b) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 com tratamento térmico. ....	64
Figura 37 – Variação da rugosidade máxima.....	66
Figura 38 – Variação da rugosidade média.....	66
Figura 39 – Variação dimensional entre as peças que foram usinadas com tratamento térmico e as sem tratamento térmico. ....	67
Figura 40 – Relação entre a dureza e a dimensão do canal usinado.....	69
Figura 41 – Relação entre a dureza e rugosidade do canal usinado. ....	70
Figura 42 – Variação da Resistência Elétrica entre as amostras. ....	71
Figura 43 – Relação entre resistência elétrica e largura do canal usinado. ....	72
Figura 44 – Relação entre resistência elétrica e a rugosidade do canal usinado.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação básica dos aços ferramenta. ....	34
Tabela 2 – Composição química dos aços ABNT NM 122 GRAU D2 e ABNT NM 122 GRAU O1. ....	47
Tabela 3 – Propriedades físicas do cobre eletrolítico. ....	50
Tabela 4 – Características técnicas da Eletroerosão Eletro ZNC 400. ....	51
Tabela 5 – Faixa de dureza dos corpos de prova. ....	59
Tabela 6 – Valores de resistência elétrica. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDM	Electrical Discharge Machining /Usinagem por Descargas Eléctricas
GAP	Comprimento da centelha / Distância entre o eletrodo e a peça
ZTE	Zona Termicamente Afetada
Ra	Rugosidade média ( $\mu\text{m}$ )
Ry	Rugosidade máxima ( $\mu\text{m}$ )
Rt	Rugosidade total ( $\mu\text{m}$ )
Rz	Rugosidade média ( $\mu\text{m}$ )
Cp	Corpo de prova
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
A	Corrente (A)
On	Tempo de descarga ( $\mu\text{s}$ )
Ie	Corrente durante a descarga (A)
TS	Transistor Standard / Densidade de corrente
DC	Tempo de Pausa (%)
Mfd	Medida final de desbaste (mm)
Mfa	Medida final de acabamento (mm)
Cs	Coefficiente de segurança

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\hat{U}_i$ - tensão em aberto	[V]
$\overline{U}_e$ - tensão média da descarga	[V]
U - tensão média de trabalho	[V]
$t_d$ - tempo de retardo de ignição	[ $\mu$ s]
$t_e$ - duração da descarga	[ $\mu$ s]
$t_i$ - duração do pulso de tensão	[ $\mu$ s]
$t_o$ - tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão $t_i$	[ $\mu$ s]
$t_p$ - tempo de período do ciclo de uma descarga	[ $\mu$ s]
$\hat{I}_e$ - corrente máxima durante a descarga	[A]
$i_e$ - corrente média durante a descarga	[A]
$\bar{\delta}$ - relação de contato	[ $\mu$ s]
Vw - Taxa de remoção de material	[mm <sup>3</sup> /min]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	Eletroerosão - definição .....	17
2.2	Tipos de eletroerosão .....	23
2.3	A definição dos parâmetros de usinagem no processo de eletroerosão.....	26
<b>3</b>	<b>FERRAMENTARIA</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>AÇOS-FERRAMENTA</b> .....	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>TRATAMENTO TÉRMICO</b> .....	<b>37</b>
5.1	O tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões .....	41
5.2	O tratamento de têmpera .....	41
5.3	O tratamento de revenimento .....	42
<b>6</b>	<b>RUGOSIDADE</b> .....	<b>43</b>
6.1	Parâmetros de Rugosidade .....	43
<b>7</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>46</b>
7.1	Corpos de prova (eletrodo peça) .....	47
7.2	Eletrodo Ferramenta .....	49
7.3	Máquina de eletroerosão .....	51
7.4	Análise dimensional .....	54
7.5	Análise da rugosidade .....	54
7.6	Análise da integridade superficial .....	55
7.7	Análise da resistência elétrica.....	58

<b>8</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
8.1	Resultado da análise da integridade superficial na região usinada .....	59
8.1.1	Resultado da análise da dureza.....	59
8.1.2	Resultado da análise da integridade superficial.....	61
8.1.3	Resultado da análise da rugosidade.....	65
8.2	Resultado da análise dimensional .....	67
8.3	A influência do tratamento térmico na usinagem .....	69
8.4	Análise da resistência elétrica.....	70
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
9.1	Sugestão de Trabalhos Futuros.....	73
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por descargas elétricas (Electrical Discharge Machining - EDM) ou eletroerosão por penetração é muito utilizado na indústria de ferramentaria para construção de moldes e matrizes de geometrias complexas, tendo em vista que a usinagem pelos processos convencionais não seria viável (LIMA, 2008, JOSHI, KOTHIYA, 2012). Esses componentes, fabricados pelo processo de EDM, são empregados como ferramentas e entram na confecção dos mais variados tipos de produtos, desde peças plásticas que compõem um telefone celular, até as complexas partes estampadas em aço dos veículos (AMORIM, L., 2002).

A exigência por estampos de conformação cada vez mais resistentes e duradouros tem feito com que projetistas solicitem a utilização de materiais especiais em componentes que até então eram fabricados em aços com menor teor de carbono e poucos elementos de liga.

Entre os materiais amplamente utilizados pela indústria de ferramentaria para a fabricação de componentes para estampos estão os aços ABNT NM 122 grau O1 e ABNT NM 122 grau D2. Classificados como aços ferramenta destinados à conformação a frio, apresentam excelentes propriedades mecânicas como: alta tenacidade, boa resistência ao desgaste e a fratura, dureza elevada após o tratamento térmico, além de boa usinabilidade e grande estabilidade dimensional - características essenciais para o fim a que se destinam - o que garante que os componentes fabricados com estes materiais sejam capazes de resistir às tensões geradas durante a operação de estampagem (VILLARES METALS, 2016 e GGD METALS, 2016).

Uma característica fundamental nos componentes de estampos para conformação é a integridade superficial da área de contato com a chapa a ser estampada. Pequenos riscos, deformações ou rugosidade fora dos padrões nestes componentes serão inevitavelmente transferidos para o produto estampado, prejudicando assim, sua qualidade final. Outro ponto a ser observado é a qualidade da rugosidade ou a presença de micro trincas, oriundas dos diversos processos de usinagem. Segundo Oliveira (2004), as superfícies geradas pelos processos de fabricação não são perfeitas, gerando irregularidades que só podem ser observadas quando são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. Estas

irregularidades podem se propagar ao longo do punção/matriz ocasionando a diminuição da vida útil do componente ou até mesmo sua fratura.

As tolerâncias dimensionais necessárias para este tipo de usinagem podem chegar à casa dos milésimos de milímetros, em função da precisão imposta pelo projeto (FERES, 2010). Esta precisão, obtida durante a usinagem dos moldes, garantirá o perfeito funcionamento de matrizes de conformação e a obtenção da qualidade final necessária ao produto.

Durante a usinagem, a garantia de parâmetros como precisão dimensional, rugosidade superficial, tolerância de forma e posição depende, entre outras coisas, do regime de trabalho adotado pelo operador do equipamento de usinagem, que no caso do EDM é função do tipo de material da peça e do eletrodo ferramenta. De acordo com a teoria de eletroerosão, as propriedades mecânicas da peça e do eletrodo ferramenta, influenciam muito pouco no processo, ao contrário do que ocorre com as propriedades físicas, tais como, condutividade térmica e elétrica, que por sua vez influenciam profundamente no processo (SANTOS, 2007).

Para definir os parâmetros de usinagem, ou seja, tempo de impulso, tempo de pausa e a corrente adequada em uma máquina EDM são utilizadas tabelas tecnológicas fornecidas pelos fabricantes das máquinas (OLINIKI, 2009). Entretanto, tais tabelas definem apenas os materiais usados como eletrodo ferramenta (cobre ou grafite), e da peça a ser erodida, por exemplo, um dos diversos tipos de aços. Quanto ao material a ser erodido, as tabelas não especificam a condição de tratamento térmico ao qual a peça foi submetida, tampouco a dureza das mesmas. Assim sendo, o foco deste trabalho foi identificar a influência do beneficiamento, nome tradicionalmente atribuído às operações de tratamento térmico por têmpera e revenimento nas características finais de peças usinadas pelo processo de eletroerosão por penetração.

## **1.1 Justificativa**

A busca por competitividade e produtividade em um mercado globalizado e cada vez mais acirrado faz com que as indústrias do segmento metal mecânico busquem equipamentos versáteis e que sejam capazes de usinar metais de diferentes composições químicas e durezas. Neste contexto, estão inseridos os processos não convencionais de usinagem como a eletroerosão, o corte a laser e o

plasma. De que forma o tratamento térmico interfere nas propriedades mecânicas dos aços e como isso se relaciona com processos convencionais de usinagem tem sido estudado por diversos autores. Entretanto, novos processos de fabricação exigem estudos de como as alterações micro-estruturais se relacionam com outras propriedades físicas como a condutividade térmica e elétrica.

O processo de eletroerosão por penetração foi o escolhido para a realização deste trabalho, pois permite relacionar tanto propriedades mecânicas e físicas como a dureza e a condutividade elétrica.

Os materiais foram selecionados levando em consideração seu campo de aplicação na indústria metal-mecânica para a fabricação de punções e matrizes de conformação e sua relação com o processo de usinagem por descargas elétricas.

## **1.2 Objetivos**

Objetivo Geral:

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência do tratamento térmico de têmpera e revenimento no processo de usinagem por eletroerosão por penetração dos aços ABNT NM 122 grau D2 e ABNT NM 122 grau O1.

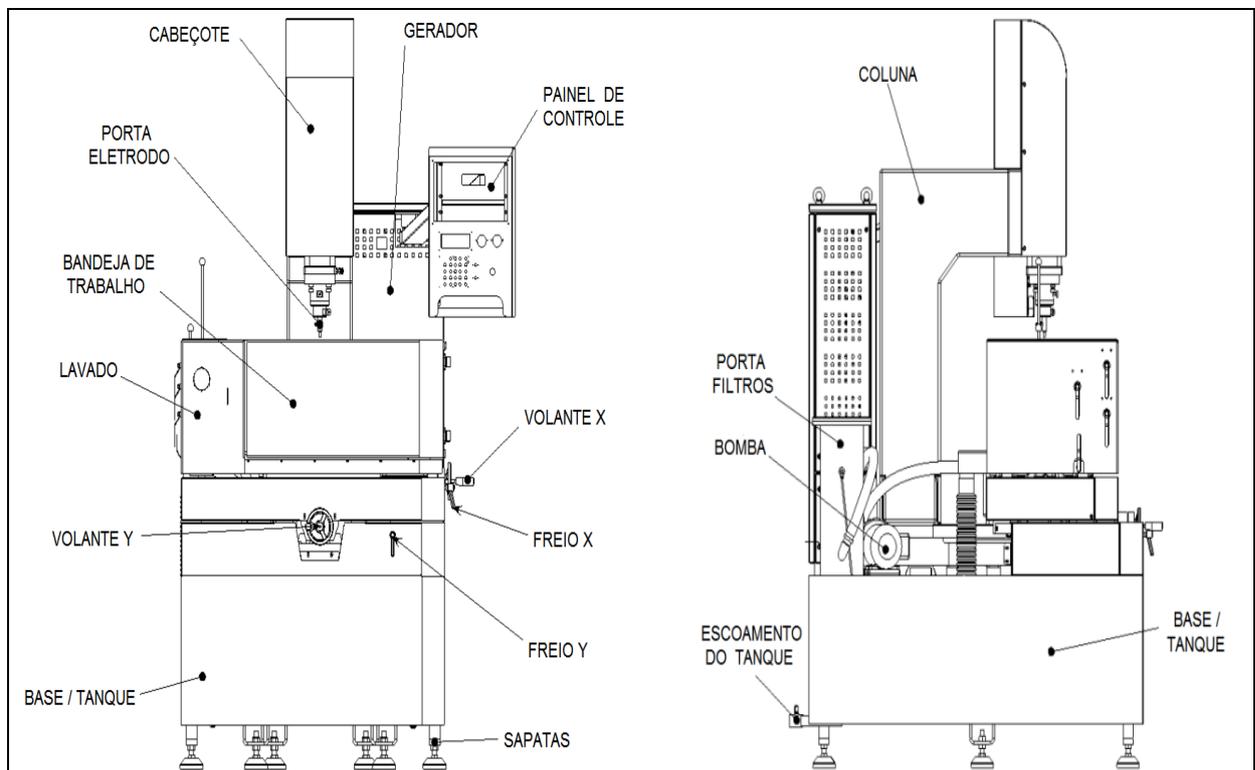
Objetivos específicos:

- 1- Avaliar e comparar as dimensões obtidas pela usinagem em eletroerosão por penetração aço ABNT NM 122 grau O1 e ABNT NM 122 grau D2 com e sem tratamento térmico.
- 2- Avaliar e comparar a rugosidade dos aços ABNT NM 122 grau O1 e ABNT NM 122 grau D2 com e sem tratamento térmico, usinados em eletroerosão por penetração.
- 3- Avaliar e comparar a integridade superficial dos aços ABNT NM 122 grau O1 e ABNT NM 122 grau D2 com e sem tratamento térmico usinados em eletroerosão por penetração.
- 4- Avaliar a influência que o tratamento térmico tem sobre a resistência elétrica aços ABNT NM 122 grau D2 e ABNT NM 122 grau O1.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Eletroerosão - definição

A usinagem por descargas elétricas ou *Electrical Discharge Machining* – EDM, é um processo não convencional de usinagem cujo arranque de material ocorre por descargas elétricas de alta frequência que geram fusão e vaporização de materiais eletricamente condutores (EUBANK, 1993). A figura 1 apresenta as principais partes de uma máquina de eletroerosão.



**Figura 1 – Representação esquemática de uma máquina de eletroerosão por penetração.**

Fonte: Eletro (2011).

O processo de EDM é utilizado na fabricação de peças compostas por materiais que apresentam usinabilidade deficiente pelos processos convencionais e na obtenção de geometrias complexas e com elevada precisão dimensional. A aplicação mais usual deste processo está ligada às ferramentas na produção de moldes e estampos e à indústria aeroespacial no que tange à fabricação de componentes em ligas de alta resistência como os aços inoxidáveis e as superligas de titânio e a base de níquel (AMORIM, L., 2002).

O responsável pela descoberta do efeito erosivo da descarga elétrica ou centelha é o químico inglês Joseph Priestly, no ano de 1770, sendo que, durante 100 anos aproximadamente, esse fenômeno passou a ser usado para desintegrar diversos metais para produzir soluções coloidais. Em 1943, na Universidade de Moscou, os Lazarenkos descobriram as propriedades destrutivas da descarga elétrica para uso construtivo e desenvolveram um processo controlado de usinagem para metais com dificuldade de corte com vaporização de material na superfície do metal. O sistema de EDM adotado pelos Lazarenkos fazia uso de resistência e capacitância da alimentação de energia e era muito usado nas máquinas de EDM até 1950, servindo de modelo posteriormente para sucessivos desenvolvimentos.

Conforme destaca Amorim L. (2002, p. 21), igualmente ao que ocorre em outras áreas técnicas, a aplicação tecnológica prática de descargas elétricas como processo de produção ocorreu pela necessidade do ambiente industrial solucionar alguns dos seus problemas intrínsecos de fabricação.

Conforme Schumacher & Dauw (1989), o fenômeno da erosão entre dois materiais foi descrito primeiramente por Boyle em 1694, sendo que em 1751 e 1766, a remoção de material por descargas elétricas entre dois eletrodos foi observada por Benjamin Franklin e Josef Priestley. Outras experiências registradas datam de 1881 em que Meritens aplicou arcos elétricos em operações de soldagem e Kohlschütter, no começo de 1900, fez uso das descargas elétricas para produzir pós metálicos coloidais, formando a primeira aplicação de descargas elétricas na usinagem de metais. Também se atribui a Kohlschütter o relato sobre o desgaste nos eletrodos.

Considerando a complexidade do processo da EDM, faz-se necessário conhecer suas variáveis de controle, bem como ao usinar qualquer componente deve-se observar dois aspectos. O primeiro relaciona-se com as irregularidades geométricas da superfície, e o segundo, com as alterações metalúrgicas da superfície e da camada sub-superficial. Segundo Lima e Corrêa (2006), no processo de usinagem de alguns produtos ou ferramentas, os dois aspectos citados, referentes à integridade superficial, devem ser definidos, medidos e usinados dentro dos limites determinados para garantir a durabilidade e qualidade dos produtos e ferramentais. A figura 2 mostra os dois processos e seus fatores de influência.

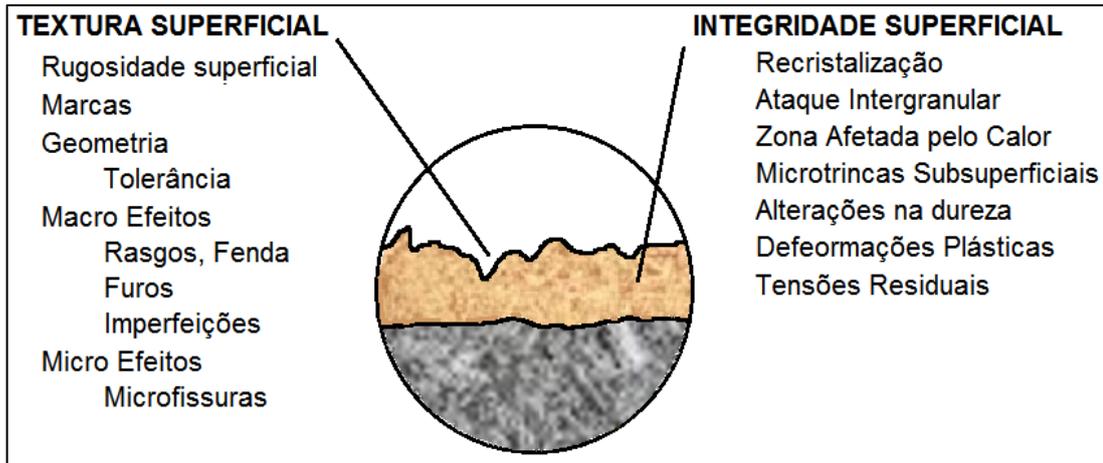


Figura 2 – Representação básica de uma superfície usinada por EDM demonstrando os dois principais aspectos e seus fatores de influência.

Fonte: Adaptado de Lima e Corrêa (2006).

O processo de Eletroerosão por penetração é destinado à usinagem de geometrias complexas e de grande precisão dimensional garantindo excelente acabamento. Caracteriza-se por permitir a usinagem de materiais condutores (e alguns semicondutores) com e sem tratamento térmico.

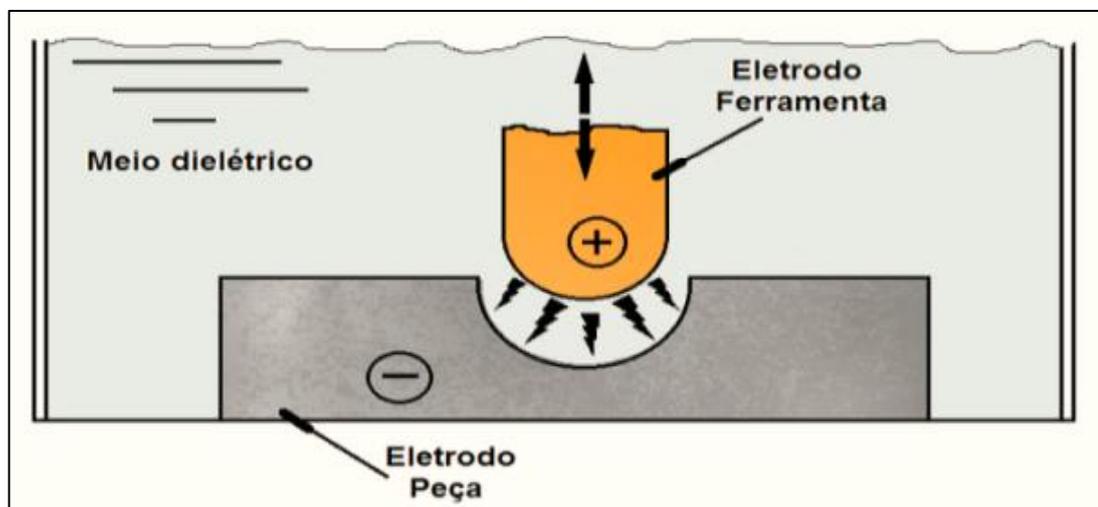


Figura 3 – Representação da peça e do eletrodo ferramenta.

O princípio de funcionamento da usinagem por eletroerosão ocorre em função da aproximação de dois eletrodos com polaridades diferentes submersos em um meio dielétrico até uma determinada distancia chamada GAP, SILVA (2007). Quando estes eletrodos se aproximam, um processo de formação de descarga

elétrica tem início transferindo para a peça a forma do eletrodo ferramenta. A figura 3 representa o eletrodo ferramenta e a peça durante o processo de usinagem.

Dentre as várias teorias existentes, a termoelétrica é a mais aceita para explicar o que ocorre durante a remoção do material na EDM (AMORIM, L., 2002). Este ciclo se divide em quatro fases distintas, são elas:

**a) Fase 1 - Ignição:** Nesse momento, apesar de existir tensão elétrica entre os dois eletrodos, não existe fluxo de corrente, visto que o dielétrico cumpre sua função de isolante. A aproximação entre o eletro ferramenta e a peça até uma determinada distancia (GAP), gera um aumento do campo elétrico fazendo com que os elétrons sejam acelerados em direção à peça diminuindo a resistência do fluido dielétrico. De acordo com Amorim L. (2002, p. 38) esse fenômeno é chamado de ionização por impacto.

**b) Fase 2 - Formação do canal de plasma:** Nesta fase, ocorre a multiplicação em altíssima velocidade do fenômeno de ionização por impacto, gerando superaquecimento e evaporação de uma pequena quantidade de dielétrico. Segundo Oliniki (2009), ocorre um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico formando túneis transportadores de carga. Nesse momento a corrente atinge os níveis regulados pelo operador concentrando-se em uma pequena superfície da peça.

**c) Fase 3 - Fusão e sublimação do material dos eletrodos:** Nesta fase, a região usinada é intensamente bombardeada por elétrons e íons positivos. A energia cinética é transformada em calor gerando a fusão e a sublimação do material.

**d) Fase 4 - Ejeção do material fundido:** É nesta fase que ocorre a expulsão do material fundido durante as etapas anteriores. A descarga elétrica é interrompida estabelecendo um intervalo até o início de um novo ciclo. Uma parte do material expelido é carregada pelo fluxo do dielétrico e a outra parte se solidifica na própria cratera e em regiões próximas, constituindo a camada superficial chamada de camada branca. A figura 4 representa os ciclos da descarga elétrica em uma máquina de EDM.

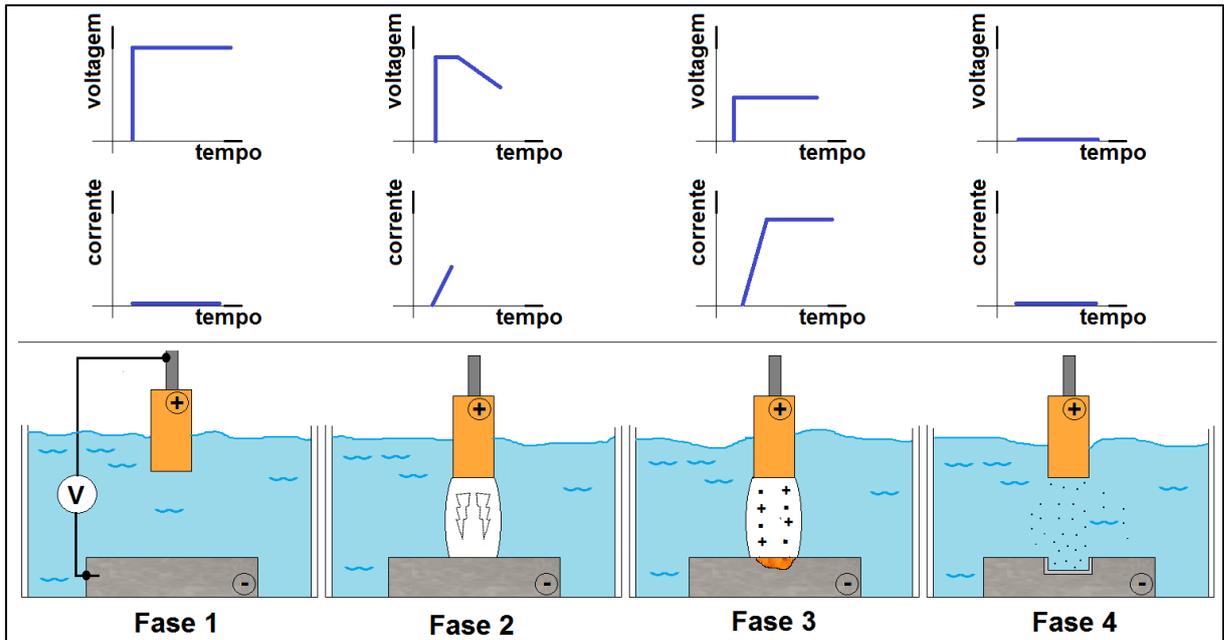
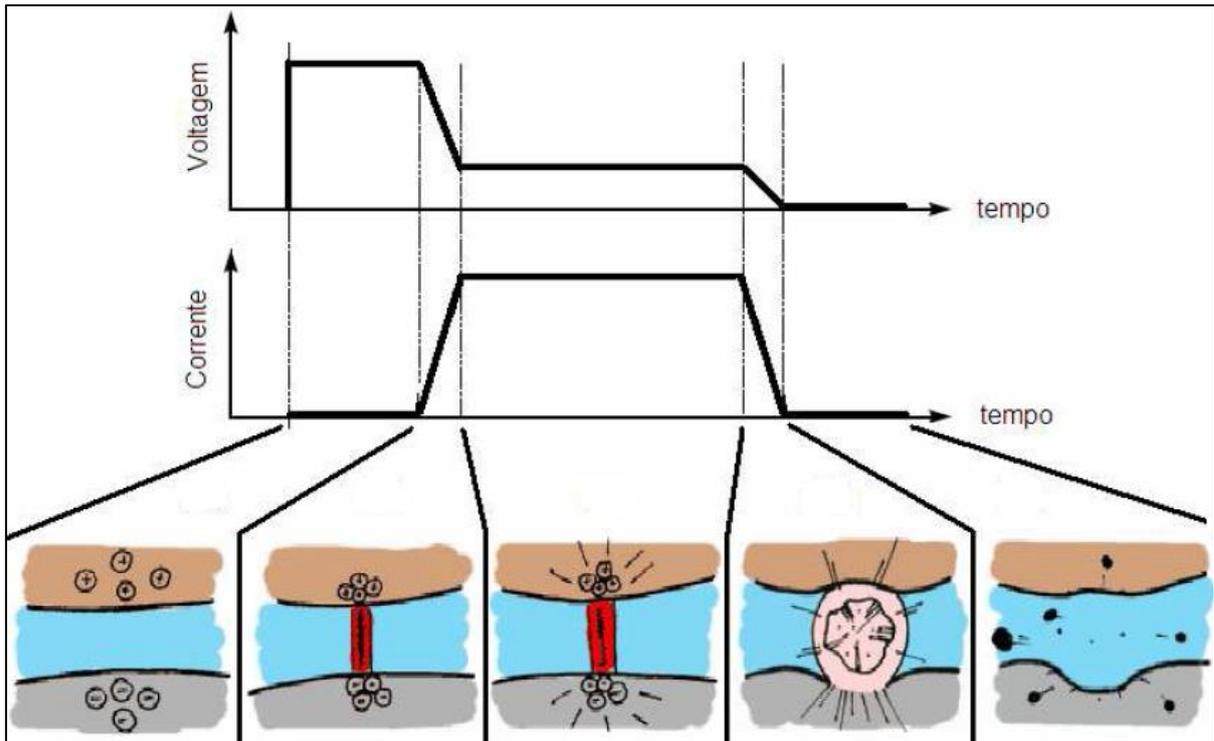


Figura 4 – Fases de uma descarga elétrica durante o processo de eletroerosão.

Outra explicação do fenômeno erosivo é dada por Descoedres (2006), e divide o fenômeno erosivo em cinco fases, sendo a primeira chamada de pré-ignição, que ocorre quando a voltagem é aplicada entre os dois eletrodos (ferramenta e peças). Com a desagregação dielétrica, ocorre formação a formação do canal de plasma. Em seguida, ocorre a descarga, o aquecimento, a fusão e a vaporização dos materiais das superfícies dos eletrodos. A quarta fase consiste no fim do canal de plasma seguido de sua implosão e remoção do material aquecido nas superfícies. Por fim, ocorre a limpeza das partículas erodidas que são removidas pelo dielétrico. Essas fases estão diretamente relacionadas aos tempos de aplicação de tensão e de corrente. A figura 5 apresenta as 5 fases descritas por Descoedres (2006).

Já Santos (2007, p. 13), refere-se ao processo de maneira mais resumida, reiterando que retirada de material ocorre pelo bombardeamento de íons ou elétrons contra a superfície da peça, de forma a produzir a extração dos resíduos por sublimação, causando cavidades profundas e tridimensionais.



**Figura 5 – Fases da descarga elétrica.**

Fonte: Descoedres (2006).

Benedict (1987) afirma que quando o pulso de eletricidade da corrente contínua é entregue aos eletrodos, um campo elétrico intenso é criado nos pontos onde existem as maiores irregularidades nas superfícies. Em seguida, partículas negativamente carregadas começam a migrar, resultando na formação de uma ponte de elevada condutividade. A temperatura do material aumenta na região da ponte, bem como numa parcela pequena das partículas fluídas carregadas no interior do dielétrico. Acontece então, a formação da centelha entre as duas superfícies, sendo que nesse momento, a tensão diminui e a corrente aumenta, aumentando também a temperatura e a pressão no canal de plasma. Uma bolha se expande rapidamente para fora do canal. Quando o pulso elétrico termina, a bolha entra em colapso e o fluído dielétrico retira o metal derretido das superfícies. Como resultado, forma-se uma pequena cratera em ambas as superfícies. Em seguida, as pequenas partículas solidificam-se e o líquido dielétrico age para remover essas partículas localizadas na fenda de trabalho.

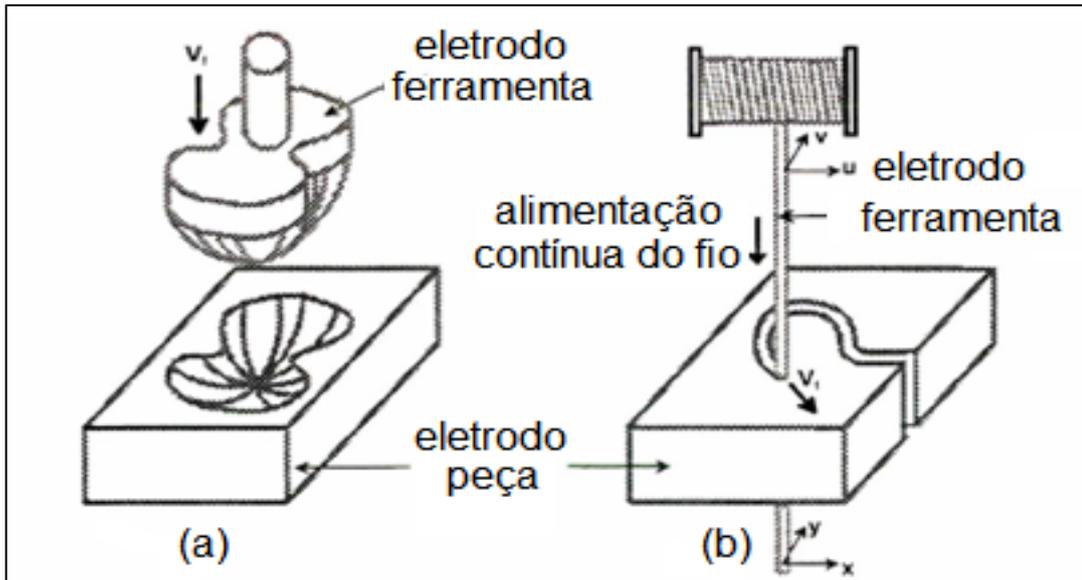
Diante do exposto, verifica-se que a remoção de material por meio de eletricidade é bastante complexa, e ocorre em função do aumento de temperatura na região da descarga, causando a fusão e a sublimação do material. As

temperaturas na área usinada podem variar entre 10.000° e 50.000°C na fase 3, podendo possivelmente provocar alterações na superfície usinada devido à formação de uma zona termicamente afetada (ZTA) e gerando a chamada “camada branca” que é consequência da ressolidificação do material em função do resfriamento brusco feito pelo fluido dielétrico ao final da descarga (SANTOS, 2007, p.122). O processo de erosão ocorre de maneira simultânea no eletrodo ferramenta e na peça, sendo que a tecnologia da máquina e ajustes adequados permite obter 99,5% de erosão no eletrodo peça e 0,5% no eletrodo ferramenta. O afastamento entre a peça e o eletrodo é chamado de GAP (folga), sendo que um GAP alto permite uma usinagem mais rápida, porém uma rugosidade maior. Já um GAP baixo gera um tempo maior de usinagem e um melhor acabamento superficial.

As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e no seu lugar, fica uma pequena cratera. O dielétrico, além de atuar como isolante, participa desta limpeza e refrigera a superfície usinada. O fornecimento de corrente é interrompido pelo afastamento do eletrodo. O ciclo recomeça com a reaproximação do eletrodo até a distância GAP, provocando uma nova descarga.

## **2.2 Tipos de eletroerosão**

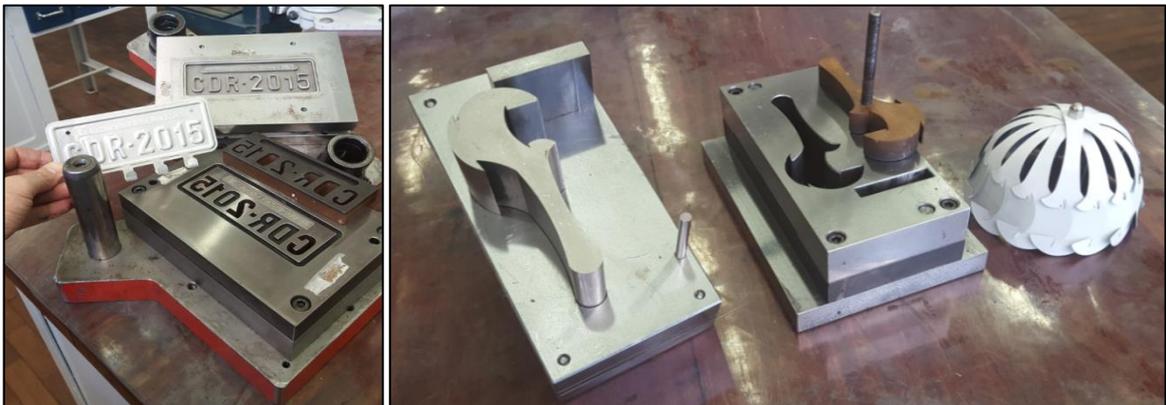
Segundo Amorim L. (2002, p.23), há dois tipos básicos de operações de eletroerosão: a eletroerosão por penetração e a eletroerosão a fio. Na EDM por penetração, o eletrodo-ferramenta conduz a sua imagem à peça conforme avança na cavidade usinada, sendo que o avanço do eletrodo pode ocorrer no sentido vertical (eixo Z) ou horizontal (eixos X e Y). No processo de EDM a fio é usado um fio bobinado que desenrola continuamente, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça, conforme figura 6.



**Figura 6 – Representação esquemática da (a) eletroerosão por penetração e da (b) eletroerosão a fio.**

Fonte: König & Klocke (1997).

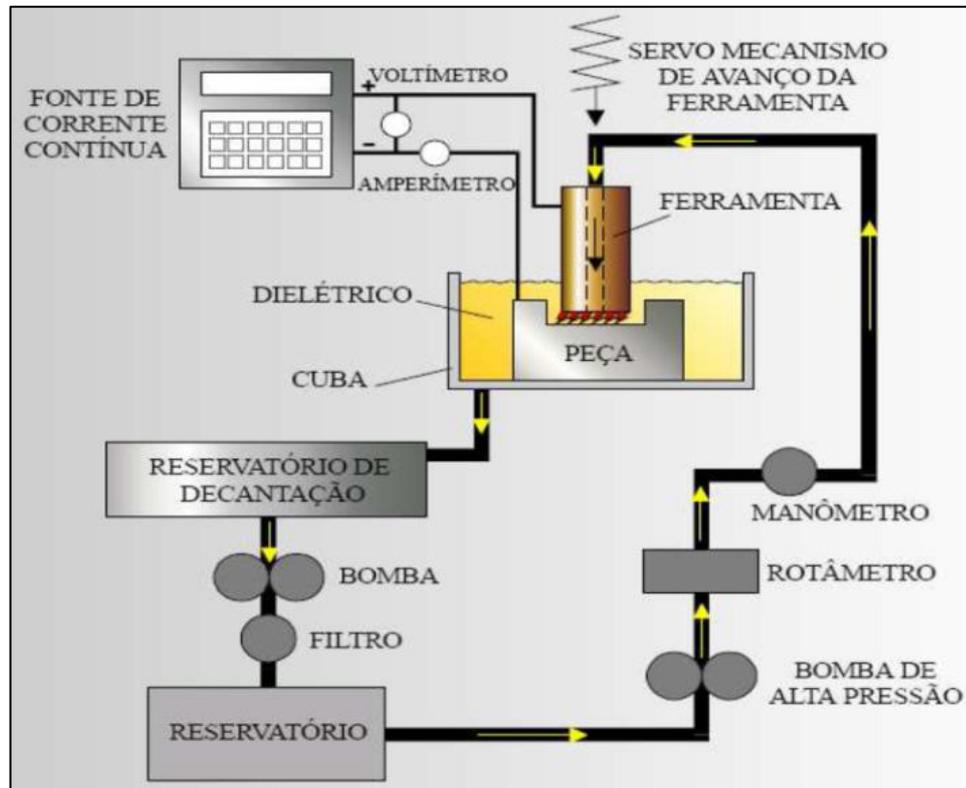
A usinagem por eletroerosão a penetração, foco deste trabalho, é geralmente aplicada na confecção de moldes ou estampos com cavidades ou vazamentos de geometria extremamente complexa. A figura 7 apresenta estampos de conformação de chapas confeccionados no curso de ferramentaria do SENAI Diadema.



**Figura 7 – Exemplo de produtos usinados através da eletroerosão por penetração.**

Em relação ao sistema elétrico, o mesmo é composto pelo gerador de pulsos, sistemas de controle do avanço e posicionamento entre os eletrodos-ferramenta/peça e cabos de alimentação de energia. O sistema mecânico é responsável pelo movimento relativo entre os eletrodos-ferramenta/peça. O conjunto do sistema dielétrico representado pelo reservatório, cuba de trabalho, filtros e moto-

bomba, é encarregado da limpeza e da alimentação do fluido dielétrico no ambiente de usinagem conforme apresentado na figura 8.



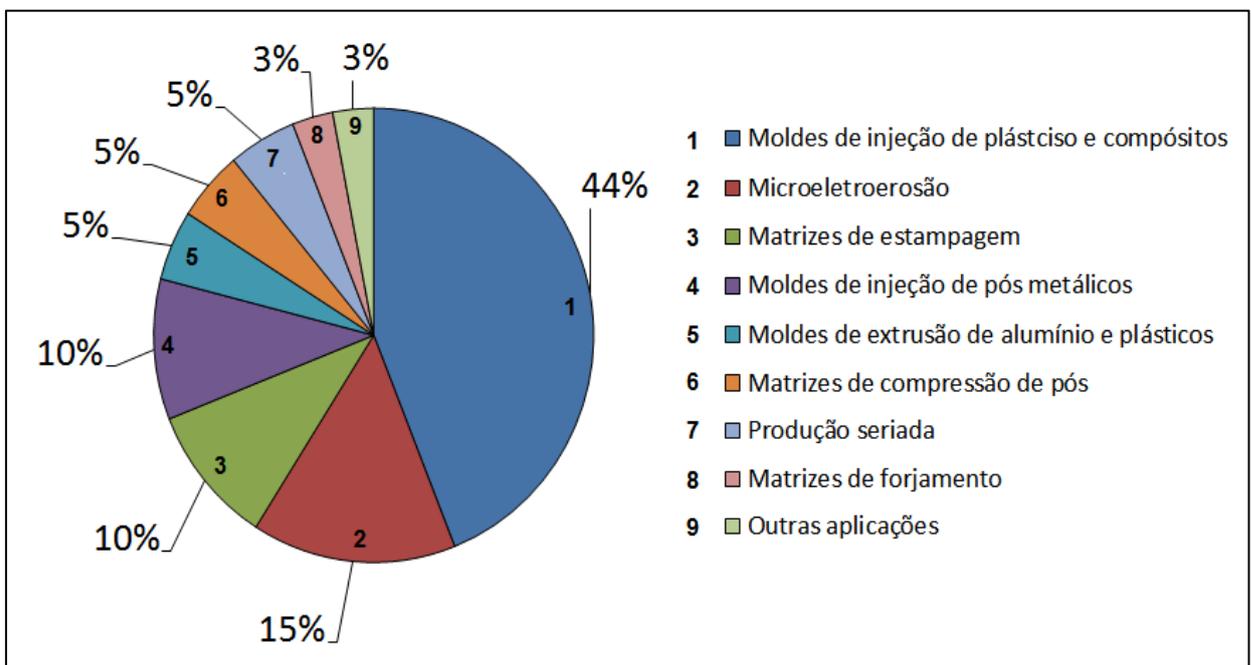
**Figura 8 – Exemplo de peça sendo usinada por eletroerosão por penetração.**

Fonte: Arantes e Silva, (2003).

Na eletroerosão por penetração, o eletrodo possui a forma espelhada da desejada para a cavidade a ser produzida na superfície do eletrodo-peça e a obtenção desta forma se dá através da remoção sucessiva de pequenas quantidades de material por microfusão localizadas através da aplicação de eletrodos que se encontram submersos em um meio isolante. Neste tipo de usinagem, não há contato mecânico entre a ferramenta e a peça, evitando assim a formação de tensões mecânicas e problemas durante o processo. Desta forma, a eletroerosão pode ser aplicada em qualquer material condutor elétrico e em alguns materiais semicondutores, sendo que as propriedades mecânicas dos mesmos como resistência e dureza apresentam pouca influência sobre o desempenho do processo. Entretanto, as propriedades termofísicas como condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, a temperatura de fusão e ebulição, influenciam consideravelmente o processo (HO, NEWMAN, 2003; AMORIM, L., 2002).

A usinagem em eletroerosão por penetração é amplamente aplicada nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, médica, equipamentos ópticos e eletrônicos e na indústria de ferramentaria em geral, informa Guitrau (1997). De acordo com Müller (2015), o processo de eletroerosão é o quarto método de usinagem mais popular, sendo os três primeiros o fresamento, o torneamento e a retificação (apud SOMMER e SOMMER, 2005).

A figura 9 mostra os valores percentuais, relacionados às principais aplicações da EDM por penetração, conforme Aggie-Charmilles (2002).



**Figura 9 – Típicas aplicações da EDM por penetração.**

Fonte: Adaptado de Aggie-Charmilles (2002).

### 2.3 A definição dos parâmetros de usinagem no processo de eletroerosão

Segundo Amorim L. (2002), a norma VDI 3402 de 1990, estabelece e define os principais parâmetros elétricos de controle do processo de eletroerosão. Alguns destes parâmetros podem ser regulados segundo uma ampla faixa de variação em função do tipo de máquina de eletroerosão. São eles:

Ûi: tensão em aberto [V] - tensão na fenda de trabalho quando não há fluxo de corrente;

$\bar{U}_e$ : tensão média da descarga [V] - representa a tensão na fenda no decorrer da centelha elétrica;

U: tensão média de trabalho [V] - significa a média aritmética da tensão na fenda de trabalho durante uma operação de usinagem;

$t_d$ : tempo de retardo de ignição [ $\mu$ s] - intervalo de tempo desde a aplicação da tensão em aberto, até o início da descarga;

$t_e$ : duração da descarga [ $\mu$ s] - período de tempo decorrido após o rompimento da rigidez do dielétrico quando ocorre o fluxo efetivo de corrente;

$t_i$ : duração do pulso de tensão [ $\mu$ s] - representa o tempo de aplicação de tensão na fenda de trabalho, correspondendo à soma do tempo de ignição  $t_d$  mais duração da descarga  $t_e$ ;

$t_o$ : tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão  $t_i$  [ $\mu$ s];

$t_p$ : tempo de período do ciclo de uma descarga [ $\mu$ s] - representa a soma da duração do pulso de tensão  $t_i$ , mais o tempo de intervalo  $t_o$ ;

$\hat{i}_e$ : corrente máxima durante a descarga [A];

$\bar{i}_e$ : corrente média durante a descarga [A];

$\bar{D}$ : relação de contato representa a razão entre o tempo de pulso  $t_i$ , e o tempo de período do ciclo da descarga  $t_p$ .

A figura 10 descreve a evolução de tensão e da durante um ciclo de descarga em uma máquina de eletroerosão.

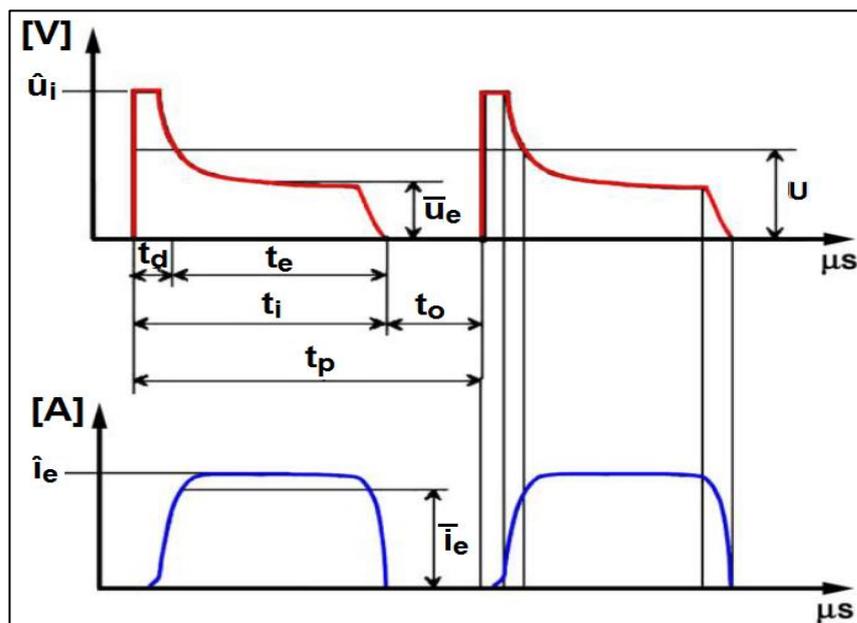


Figura 10 – Evolução da tensão e corrente durante o ciclo de uma descarga.

Fonte: AMORIN (2002).

Durante a usinagem por EDM, a garantia de parâmetros como precisão dimensional, rugosidade, integridade superficial, tolerância de forma e posição depende, entre outras coisas, do regime de trabalho adotado pelo operador do equipamento de usinagem, que no caso do EDM é função do tipo de material da peça e do eletrodo ferramenta. Para definir os parâmetros de usinagem são utilizadas tabelas tecnológicas desenvolvidas com base na norma alemã VDI 3402 e fornecidas pelos fabricantes das máquinas. No entanto, tais tabelas não distinguem a condição de tratamento térmico ao qual a peça foi submetida, tampouco a dureza das mesmas. A figura 11 representa uma tabela tecnológica utilizada para a regulagem de uma EDM.

VALORES ESTABELECIDOS			RUGOSIDADE	REMOÇÃO MATERIAL	DESGASTE	SUBDIMENSIONAMENTO 2gs = B - A				CONDIÇÃO TESTE		
On μs	Ie QT	Dc %	Rmax μm	Vw mm <sup>3</sup> /min	Vv %	PRESSÃO (mm)		SUCÇÃO (mm)		Vmin Volt	Iav A	Área Cm <sup>2</sup>
						2gs max	2gs	2gs max	2gs			
200	2	90	30	14	0.0	0.250	0.130	0.238	0.118	38	7	5
200	3	92	34	32	0.0	0.284	0.144	0.272	0.132	35	10	5
200	4	92	38	60	0.3	0.314	0.156	0.303	0.145	33	14	10
200	5	92	43	86	0.9	0.347	0.166	0.340	0.159	32	17	10
200	6	92	47	112	1.5	0.379	0.175	0.376	0.172	30	20	10
200	7	92	48	132	1.8	0.392	0.180	-	-	30	23	10

Figura 11 – Representação de uma tabela Tecnológica fornecida pelo fabricante.

Fonte: Eletro (2011).

Em relação ao descrito nas tabelas tecnológicas, as informações relacionadas à amperagem (Ie), tempo de descarga (On) e tempo de pausa (Dc) são de grande importância e estão diretamente relacionados com a qualidade final da usinagem. Sobre os dois períodos de tempo, o de descarga e o tempo de pausa, Silva (2007) afirma que a duração desses períodos é da ordem de microssegundos, sendo que no tempo On, a voltagem entre peça e ferramenta forma o canal de plasma, onde elétrons e íons circulam livremente entre os eletrodos. No instante em que a voltagem é desligada, automaticamente pelo sistema de funcionamento da máquina, o canal de plasma se desfaz e a corrente passa através do fluido entre peça e a

ferramenta, fazendo com que os elétrons e íons se chocam contra as superfícies dos eletrodos. Logo em seguida, começa o tempo de pausa  $D_c$ , durante o qual as partículas dos materiais que foram arrancadas pela descarga são arrastadas pelo fluido dielétrico. Em relação ao parâmetro amperagem, este define a intensidade da corrente elétrica desejada para cada tipo de trabalho considerando a área de erosão e os materiais do eletrodo e da peça. Quanto maior a amperagem, maior o volume de material erodido. A corrente é definida pela quantidade de  $I_e$  ou  $T_s$  (transistor standard) sendo que 1  $I_e$  é igual a 3,33 Amperes. O cálculo da corrente a ser utilizada é feito em função da área a ser erodida considerando a fórmula: (SENAI, 2009; ELETRO, 2011).

$$I_e = \frac{\text{Área} \cdot \text{Constante}}{3,33} \quad (1)$$

Sendo:

- A: Área de contato da face do eletrodo ferramenta com a peça ( $\text{cm}^2$ );
- Constante: Quantidade de  $T_s$  necessário para erodir uma área igual a  $1\text{cm}^2$ ;
- 3,33: Fator de conversão;

Vale ressaltar que a garantia da qualidade da usinagem por descargas elétricas não está relacionada apenas ao uso das tabelas tecnológicas, mas também, e principalmente, à habilidade do operador do equipamento e o domínio que ele tem sobre a máquina. Apesar das inúmeras vantagens do processo de eletroerosão e pelas suas características de remoção de material, alguns defeitos podem surgir na superfície das peças usinadas e, se não forem eliminados ou reduzidos podem contribuir para uma falha prematura.

Diante disso, pode-se afirmar que o processo de eletroerosão é dependente de retrabalhos posteriores para minimizar os efeitos nocivos de usinagem. Estes retrabalhos incluem processos de lixamento, retificação, polimento e tratamento térmico, sempre com objetivo de retirada da camada superficial resolidificada ou minimização da zona afetada pelo calor. Esse retrabalho pode ser em maior ou menor grau, dependendo, como citado anteriormente, da habilidade e do conhecimento tácito do operador da máquina.

Segundo Silva (2004, p. 37), a escolha dos parâmetros para a determinação da rugosidade no processo de usinagem por descargas elétricas é a fase mais

complexa do processo, pois envolve uma série de conhecimentos heurísticos e teóricos contidos em manuais técnicos fornecidos pelos fabricantes de cada equipamento. Variações de tensão na rede elétrica, condições inadequadas de instalação, desgastes dos componentes eletrônicos, fazem surgir novos parâmetros, prevalecendo a experiência adquirida pelos especialistas em cada situação.

Em comparação a outros processos de usinagem, a eletroerosão tem taxas de remoção de material extremamente baixas, o que a torna um processo relativamente lento. Para taxas mais elevadas de remoção de material, as consequências nocivas seriam em tese, igualmente maiores, assim como os retrabalhos para minimização destes efeitos. Nesse sentido, observando que as tabelas tecnológicas são o principal referencial teórico na preparação de máquinas de eletroerosão, é importante que estas sejam o mais completas quanto possível, considerando as particularidades de cada material como dureza e tratamento térmico. Amorim L. (2002, p.32) destaca que na Europa e nos Estado Unidos, é pratica comum das ferramentarias em parceria com laboratórios universitários o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa direcionados ao estabelecimento de parâmetros tecnológicos.

### 3 FERRAMENTARIA

A evolução industrial e a constante necessidade de produtos fabricados em série e com excelente qualidade se intensificou ao longo dos anos, fazendo com que cada vez mais os esforços tecnológicos tanto para desenvolvimento de novas técnicas de usinagem como novos materiais se desenvolvessem no segmento de ferramentaria. Entende-se como ferramentaria, o ramo metalúrgico que atua na obtenção de moldes de injeção, matrizes de estampagem, conformação e cunhagem dos mais diversos itens de consumo. Entre as possíveis especializações do profissional de ferramentaria, destacam-se as seguintes:

- *Ferramenteiro de corte e repuxo*: Nesta área o tópico principal é a fabricação de estampos de corte, dobra ou repuxo, os quais estampos serão utilizados como ferramentas para a conformação de chapas de aço, cobre, latão e demais materiais metálicos.
- *Ferramenteiro de moldes plásticos*: Nesta área o tópico principal é a fabricação de moldes para a conformação de plásticos e suas resinas.

No Brasil, existem em torno de 2000 empresas de ferramentaria, a maioria delas concentradas no estado de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O faturamento do setor gira em torno de US\$ 300 milhões por ano no Brasil e estima-se um faturamento bruto mundial em torno de US\$ 20 bilhões por ano. Entre os principais fornecedores mundiais de moldes e matrizes estão os Estados Unidos, com faturamento em torno de 5 bilhões por ano, seguidos de Japão e Alemanha. Países como Espanha, Portugal, França e Itália, além dos asiáticos Coreia, Taiwan, Singapura e China merecem destaque nessa área e tem investido alto no setor (ALBANO, 2008; ABREU, 2010; RBIF, 2010; DIHLMANN, 2012).

Embora seja notória a importância do setor de moldes e matrizes, a participação brasileira ainda é mínima o que se justifica, segundo diversos estudos, por conta de uma defasagem tanto tecnológica quanto organizacional. (REIS, 2003; REZENDE, 2003; REZENDE e GOMES, 2004). Segundo a revista de EXAME de junho de 2016, a profissão de ferramenteiro configura entre as 10 profissões mais bem pagas do país sem a necessidade de um diploma de ensino superior, sendo que a especializações de corte e repuxo ocupa a 2<sup>o</sup> posição e a de moldes para plástico a 8<sup>o</sup> posição.

Em particular, a produção de itens confeccionados a partir de chapas estampadas representa um grande avanço dos processos de fabricação podendo ser considerado uma das mais importantes técnicas de produção em série (SENAI, 1970).

Atualmente os processos de estampagem e conseqüentemente o segmento de ferramentaria estão presentes em diversas áreas industriais, onde é possível destacar o setor automobilístico, de brinquedos, artigos elétricos e eletrônicos, utensílios domésticos, máquinas etc. Os profissionais que atuam nesta área destacam-se pela habilidade no manuseio de diversas máquinas de usinagem convencional e a CNC, a destreza manual para ajustes de componentes extremamente precisos e o conhecimento em diversas áreas da metalurgia.

É importante ressaltar que a qualidade dos produtos obtidos em série pelo processo de estampagem está diretamente relacionada à qualidade da fabricação dos componentes que compõem um estampo. Características como precisão dimensional, integridade superficial e rugosidade são fatores que devem ter a máxima prioridade desde o planejamento até a execução do componente devendo ser constantemente controlados pelo ferramenteiro.

## 4 AÇOS-FERRAMENTA

Os aços-ferramenta têm sua história pautada à própria evolução dos aços em geral, sendo que os primeiros aços-ferramenta da era moderna eram simples aços carbono com teores de carbono de 0,7 a 1,5%. A partir do século XIX e começo do século XX, os aços-ferramenta se tornaram materiais ligados com microestrutura complexa. Geralmente, os aços-ferramenta são ligas Fe-C com soma de elementos de liga formadores de carbonetos como vanádio, tungstênio, cromo, molibdênio, entre outros. Os aços-ferramenta como o próprio nome sugere, são aplicados na fabricação de ferramentas de corte, dobramento, moldes, matrizes e qualquer outra ferramenta capaz de transformar um material em uma peça de uso bem definido (ASM, 1983; HOYLE, 1998; AVNER, 1974).

Os aços-ferramenta são um grupo de ligas complexas cujas formas de aplicações podem ser a quente e a frio. Detalhes de processo, como composição química, obtenção, aplicações típicas, taxas recomendadas de resfriamento, tempo e temperatura de tratamento térmico, são encontrados na literatura e em geral informados pelos fabricantes. Para cada tipo de aço ferramenta existe um tratamento térmico que evolui e desenvolve microestruturas e propriedades mecânicas (KRAUSS, 1989).

Os aços-ferramenta são amplamente empregados na indústria de ferramentaria, na construção de moldes e matrizes destinados a conformação de materiais metálicos em alta ou baixa temperatura, na obtenção de peças poliméricas e materiais cerâmicos, sendo o tratamento térmico desejável para que as propriedades finais sejam atingidas.

A classificação dos aços ferramentas é feita de acordo com suas características metalúrgicas principais ou de acordo com seu nicho de aplicação. A classificação do *American Iron and Steel Institute* (AISI) é bastante utilizada pela indústria de ferramentaria e tem se mostrado útil para a seleção de materiais, sendo apresentada na Tabela 1.

Embora exista mais de 100 tipos de aços-ferramenta normalizados internacionalmente, para as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria trabalha com uma gama reduzida de opções, tendo preferência aqueles que possuem suas propriedades e desempenhos consagrados ao longo do tempo (HEINRICH, 1975).

Tabela 1 – Classificação básica dos aços ferramenta.

<b>Grupo</b>	<b>Símbolo</b>
Aço de têmpera em água	<b>W</b>
Aço resistente ao choque	<b>S</b>
<b>Aço para trabalho a frio</b>	
Aço de têmpera em óleo	<b>O</b>
Aço de têmpera ao ar	<b>A</b>
Aço de alto C e alto Cr	<b>D</b>
<b>Aço para trabalho a quente</b>	
Aço ao Cr	<b>HI - H19</b>
Aço ao W	<b>H20 - H39</b>
Aço ao Mo	<b>H40 - H59</b>
<b>Aço de corte rápido</b>	
Aço ao W	<b>T</b>
Aço ao Mo	<b>M</b>
<b>Aços para fins especiais</b>	
Aço de baixa liga	<b>L</b>
Aço para moldes	<b>P</b>
Aço extra-duro	<b>F</b>

Fonte: Gobbi (2009).

Aços ferramenta também são empregados para fins que necessitem de propriedades diferenciadas como alta resistência mecânica, ao desgaste ou tenacidade. A composição química desses materiais pode variar muito, desde aços baixa liga até aços altamente ligados. Contudo, o que difere tal classe de materiais dos aços convencionais é o processo de manufatura especial e a significativa modificação de propriedades após os tratamentos térmicos (TOOLS STEELS, 1988). Os tratamentos térmicos mais usuais são a têmpera e revenimento, que propiciam dureza e propriedades mecânicas adequadas para maioria das aplicações.

Normalmente, os aços-ferramenta são fornecidos pelos fabricantes como recozidos e aplicados após tratamento de têmpera e revenido (KRAUSS, 1990, BÖHLER, 2002, UDDEHOLM, 2002-2006).

A dureza de fornecimento na condição de recozido, na faixa de 220 a 300 HB facilita a conformação e a usinagem. Os aços ferramenta são utilizados após uma série de tratamentos térmicos: austenização, têmpera e revenido para que contraiam propriedades mecânicas amoldadas ao uso. A austenização refere-se ao processo de aquecer o aço até a temperatura de solubilização e, em seguida resfriá-lo rapidamente (têmpera) com o objetivo de evitar as transformações perlítica e bainítica, obtendo-se, assim, uma estrutura martensítica metaestável, que é frágil e o

tratamento térmico de revenimento é essencial para o resgate parcial de uma estrutura com maior tenacidade. Na prática, o revenido é um tratamento térmico subcrítico com o objetivo de aquecer os aços temperados numa temperatura inferior à eutetóide, promover um patamar, seguido novamente de resfriamento até a temperatura ambiente por várias vezes, se necessário (COSTA E SILVA, 1988, MEI, 1988, KRAUSS, 1988 *et al.*).

O tratamento de revenimento objetiva facilitar fenômenos de difusão com vistas a alcançar uma estrutura mais estável e menos frágil, sendo que este tratamento normalmente é aplicado nos aços ferramenta para atingir um equilíbrio entre dureza e tenacidade dependendo da aplicação final da ferramenta, bem como, em alguns casos, promover o endurecimento secundário. Os elementos microestruturais mais importantes presentes nos aços-ferramenta, em condições de uso são a matriz de martensita revenida com carbonetos que, na maioria dos casos, são coerentes com a matriz (ROBERTS; KRAUSS; KENNEDY, 1998).

Entre os materiais amplamente utilizados pela indústria de ferramentaria para a fabricação de componentes de estampos estão os aços ABNT NM 122 grau O1 e ABNT NM 122 grau D2.

O Aço ABNT NM 122 grau O1 destaca-se por apresentar um custo bastante razoável em comparação aos demais de mesma classificação, sendo que, dentre os temperáveis em óleo é o mais utilizado (GGD METALS, 2016). Tem como principais aplicações, o corte e a conformação a frio de aços e metais não ferrosos, matrizes para conformação de porcelana, instrumentos de medição além de aplicações onde seja necessária grande estabilidade dimensional, resistência ao desgaste e principalmente ao deslizamento. Dentre os aços para trabalho a frio, o O1 torna-se relevante, por manter a integridade de seu gume constante por um tempo razoável para aplicações onde a abrasividade do produto não seja muito grande, já caso seja necessário uma maior resistência a abrasão, normalmente são utilizados os aços da categoria “D” como o ABNT NM 122 grau D2 e ABNT NM 122 grau D6.

O aço ferramenta para trabalho a frio ABNT NM 122 grau D2 é amplamente utilizado em estampos de corte, dobra e repuxo, pentes laminadores de roscas e calibres, pois possui excelente combinação entre propriedades mecânicas e elevada resistência ao desgaste (MENDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2003).

Outro aço de mesma classificação é o aço ABNT NM 122 grau D6 cuja característica é uma dureza maior após tratamento térmico. Entretanto sua

resistência à fratura é inferior a do aço D2. O aço ABNT NM 122 grau D2 pode ser tratado termicamente sob diferentes procedimentos o que lhe confere uma combinação ótima entre dureza e resistência à fratura, mesmo com 59 HRC (GGD METALS, 2016).

## 5 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico refere-se ao conjunto de operações de aquecimento e resfriamento dos aços com controle da temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento para alterar suas propriedades ou atribuir-lhes características determinadas, sendo que as propriedades dependem, em princípio, da estrutura do aço. Os tratamentos térmicos alteram de alguma forma a estrutura dos aços alterando suas propriedades. Cada estrutura obtida tem suas características próprias transferidas ao aço.

Sendo assim, é importante destacar a importância dos tratamentos térmicos, principalmente nos aços de alto carbono e naqueles que apresentam também elementos de liga. Os tratamentos térmicos têm como principais objetivos:

- Remoção de tensões internas (geradas por esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa);
- Aumento ou diminuição da dureza; da resistência mecânica e da ductibilidade;
- Melhora da ductibilidade, da usinabilidade, da resistência ao desgaste, das propriedades de corte, da resistência à corrosão e ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

O tratamento térmico dos aços ferramenta apresenta muitas peculiaridades. Por uma série de fatores, e não apenas fatores metalúrgicos, pode ser considerado muito diferente do tratamento térmico de aços ao carbono ou baixa liga, por exemplo, aplicados em peças seriadas.

Em primeiro lugar, deve-se considerar a alta dependência das propriedades finais do material com o tratamento térmico aplicado, ou seja, as condições de temperatura, tempo e taxas de aquecimento e resfriamento, os equipamentos utilizados, enfim, todo o procedimento que eventualmente está ou na maioria dos casos, estará relacionado ao desempenho final da ferramenta.

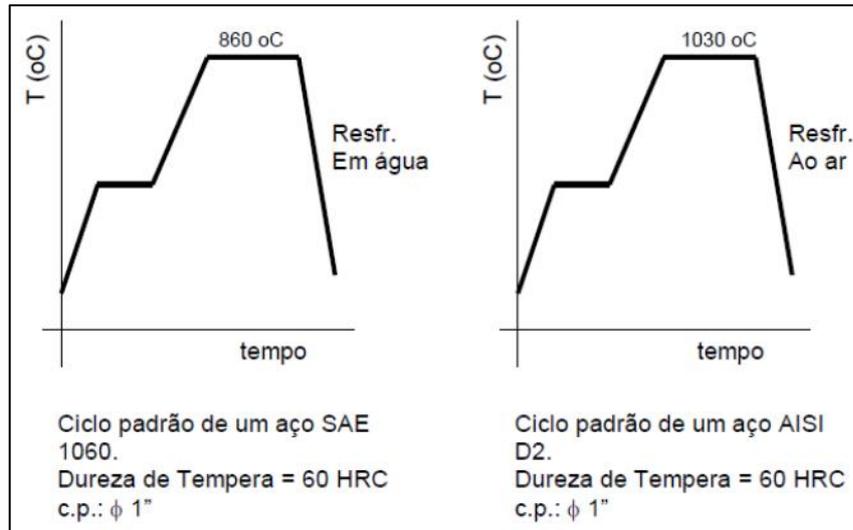
A segunda particularidade refere-se ao alto valor agregado das peças a serem tratadas, neste caso, moldes e matrizes nos quais os custos de usinagem bem como do próprio aço já estão embutidos. A terceira particularidade representa uma das etapas finais do processo, pois, caso ocorram problemas sérios, será difícil repor a ferramenta tratada no prazo solicitado. O quarto item refere-se ao fato de os

moldes e matrizes não serem ferramentas padronizadas e, com isso, há uma variação constante entre os tempos de aquecimento e a geometria, e os concentradores de tensão a ela relacionados. A quinta particularidade diz respeito à faixa estreita de temperatura, tanto de austenitização e revenimento, bem como pela variação deste faixa entre os diversos tipos de aço ferramenta aplicados (WILSON 1975 e HONEYCOMBE, 1981).

Pode-se dizer que todas as particularidades do tratamento térmico do aço ferramenta conduzem a problemas e falhas do processo e, conseqüentemente, diminuição do rendimento da ferramenta. As falhas podem ser divididas em dois subgrupos, sendo o primeiro daquelas apresentadas no próprio processo, como trincas pequenas ou catastróficas, distorções, problemas superficiais e outras falhas que podem ser observadas. Mesmo sendo consideradas graves, essas falhas não colocam em risco a vida útil da ferramenta. Em contrapartida, não apresentam resultados inesperados no período de utilização, tendo em vista que são identificadas antes de a mesma entrar em operação (HONEYCOMBE, 1981).

Como segunda possibilidade de desvios no tratamento térmico encontram-se as condições de temperatura, tempo e taxas de resfriamento empregadas. Na maior parte dos casos, o controle de qualidade do tratamento térmico é realizado somente por medidas de dureza na superfície da ferramenta. Tal fato se explica por serem peças únicas e de alto valor, sem qualquer possibilidade para sua destruição e análise microestrutural e das propriedades obtidas. Sendo assim, se a dureza estiver correta, será difícil identificar possíveis desvios de tratamento térmico antes da utilização da ferramenta. Tais desvios somente serão observados se for percebida uma menor vida útil da ferramenta e se a causa da falha puder ser definida com precisão (HONEYCOMBE, 1981).

Segundo Sartori (2004, p.4) o que diferencia um aço comum de um aço ferramenta em termos de tratamento térmico são, fundamentalmente as temperaturas e os tempos utilizados. Tendo em vista as características finais relacionadas à aplicação, o conhecimento de tais comportamentos é de fundamental importância. A figura 12 apresenta as diferenças de ciclos de tratamento térmico para os aços SAE 1060 e AISI D2.



**Figura 12 – Ciclos de têmpera para os aços SAE 1060 e AISI D2.**

Fonte: Sartori (2004).

Os gráficos da figura 12 apresentam as diferenças de temperatura utilizadas e os meios de resfriamento, sendo este segundo o que determina a velocidade de resfriamento. Estes ciclos são definidos em função da composição química do aço. Normalmente, os aços ferramenta têm temperaturas de tratamento de têmpera pré-definidos pelo seu fabricante, e, salvo em casos excepcionais, não devem ser alterados, pois podem ocorrer mudanças drásticas nas propriedades alcançadas.

Vale ressaltar que o tratamento térmico afeta o aço como um todo causando profundas modificações micro estruturais e garantindo algumas propriedades pré-determinadas adequando-os a diversas aplicações. Entre estas modificações, merecem destaque o aumento da resistência mecânica, a melhora da resistência ao desgaste e a modificação das propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 1988).

Em relação aos aços ABNT NM 122 grau O1 e grau D2, diversos fabricantes recomendam a sequencia adequada dos tratamentos térmicos a serem empregados bem como os resultados esperados. Do catálogo do fabricante são obtidas as seguintes orientações para o tratamento térmico (VILLARES, 2016):

Aço ABNT NM 122 grau O1 (que recebe o nome comercial de VND):

- Tratamento de alívio de tensões onde a retirada de material tenha sido acima de 30% para minimizar as deformações que possam ocorrer durante o processo de têmpera. Utilização de uma temperatura 500 e 600°C,

sendo o aquecimento de maneira lenta, bem como o resfriamento dentro do forno até 200°C.

- Tratamento de têmpera com temperatura entre 790 e 820°C com a recomendação de pré aquecimento e resfriamento em óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70°C ou banho de sal fundido, mantido entre 180 e 230°C.
- Tratamento de revenimento, realizado imediatamente após a têmpera, tão logo as peças atinjam 60°C. Fazer, no mínimo, 2 revenimentos e entre cada revenimento as peças devem resfriar até a temperatura ambiente. As temperaturas devem ser escolhidas conforme a dureza desejada (em diagrama fornecido pelo fabricante), sendo o tempo de no mínimo, 2 horas.

Para o aço ABNT NM122 grau D2 (comercialmente conhecido como VD2)

- Tratamento de alívio de tensões com temperaturas entre 500 e 600°C e resfriamento em forno até a temperatura de 200°C. Se aplicado após o trabalho, o alívio de tensões deve ser realizado em uma temperatura 50°C inferior a temperatura do último revenimento.
- Tratamento de têmpera com aquecimento entre 1010 e 1030°C com recomendação de pré-aquecimento das peças. O resfriamento deve ser em óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C ou em banho de sal fundido, mantido entre 500 e 550 °C.
- Tratamento de revenimento realizado logo após a têmpera, tão logo as peças atinjam uma temperatura de 60°C. Da mesma forma que no aço O1, recomenda-se no mínimo 2 revenimentos em temperatura selecionada conforme dureza desejada e com base em diagrama fornecido pelo fabricante.

Para ambos os materiais, os fabricantes recomendam, no caso da usinagem pelo processo de eletroerosão, um novo tratamento a uma temperatura 50°C inferior a utilizada no último revenimento. Tal medida tem como objetivo minimizar os efeitos das temperaturas elevadas inerentes ao processo de usinagem por descargas elétricas.

Resumidamente, as condições de tratamento térmico têm influência significativa na microestrutura e propriedades dos aços ferramenta e,

conseqüentemente, na vida útil do molde, matriz ou da ferramenta empregada (MARIANTE *et al.*, 1999).

### **5.1 O tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões**

O tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões refere-se ao aquecimento do aço a temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica para aliviar as tensões surgidas no processo de solidificação ou produzidas em operações de endireitamento, corte por chama, soldagem ou usinagem. Tais tensões começam a ser aliviadas à temperatura logo acima da ambiente; no entanto, é recomendável aquecimento até pelo menos 500° C para obter melhores resultados. De qualquer maneira, a temperatura de aquecimento deve ser a mínima combinada com o tipo e as condições da peça para não alterar sua estrutura interna, bem como não ocorram alterações sensíveis de suas propriedades mecânicas.

### **5.2 O tratamento de têmpera**

O tratamento de têmpera refere-se ao resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica (cerca de 50°C acima da linha A1 os hipereutetóides) em um meio como óleo, água, salmoura ou ar.

Vale destacar que a velocidade de resfriamento nas condições apresentadas anteriormente vai depender do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças. Considerando que na têmpera o componente final desejado é a martensita, o objetivo dessa operação, levando em conta as propriedades mecânicas e o aumento da dureza deve ser verificado até certa profundidade.

Também são resultados da têmpera a redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de algumas tensões internas, sendo que tais inconvenientes são diminuídos ou eliminados pelo revenido.

Visando ao sucesso da têmpera devem ser levados em conta diversos fatores, começando pela velocidade de resfriamento que deve impedir a transformação da austenita nas temperaturas mais altas em qualquer parte da peça que se queira endurecer.

### 5.3 O tratamento de revenimento

O revenimento é o tratamento térmico que acompanha a têmpera, tendo como objetivo abolir os inconvenientes causados pelo primeiro tratamento. Além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige as durezas exageradas e fragilidade do material aumentando sua ductibilidade e resistência ao choque. De acordo com a Spectru Metalurgia, conforme a temperatura do revenimento ocorre as seguintes alterações:

- Entre 25° e 100°C há uma segregação a uma redistribuição do carbono em direção à discordância, mas essa pequena precipitação presente no carbono pouco afeta a dureza. Este fenômeno é predominante em aços de alto carbono;

- Entre 100° a 250°C, conhecido como primeiro estágio do revenido, ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula  $Fe_2-3C$ , e reticulado hexagonal. Este carboneto pode não estar presente em aços de baixo carbono e de baixo teor em liga. Há uma queda na dureza Rockwell, que pode chegar a 60 HRC;

- Entre 200° a 300°C, às vezes denominado segundo estágio do revenido ocorre a transformação de austenita retida em bainita nos aços de carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair;

- No terceiro estágio do revenido, entre 250° a 350°C, forma-se um carboneto metaestável de fórmula  $Fe_5C_2$  e este processo de transformação verifica-se em aços de alto carbono. A estrutura visível ao microscópio é uma massa escura antigamente chamada “troostita”, nome não mais usado. A dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir valores pouco acima a 50;

- Entre 400 a 600°C há uma recuperação da subestrutura de discordância. Os aglomerados de  $Fe_3C$  passam a uma esferoidal, mantendo uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para 45° a 25°;

- Entre 500° a 600°C, há precipitação de carboneto de liga nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W. A transformação que ocorre é chamada de endurecimento secundário ou quarto estágio do revenido;

- No último estágio, entre 600° a 700°C, há uma recristalização de crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta forma esferoidal, a ferrita apresenta forma equiaxial. A estrutura é normalmente chamada de “esferoidita” e tem como característica ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell C.

## 6 RUGOSIDADE

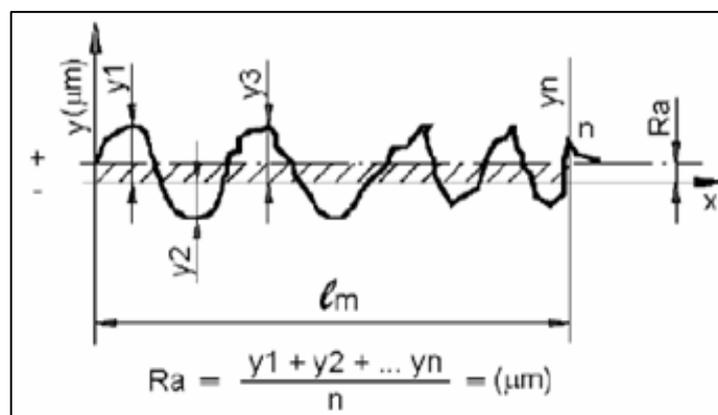
É o conjunto de irregularidades, ou pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, como o rugosímetro. A rugosidade interfere em características mecânicas como:

- Aparência;
- Resistência ao desgaste;
- Vedação;
- Qualidade de deslizamento;
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluido;
- Qualidade de aderência que a superfície oferece as camadas protetoras;

### 6.1 Parâmetros de Rugosidade

- Rugosidade média (Ra)

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $Y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ) conforme indicado na figura 13. Tal grandeza corresponde à altura de um retângulo, de área igual à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e da linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ), adaptado da norma DIN em ISO 4287 (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2004).

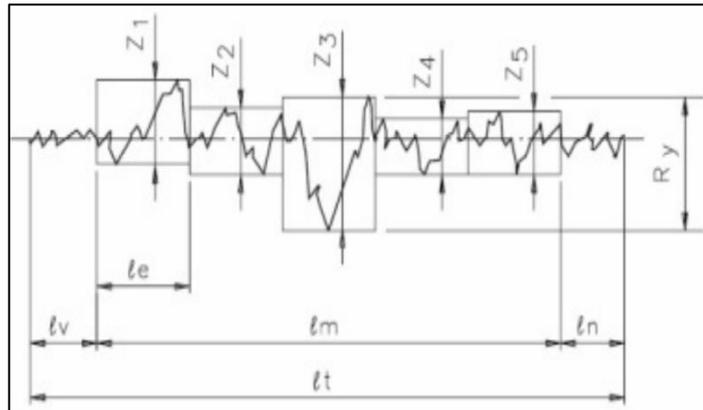


**Figura 13 – Rugosidade média (Ra).**

Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2004).

- Rugosidade máxima ( $R_y$ )

É o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). Conforme figura 14, o maior valor parcial é o  $Z_3$ , que está localizado no 3º *cut off*, e que corresponde à rugosidade  $R_y$  (AGOSTINHO, RODRIGUES, LIRANI, 2004).

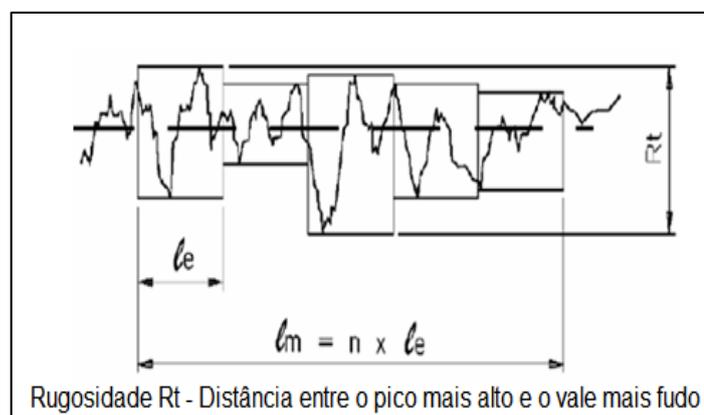


**Figura 14** – Rugosidade máxima ( $R_y$ ).

Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2004).

- Rugosidade total ( $R_t$ )

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). Na figura 15, nota-se que o pico mais alto está no retângulo  $Z_1$ , e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo  $Z_3$ . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_t$  (AGOSTINHO, RODRIGUES, LIRANI, 2004).



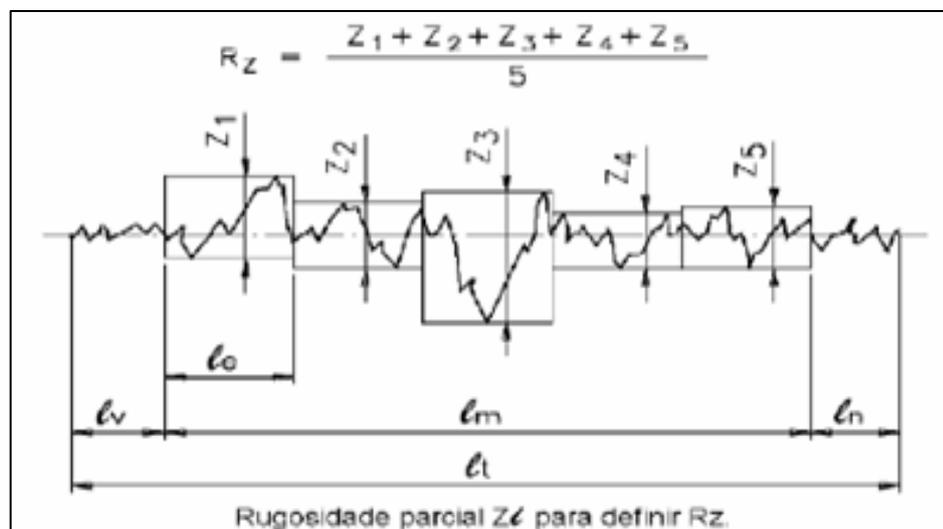
Rugosidade  $R_t$  - Distância entre o pico mais alto e o vale mais fundo

**Figura 15** – Rugosidade total.

Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2004).

- Rugosidade média (Rz)

É a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ), sendo que rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, presentes no comprimento de amostragem (*cut off*), conforme figura 16. Na representação gráfica do perfil, esse valor refere-se à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil no comprimento da amostragem ( $l_e$ ) (AGOSTINHO, RODRIGUES, LIRANI, 2004).



**Figura 16 – Rugosidade média (Rz).**

Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2004).

## 7 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento para a realização dos experimentos respeitou uma sequência de preparação das amostras desde a obtenção dos materiais brutos até a usinagem em eletroerosão e avaliação dos resultados tendo como objetivo a comparação do comportamento das amostras tratadas termicamente com as que foram mantidas na condição sem tratamento térmico. A figura 17 apresenta um fluxograma que foi desenvolvido para sistematizar, orientar e organizar os trabalhos de usinagem e análise dos resultados. A maior parte dos experimentos foram realizados nos laboratórios de mecânica e ferramentaria da Escola SENAI “Manuel Garcia Filho” em Diadema.

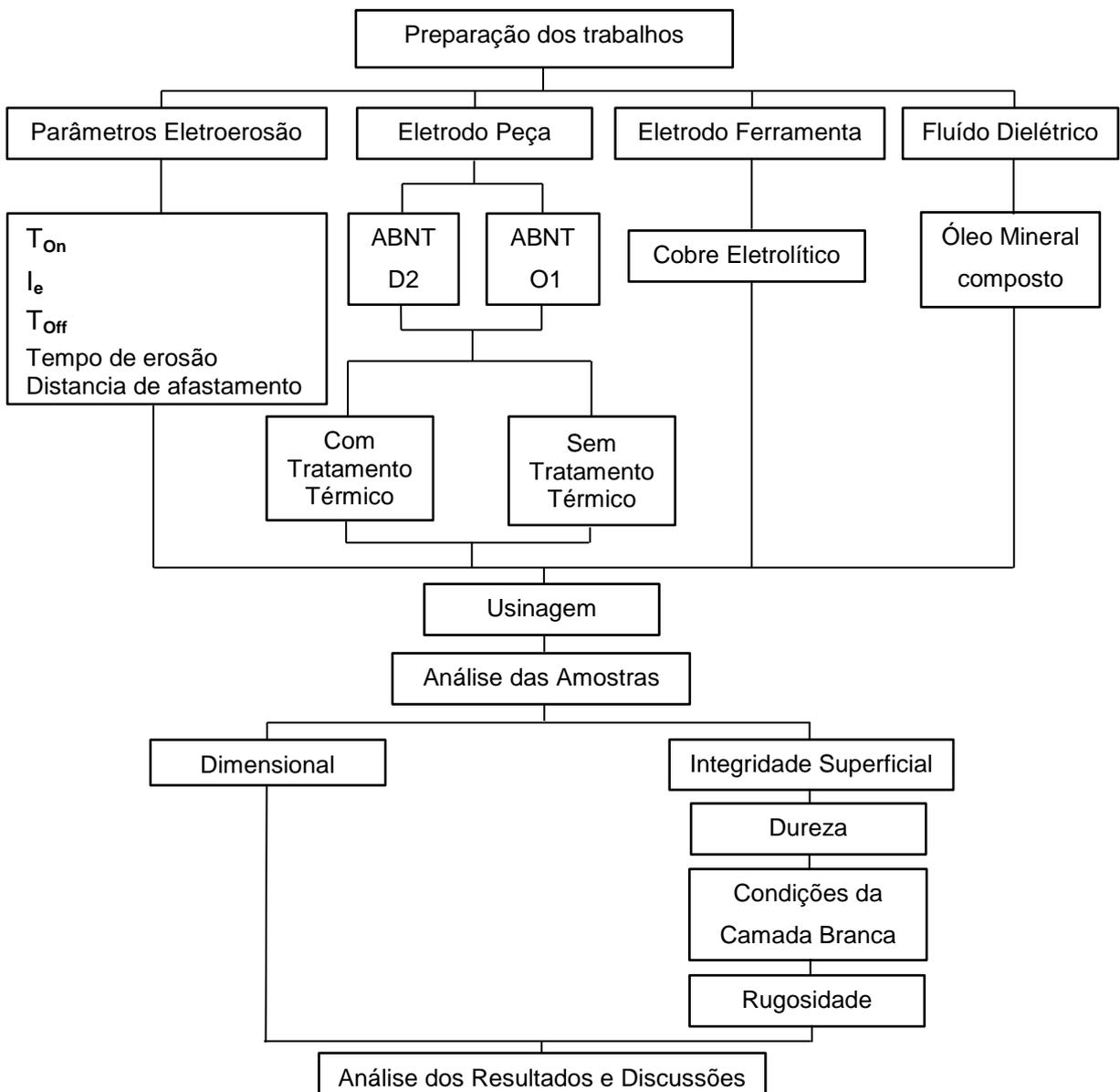


Figura 17 – Fluxograma do procedimento experimental.

## 7.1 Corpos de prova (eletrodo peça)

Os materiais selecionados como corpos de prova (CPs) para os experimentos foram os aços ABNT NM 122 GRAU D2 e ABNT NM 122 GRAU O1. Classificados como aços ferramenta para trabalho a frio ambos possuem vasta aplicação no setor metal-mecânico principalmente no segmento de corte e conformação a frio. Podem ser tratados termicamente garantindo entre outras propriedades, boa resistência à fratura e ao desgaste e excelente estabilidade dimensional. Segundo a ABNT NM 122, os aços D2 e O1 devem apresentar a composição química descrita na tabela 2.

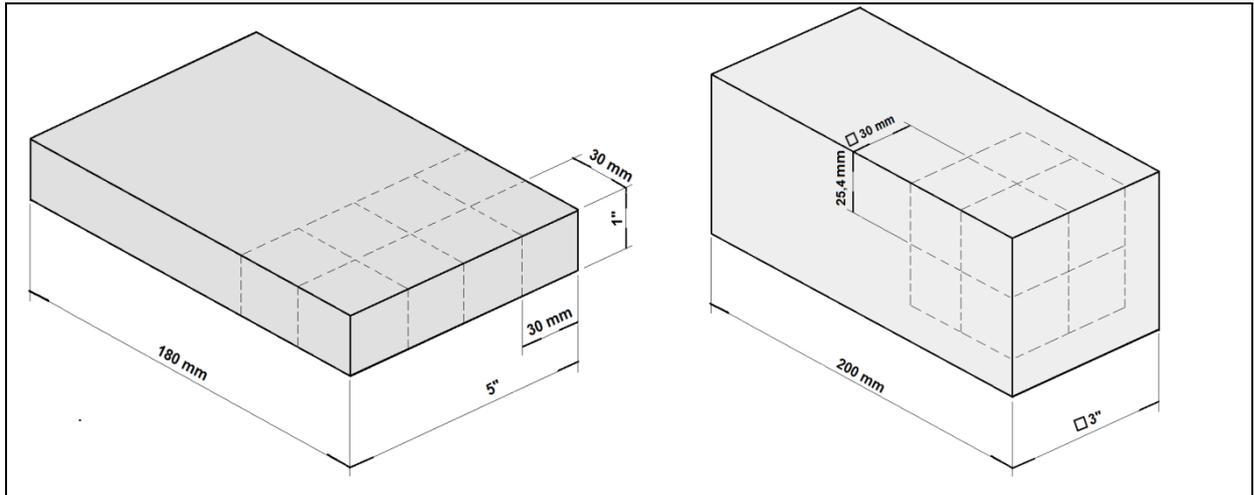
**Tabela 2 – Composição química dos aços ABNT NM 122 GRAU D2 e ABNT NM 122 GRAU O1.**

<b>Aço ABNT NM 122 GRAU D2 (%em peso)</b>						
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
1,40 - 1,60	0,60 (máx)	0,60 (máx)	11,0 - 13,0	0,30 (máx)	0,70 - 1,20	1,10 (máx)
<b>Aço ABNT NM 122 GRAU O1 (%em peso)</b>						
C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V
0,85 - 1,00	1,00 - 1,40	0,50 (máx)	0,40 - 0,60	0,30 (máx)	0,40 - 0,60	0,30 (máx)

Fonte: ABNT NM 122 (2005).

Foram preparadas oito amostras de aço ABNT NM 122 GRAU O1 e oito de aço ABNT NM 122 GRAU D2. O material bruto utilizado para a obtenção dos CPs de D2 foi uma barra laminada nas medidas de 1" x 5" x 180mm. Para o O1 foi utilizado um bloco de 3" x 3" x 200mm. As barras foram cortadas no sentido transversal e longitudinal (observando o sentido de laminação), de modo a obter amostras na medida bruta de 25,4 x 30 x 30mm como descrito na figura 18.

Quatro CPs de cada aço receberam tratamento térmico para alívio de tensões e em seguida de têmpera e revenimento. Os demais CPs foram mantidos na condição sem tratamento térmico. Após o beneficiamento as 16 amostras foram retificadas, todas juntas de modo a se obter as dimensões finais de 25,0 x 25,0 x 20mm. Em seguida, os CPs foram devidamente identificados, sendo que as peças de D2 receberam números de 1 até 8 sendo as quatro últimas tratadas termicamente. As peças de O1 receberam identificação com letras de A até H e da mesma forma, as quatro últimas com tratamento térmico de têmpera e revenimento.



**Figura 18 – Representação das barras para retirada dos Corpos de Prova.**

O tratamento térmico foi realizado no laboratório de tratamento térmico do SENAI Diadema, seguindo as orientações disponíveis no catálogo do fabricante dos materiais. Para o Aço ABNT NM 122 GRAU D2 o procedimento foi:

a) Para minimizar as distorções durante a têmpera, foi realizado alívio de tensões a uma temperatura 600°C durante duas horas e resfriamento lento dentro do próprio forno até 300°C e a seguir em ar calmo.

b) O tratamento térmico de têmpera foi feito a uma temperatura de 1040°C com tempo de permanência de 50 minutos e resfriamento em óleo. Antes de atingir a temperatura de 1040°C foram feitos dois pré-aquecimentos, o primeiro até atingir 600° e o segundo a 850°C.

c) Foram feitos dois revenimentos por duas horas cada um a uma temperatura de 540°C e resfriamento lento à temperatura ambiente.

O procedimento para tratamento térmico do aço ABNT NM 122 GRAU O1 foi:

a) Para minimizar as distorções durante a têmpera, foi feito alívio de tensões a uma temperatura de 550°C durante duas horas e resfriamento lento dentro do próprio forno até 300°C e a seguir em ar calmo.

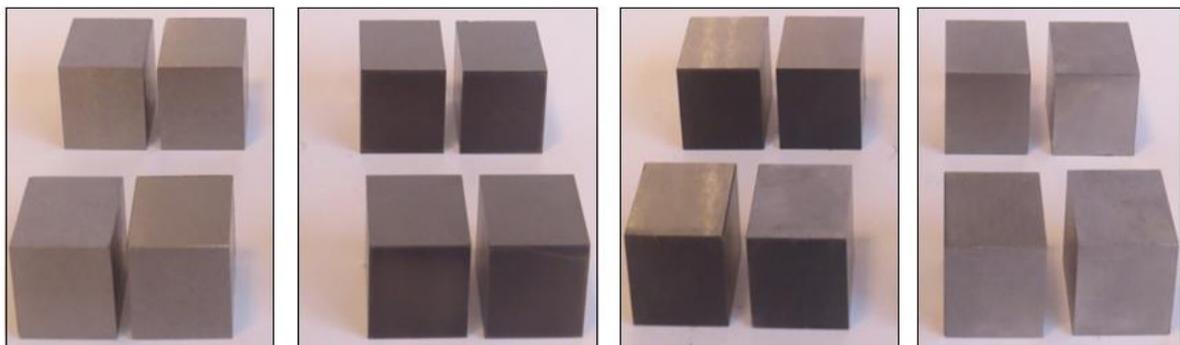
b) Tratamento térmico de têmpera com pré-aquecimento a 600°. Os CPs foram austenitizados a um 820°C por 50 minutos e resfriados em óleo.

c) Foram feitos dois revenimentos por duas horas cada um a uma temperatura de 300°C e resfriamento lento à temperatura ambiente.

As figuras 19 e 20 ilustram respectivamente o ambiente utilizado no tratamento térmico e os corpos de prova.



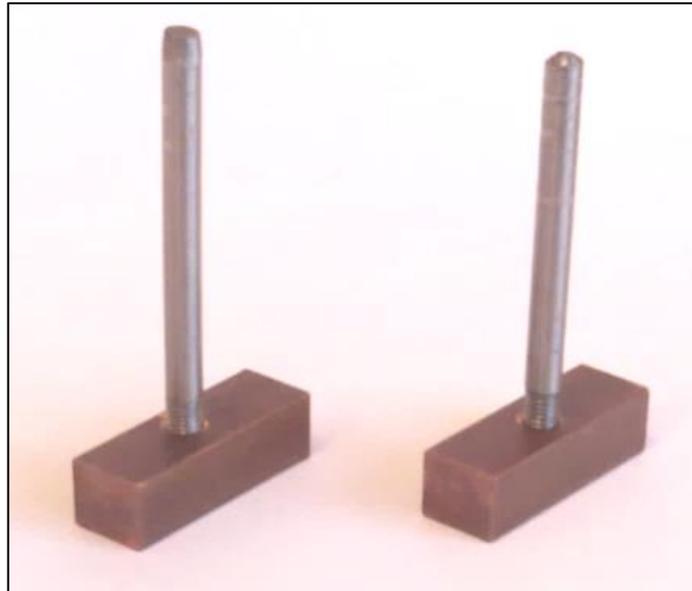
**Figura 19 – Laboratório de tratamento térmico.**



**Figura 20 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU D2 como recebido (b) aço ABNT NM 122 GRAU D2 com tratamento térmico; (c) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 com tratamento térmico e (d) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 como recebido.**

## 7.2 Eletrodo Ferramenta

Como eletrodo ferramenta, foram preparados e devidamente identificados 16 eletrodos de cobre eletrolítico, um para cada CP, nas medidas de 9,52mm x 9,52mm x 28mm. Para fixação no cabeçote da máquina, hastes de aço ABNT NM 87:2000 Grau 52100 foram fixadas aos eletrodos conforme descrito na figura 21.



**Figura 21 – Eletrodo ferramenta.**

Os materiais indicados para fabricação do eletrodo ferramenta devem apresentar excelente condutividade elétrica e ponto de fusão elevado. O cobre eletrolítico, além de apresentar estas características, possui excelente usinabilidade. De acordo com ARANTES E SILVA (2003), o cobre é o material mais comum utilizado na eletroerosão por penetração devido à sua alta condutividade térmica e baixo desgaste relativo. A tabela 3 apresenta as propriedades físicas do cobre eletrolítico.

**Tabela 3 – Propriedades físicas do cobre eletrolítico.**

Densidade a 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	Ponto de Fusão (°C)	Coeficiente médio de expansão térmica (20-300°C) (10 <sup>-6</sup> /°C)	Condutibilidade Elétrica Volumétrica a 20°C (%I.A.C.S)		Condutibilidade Térmica a 20°C (cal/cm s°C)	Calor Específico a 20 °C (cal/g°C)	Resistividade Elétrica (ohm mm <sup>2</sup> /m)		Módulo de Elasticidade a 20°C (MPa)	Módulo de Rgidez (Torção) a 20°C (MPa)
			Recozido	Encruado			Recozido p/ 100-101% I.A.C.S (100-200°C)	Encruado p/ 97% I.A.C.S (0-100°C)		
8,89	1083	17,7	100-101,5	97	0,93	0,092	0,017- 0,01724	0,0178	115000	44000

Fonte: Termomecânica (2016).

Para garantir a precisão dimensional necessária, a largura dos eletrodos foi aferida em uma máquina tridimensional e não foi encontrado um desvio maior que 0,001mm.

### 7.3 Máquina de eletroerosão

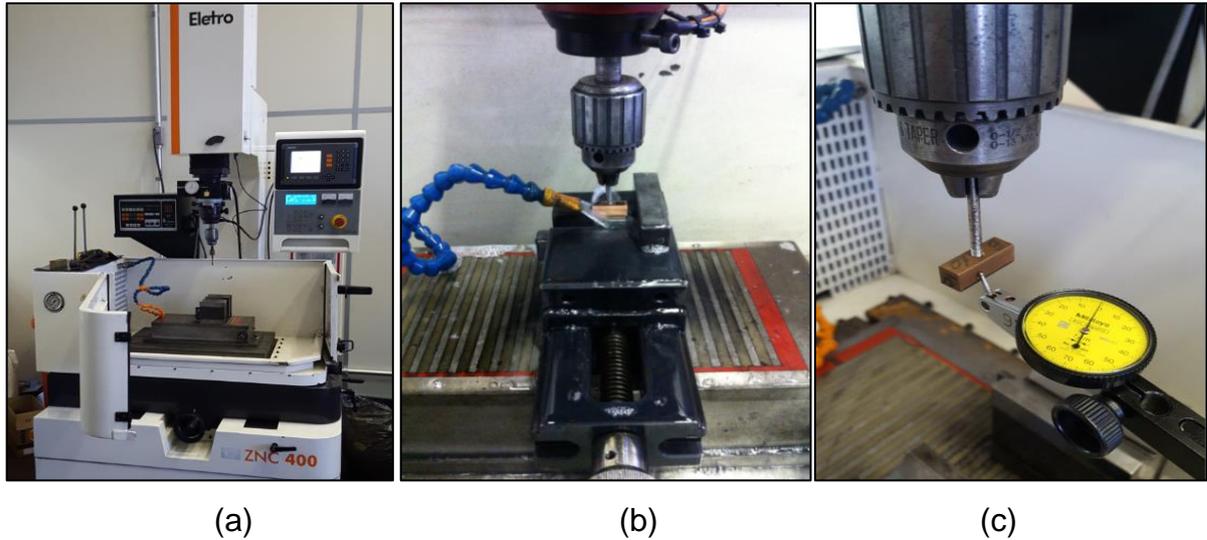
As amostras utilizadas neste trabalho foram usinadas em uma máquina de eletroerosão por penetração marca ELETRO modelo ZNC 400. Esta máquina possui um sistema mecânico de guias lineares e esferas recirculantes com curso de trabalho de 400 mm no eixo “X”, 300 no eixo “Y” e 255 mm no eixo “Z”. Admite uma massa de eletrodo de até 80 kg e de 1000 kg apoiado sobre a mesa. O equipamento conta com acessórios como leitor digital dos eixos, porta eletrodo basculante giratório, sistema orbital rotativo para erosão acoplado ao cabeçote e estabilizador de tensão. Outras especificações da máquina, conforme manual do fabricante Eletro (2011) são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 – Características técnicas da Eletroerosão Eletro ZNC 400.**

<b>CABEÇOTE</b>		
Resolução de medida do eixo "Z"	mm	0,001
Perpendicularismo eixo lateral	mm	0.020/300
Perpendicularismo eixo frontal	mm	0.020/300
<b>MESA DE COORDENADAS</b>		
Paralelismo mesa de coord. X - Y	mm	0.025/300
Esquadro mesa coordenadas. X - Y	mm	0.015/300
<b>BANDEJA</b>		
Dimensões internas	mm	900x500x350
Tempo de enchimento	s	80
Tempo de esvaziamento	s	100
Volume do dielétrico	l	140
<b>SISTEMA DIELETRICO</b>		
Capacidade do tanque	l	700
Potência da bomba	CV	3/4
Vazão média da bomba	L/h	4000
Pressão máxima da bomba	Kg/cm <sup>2</sup>	1.8
Número de filtros	-	2
Capacidade de filtragem	microns	5
Dimensões externas do tanque	mm	1500x1160x580
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>		
Tensão	V	220/380 60Hz
Potência total	KVA	4.6
<b>PESOS APROXIMADOS</b>		
Máquina	Kg	1400

Fonte: Eletro (2011).

Para a fixação das peças foi utilizada uma morsa de precisão apoiada sobre uma base magnética. A figura 22 apresenta a máquina de eletroerosão e a fixação dos eletrodos.



**Figura 22 – (a) Máquina de eletroerosão modelo ZNC 400; (b) sistema de fixação das peças; (c) alinhamento do eletrodo ferramenta.**

Como fluido dielétrico foi utilizado um óleo mineral composto à base de hidrocarbonetos recomendado pelo fabricante da máquina e fornecido pela ITW CHEMICAL Ltda. As propriedades físico-químicas do fluido dielétrico estão descritas na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) fornecida pelo fabricante. São elas:

- Ponto de ebulição inicial (°C):.....210
- Ponto de fulgor (°C):.....100
- Limite inferior/superior de inflamabilidade ou explosividade (%):.....0,6 / 6,5
- Pressão de vapor (mmHg /20°C):.....0,05
- Densidade relativa (20°C g/ml):.....0,760 - 0,820
- Viscosidade (cSt):.....2,2

Em relação aos parâmetros de usinagem e com o objetivo de identificar as diferenças de dimensão, rugosidade e integridade superficial foram empregados os mesmos parâmetros de usinagem tanto para as peças tratadas termicamente como para as peças sem tratamento térmico, alguns dos quais estão destacados na Figura 23. Estes parâmetros são considerados como de pré-acabamento e foram selecionados em função de que potências maiores evidenciariam de maneira exagerada as imperfeições inerentes ao processo. Da mesma forma que regulagens voltadas a acabamento poderiam não evidenciar as características que se pretende analisar. São eles:

a) *Impulso On = 150µs;*

O Impulso On determina a duração do pulso ou tempo de descarga e possui como unidade de referência o micro-segundo. É o tempo durante o qual a centelha possui energia elétrica.

b) *Quantidade de corrente  $I_e = 2TS$ ;*

Trata-se da corrente de descarga consumida no processo de eletroerosão sendo um parâmetro de extrema importância na qualidade e rendimento da operação. Este parâmetro se relaciona diretamente com o grau de acabamento desejado, o desgaste do eletrodo e a velocidade de usinagem.

c) *Pausa Dc = 88%;*

Este parâmetro relaciona-se ao tempo de pausa entre duas descargas consecutivas. Neste tempo ocorre a interrupção da descarga elétrica, sendo o tempo necessário à estabilização do ambiente no gap, incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada.

d) *Tempo de erosão = 1s;*

Refere-se ao tempo durante o qual as descargas são disparadas sem que o eletrodo retroceda

e) *Distância de afastamento = 0,5mm.*

É a distancia em milímetro que o eletrodo retrocede facilitando a limpeza da região usinada.

VALORES ESTABELECIDOS		RUGOSIDADE	REMOÇÃO MATERIAL	DESGASTE	SUBDIMENSIONAMENTO 2gs = B - A				CONDIÇÃO TESTE			
On µs	Ie QT	Dc %	Rmax µm	Vw mm³/min	Vv %	PRESSÃO (mm)		SUCÇÃO (mm)		Vmin Volt	Iav A	Área Cm²
						2gs max	2gs	2gs max	2gs			
100	7	89	37	128	6.5	0.316	0.152	-	-	30	22	10
100	8	89	38	144	9	0.330	0.157	-	-	30	26	10
150	2	88	26	16	0.0	0.223	0.121	0.208	0.100	38	6.5	5
150	3	91	32	36	0.0	0.261	0.136	0.245	0.121	35	9.5	5
150	4	91	35	62	0.8	0.279	0.145	0.266	0.132	33	13	10

Figura 23 – Dados da tabela tecnológica fornecida pelo fabricante.

Fonte: Eletro (2011).

Tanto a peça como o eletrodo foram alinhados com auxílio de relógio apalpador com resolução de 0,005mm. O nível do dielétrico foi regulado a uma altura de aproximadamente 50 mm acima da peça e pressão da bomba aferida em 15000 kgf/m<sup>2</sup>. Um bico auxiliar de dielétrico foi posicionado na direção da usinagem com objetivo de facilitar a limpeza dos resíduos. O eletrodo ferramenta foi referenciado na face da peça e a usinagem ocorreu por um tempo de 25 minutos. Testes preliminares indicaram que este tempo seria o mínimo necessário de modo a se obter uma cavidade suficientemente profunda para a análise das características desejadas.

#### 7.4 Análise dimensional

A figura 24 mostra a máquina tridimensional Tesa Micro-Hite utilizada na medição da largura do canal usinado dos CPs. A máquina foi regulada e aferida com erro de forma de 0,001mm. Foram feitas quatro medições em pontos aleatórios em cada corpo de prova.

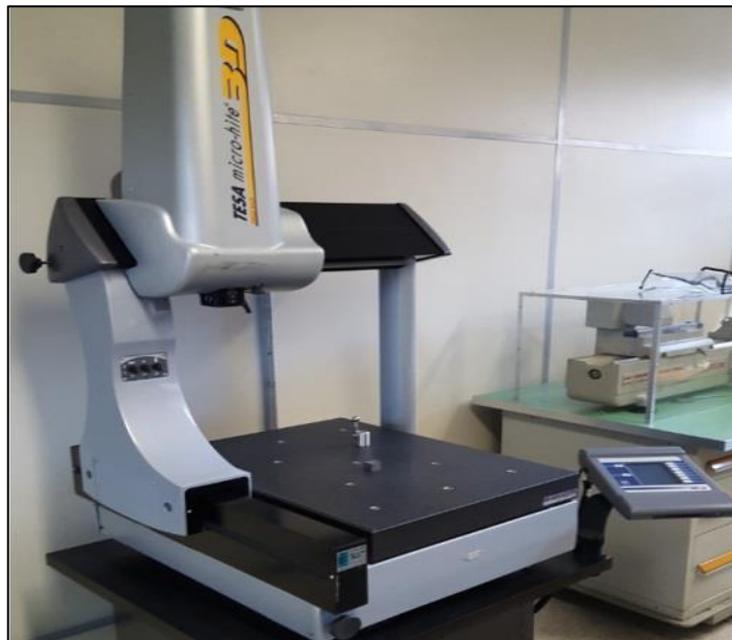


Figura 24 – Máquina tridimensional de medir.

#### 7.5 Análise da rugosidade

A rugosidade da região eletroerodida foi avaliada utilizando um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201 conforme mostrado na figura 25.

Foram avaliadas tanto a rugosidade máxima, onde foi possível comparar os valores obtidos com os valores fornecidos pela tabela tecnológica do fabricante, quanto a rugosidade média das peças. Durante a avaliação, o rugosímetro foi regulado com *cut-off* de 0,8mm sendo efetuadas quatro medições em direções aleatórias cada peça.



Figura 25 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201.

## 7.6 Análise da integridade superficial

A integridade da região usinada pode ser observada por meio da presença da camada branca originada pela resolidificação do material durante o processo de EDM. Essa camada possui características próprias como dureza elevada e seus efeitos são amplamente estudados.

Nesse sentido, a integridade superficial foi avaliada de três formas: através da dureza da camada branca, por meio de ensaio metalográfico na região usinada e com imagens geradas por Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V.).

A medição da dureza teve como objetivo a comparação da dureza (em Vickers) da região usinada e do material base da peça. Esse procedimento foi feito com a utilização de um durômetro digital portátil modelo TH 160.

Em cada amostra, o valor da dureza foi verificado quatro vezes, tanto na região usinada como fora dela, conforme figura 26.



**Figura 26 – Durômetro portátil TIME GROUP INC TH 160.**

O ensaio metalográfico teve como objetivo evidenciar as condições da camada branca e da zona termicamente afetada durante o processo de erosão.

Todas as amostras foram submetidas ao processo de lixamento com lixas d'água granulação 400, 600 e 1000. Em seguida foram submetidas ao processo de polimento com a utilização de pasta diamantada com grana de 6, 4, 2 e 1 micron. O ataque químico foi feito com o reagente Vilela por cerca de 40 segundos. A figura 27 apresenta o estereoscópio utilizado na análise metalográfica.



**Figura 27 – Estereoscópio binocular ZTX-E.**

Para uma melhor visualização dos efeitos da temperatura na integridade da superfície usinada foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura modelo Auriga da Carl ZEISS, disponível no Laboratório de Nanotecnologia da Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” e ilustrado na figura 28.

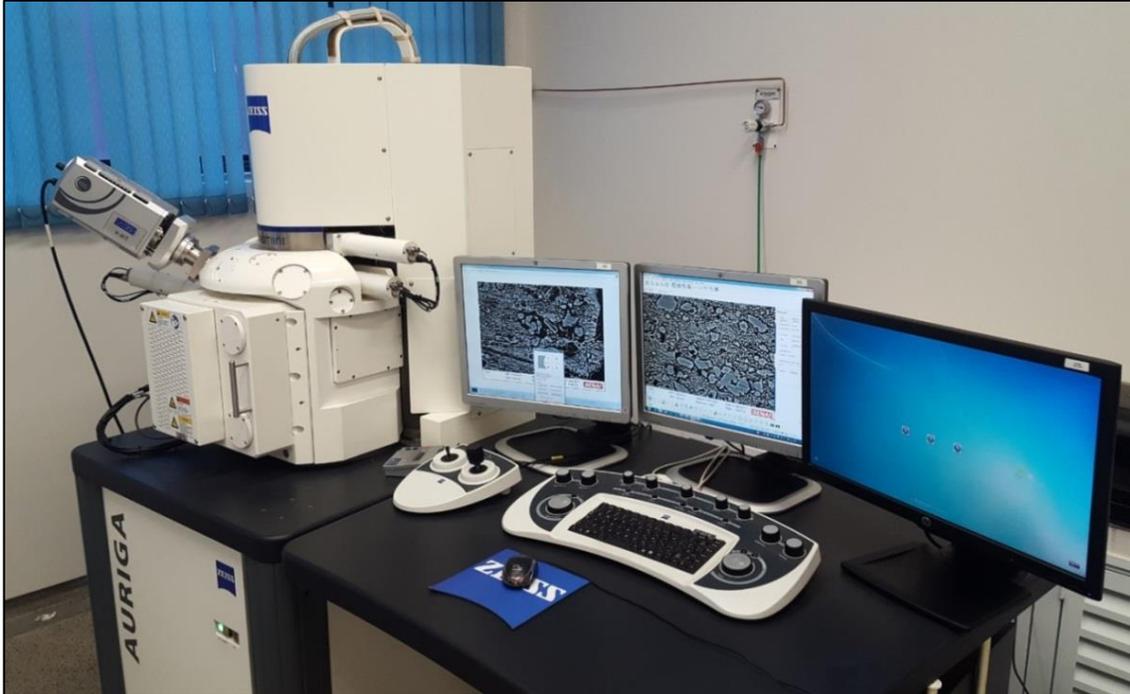


Figura 28 – Microscópio Eletrônico de Varredura.

A figura 29 ilustra as regiões analisadas durante verificação de dureza e integridade superficial.

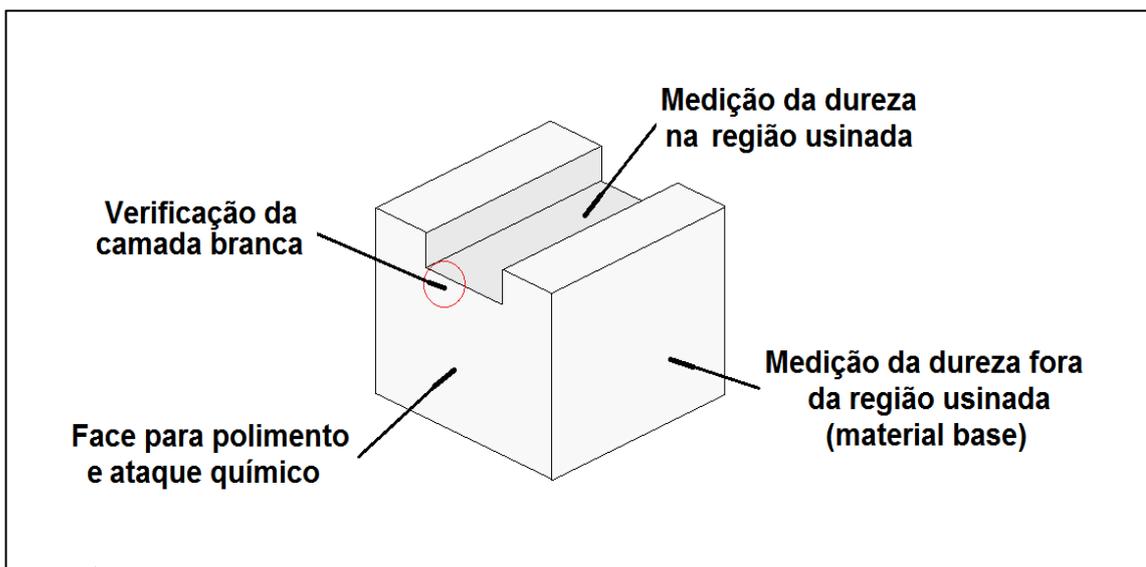


Figura 29 – Ilustração dos pontos de análise da dureza e da integridade superficial.

## 7.7 Análise da resistência elétrica

Com o objetivo de verificar se a resistência elétrica dos CPs foi alterada durante o tratamento térmico, foi utilizado um equipamento de medição de resistências marca Yokogawa modelo Precision Double Bridge 2752. Este instrumento é utilizado tanto para a medição de alta precisão de resistência, como para a medição da condutividade elétrica de condutores e calibração dos instrumentos de baixa resistência funcionando com base no conceito de ponte de Kelvin.

Para a realização dos ensaios foram feitas quatro medições em cada CP sendo que a tensão foi fixada em 5,0 Volts e a corrente em 100mA. Os valores de resistência elétrica em ohms foram registrados. As figuras 30 e 31 apresentam o equipamento utilizado para medição da resistência elétrica das amostras.

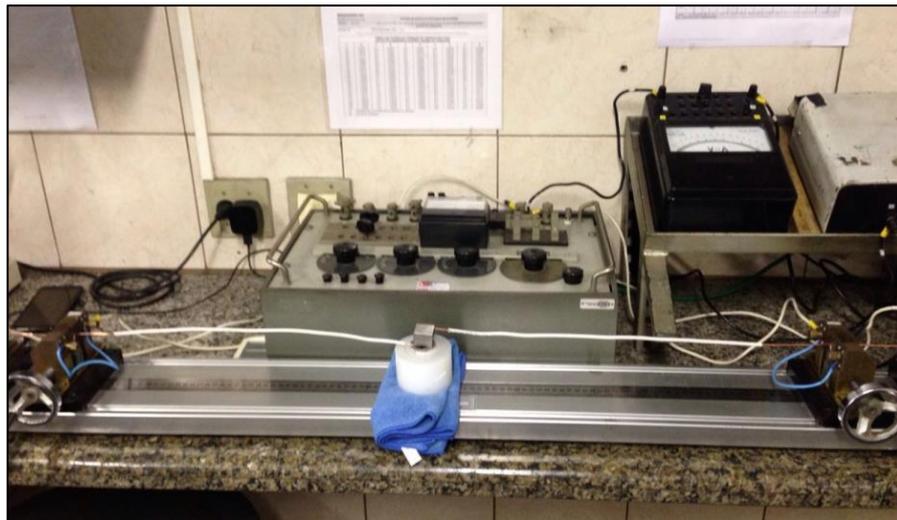


Figura 30 – Medição da resistência.

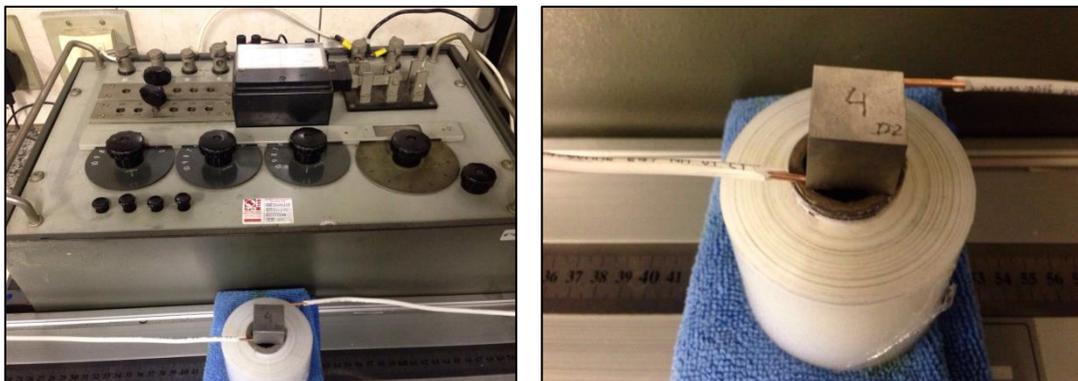


Figura 31 – Medição da resistência.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a usinagem dos corpos de prova, foram comparadas as características de largura do canal usinado, da integridade superficial, de rugosidade e das condições da camada branca conforme descrito no fluxograma do procedimento experimental.

### 8.1 Resultado da análise da integridade superficial na região usinada

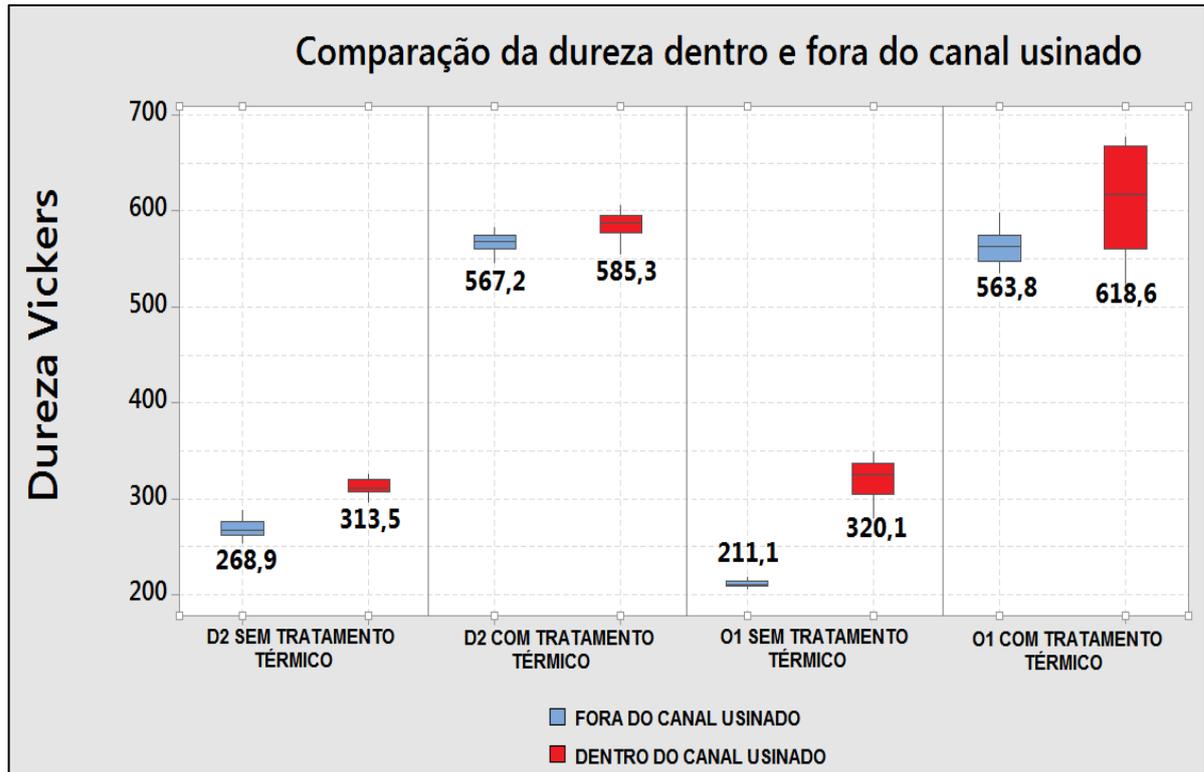
#### 8.1.1 Resultado da análise da dureza

Os valores de dureza tanto dos corpos de prova que receberam tratamento térmico como os que não receberam, constantes na tabela 5 fazem parte do estudo de integridade superficial e são o ponto de partida para a realização deste trabalho, tendo em vista seu objetivo geral.

Tabela 5 – Faixa de dureza dos corpos de prova.

Aço D2			Aço O1		
Corpo de prova	Condição	Variação de Dureza (Vickers)	Corpo de prova	Condição	Variação de Dureza (Vickers)
1	Sem Tratamento Térmico	263 - 288	A	Sem Tratamento Térmico	209 - 215
2	Sem Tratamento Térmico	270 - 285	B	Sem Tratamento Térmico	208 - 218
3	Sem Tratamento Térmico	254 - 270	C	Sem Tratamento Térmico	210 - 216
4	Sem Tratamento Térmico	256 - 265	D	Sem Tratamento Térmico	206 - 212
5	Com Tratamento Térmico	563 - 578	E	Com Tratamento Térmico	536 - 563
6	Com Tratamento Térmico	553 - 575	F	Com Tratamento Térmico	558 - 573
7	Com Tratamento Térmico	547 - 578	G	Com Tratamento Térmico	540 - 573
8	Com Tratamento Térmico	567 - 582	H	Com Tratamento Térmico	576 - 598

Neste ponto, o objetivo é a comparação entre a dureza do componente fora do canal usinado (material base) com a dureza dentro do canal usinado, conforme descrito na figura 32.



**Figura 32 – Variação da dureza dentro e fora do canal usinado.**

Esta comparação é importante para caracterizar a formação da camada branca (que será melhor analisada em 8.1.2), originada pela resolidificação do material durante o processo de EDM. Nesse sentido verificou-se que todos os CPs apresentam uma dureza dentro do canal usinado maior do que a dureza medida fora deste canal. Como verificado nos trabalhos de Olinki (2009, p.127); Neves e Souza (2013, P.10) e Amorim L. (2002, P.156) a dureza superior dentro do canal é justificada pela integridade superficial deficiente gerada em função às altas temperaturas envolvidas durante a usinagem por EDM. Segundo Amorim L. (2002), a dureza e a fragilidade da região termicamente afetada pela eletroerosão é bem superior a do material base da liga. Cabe comentar que a variação observada no valor de dureza das amostras de O1 com tratamento térmico pode ser justificada em função de uma característica intrínseca ao material devido ao seu teor potencial de austenita retida durante o processo de têmpera e outros fatores provocados por seus elementos de liga.

Considerando a aplicação dos aços ABNT NM 122 grau D2 e ABNT NM 122 grau O1, os constantes esforços mecânicos a que serão submetidos, e a dependência de suas propriedades mecânicas com o tipo de tratamento térmico realizado, as variações de dureza podem ter consequências tanto do ponto de vista

de desempenho final como baixo rendimento da ferramenta, quanto econômico. Ou seja, por se tratar de um dos processos finais de fabricação e seu alto valor agregado, os problemas relacionados à falha no processo de EDM podem gerar, entre outras coisas, retrabalho, atraso na entrega ou até mesmo descarte do componente.

### 8.1.2 Resultado da análise da integridade superficial

A presença da camada branca também ficou evidente durante o ensaio metalográfico realizado nas amostras, onde é possível percebê-la bem mais pronunciada nos CPS tratados termicamente, conforme mostrado nas figuras 33 e 34.

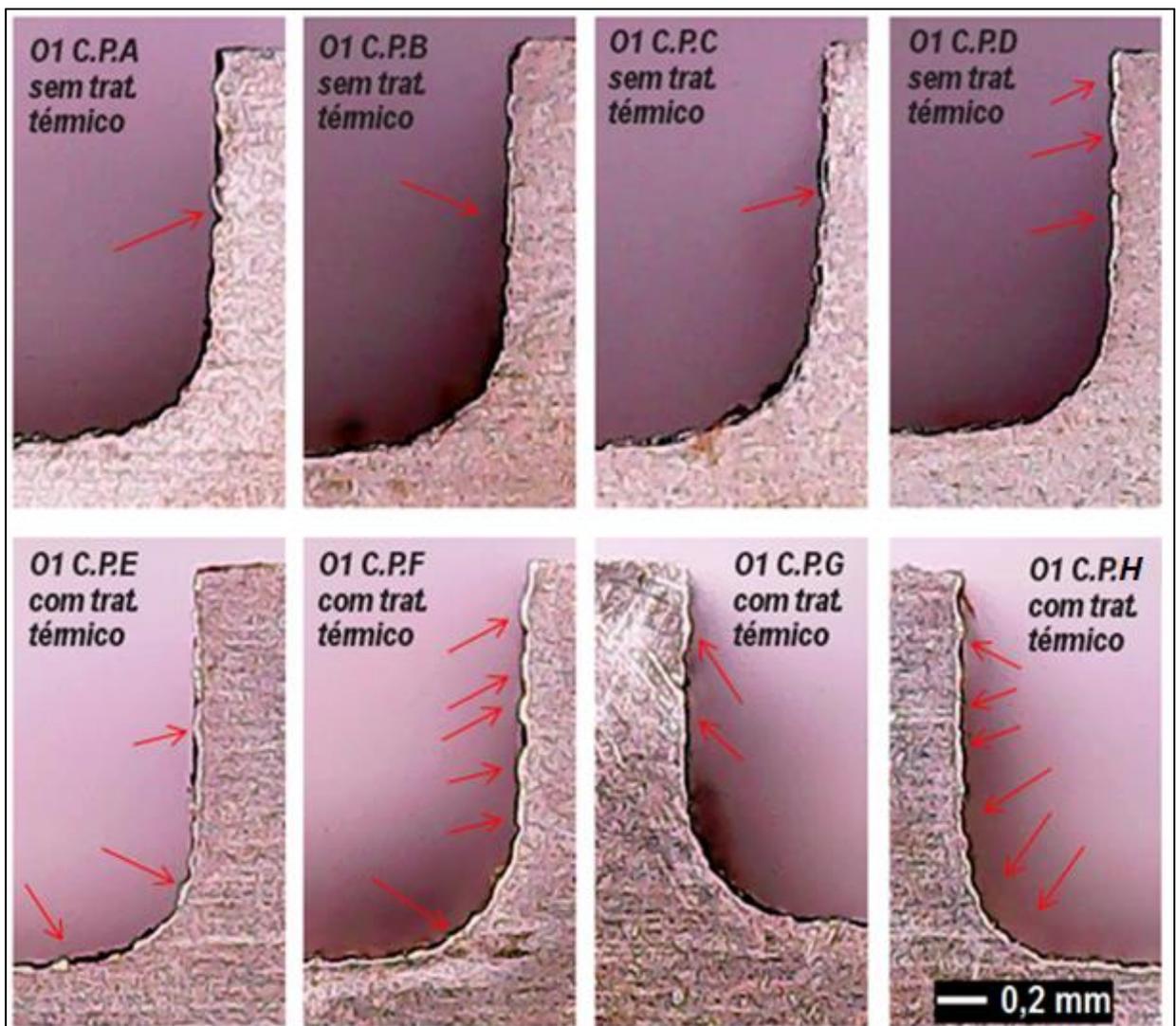


Figura 33 – Presença da Camada branca nos CPs Aço O1 (30x).

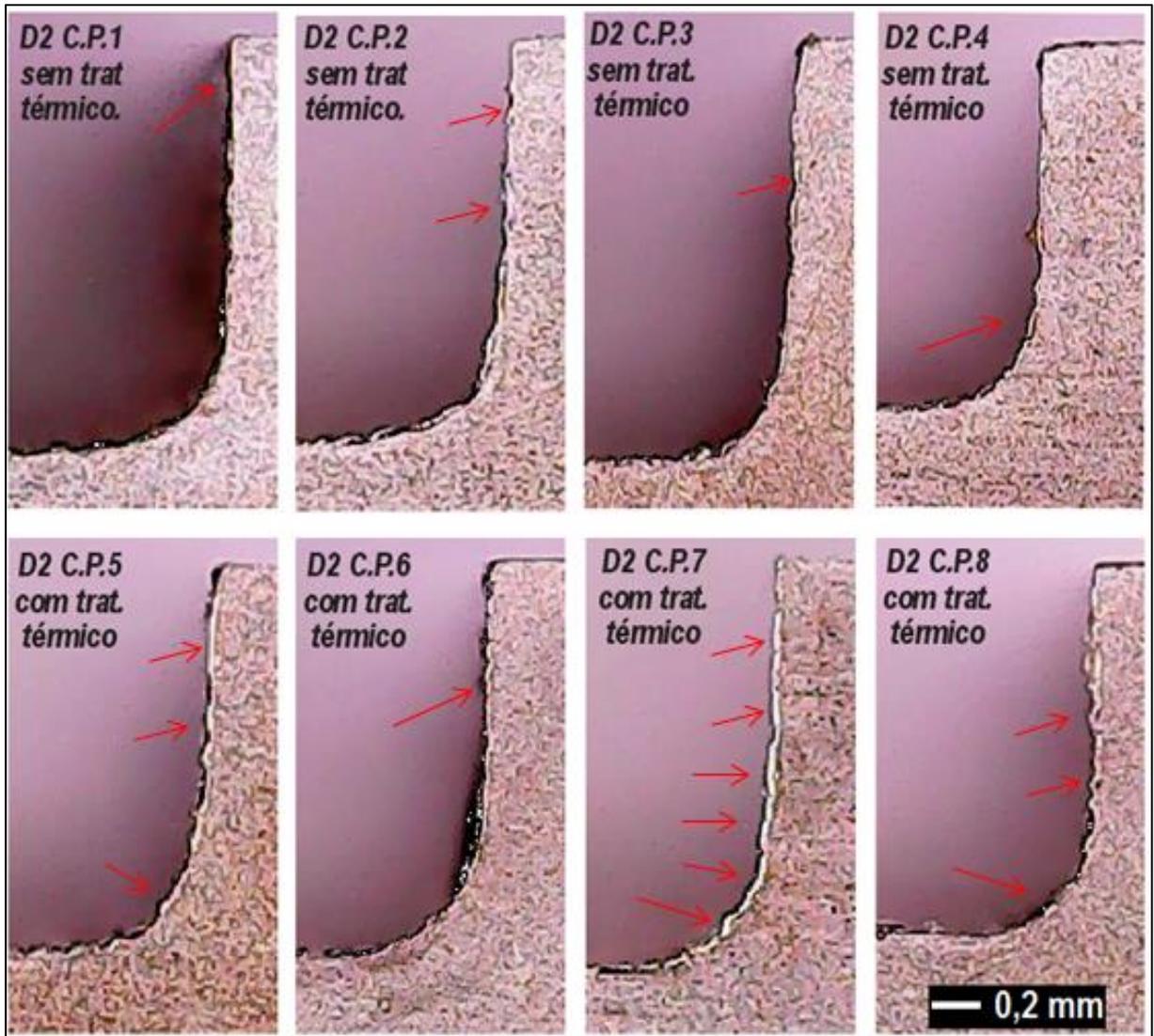
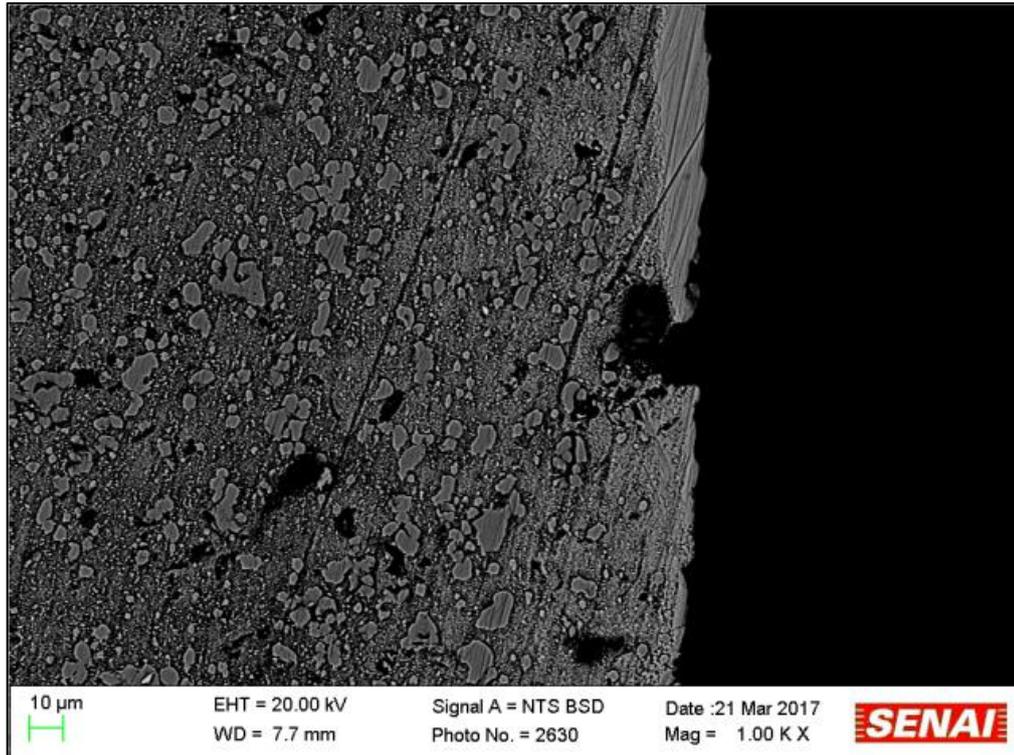
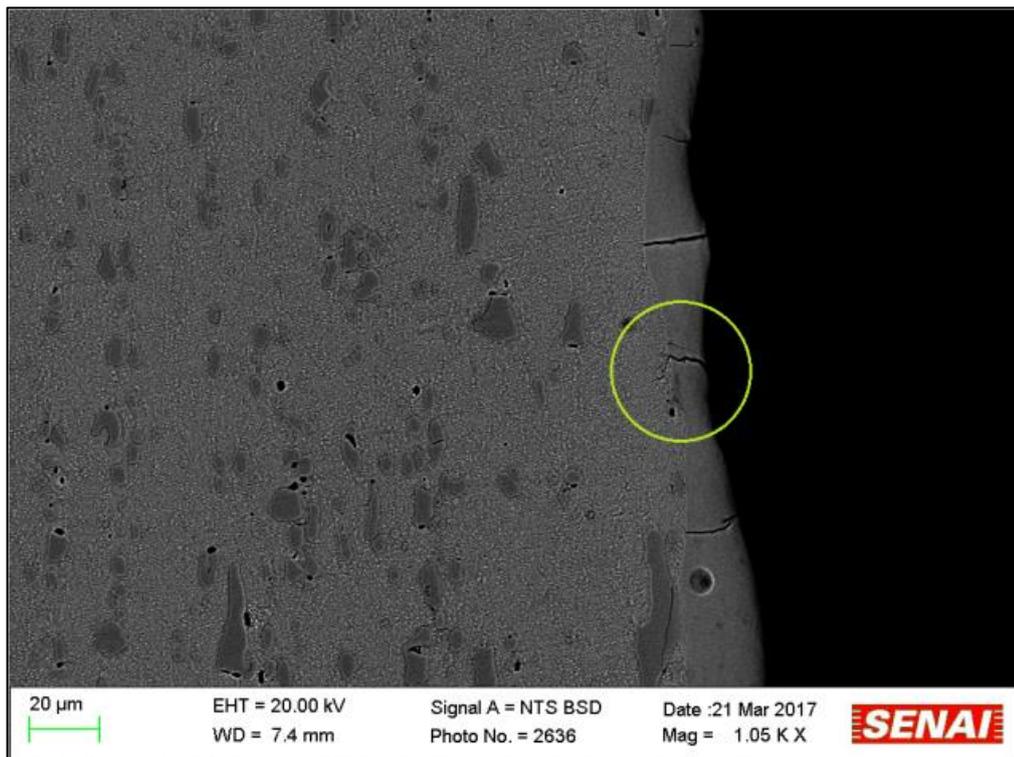


Figura 34 – Presença da Camada branca nos CPs Aço D2 (30x).

Na análise por meio do microscópio eletrônico de varredura foi possível evidenciar uma camada branca mais espessa nos materiais tratados termicamente. Da mesma forma, a presença de trincas nesta camada, foi observada apenas nos materiais beneficiados, sendo que algumas delas avançam em direção ao material base. Em relação à zona termicamente afetada pelo calor, não é possível identificar diferenças nas amostras analisadas, o que pode ser explicado em função dos baixos valores utilizados tanto na regulação dos parâmetros de corte quanto no tempo de usinagem. As figuras 35 e 36 apresentam as imagens obtidas por meio do M.E.V.

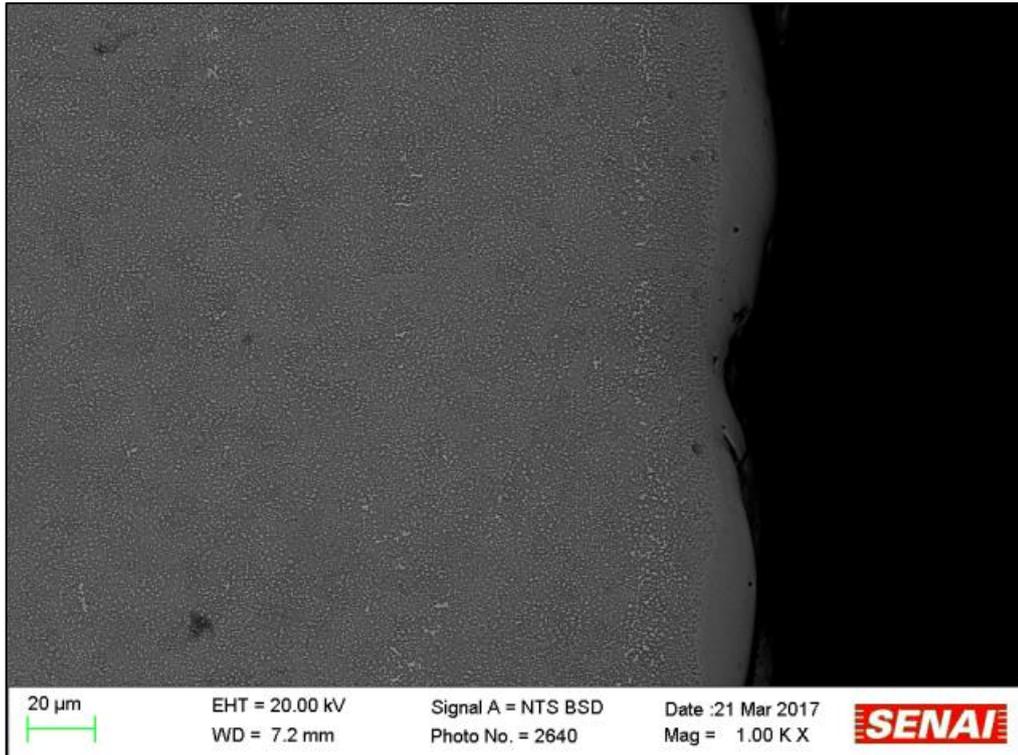


(a)

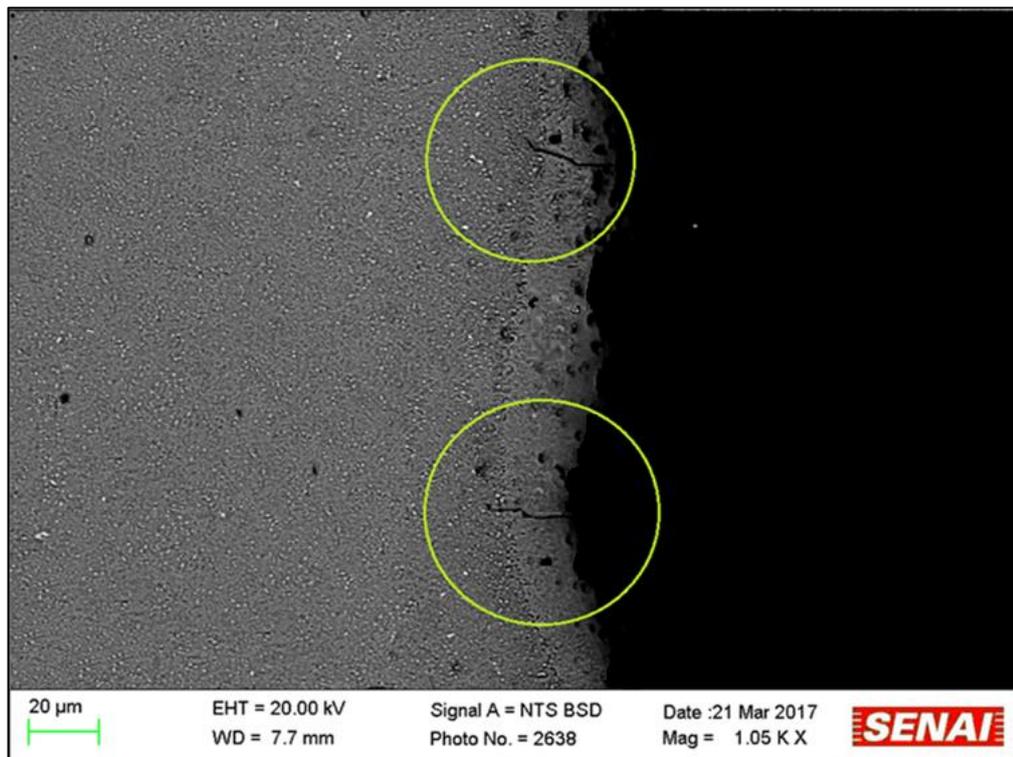


(b)

Figura 35 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU D2 sem tratamento térmico; (b) Aço ABNT NM 122 GRAU D2 com tratamento térmico.



(a)



(b)

Figura 36 – (a) aço ABNT NM 122 GRAU O1 sem tratamento térmico; (b) Aço ABNT NM 122 GRAU O1 com tratamento térmico.

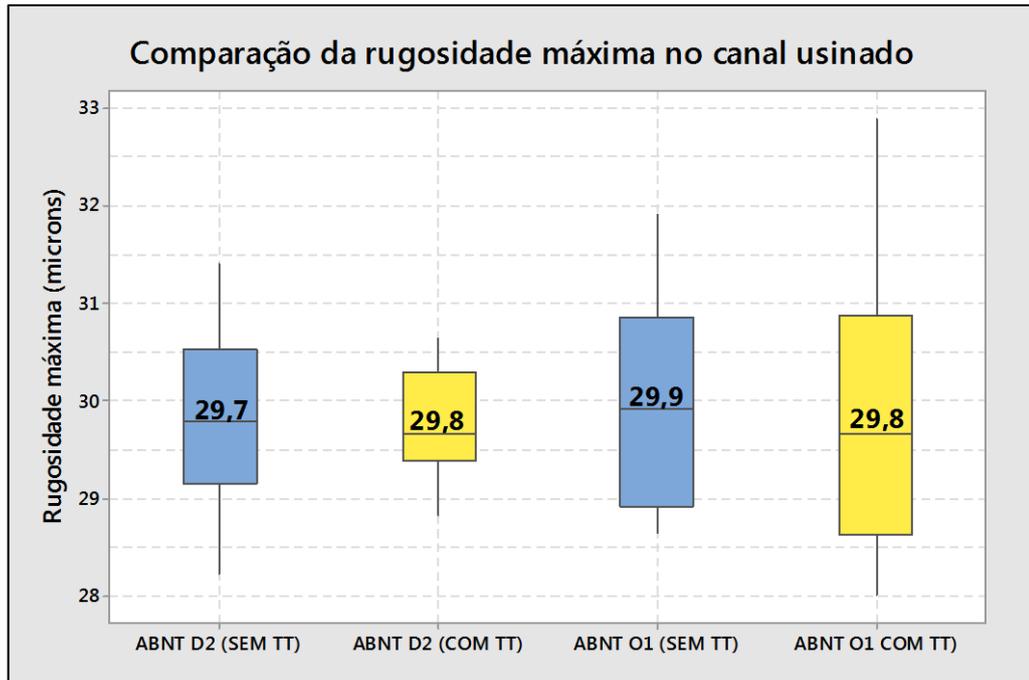
Formada pela interação do carbono presente no dielétrico com o ferro e também pelo rápido resfriamento da peça, originando a formação de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), esta camada é considerada como a grande falha do processo de usinagem por descargas elétricas (OLINIKI, 2009; AMORIM, L., 2002). Entretanto, as consequências do excesso de calor vão além desta pequena camada. Uma zona termicamente afetada que, de acordo com PURI (2005,) se apresenta na forma de microfissuras, alterações de dureza e tensões residuais pode claramente comprometer a funcionalidade do componente usinado.

Diante de todas estas características, é necessário remover a camada branca por outros processos mecânicos como lixamento/polimento ou retificação. Entretanto, a retirada de material por lixamento/polimento pode ser insuficiente para retirá-la em sua totalidade e o processo de retificação pode ser inviável em função da geometria da peça.

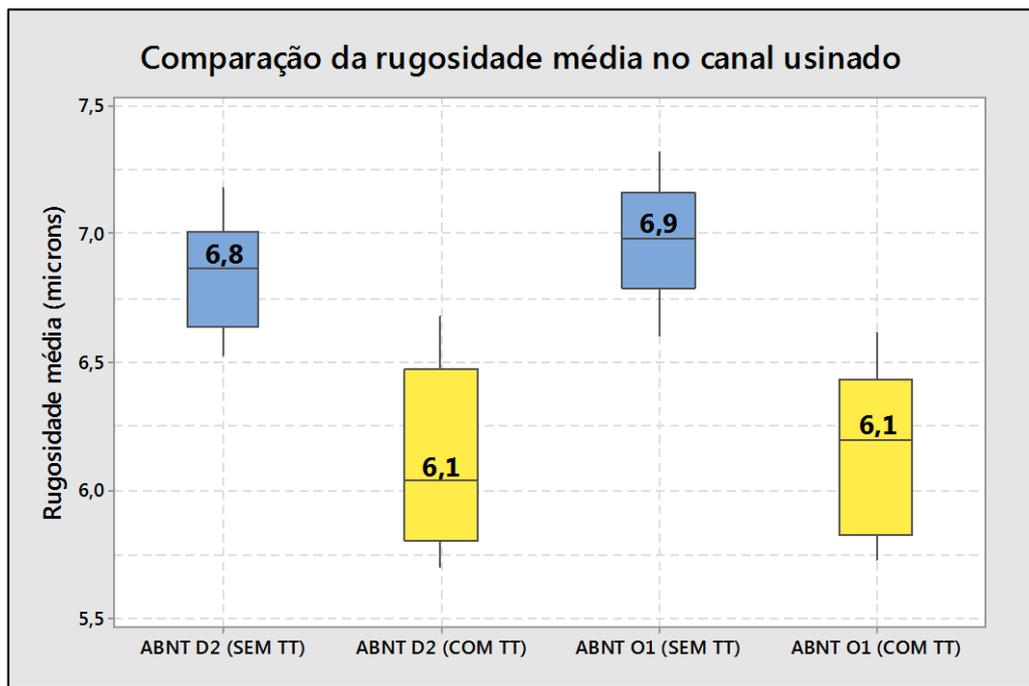
Tendo em vista, que em muitos casos, punções e matrizes destinados à conformação são peças grandes e pesadas, com geometria extremamente complexa, o que pode inviabilizar a análise metalográfica, o principal meio de controle de características relacionadas à resistência mecânica acaba sendo o controle da dureza. Nesse sentido, torna-se relevante o domínio das consequências na camada superficial de peças confeccionadas pelo processo de eletroerosão, e de que forma ela se apresenta em materiais com diferentes durezas.

### **8.1.3 Resultado da análise da rugosidade**

A rugosidade do canal usinado foi medida na forma de rugosidade máxima ( $R_y$ ) e rugosidade média ( $R_a$ ). Em relação à rugosidade máxima, foi verificada uma coerência entre os valores fornecidos pela tabela tecnológica do fabricante e os obtidos durante os ensaios em todos os Cps. Já em relação à rugosidade média, é possível constatar que, nas amostras tratadas termicamente, a rugosidade é menor que nas amostras sem tratamento térmico. Isso indica que a rugosidade máxima, apesar de ser um parâmetro relevante ao processo, não consegue representá-lo com a sensibilidade necessária para caracterizar materiais que deveriam ter desempenhos diferentes em função de suas propriedades termofísicas. As figuras 37 e 38 apresentam os resultados.



**Figura 37 – Variação da rugosidade máxima.**



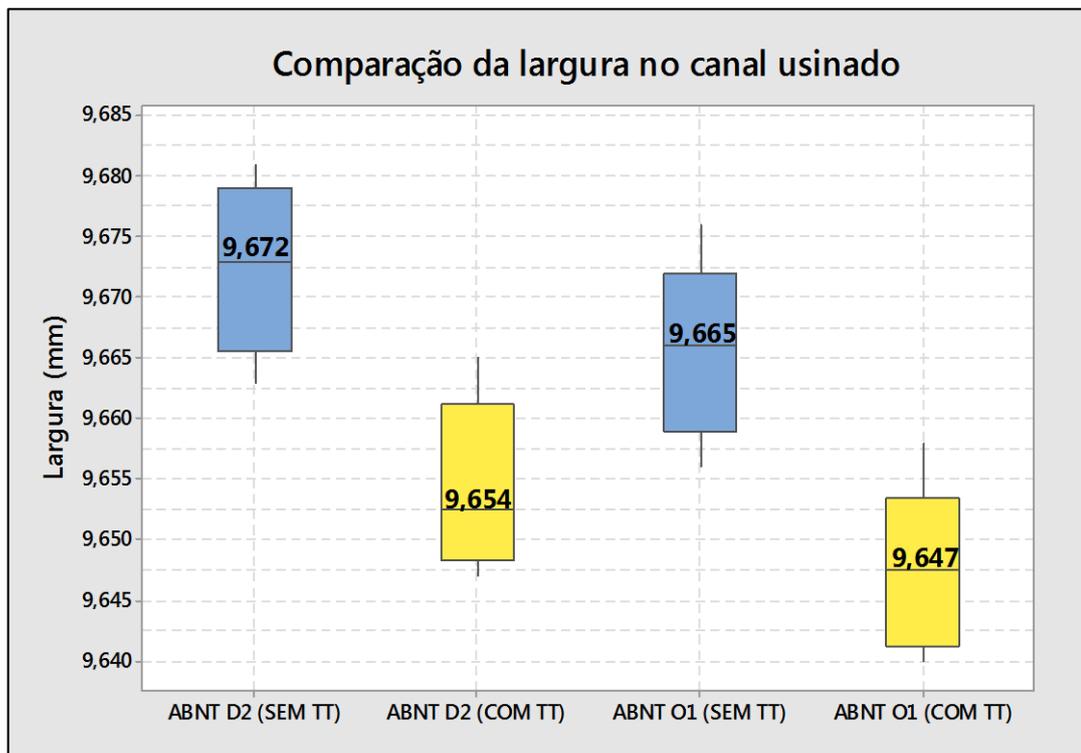
**Figura 38 – Variação da rugosidade média.**

O acabamento superficial de uma peça está diretamente relacionado ao desempenho na sua aplicação. Entre estes desempenhos é possível citar o desgaste de componentes mecânicos, onde, superfícies com rugosidade mais pronunciadas estão sujeitas a desgastes mais intensos do que teriam no caso de um melhor acabamento. Outro fator influenciado pela qualidade do acabamento

superficial é a resistência à fadiga - componentes que trabalham sob a exigência de cargas elevadas necessitam de melhor acabamento, pois geometrias com alta rugosidade estão propensas a concentrações de tensão facilitando a propagação de trincas (AMORIM, J., 2002, p.114).

## 8.2 Resultado da análise dimensional

Em relação à largura do canal usinado, tanto as peças de aço ABNT NM 122 GRAU D2 como as de aço ABNT NM 122 GRAU O1 na condição sem tratamento térmico apresentaram-se em média 18µm maiores do que as que foram tratadas termicamente, como ilustrado na figura 39.



**Figura 39 – Variação dimensional entre as peças que foram usinadas com tratamento térmico e as sem tratamento térmico.**

Mesmo uma diferença dimensional da ordem de 18µm pode afetar a qualidade dos ajustes dos moldes e matrizes e conseqüentemente a qualidade do produto final. Segundo Maziero, Ferreira e Gubert (1997), muitos problemas relativos a projetos só serão descobertos durante a fabricação, como, por exemplo, a obtenção de peças com as dimensões adequadas para a montagem e que mantenham a funcionalidade do produto.

O ajuste comum punções e guias em estampos de conformação é H7g6, SENAI (2009). Considerando, por exemplo, o ajuste de um punção com 10 mm de diâmetro a qualidade g6, segundo a NBR 6158 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2006), é permitido um afastamento máximo de 14µm. O afastamento obtido neste estudo entre as peças que receberam tratamento térmico e as usinadas no estado como recebido, foi superior a esta especificação, o que inviabilizaria o uso dos componentes. Para garantir a precisão dimensional, preparadores de uma máquina e eletroerosão têm como recurso a utilização de tabelas tecnológicas fornecidas pelos fabricantes e cálculos de medida final do eletrodo em função do GAP (G) da máquina, que é a distância entre o eletrodo e a peça. Em relação às tabelas tecnológicas, segundo apontado por Amorim L. (2002, p.156) é muito difícil obter na prática industrial as condições ótimas de usinagem e os mesmos resultados informados pelas tabelas tecnológicas fornecidas pelos fabricantes. Isso ocorre tanto pela complexidade na fabricação de moldes e matrizes quanto pela diferença entre os materiais efetivamente empregados na fabricação e aqueles que foram usados pelos fabricantes para a elaboração das tabelas tecnológicas de controle dos equipamentos de usinagem. O cálculo da medida final do eletrodo para o desbaste (Mfd) e para o acabamento (Mfa), de acordo com o SENAI (2010) e SANTOS (2010, p.126), é dado por:

$$Mfd = Mn - (2GAP + 2r + CS) \quad (2)$$

$$Mfa = Mn - (2GAP + 2r) \quad (3)$$

Nestas fórmulas: “GAP” é a distância entre o eletrodo e a, “r” a rugosidade e “CS” o coeficiente de segurança. Nota-se que, tanto as fórmulas utilizadas para dimensionamento do eletrodo ferramenta, quanto as tabelas tecnológicas fornecidas pelos fabricantes não levam em conta o tratamento térmico das peças. Entretanto, observou-se durante os testes realizados que a medida final dos corpos de prova temperados e revenidos apresentaram uma variação próxima a 0,02mm em relação às peças sem tratamento. Esta variação dimensional pode ser justificada em função dos efeitos que as transformações de fases no estado sólido, ocorridas no tratamento térmico, têm sobre a microestrutura dos materiais (aços), afetando suas propriedades físicas. (ASKELAND, PHULÉ, 2008; REBECHI, 2011).

### 8.3 A influência do tratamento térmico na usinagem

Com base nos resultados obtidos, foi possível constatar que as peças que foram tratadas termicamente apresentaram-se com a largura do canal usinado menor que as demais. O mesmo comportamento foi observado em relação à rugosidade e a integridade superficial na região usinada. Peças com tratamento térmico, e conseqüentemente com dureza maior, apresentam menor rugosidade e uma camada branca mais evidente do que as que foram usinadas sem tratamento térmico. Embora tenha ficado evidente uma correlação entre os valores, a dispersão dos dados demonstram apenas uma correlação moderada entre os valores de dureza e de largura do canal usinado, conforme apresentado nas figuras 40 e 41.

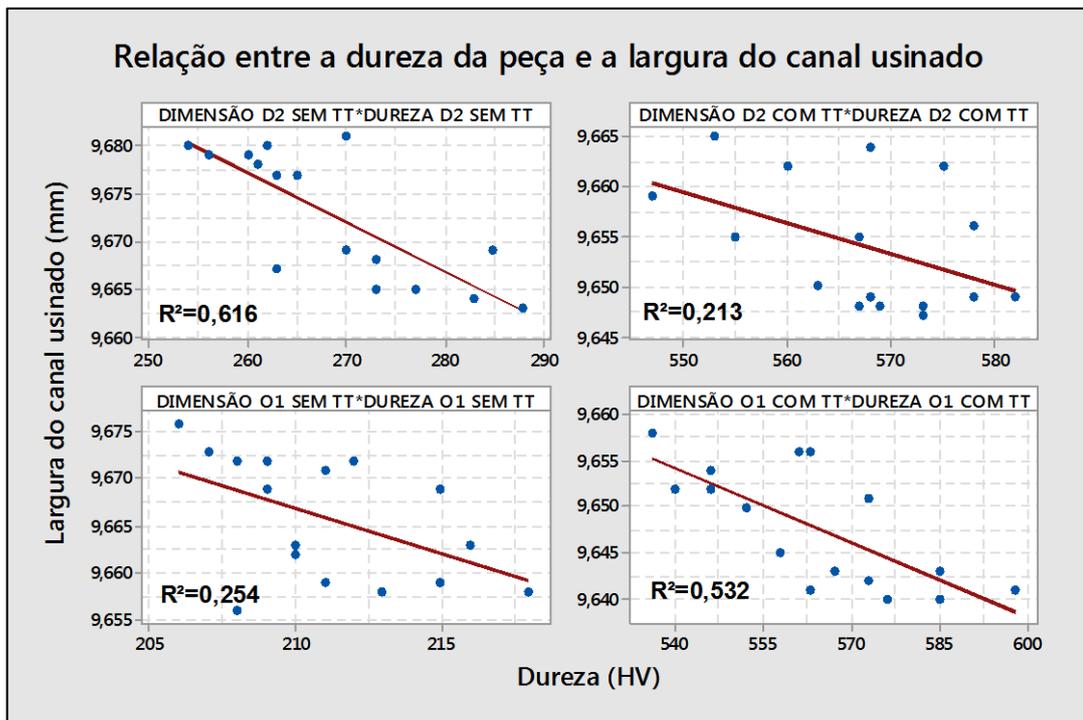


Figura 40 – Relação entre a dureza e a dimensão do canal usinado.

Essa relação pode ser explicada, muito possivelmente em função da alteração nos valores de resistência elétrica ocasionadas pelo processo de tratamento térmico e observados posteriormente na figura 42. Segundo Amorim (2002) as propriedades termo físicas dos materiais influenciam profundamente no processo de eletroerosão. Nesse sentido, é possível apontar que as tabelas tecnológicas usadas na regulagem apresentam falha ao não distinguirem materiais tratados termicamente dos que não apresentam o beneficiamento.

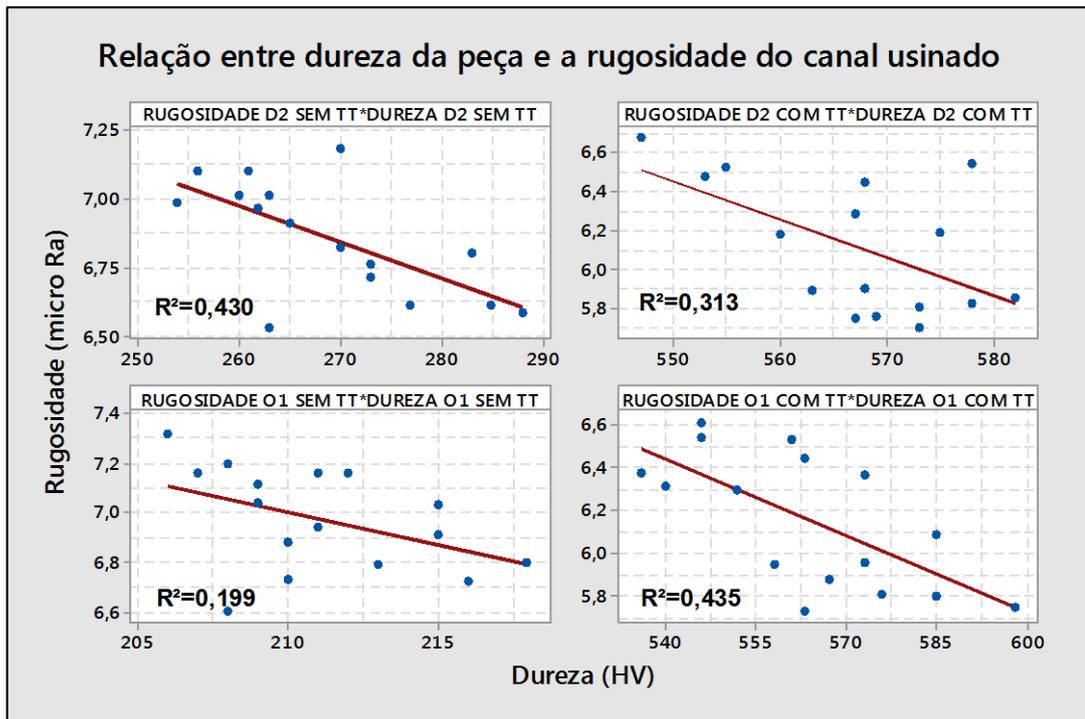


Figura 41 – Relação entre a dureza e rugosidade do canal usinado.

#### 8.4 Análise da resistência elétrica

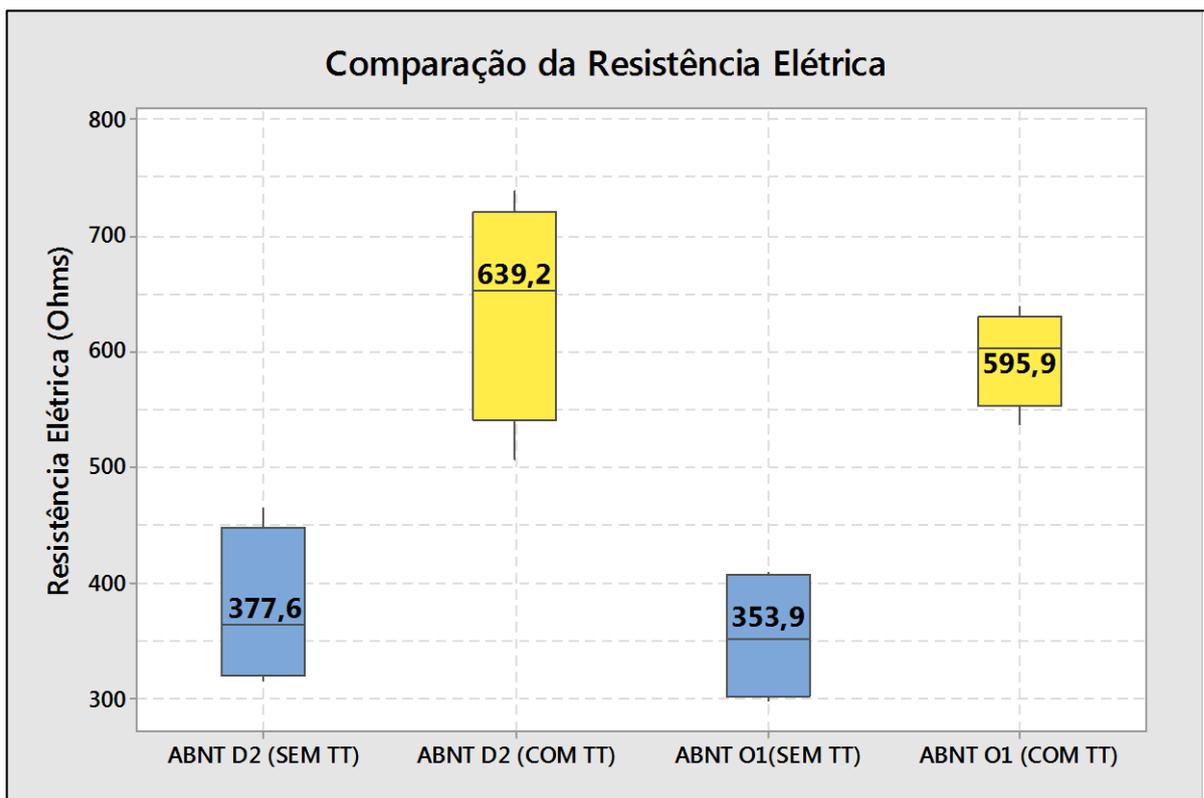
A tabela 6 apresenta os valores de resistência elétrica aferida com base na ponte de Kelvin.

Tabela 6 – Valores de resistência elétrica.

Aço D2			Aço O1		
CP	Condição	Faixa de Resistência Elétrica (mΩ)	CP	Condição	Faixa de Resistência Elétrica (mΩ)
1	Sem Tratamento Térmico	464,1 - 462,6	A	Sem Tratamento Térmico	303,1 - 303,9
2	Sem Tratamento Térmico	401,6 - 403,2	B	Sem Tratamento Térmico	409,1 - 409,9
3	Sem Tratamento Térmico	316,8 - 318,2	C	Sem Tratamento Térmico	402,1 - 404,4
4	Sem Tratamento Térmico	326,5 - 327,5	D	Sem Tratamento Térmico	298,4 - 300,9
5	Com Tratamento Térmico	671,6 - 673,9	E	Com Tratamento Térmico	538,1 - 538,9
6	Com Tratamento Térmico	636,1 - 636,9	F	Com Tratamento Térmico	608,0 - 608,9
7	Com Tratamento Térmico	508,1 - 510,8	G	Com Tratamento Térmico	597,4 - 599,5
8	Com Tratamento Térmico	737,2 - 739,7	H	Com Tratamento Térmico	637,4 - 639,6

Com base na análise dos valores apresentados na tabela 6 é possível verificar que as amostras que receberam tratamento térmico apresentam valores de resistência elétrica em ohms maior do que os CPs que foram mantidas na condição sem tratamento térmico.

Nesse sentido, ficou evidenciado que as peças com maior dureza apresentam maior resistência elétrica conforme apresentado na figura 42.



**Figura 42 – Variação da Resistência Elétrica entre as amostras.**

A figura 43 apresenta a correlação entre os valores de resistência elétrica e a largura do canal usinado, sendo possível observar valores de correlação  $R^2$  maiores do que os que foram observados nas análise de dureza.

O mesmo comportamento é observado em relação à correlação entre a resistência elétrica e a rugosidade, a figura 44 demonstra que as peças com maior resistência elétrica apresentam as menores rugosidades. Analisando os resultados, é possível constatar que mesmo as pequenas variações de resistência elétrica causadas pelo tratamento interferiram nas dimensões finais de usinagem.

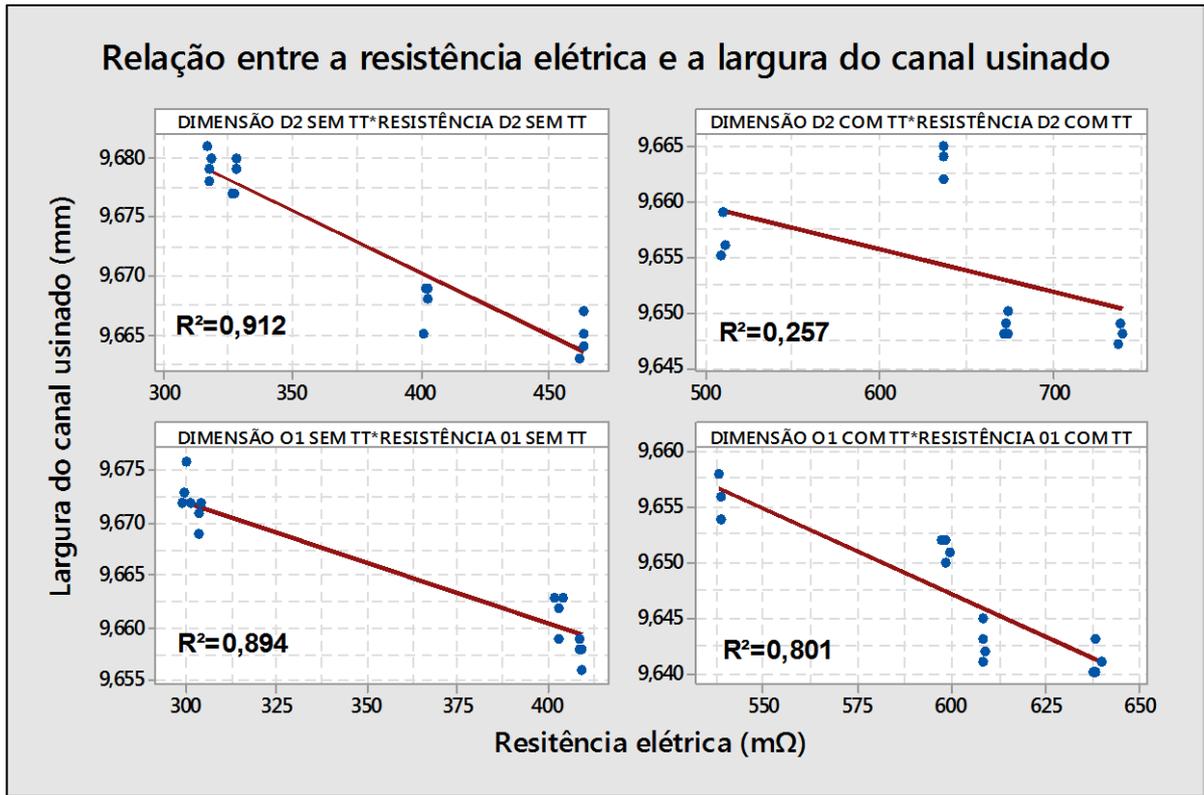


Figura 43 – Relação entre resistência elétrica e largura do canal usinado.

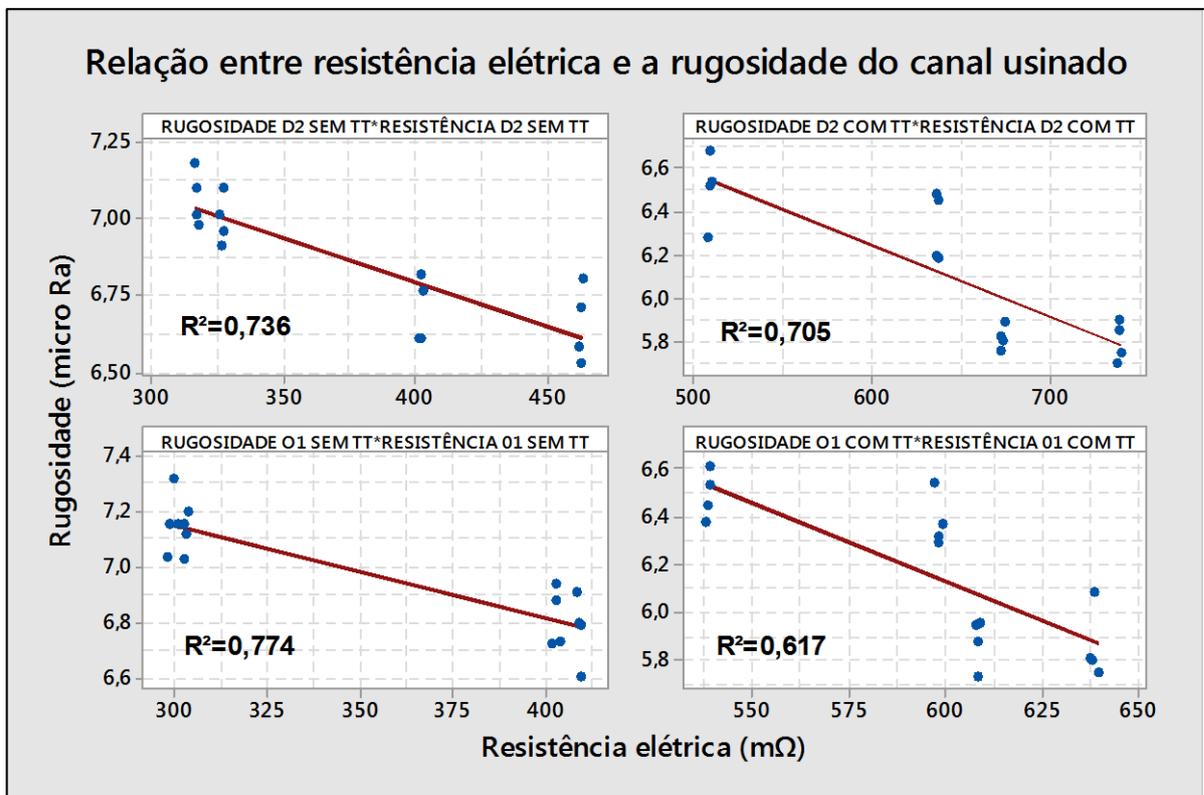


Figura 44 – Relação entre resistência elétrica e a rugosidade do canal usinado.

## 9 CONCLUSÃO

Para a maioria das aplicações industriais, o tratamento térmico tem como objetivo a alteração das propriedades mecânicas como resistência a esforços diversos, desgaste ou fadiga. Entretanto, nos ensaios realizados neste trabalho foi possível observar que o tratamento térmico tem influência direta no comportamento da usinagem por eletroerosão. Variações dimensionais, de rugosidade ou de integridade superficial podem afetar aspectos importantes de moldes e matrizes causando dificuldades de montagem, diminuição da vida útil e até mesmo fratura. Da mesma forma, foi possível verificar que as peças tratadas termicamente apresentaram valores de resistência elétrica superior as que foram mantidas sem tratamento térmico. Observou-se uma correlação entre as variações de resistência elétrica e as características dimensionais e de integridade superficial analisadas durante os experimentos. As variações verificadas devem ser consideradas no projeto da usinagem de moldes e matrizes, pois estas podem afetar aspectos importantes destes componentes causando dificuldades de montagem, diminuição da vida útil e até mesmo sua fratura prematura.

### 9.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Diante da evidência da influência do tratamento térmico na usinagem por descargas elétricas, fica a possibilidade de estudos futuros no seguinte sentido:

1- Análise de como as transformações na microestrutura dos aços afetam a usinagem por descargas elétricas;

2- Possibilidade de inclusão nas tabelas tecnológicas de um coeficiente para distinguir a condição de tratamento térmico e/ou dureza das peças usinadas por descargas elétricas;

3- Investigar o efeito da variação dos parâmetros na usinagem dos mesmos aços estudados neste trabalho, avaliando as dimensões finais e a integridade superficial;

4- Influência do tratamento térmico em outros processos de usinagem não convencionais como o plasma ou o corte a laser.

## REFERÊNCIAS

ABREU, P. J. M. de. **Análise e otimização dos processos de fresamento a altas velocidades no contexto de ferramentaria**. São José dos Campos: ITA, 2010. 120f. Dissertação (Mestrado) - Área de Mecânica dos Sólidos e Estruturas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

AÇOS BÖHLER. Catálogo técnico. 2002

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2004.

AGGIE CHARMILLES. Disponível em: <<http://www.agie-charmilles.com>>. Acesso em: 20 ago.2016.

ALBANO, A. E. **Análise comparativa entre as estratégias de fresamento 3 e 5 eixos para a fabricação de moldes**. Joinville: SOCIESC, 2008, 400 p. Dissertação (Mestrado) – Sociedade Educacional de Santa Catarina, Instituto Superior Tupy, Joinville, 2008. Disponível em: <<http://unisociesc.org.br/download/?tipo=anx&count=1&id=12862>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

ASM – American Society for Metals. Metals Handbook. 1983.

AMORIM H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

AMORIM F. L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 800 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. Florianópolis: UFSC, 2002. 156 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ARANTES, L. J.; SILVA, M. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Revista Metalúrgica & Materiais**. Minas Gerais, Ouro Preto, 56(2): 91-96, 2003.

ARANTES, L. J.; **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM)**. Uberlândia: UFU, 2007, 117 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

ASKELAND DR, Phulé PP. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87: aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 122-1: Aços ferramentas, Parte 1: Classificação, designação e composição química.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 122-1: aços ferramentas. Aços ferramentas, Parte 1: Classificação, designação e composição química.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 6158: sistema de tolerâncias e ajustes.** Rio de Janeiro, 2006.

AVNER, S. H. **Introduction to Physical Metallurgy.** 2. ed. McGraw-Hill, 1974.

BENEDICT, Gary F. **Nontraditional manufacturing processes.** New York: Marcel Dekker, 1987. p. 207-229.

CHARMILLES TECHNOLOGIES. **Photos.** Disponível em: <<http://www.agie-charmilles.com/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

CHIAVERINI, VICENTE. **Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7a Edição. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1988.

COSTA e SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 2. ed. 1988.

DESCOEUDRES, A. **Characterization of electrical discharge machining plasmas.** These (Docteur ès sciences). 2006. 125f. École Polytechnique Federale de Lausanne, Lusanne.

DIHLMANN, Christian. Brasil x concorrência predatória internacional. In: 10º ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES DA ABM ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://docplayer.com.br/16491475-Brasil-x-concorrenca-predatoria-internacional-christian-dihlmann-dihlmann-brturbo-com-br.html>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

ELETRO. **Manual de operação, instalação e manutenção ZNC 400.** 2011. Apostila.

EUBANK, P. T. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. *Journal of Applied Physics*, USA, v. 73, n. 11, p. 7900-7909, jun. 1993.

FERES F. **Eletroerosão Possibilita Acabamentos Altamente Precisos.** O mundo da Usinagem. 2010.

GGD METALS. **Catálogo de Materiais.** 2016. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/aco-ferramenta/>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM).** Uberlândia: UFU, 2007, 117 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

GOBBI, S. J. **Influência do Tratamento Criogênico na resistência ao Desgaste do aço para Trabalho a Frio AISI D2**. Distrito Federal: UnB, 2009, 96 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.

GUITRAU, E. P. **The EDM Handbook**. USA: Hanser Gardner Publications, 1997, 305 p.

HEINRICH, Ernest. (1975). Os aços-ferramentas: aços-ferramentas ligados e não ligados, composição, propriedades, produção e tratamento. São Paulo-SP, 61p.

HEXAGON METROLOGY. **Micro Hite 3D** - Máquina de Medição por Coordenada. Catálogo. 2015. Disponível em: <[http://www.hexagonmetrology.com.br/TESA-Micro-Hite-3D\\_134.htm](http://www.hexagonmetrology.com.br/TESA-Micro-Hite-3D_134.htm)>. Acesso em: 21 set. 2015.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. **State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, 2003, p. 1287–1300.

HONEYCOMBE, R. W. K. (1981). **Steels metallurgy and materials science**. Edward Arnold Ltd., London.

HOYLE, G. **High Speed Steels**. Cambridge, Engl.: Butterworths, 1998.

JOSHI A.; KOTHIYA, P. **Investigating effects of process variables on MRR in EDM**. International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME). 2012: p. 6.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - 3: abtragen und generieren**. 3 v. Berlin: Springer, 1997.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. ASM International. 2005.

KRAUSS, G. **Steel: Heat Treatment and Processing Principles**. ASM International, Ohio, 1989.

KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. Colorado: ASM International, 2nd ed., 1990

LIMA, R. M. **Utilização de Fluidos Dielétricos à Base de Óleos Vegetais na Usinagem**. Uberlândia: UFU, 2008, 104 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008.

LIMA, F.; CORRÊA, M. **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas**. UNICAMP, Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 27, n. 1, Brazil, p. 26-33, 2006.

MARIANTE, G. R. **Efeito do Tratamento Criogênico nas propriedades mecânicas do aço rápido AISI M2**. Porto Alegre: UFRGS, 1999. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MAZIERO, L.; FERREIRA, C. E.; GUBERT, É. **Desenvolvimento de um banco de dados de tolerâncias**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. 1997.

MENDANHA, A.; GOLDENSTEIN, H.; PINEDO, C.E. (2003). **Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 – parte I: Influência da microestrutura de partida**. In: 1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes”, 29 – 30 de outubro de 2003. São Paulo/SP.

MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. (2006). **Efeito das condições de tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas de aços ferramentas**. In: Catálogo de Tecnologia da Villares Metals.

MITUTOYO DO BRASIL. **Medidor de rugosidade superficial modelo SJ201**. 2009. Manual do usuário.

MULLER, A.; CARVALHO, C. **Análise da Usinagem por Eletroerosão com diferentes eletrodos-ferramentas**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18 a 22 de maio de 2015, Salvador - Bahia

NEVES P.; SOUZA, O. **Influência da Variação dos Parâmetros do Processo de Eletroerosão por Penetração no Desgaste do Eletrodo e na Produtividade no Desbaste do Aço Inoxidável 304 e do Inconel 718**. In 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Penedo RJ; 2013: p. 10.

OLIVEIRA C. J. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfícies em Usinagens**. Belo Horizonte: PUCMG, 2004, 123 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLINIKI R. **Influência da Combinação entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço AISI H13 Temperado e Revenido**. Curitiba: UTFPR, 2009. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PURI, A. B. **Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2005, Volume 25, Issue 3, pp 301-307.

REBECHI, J. G. **Correlações Numéricas entre Taxas de Resfriamento, Microestrutura e Propriedades Mecânicas para o Tratamento Térmico dos Aços AISI/SAE 4140**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

REIS, Z. C. **Elementos de Gestão do Conhecimento em uma Ferramentaria: Um Estudo de Caso.** Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/4022>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

RESENDE, M. F. C. **Competitividade e Potencial de Crescimento do Cluster de Embalagens Plásticas do ABC Paulista Belo Horizonte:** UFMG/Cedeplar. Texto para discussão n. 185, mar. 2003.

RESENDE, M. F. C. ; GOMES, J. O. **Competitividade e potencial de crescimento do cluster de produtos de moldes para a indústria do plástico de Joinville.** Nova Economia (UFMG), Belo Horizonte, v. 14, n. 1, 2004.

RBIF - REVISTA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE FERRAMENTAIS. 2010.

REVISTA EXAME. Jun. 2016. **As 10 profissões mais bem pagas que não exigem diploma.** Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/carreira/as-10-profissoes-mais-bem-pagas-que-nao-exigem-diploma/>>. Acesso em: 13 dez. 2016.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels.** 5. ed. American Society for Metals, Metals Park, OH., 1998.

SANTOS, I. **Análise dos Parâmetros de Entrada na Eletroerosão por Penetração na Liga de Titânio Ti-6Al-4V.** Curitiba: UTFPR, 2010. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SANTOS, R. F. **Influência do Material da Peça e do Tratamento Térmico na Eletroerosão dos Aços AISI H13 e AISI D6.** Belo Horizonte: PUCMG, 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SARTORI, C.H. apostila “**Curso de tratamentos térmicos de aços ferramenta**”, 2º.encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes da abm, 2004

SCHUMACHER, B. M.; DAUW, D. F. "**Milestones of Worldwide EDM Research Activities**" Proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining, vol.1, pp.240-254, 1989.

SENAI SÃO PAULO. **Ferramenteiro de Corte, Dobra e Repuxo** - Informações Tecnológicas. 2009. Apostila.

SILVA, J. C. **Sistema Especialista Aplicado à Técnica de Usinagem por Eletroerosão.** Taubaté: UNITAU, 2004, 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2004.

SILVA, N. H. **Usinagem de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4v em máquina de eletroerosão por penetração.** Curitiba: Dissertação de Mestrado, Departamento de engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, Brasil, 2006.

SILVA R. D. **Comparação do Desempenho do Fluido Dielétrico Vegetal com Mineral Sintético e Querosene na Eletroerosão do Aço AISI H13.** Belo Horizonte: PUCMG, 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, E. R. da. **Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13.** Belo Horizonte, 2007. 110f. : il.

SOARES JUNIOR, E. D. **Efeito do Tratamento Térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços-ferramenta para trabalho a frio.** São Paulo: USP, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO- Disponível em: <[www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf](http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2016.

TIME GROUP INC. Time High Tec instrumentos de medição. Medidor de dureza portátil. Catálogo. 2015. Disponível em: <<http://www.timeinstrument.com/th160.html>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

Tools Steels. **Steel Products Manual.** Iron and Steel Society, April 1998.

UDDEHOLM. **Catálogos técnicos - Aços Especiais.** 2002-2006.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEUR. Elektroersive bearbeitung: definitionen und terminologie, 3402. Dusseldorf, 1990, 2 v.

VILLARES METALS. **Catálogo de Materiais.** 2016. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

WILSON, R. **Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels.** London, N. Y.: McGraw-Hill, 1975.