

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE NA
ELETROEROSÃO NO AÇO AISI P20 E NA LIGA DE
ALUMÍNIO 7075-T6

Artur da Silva Rossetto

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

R829a Rossetto, Artur da Silva
Avaliação das propriedades de superfície na eletroerosão no aço AISI P20 e na liga de alumínio 7075-T6 [recurso eletrônico] / Artur da Silva Rossetto. – 2022.
6.1 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter.

Coorientador: Prof. Dr. William Haupt.

Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Termoplásticos. 3. Ligas de alumínio. 4. Aço. I. Consalter, Luiz Airton, orientador. II. Haupt, William, coorientador. III. Título.

CDU: 621.9.048

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Artur da Silva Rossetto

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE NA
ELETROEROSÃO NO AÇO AISI P20 E NA LIGA DE ALUMÍNIO
7075-T6**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Coorientador: Prof. Dr. William Haupt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2022

Artur da Silva Rossetto

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE NA
ELETROEROSÃO NO AÇO AISI P20 E NA LIGA DE ALUMÍNIO
7075-T6**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 28 de março de 2022.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor William Haupt
Orientado/Coorientador

Professor Doutor Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Universidade de Passo Fundo

Dedico este trabalho a minha mãe, que tanto orou para meu êxito neste desafio. E a minha outra mãe, que está no céu olhando por mim. Dedico também ao professor Luiz Airton Consalter, por seus vários anos de dedicação ao ensino e à UPF.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder a capacidade de superar todos os obstáculos para concluir o mestrado.

Aos meus orientadores, professor Luiz Airton Consalter e professor William Haupt, por aceitarem conduzir o meu trabalho de pesquisa e pelas valiosas contribuições recebidas durante todo o processo.

Aos professores que compõem a Banca examinadora, pela disponibilidade e interesse de participar.

À UPF e a todo o corpo docente do mestrado por disponibilizarem este curso, e pela dedicação e excelência na qualidade do ensino ofertada.

Aos laboratoristas que auxiliaram nas atividades práticas, e foram essenciais para o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul, por me apoiar e flexibilizar em vários momentos meu horário de trabalho, para que eu pudesse desenvolver minhas atividades acadêmicas.

À empresa Plaxmetal, por me ceder material para o desenvolvimento da pesquisa experimental.

À minha mãe e minha esposa que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda esta trajetória.

*Não tente ser uma pessoa de sucesso.
Tente ser uma pessoa de valor.*

Albert Einstein

RESUMO

O presente estudo propõe a avaliação da usinagem por eletroerosão por penetração na produtividade e na integridade superficial do aço AISI P20 e da liga de alumínio 7075-T6. Esta liga de alumínio se destaca com substituta ao aço AISI P20 na confecção de moldes de injeção para termoplásticos. Para o estudo foram usinados corpos de prova em regimes de desbaste, semiacabamento e acabamento. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) para analisar os efeitos dos fatores e verificação de diferenças significativas na rugosidade superficial (R_a e R_z) e na taxa de remoção de material (TRM). Para a análise da integridade superficial, foram realizadas avaliações de microscopia e ensaios de microdureza. A TRM e a rugosidade, demonstraram que o regime de semiacabamento apresentou os melhores resultados, onde obteve-se na liga de alumínio, rugosidade próximas a do aço e com aumento acentuado de produtividade. A extensão da zona termicamente afetada (ZTA), perceptível pela redução da microdureza, e a espessura da camada reformulada, aumentaram com a severidade dos regimes no aço. Na liga de alumínio, o aumento da espessura da camada reformulada não ficou visível com a mudança dos regimes, e a ZTA das três amostras apresentaram valores de microdurezas semelhantes, levemente menores que do metal base. Microscopias revelaram topografias distintas entre os materiais, com defeitos superficiais em escala micrométrica. Diferentemente do aço, verificou-se a ausência de microfissuras na camada reformulada da liga de alumínio, esta é uma ótima constatação para a vida útil do molde. Em comparação ao aço AISI P20, a liga de alumínio 7075-T6 demonstrou resultados promissores em termos de utilização da usinagem por eletroerosão na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos.

Palavras-chave: EDM. Aço AISI P20. Liga Alumínio 7075-T6. Produtividade. Integridade superficial.

ABSTRACT

The present study proposes the evaluation of penetration EDM machining on productivity and surface integrity of AISI P20 steel and 7075-T6 aluminum alloy. This aluminum alloy stands out as a replacement for AISI P20 steel in the manufacture of injection molds for thermoplastics. For the study, specimens were machined in roughing, semi-finishing and finishing regimes. Analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the effects of the factors and verify significant differences in surface roughness (Ra and Rz) and material removal rate (MRR). For the analysis of surface integrity, microscopy evaluations and microhardness tests were performed. The MRR and the roughness showed that the semi-finishing regime presented the best results, where it was obtained in the aluminum alloy, roughness close to that of steel with a marked increase in productivity. The extension of the thermally affected zone (TAZ), noticeable by the reduction of microhardness, and the thickness of the reformulated layer, increased with the severity of the regimes in the steel. In the aluminum alloy, the increase in the thickness of the reformulated layer is not visible with the change of regimes, and the TAZ of the three samples presented similar microhardness values, slightly lower than that of the base metal. Microscopy revealed different topographies between the materials, with superficial defects on a micrometric scale. Unlike steel, it was verified the absence of microcracks in the reformulated layer of aluminum alloy, this is an excellent finding for the useful life of the mold. Compared to AISI P20 steel, the AL7075-T6 alloy has shown promising results in terms of the use of electro-erosion machining in the manufacture of molds for thermoplastic injection.

Keywords: EDM. AISI P20 steel. Alloy AL7075-T6. Productivity. Surface integrity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático da usinagem por descarga elétrica no circuito RC... 23	23
Figura 2 – Componentes básicos da máquina EDM..... 24	24
Figura 3 - Diferença das taxas de remoção no ânodo e no cátodo em decorrência do tempo de pulso (T_{on})..... 28	28
Figura 4 - Fases da descarga elétrica em um ciclo EDM 29	29
Figura 5 - Comportamento dos parâmetros elétrico durante um ciclo EDM 32	32
Figura 6 - Influência da intensidade da corrente elétrica na TRM 34	34
Figura 7 - Curva característica real de tensão e corrente..... 35	35
Figura 8 - Variação da TRM e da rugosidade como o aumento do tempo de pulso 36	36
Figura 9 - Diâmetro das crateras do aço AISI 1045 de acordo com a duração do tempo de pulso 37	37
Figura 10 - Representação esquemática da seção transversal de uma amostra eletroerodida 39	39
Figura 11 - Classificação da integridade superficial 40	40
Figura 12 - Microfissuras superficiais no carboneto de tungstênio eletroerodido 42	42
Figura 13 - Microfissuras na camada branca (material: D2; 4 A / 15 μ s) 42	42
Figura 14 - Distribuição da densidade de microfissuras superficiais no aço D2 e H13 . 43	43
Figura 15 - Fluxograma do desenvolvimento experimental..... 50	50
Figura 16 - Usinagem EDM no corpo de prova de aço 51	51
Figura 17 - Ensaio feitos nos corpos de prova 54	54
Figura 18 - Desempenho da TRM do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6 59	59
Figura 19 - Desempenho do R_a do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6..... 59	59
Figura 20 - Desempenho do R_z do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6..... 60	60
Figura 21 – Ganho percentual médio da produtividade da liga Al 7075-T6 em relação ao aço AISI P20..... 61	61
Figura 22 - Aumento percentual médio da rugosidade da liga Al 7075-T6 em relação ao aço AISI P20..... 61	61
Figura 23 – Camada reformulada/branca do aço AISI P20 ampliação de 500 vezes..... 63	63
Figura 24 - Camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6 ampliação de 500 vezes 64	64
Figura 25 – Comportamento da microdureza Vickers na ZTA 66	66
Figura 26 – Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de acabamento 68	68

Figura 27 - Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de semiacabamento ...	69
Figura 28- Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de desbaste	69
Figura 29 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de acabamento	71
Figura 30 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de semiacabamento	71
Figura 31 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de desbaste	72
Figura 32 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de acabamento no aço AISIP20	73
Figura 33 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de semiacabamento no aço AISIP20	74
Figura 34 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de desbaste no aço AISIP20	74
Figura 35 - Material base e camada reformulada do aço AISI P20.....	75
Figura 36 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de acabamento na liga de alumínio 7075-T6	76
Figura 37 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de semiacabamento na liga de alumínio 7075-T6	77
Figura 38 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de desbaste na liga de alumínio 7075-T6	77
Figura 39 – Material base e camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6.....	78
Figura 40 - Microglóbulos na superfície da amostra de desbaste da liga de alumínio 7075- T6 ampliação 5000 vezes	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica do aço AISI P20 em termos percentuais.....	45
Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio 7075	46
Tabela 3 - Níveis dos parâmetros dos regimes	52
Tabela 4 - Análise de variância das variáveis.....	58
Tabela 5 - Desvio padrão das variáveis de desempenho	62
Tabela 6 - Dados referentes as crateras geradas na superfície do aço AISI P20.....	70
Tabela 7 - Dados referentes as crateras geradas na superfície da liga Al 7075-T6.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tempos de erosão e TRM do aço AISI P20.....	55
Quadro 2 - Tempos de erosão e TRM da liga de alumínio 7075-T6.....	55
Quadro 3 - Rugosidade (R_a) do aço AISI P20 e da liga de alumínio 7075-T6.....	56
Quadro 4 - Rugosidade (R_z) do aço AISI P20 e da liga de Alumínio 7075-T6	56
Quadro 5 - Tempos de erosão dos materiais em h,min,s.....	93
Quadro 6 - Valores da microdureza Vickers	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de variância)
Al	Alumínio
C	Carbono
DC	<i>Direct current</i> (Corrente contínua)
Df	graus de liberdade
DOE	<i>Design of Experiments</i>
F	distribuição de Fischer
GAP	Distância entre a peça e a ferramenta
HRC	Microdureza Rockwell C
HV	Microdureza Vickers
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IBM	<i>International Business Machines</i>
IC	Intervalo de Confiança
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MS	<i>Mean Squares</i> (Média dos Quadrados)
NDE	Nitretação por Descargas Elétricas
NBR	Norma Técnica Brasileira
PCR	<i>Percentage-Contribution Ratio</i> (Proporção de Contribuição Percentual)
RC	Resistor capacitor
SI	Sistema Internacional de Unidades
SS	Soma dos quadrados
TRM	Taxa de Remoção de Material [mm ³ /min]
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação de Engenheiros Alemães)
W	Tungstênio
ZTA	Zona Termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
HV	Dureza Vickers	GPa
i	Corrente elétrica	A
V	Tensão elétrica	V
\hat{u}_i	Tensão em aberto;	V
\bar{u}_e	Tensão média da descarga;	V
U	Tensão média de trabalho durante a usinagem;	V
t_d	Tempo de retardo de ignição da descarga;	μs
t_e	Duração da descarga;	μs
$t_i = T_{on}$	Duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$);	μs
$t_o = T_{off}$	Duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;	μs
t_p	Duração do período do ciclo de uma descarga;	μs
i_e	Corrente máxima durante a descarga;	A
\bar{i}_e	Corrente média durante a descarga;	A
t_p	Ciclo total de pulso	μs
f_p	Frequência dos pulsos	μs
R_a	Rugosidade média aritmética dos valores absolutos	μm
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade	μm
l	Comprimento	m
μ	Micro (10^{-6})	$\mu\text{m}, \mu\text{s}$
Z_p	Maiores alturas de pico do perfil de rugosidade	μm
Z_v	Profundidades dos vales do perfil de rugosidade	μm
v	Volume	mm^3
σ_{LE}	Tensão de escoamento	MPa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Problema da pesquisa	20
1.2	Justificativas	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Usinagem.....	22
2.2	Usinagem por eletroerosão por penetração	23
2.3	Máquina operatriz EDM.....	24
2.3.1	Fonte de alimentação	24
2.3.2	Sistema servo mecanismo	25
2.3.3	Sistema dielétrico	25
2.3.4	Eletrodos-ferramenta	27
2.4	Fundamentos do fenômeno físico da usinagem por descarga elétrica	29
2.5	Parâmetros do processo EDM	31
2.5.1	Tensão elétrica.....	33
2.5.2	Corrente elétrica	33
2.5.3	Frequência de pulso	35
2.6	Camadas afetadas	38
2.7	Integridade superficial.....	40
2.7.1	Rugosidade.....	43
2.8	Materiais para moldes de injeção de termoplásticos	44
2.8.1	Desempenho do aço e do alumínio como moldes de injeção	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Procedimento experimental.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	Análise estatística	57
4.2	Microscopia óptica	62
4.2.1	Camada reformulada do aço AISI P20.....	62
4.2.2	Camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6.....	64

4.3	Microdureza Vickers e zona termicamente afetada	66
4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	68
4.4.1	Morfologia superficial do aço AISI P20.....	68
4.4.2	Morfologia superficial da liga de alumínio 7075-T6.....	70
4.4.3	Topografia da camada reformulada do aço AISI P20.....	73
4.4.4	Topografia da camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6.....	76
5	CONCLUSÕES.....	81
6	SUGESTÕES DE NOVAS PESQUISAS NA ÁREA.....	83
7	REFERÊNCIAS.....	84
8	APÊNDICE.....	93
8.1	Apêndice - A	93
8.2	Apêndice - B.....	93

1 INTRODUÇÃO

O processo de eletroerosão ou EDM (Electrical Discharge Machining) consolidou-se como uma das tecnologias mais importantes e difundida na indústria de manufatura para a obtenção de formas complexas. Desenvolvido a várias décadas, tem sido aceito em todo o mundo como um processo padrão para a fabricação de ferramentais, sendo considerado o quarto mais popular processo de usinagem para esta aplicação. Os processos mais utilizados são: fresamento, torneamento e retificação. É amplamente aplicado no processo final de fabricação, ou seja, no acabamento, que exige a usinagem de precisão (PINEDO, 2016).

Devido ao constante aprimoramento tecnológico para atender as complexas necessidades técnicas de usinagem do mercado, o processo de usinagem por eletroerosão tem hoje sua aplicação em diversos setores fabris. A usinagem EDM por penetração, tem como principal aplicação a confecção de moldes de injeção de plásticos e compósitos (AMORIM, 2002; PINEDO, 2016). Os principais benefícios de utilizar o processo EDM por penetração na fabricação de moldes, é a não interferência da dureza do material na usinagem e por proporcionar moldes com geometria complexa, paredes finas e livre de rebarbas (ALMEIDA e SOUZA, 2015).

A popularidade do processo de injeção na produção de produtos plásticos se deve a algumas vantagens em relação a outros processo, tais como, alta produtividade e fácil robotização e automação, extensa gama de resinas plásticas injetadas, produção de peças tridimensionais complexas com elevada qualidade, precisão dimensional e reprodutibilidade, e ainda possibilidades de vários acabamentos superficiais e texturizações (ARIETA *et al.*, 2019). O uso de produtos plásticos injetados tem aumentado em várias aplicações, como automóveis, construção naval, aviões e eletrodomésticos, devido à sua baixa densidade, facilidade de fabricação e baixo custo (SHIOU e CHENG, 2008; GRAND VIEW RESEARCH INC, 2018).

Em 2016 quase 40% do volume total de matéria-prima plástica foi transformada em produtos plásticos através do processo de injeção, gerando um volume de 130 milhões de toneladas neste mesmo ano (GRAND VIEW RESEARCH INC, 2018). O mercado global de plásticos moldados por injeção deve se expandir a uma taxa composta de crescimento anual de 4,6% de 2021 a 2028. A crescente demanda por componentes

plásticos, deverão impulsionar o mercado. Inovações modernas para minimizar a taxa de produtos defeituosos, aumentaram a importância da tecnologia de moldagem por injeção, na produção em massa de formatos plásticos complexos (GRAND VIEW RESEARCH INC, 2021).

Frente às demandas da produção de produtos customizados em curto prazo, observa-se na área de fabricação de moldes, um crescente interesse por materiais que combinem altas propriedades mecânicas com usinagem rápida e fácil. A substituição do molde para injeção de termoplásticos de aço AISI P20 pelas ligas de alumínio da série 7XXX, apresentam-se como uma opção viável, promovendo reduções típicas entre 20 a 60 % do custo final de produção por peça (ARIETA *et al.*, 2019).

A condutividade térmica de um molde de alumínio é até cinco vezes superior aos dos aços tradicionais, isso garante uma redução relevante no ciclo de resfriamento do material injetado. O molde de alumínio funciona como um trocador de calor mais eficiente que o aço, aumentando a produtividade dos componentes injetados (AMORIM, 2002). O uso da liga de alumínio em moldes de injeção para termoplásticos, reduz o tempo de resfriamento das peças injetadas em cerca de 30 % em comparação com os aços, em uma mesma faixa de vazão e temperatura do refrigerante (RASHID *et al.*, 2020). Este ganho na produtividade colabora no atendimento da demanda atual do mercado, de lançar novos produtos em frequências cada vez maiores (ARIETA *et al.*, 2019).

A alta troca térmica do molde de alumínio promove menores risco de empenamento e marcas de afundamento, com menores tensões de moldagem (BANK *et al.*, 2012; ERSTLING, 1998 *apud* GATTO *et al.*, 2011). Isso minimiza a quantidade de peças defeituosas e proporciona melhorias na precisão dimensional das peças injetadas, pois o alumínio aquece mais rápido na passagem do termoplástico fundido, auxiliando na sua fluidez e possibilitando menores pressões de injeção (REVPART, 2018; BANK *et al.*, 2012).

A liga de alumínio 7075-T6, apresenta valores de tensão de escoamento (σ_{LE}) na faixa de 505 MPa (CALLISTER, 2008). Esta é a propriedade mais relevante em projetos de moldes de injeção, pois indica a resistência do material a uma deformação plástica. Durante o processo de injeção de termoplásticos, os valores de pressão máxima de injeção ficam normalmente na faixa de 100 a 160 MPa, logo a liga de alumínio 7075-T6 atende esta solicitação mecânica. Testes mostraram que mesmo após exposta por longos períodos

a temperaturas típicas presentes no molde de injeção de termoplásticos, a liga de alumínio 7075-T6 apresentou resistência mecânica e estabilidade microestrutural adequada para suportar as temperaturas (ARIETA *et al*, 2019).

1.1 Problema da pesquisa

O principal problema que tenta-se sanar com esta pesquisa, é a necessidade da avaliação sobre a possibilidade de substituir o aço AISI P20 pela liga de alumínio 7075-T6 em moldes de injeção para termoplásticos, em termos de ganho de produtividade e qualidade superficial resultante do processo EDM. Visto que esta substituição propicia algumas vantagens significativa em relação aos moldes de aço, além do processo EDM ser vastamente utilizado na confecção de moldes para injeção.

Outro problema que esta pesquisa pretende contribuir, é no aumento do conhecimento sobre os desempenhos resultantes da usinagem EDM em ligas de alumínio, haja vista que as pesquisas nesta área ainda são incipientes. Segundo Markopoulos *et al*. (2019), na literatura existem muitos estudos experimentais e de modelagem sobre usinagem EDM em ligas ferrosas, mas poucos para outros materiais, comumente menos utilizados, como as ligas de alumínio.

1.2 Justificativas

Muito moldes somente podem ser fabricados ou finalizados pelo processo EDM por penetração, devido a algumas limitações nas usinagens convencionais, como a impossibilidade de gerar cantos vivos em cavidades, ferramentas que não possibilitam atingir grandes profundidades, risco de quebra de ferramentas de pequeno diâmetro, formação de aresta postiça que pode provocar defeitos superficiais, principalmente na usinagem de metais dúcteis, possibilidade de riscos superficiais devido a geração de cavaco, elevada dureza do material, entre outros. Sendo assim, é importante propiciar a devida avaliação da produtividade e da integridade superficial entre os materiais pesquisados, em termos de resultados de usinagem EDM.

Os processos de fabricação são regidos pelo fator financeiro e para evitar gastos desnecessários e retrabalhos, é importante ter o profundo conhecimento das principais tecnologias envolvidas no ciclo de fabricação; e também a correta especificação do

material que proporcione uma usinagem mais rápida e simultaneamente promova o atendimento aos requisitos de qualidade do projeto da peça e do próprio molde. Segundo Vieira *et al.* (2009) e Arieta *et al.* (2019), a maior produtividade aliada ao menor custo referente a ferramentas, máquinas e processos, é um dos pilares para a sobrevivência das fábricas no mercado extremamente competitivo. A redução do tempo de entrega de peças e de máquina trabalhada, é um fator essencial para agrega valor ao produto e na manutenção das empresas.

A usinagem pode afetar de forma relevante na integridade superficial da ferramenta de moldagem, e conseqüentemente, na sua funcionalidade, especialmente no que diz respeito a sua vida útil (JAVIDI *et al.*, 2008). O molde sendo um elemento crítico em termos de produtividade e qualidade dos produtos finais na moldagem de plásticos (PARK *et al.*, 2019). E considerando a carência de dados no que diz respeito a usinagem EDM na liga de alumínio 7075-T6, que segundo Arieta *et al.* (2019), no Brasil, seu uso como material para moldes ainda é irrisório, e da grande demanda na produção de moldes para termoplásticos com o aço AISI P20, justifica-se a relevância desta pesquisa experimental, como se propõe este trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a produtividade e a integridade superficial resultantes da usinagem por eletroerosão por penetração no aço AISI P20 e na liga de alumínio 7075-T6.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) avaliar e verificar as variações da rugosidade (R_a e R_z) e da TRM de acordo com a alteração dos materiais e dos regimes de usinagem;
- b) investigar nas amostras usinadas nos diferentes regimes, a formação da camada reformulada/branca, e a extensão da ZTA por meio de alterações na microdureza;
- c) analisar o efeito dos regimes de usinagem sobre a morfologia e topografia da superfície eletroerodida dos materiais pesquisados (crateras, microfissuras, poros, etc.).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica dos tópicos mais relevantes para o desenvolvimento do projeto de pesquisa. A estrutura deste capítulo segue a seguinte sequência: inicialmente trata-se da usinagem de forma geral abordando a usinagem convencional e não convencional, em seguida discorre-se sobre a usinagem por eletroerosão e seus subcapítulos, sobre as suas variáveis do processo, e os materiais que serão utilizados na pesquisa.

2.1 Usinagem

A usinagem ocorre com a remoção gradual de material da peça, resultando na forma geométrica final com dimensões e acabamentos apropriados (REBEYKA, 2016). Segundo Machado (2015), os processos de fabricação com remoção de cavaco podem ser divididos em dois grandes grupos, em processo de fabricação convencional e não convencional. Na usinagem convencional, há necessidade que as ferramentas de corte sejam mais duras que o material da peça a ser usinada. O uso de materiais difíceis de usinar, com elevada dureza e geometria complexa, incentivou à introdução dos processos de usinagem não convencionais, que hoje em dia estão bem estabelecidos nas modernas indústrias de fabricação (MACHADO, 2015).

Além da dureza elevada dos materiais avançados e das formas complexas, as estruturas de baixa rigidez e componentes micro-usinados com tolerâncias rigorosas e qualidade de superfície fina, dificilmente são possíveis de serem fabricados pelos métodos tradicionais de usinagem. Para atender estas demandas, surgiram os processos avançados de usinagem (não convencionais), como é o caso do processo de eletroerosão (EL-HOFY, 2005). Segundo Jain (2002, p.02), “Os processos avançados de usinagem são aqueles que empregam a energia em sua forma direta, em vez do uso de ferramentas convencionais”

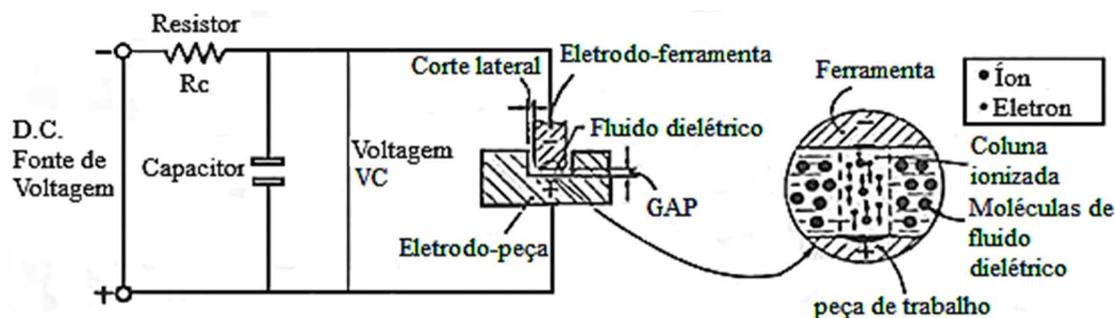
2.2 Usinagem por eletroerosão por penetração

O processo de usinagem por eletroerosão é um dos métodos de usinagem não convencionais mais utilizados nas indústrias. Segundo Amorim (2002), o EDM avançou para um dos principais processos de fabricação aplicados na indústria de moldes e matrizes, por gerar cavidades complexas, profundas e tridimensionais em muitas classes de materiais, nas operações de desbaste e acabamento. Os exemplos incluem usinagem de precisão em aços temperados, carbonetos, materiais cerâmicos compósitos e qualquer outro que ofereça condutividade elétrica mínima.

A descoberta do efeito erosivo da descarga elétrica se deve ao químico inglês Joseph Priestly, em 1770. Somente em 1943, na Universidade de Moscou, B. R. e N. I. Lazarenko exploraram as propriedades destrutivas da descarga elétrica para uso construtivo. Eles desenvolveram um sistema controlado de usinagem para metais de difícil usinabilidade, promovendo a vaporização/fusão do material da superfície, que serviu como padrão para o desenvolvimento de máquinas EDM (JAIN, 2002; McGEOUGH, 1988; HO e NEWMAN, 2003).

Os Lazarenko desenvolveram um circuito RC (resistor-capacitor), conforme Figura 1. A ferramenta e a peça de trabalho ficam imersas em um fluido dielétrico, e são conectadas a ambos os lados de um capacitor, que é carregado por uma fonte de corrente contínua. O aumento na tensão do capacitor deve ser grande o suficiente para atingir a tensão de ruptura do dielétrico, e assim poder criar uma faísca entre a ferramenta e a peça de trabalho, na região de menor resistência elétrica (KÖNIG & KLOCKE, 1997; McGEOUGH, 1988).

Figura 1 - Diagrama esquemático da usinagem por descarga elétrica no circuito RC



Fonte: JAIN, 2002

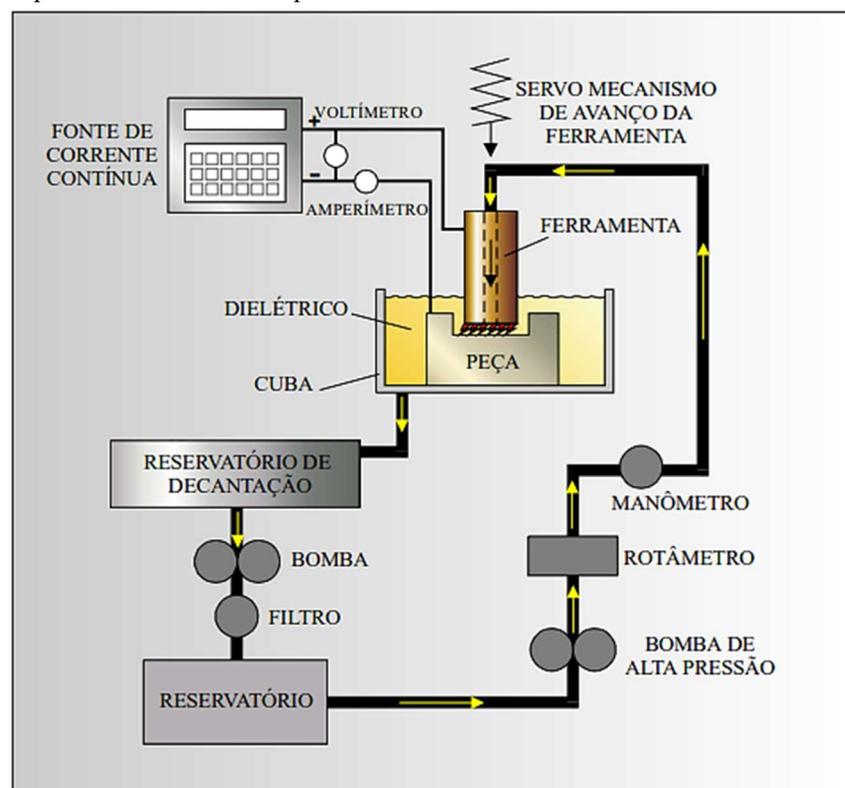
As descargas elétricas ocorrem quando a distância (GAP) entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça atinge um intervalo suficiente para romper as propriedades

resistivas do fluido. Os eletrodos ao se aproximarem, geram faíscas que proporcionam a remoção de material. Para aproveitar este método de fabricação é necessário o controle da energia gerada pela faísca. Para este controle, descobriu-se a possibilidade de concentrar a energia em uma determinada área, através da ocorrência da descarga elétrica submersa em um fluido dielétrico (JAIN, 2002).

2.3 Máquina operatriz EDM

As máquinas operatrizes EDM, possuem quatro componentes principais: fonte de alimentação, sistema servo mecanismo, sistema dielétrico e o conjunto eletrodo-ferramenta/eletrodo-peça (JAIN, 2002). A Figura 2 esquematiza os principais componentes de uma máquina de eletroerosão por penetração, esboçando também o seu princípio básico de funcionamento.

Figura 2 – Componentes básicos da máquina EDM



Fonte: ARANTES, 2001

2.3.1 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação da máquina EDM, tem como função converter corrente alternada em corrente contínua pulsada, que será responsável por produzir a centelha entre

os eletrodos. Para determinada tensão de entrada, a ferramenta ao atingir o GAP gera a faísca responsável pela usinagem. A fonte de alimentação EDM detecta a tensão entre os eletrodos e envia os sinais ao servo mecanismo, que mantém o valor do GAP adequado entre os eletrodos. A fonte de alimentação regula a intensidade da corrente e da tensão elétrica (JAIN, 2002; EL-HOFY, 2005). Parâmetros como corrente, tensão, frequência, duração de pulso, ciclo de trabalho e polaridade do eletrodo, devem ser capazes de serem controlados pela fonte de alimentação (JAIN, 2002).

2.3.2 Sistema servo mecanismo

O GAP é controlado pelo servo mecanismo, que mantém a separação adequada entre a ferramenta e a peça de trabalho (CROOKALL e HEUVELMAN, 1971 *apud* GOUDA *et al*, 2021). O servo mecanismo em máquinas tradicionais de eletroerosão por penetração, tem como função controlar o deslocamento do eletrodo-ferramenta na direção vertical, mantendo o GAP pré-determinado entre os eletrodos e assim garantindo faíscas eficientes. Há um sensor de tensão de GAP na fonte de alimentação, que envia sinais para o sistema servo (JAIN, 2002; PAULINUS, 2017). Conforme Jain (2002), o servo mecanismo garante durante a operação EDM:

- a) movimento do eletrodo-ferramenta em direção à peça de trabalho;
- b) centelhamento e retração eficientes do eletrodo quando faíscas ou arcos ineficientes são notados;
- c) processo de máquina estável, porque um processo de máquina instável é capaz de danificar a superfície usinada e também afetar adversamente a precisão da dimensão do produto usinado;
- d) distância adequada entre o eletrodo e a peça de trabalho.

2.3.3 Sistema dielétrico

As principais funções de um fluido dielétrico são absorver e remover o calor produzido pela descarga elétrica, ser um meio de lavagem eficaz para erradicar partículas e permitir concentrar a energia da centelha na região do GAP (GUPTA *et al*, 2019; RAZAK *et al*, 2015; KUMAR *et al*, 2021). O sistema dielétrico é composto pelo reservatório, filtros, bomba, dispositivos de distribuição e pelo fluido dielétrico.

Conforme Jain (2002) e Arantes (2001), um fluido dielétrico adequado deve possuir as seguintes características:

- a) alta resistência dielétrica (ou seja, rigidez dielétrica que permita permanecer eletricamente não condutor até que a tensão de ruptura entre os eletrodos seja atingida);
- b) levar o mínimo tempo possível para promover a ruptura do dielétrico;
- c) desionizar o GAP imediatamente após a centelha, promovendo a limpeza desta área. Esta característica faz com que se evitem curtos-circuitos;
- d) servir como um meio de resfriamento eficaz, e
- e) apresentar alto grau de fluidez, possuindo boas características de escoamento, para auxiliar na expulsão dos detritos da erosão.

Lima (2008) cita outras características requeridas ao fluido dielétrico, como calor específico, quanto maior, mais energia térmica é armazenada sem grandes aumentos de temperatura. Possuir boa condutividade térmica, esta característica reduz o tempo necessário para refrigerar e solidificar o metal fundido da zona de erosão, isso minimiza as chances das partículas se aderirem a ferramenta ou se depositarem na superfície da peça. Ter alto ponto de ebulição, que permite ao dielétrico manter-se mais estável em elevadas temperaturas, sem alterar suas propriedades originais. Possuir alto ponto de fulgor também é desejável ao fluido dielétrico.

Água deionizada, querosene, óleos lubrificantes, óleo de parafina e óleo de transformador, são alguns dos fluidos dielétricos usados. A água deionizada tem como vantagem proporcionar alta TRM e ser eficaz no resfriamento. Como desvantagens, pode-se citar, elevada taxa de desgaste do eletrodo e também causa corrosão. A água deionizada é comumente usada como fluido dielétrico no EDM a fio e em perfuração de furos de pequeno diâmetro, pois a oxidação provocada pela água, auxilia na usinagem em operações mais precisas (JAIN, 2002).

O óleo a base de hidrocarboneto é mais eficiente do que o fluido dielétrico à base de água, e geralmente mais indicado para o processo EDM. Embora o hidrocarboneto ofereça resistência à corrosão e resistência ao envelhecimento mais aprimorada do que outro meio, ele possui o risco de incêndio. Além disso, a decomposição do óleo durante o processo de usinagem, pode formar materiais à base de carbono, que podem promover a instabilidade da faísca (LEÃO, 2004 *et al*; CHAKRABORTY *et al*, 2015; STORR, 2016).

2.3.4 Eletrodos-ferramenta

O eletrodo-ferramenta é o responsável por gerar na peça de trabalho a cavidade com seu formato (HO e NEWMAN, 2003). Vários materiais podem ser empregados como eletrodo-ferramenta, porém os mais utilizados na indústria em geral, são o cobre e o grafite (ARANTES, 2001). Para que certo material seja utilizado como eletrodo-ferramenta, é desejável que o material tenha algumas características importantes, como: boa usinabilidade, baixa taxa de desgaste, bom condutor de eletricidade e calor, barato e prontamente disponível (JAIN, 2002).

O grafite é amplamente utilizado como material de eletrodo-ferramenta, isso se deve às suas boas propriedades de condução elétrica e térmica, juntamente com sua boa usinabilidade, entretanto é frágil, ficando propenso a quebra. O cobre é altamente estável e têm relativamente baixa taxa de desgaste (JAIN, 2002). O cobre e suas ligas são amplamente utilizados por causa de sua excelente condutividade elétrica e térmica, excelente resistência à corrosão, grande facilidade de fabricação de ferramentas de pequenas dimensões e boa resistência à fadiga (ASM, 1990).

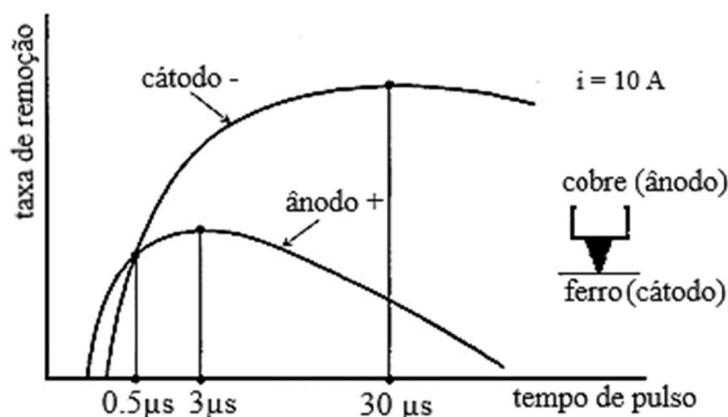
O cobre tem boa capacidade de polimento em comparação ao grafite, por isso é muito utilizado como eletrodo-ferramenta na fabricação de equipamentos médicos. O eletrodo de cobre é usado em situação em que o molde necessita de estreitas tolerâncias de rugosidade, dispensando assim trabalhos posteriores de polimento, que ocasionam a perda da repetitividade do molde (AMORIM, 2002). O cobre além de possuir as propriedades requeridas para um eletrodo, pode ser moldado pelos principais métodos de usinagem convencional, sendo um material para eletrodo vastamente usado em acabamentos superficiais precisos (WURZEL, 2015).

É comum no processo de usinagem por descarga elétrica utilizar-se de um eletrodo-ferramenta para desbaste e um para acabamento, principalmente em perfurações profundas, pois a ferramenta fica afunilada e os cantos arredondados devido a densidade do campo magnético ser mais alta nos cantos. A previsão do desgaste do eletrodo-ferramenta, é algo bem complexo de analisar, devido ao envolvimento de muitas variáveis de influência no seu desgaste (JAIN, 2002).

Em geral, as máquinas EDM possibilitam a escolha da polaridade dos eletrodos, conforme o tipo de aplicação desejada. Kunieda *et al.* (2005) e Dibitonto *et al.* (1989) sustentam que no processo EDM a combinação de eletrodo-ferramenta de cobre no polo

positivo para usinar materiais ferrosos é favorável ao processo, exceto no caso da aplicação de pulsos de descarga de curta duração, que proporciona maior erosão no eletrodo-ferramenta do que na peça de trabalho. A Figura 3 mostra que a erosão máxima no ânodo ocorre em cerca de $3\mu\text{s}$, enquanto a erosão máxima do cátodo ocorre em $30\mu\text{s}$, utilizando eletrodo de cobre em uma peça de ferro. A taxa de remoção referida na Figura 3, é definida como o volume de material removido, dividido pela soma dos tempos de pulso e de pausa, para cada ciclo de operação.

Figura 3 - Diferença das taxas de remoção no ânodo e no cátodo em decorrência do tempo de pulso (T_{on})



Fonte: DIBITONTO *et al.*, 1989

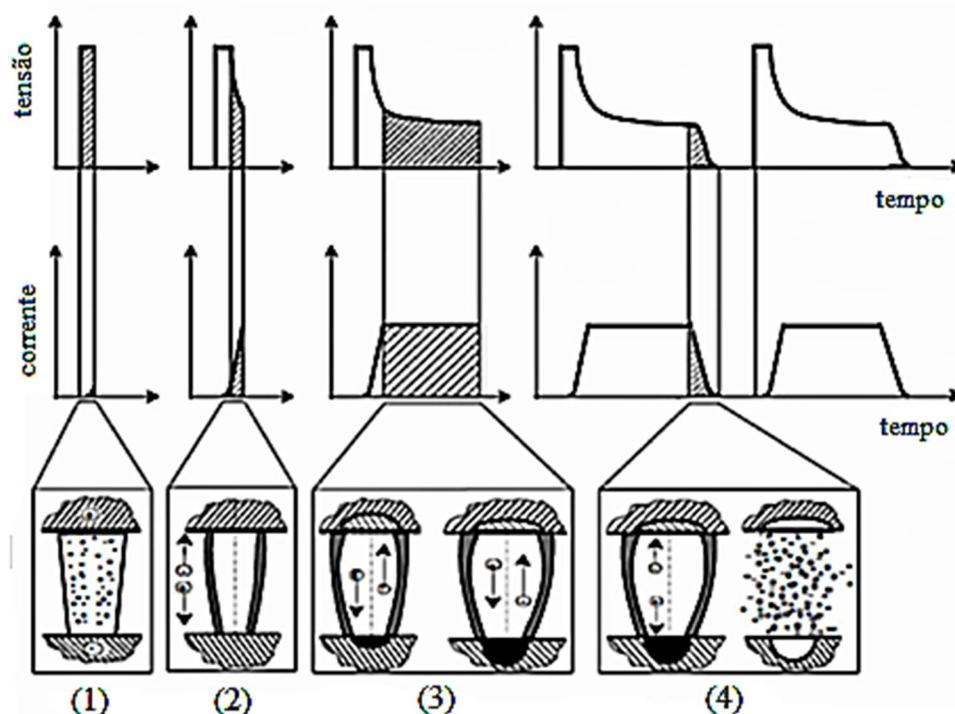
No caso ilustrado acima, a alta mobilidade dos elétrons que ocorre no início da descarga, faz com que apenas o ânodo seja bombardeado pelos elétrons, proporcionando maior remoção de material neste polo. A maior remoção de material no cátodo acontece após aproximadamente o dobro do período de tempo que o ânodo leva para o início da fusão de material. De acordo com estas observações, para as descargas elétricas com baixos valores de pulso (t_i ou T_{on}), abaixo de $0,5\mu\text{s}$, na polaridade positiva ocorrerá a maior extração de material. Com pulsos maiores, dá tempo para que os íons positivos resultantes do processo de ionização por impacto atinjam o cátodo, aumentando a remoção de material no mesmo (DIBITONTO *et al.*, 1989). A polaridade adequada do eletrodo-ferramenta, é dependente do seu material e da peça de trabalho (El-HOFY, 2005). Segundo Metals Handbook (1989 *apud* El-HOFY, 2005), é indicado a polaridade positiva no eletrodo-ferramenta de cobre, na usinagem do alumínio.

2.4 Fundamentos do fenômeno físico da usinagem por descarga elétrica

Há várias teorias que explicam a remoção de material no processo EDM. Amorim (2002) comenta sobre as teorias eletromecânica e termomecânica. Pela teoria eletromecânica entende-se que a erosão do material se baseia no princípio que ao se estabelecer um campo elétrico, produz-se forças suficientes para superar a coesão na face do material, e assim remover pequenas partículas da sua superfície. Pela teoria termomecânica entende-se que a retirada de material ocorre devido a fusão localizada na superfície da peça, ocorrida pela formação de chamas originadas pelos vários fenômenos físicos ocorridos durante a descarga elétrica. Entretanto, a teoria mais aceita, é a teoria termoelétrica.

No processo termoelétrico, a usinagem por eletroerosão utiliza para remover material da peça de trabalho a energia térmica de uma faísca gerada pela energia elétrica, que ocorre devido a interação entre os eletrodos. Para ocorrer o processo termoelétrico, tanto a peça de trabalho quanto o eletrodo-ferramenta devem possuir a propriedade física da condutividade elétrica (AMORIM, 2002; LIMA, 2008). O ciclo de uma descarga elétrica é dividido em quatro fases ou etapas consecutivas e distintas, conforme apresenta a Figura 4:

Figura 4 - Fases da descarga elétrica em um ciclo EDM



Fonte: KÖNIG E KLOCKE, 1997

As fases de um ciclo de descarga elétrica pela teoria termoelétrica são denominadas: ignição da faísca, formação do canal de plasma, fusão e evaporação dos resíduos da peça e do eletrodo, e, ejeção dos materiais fundidos (WURZEL, 2015; LIMA, 2008). Lima (2008) descreve simplificadamente as quatro fases consecutivas do ciclo de uma descarga elétrica:

1. Fase de ignição da faísca:

- a) o eletrodo se aproxima da peça;
- b) início da descarga elétrica;
- c) as duas unidades são energizadas;
- d) concentração do campo elétrico na fenda de trabalho (GAP).

2. Formação do canal de plasma:

- a) criação de um canal ionizado entre o eletrodo e a peça.

3. Fusão e vaporização de uma pequena quantidade de material nos eletrodos:

- a) o material da peça se funde localmente e se desintegra;
- b) o eletrodo se desgasta levemente;
- c) interrupção da centelha.

4. Ejeção do material fundido:

- a) evacuação das partículas metálicas pelo fluxo do dielétrico.

Durante o processo EDM, circula através dos eletrodos corrente DC pulsada (corrente contínua pulsada produzida a partir de corrente alternada), que produz no local do GAP o campo elétrico mais intenso. As forças do campo elétrico exercem influência na superfície do cátodo (polo negativo), que desprende os elétrons que se movem em direção a superfície do ânodo (polo positivo) (JAIN, 2002).

Os elétrons em movimento chocam-se com as moléculas neutras do dielétrico, que promove a ionização, ou seja, produzem íons. Com a ionização cada vez mais intensa, um canal muito estreito de condutividade elétrica contínua é formada. Nesse canal de plasma, há um fluxo contínuo e intenso de elétrons em direção ao ânodo e de íons em direção o cátodo. A energia cinética gerada pelo movimento dos elétrons e íons são convertidos em energia térmica, que resulta na fusão ou fusão com vaporização do material na superfície dos dois contatos, no ponto onde ocorreu a centelha (JAIN, 2002).

Benedict (1987) também corrobora com esta teoria, explicando que o pulso elétrico ao atingir os eletrodos, promove a faísca entre eles, sendo que neste momento a

corrente, a temperatura e a pressão no canal de plasma aumentam e a tensão diminui. Uma bolha expande-se rapidamente. No instante que cessa o pulso elétrico, a bolha gerada entra em colapso, e o metal fundido das superfícies é retirado do GAP pela passagem do fluido dielétrico.

A pressão do canal de plasma aumenta para valores elevados devido à evaporação do dielétrico, evitando assim a vaporização do metal, porém assim que o pulso é desligado a pressão diminui instantaneamente, permitindo a remoção/expulsão do metal fundido. A quantidade de material erodido da peça e do eletrodo-ferramenta depende da energia cinética liberada pelos elétrons e íons (JAIN, 2002).

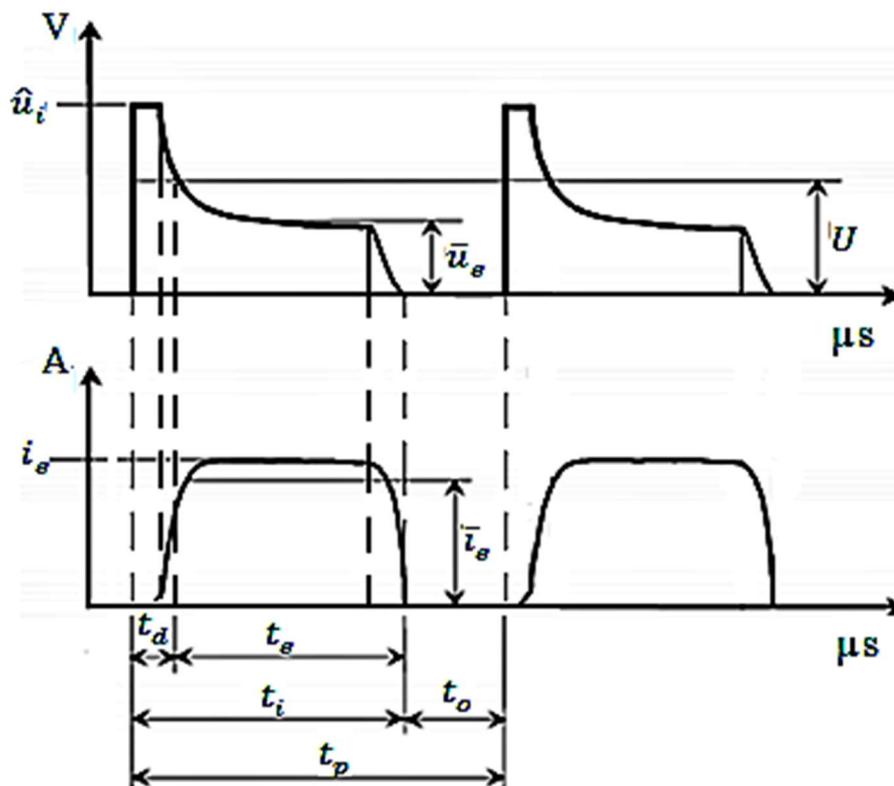
2.5 Parâmetros do processo EDM

Para se atingir uma condição de otimização na usinagem EDM, é necessário o controle dos parâmetros do processo, que vão determinar o rendimento da usinagem e as características finais da peça usinada. O material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, e o fluido dielétrico, são os primeiros parâmetros a serem escolhidos. A partir desta seleção, se faz necessário o ajuste dos parâmetros de usinagem da máquina-ferramenta, também chamados de parâmetros elétricos; os quais nas máquinas mais modernas, já há a sugestão da seleção adequada, conforme os parâmetros de desempenho desejáveis, porém estes podem variar de acordo as condições dos fatores do processo.

De forma geral, os parâmetros elétricos com maior efeito sobre as variáveis de desempenho do processo, são a intensidade da corrente de pico, a tensão do arco e os tempo de pulso de descarga ligado e desligado (LEE e TAI, 2003). Os parâmetros de desempenho da usinagem, são os que resultam do ajuste dos parâmetros do processo e dos parâmetros elétricos, sendo os principais, a taxa de remoção de material e de desgaste do eletrodo-ferramenta, e a rugosidade superficial.

Várias pesquisas, inclusive a de Arantes (2001), relevam que a taxa de remoção de material (TRM) sofre influência de praticamente todos os parâmetro envolvidos no processo, sendo um fator determinante para a usinagem por eletroerosão. A Figura 5 ilustra o comportamento dos parâmetros elétricos durante um ciclo EDM, de acordo com a norma VDI 3402 de 1990.

Figura 5 - Comportamento dos parâmetros elétrico durante um ciclo EDM



Fonte: AMORIM, 2002

A norma alemã VDI 3402 de 1990, que é citada por vários autores, como, Amorim (2002), Campos (2014), Oliniki (2009), Santos (2007) e Silva (2006), define da seguinte forma os principais parâmetros de controle do processo EDM por penetração e a simbologia empregada:

\hat{u}_i – Tensão em aberto;

\bar{u}_e – Tensão média da descarga;

U – Tensão média de trabalho durante a usinagem;

t_d – Tempo de retardo de ignição da descarga;

t_e – Duração da descarga;

t_i – Duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$);

t_o – Duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;

t_p – Duração do período do ciclo de uma descarga;

i_e – Corrente máxima durante a descarga;

\bar{i}_e – Corrente média durante a descarga.

2.5.1 Tensão elétrica

A tensão do arco elétrico é um fator significativo nos parâmetros de desempenho do processo EDM, estando relacionada com a capacidade de lavagem do GAP pelo fluido dielétrico. Kansal *et al* (2005, *apud* CRUZ jr, 2015) cita que a tensão irá determinar a distância entre o eletrodo e a peça, sendo que maiores tensões aumentam o GAP, e assim colaboram com o processo de lavagem e estabilidade da descarga elétrica. Com o aumento da tensão, a taxa de desgaste do eletrodo e a taxa de remoção de material tendem a aumentar, pois proporciona maior aporte energético imposto sobre a peça.

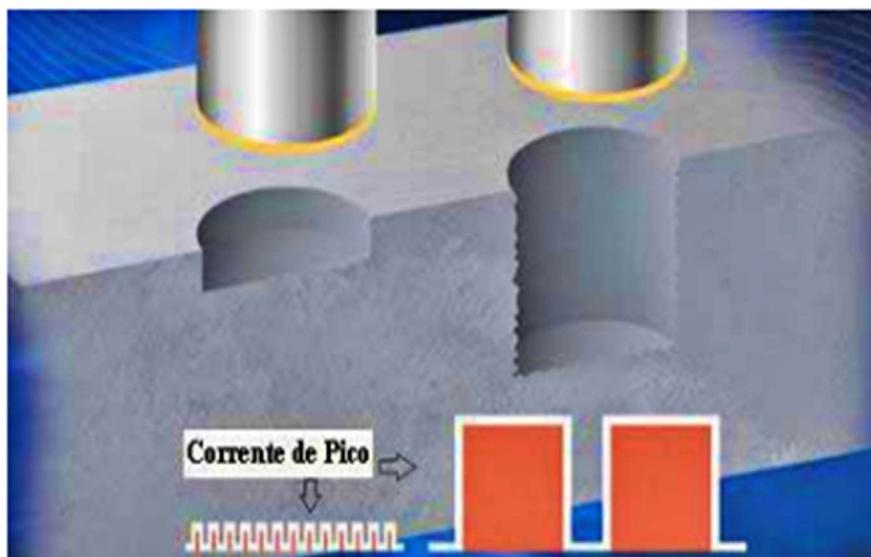
Campos (2014) também afirma que o aumento da tensão média de trabalho ocasiona maior abertura do GAP entre os eletrodos, que proporciona boas condições de movimentação de retirada das partículas erodidas. Porém, em contrapartida, o aumento gradual da tensão em aberto, origina um aumento excessivo do GAP, que ocasiona um longo tempo de retardo da ignição de descarga (t_d), e conseqüentemente, diminuirá o rendimento por diminuir a frequência dos pulsos.

Os valores da tensão elétrica devem ser ajustados para que se evite a ocorrência de curtos-circuitos e arco durante a usinagem, podendo até ocorrer ausência completa de usinagem ou danificações no eletrodo-ferramenta e na peça. No caso de arcos elétricos, que na eletroerosão significam a ocorrência de descargas instáveis sempre no mesmo ponto dos eletrodos, o desempenho do processo é prejudicado, pois ocorrem baixas taxas de remoção, aliados a uma alta taxa de desgaste relativo da ferramenta (AMORIM, 2002).

2.5.2 Corrente elétrica

A corrente elétrica é a quantidade de energia empregada em cada centelha (ARANTES, 2001; WURZEL, 2015). Cruz jr (2015) define a intensidade de corrente elétrica como um dos parâmetro mais significativo do processo EDM. Santos (2007) estudou o processo de eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6, e afirmou que a intensidade da corrente de descarga, é um parâmetro de extrema importância na produtividade e na qualidade das peças. Sendo que a seleção adequada da intensidade da corrente elétrica, influencia na rugosidade, na taxa de desgaste do eletrodo e no rendimento do processo. A intensidade da corrente elétrica exerce papel de maior influência na taxa de remoção de material. A ilustração da Figura 6, representa o efeito da intensidade da corrente elétrica na TRM.

Figura 6 - Influência da intensidade da corrente elétrica na TRM



Fonte: CRUZ jr, 2015

Wurzel (2015) se propôs a analisar o desempenho da liga de cobre-nióbio com diferentes composições de nióbio, para serem utilizadas como eletrodo-ferramenta na usinagem do aço AISI H13, comparando com o desempenho do cobre eletrolítico. As ligas foram confeccionadas por metalurgia do pó, com teores de nióbio de 10, 20, 30, 40 e 50 %, em peso. Observou-se que em todas as configurações da liga cobre-nióbio, gerou-se uma superfície usinada de baixa rugosidade média, em comparação ao eletrodo de cobre. Isto deve-se provavelmente ao nióbio, que reduz o faiscamento, agindo como redutor de corrente, melhorando a qualidade superficial, mas diminuindo a TRM.

Verma e Sahu (2017) investigaram a otimização dos parâmetros do processo EDM por penetração na liga de titânio (Ti6Al4V) usando a abordagem completa do projeto fatorial. Nos ensaios experimentais foram usados eletrodo de cobre, e querosene como fluido dielétrico. A corrente de pico, a tensão no GAP, o tempo de pulso e a pressão do fluido dielétrico foram considerados os parâmetros variáveis, enquanto a taxa de remoção de material e a rugosidade (R_a) superficial foram as variáveis de resposta. Concluiu-se para esta liga, que a corrente elétrica é o parâmetro operacional dominante relacionado à taxa de remoção e a rugosidade, sendo que o tempo de pulso também tem contribuições relevantes para os parâmetros de desempenho analisado.

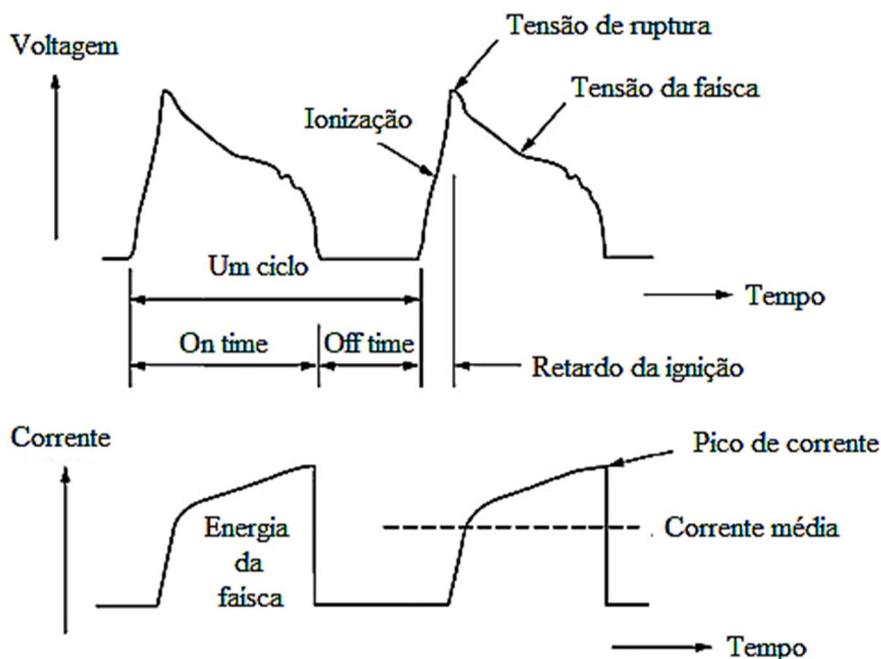
Arroj *et al.* (2014) demonstrou claramente em seu experimento variando somente a corrente elétrica na usinagem EDM da liga de alumínio 6061-T6, que com o aumento da corrente, a rugosidade da superfície também aumenta. Quanto mais energética ficar a

centelha, maior sua capacidade de remover material, e, portanto, maiores valores de rugosidade serão obtidos. Porém, em baixos valores de corrente, a TRM também é baixa, e o tempo total de usinagem aumenta. Desta forma, se o acabamento da superfície não é prioridade, pode-se fazer uso de altos valores de corrente, porém deve-se tomar cuidados com os danos na integridade do material, causado pela alta energia empregada.

2.5.3 Frequência de pulso

A frequência de pulso é o número de ciclos ($T_{on} + T_{off}$) produzidos por segundo. Quanto mais alta a frequência, normalmente mais fino é o acabamento superficial obtido. Com o aumento do número de ciclos por segundo, a duração do tempo de energia ativa diminui. Tempos curtos removem pouco material e criam crateras menores. Isso produz um acabamento superficial mais liso e com menos danos à integridade da peça de trabalho. A duração do pulso ($T_{on} = t_i$) é o período de tempo que a corrente pode fluir durante o processo EDM, e o trabalho é realizado (KUMAR *et al*, 2009). O intervalo de pulso ($T_{off} = t_o$) é o período de tempo entre duas descargas elétricas sucessivas. A Figura 7 apresenta um ciclo de pulso característico real.

Figura 7 - Curva característica real de tensão e corrente



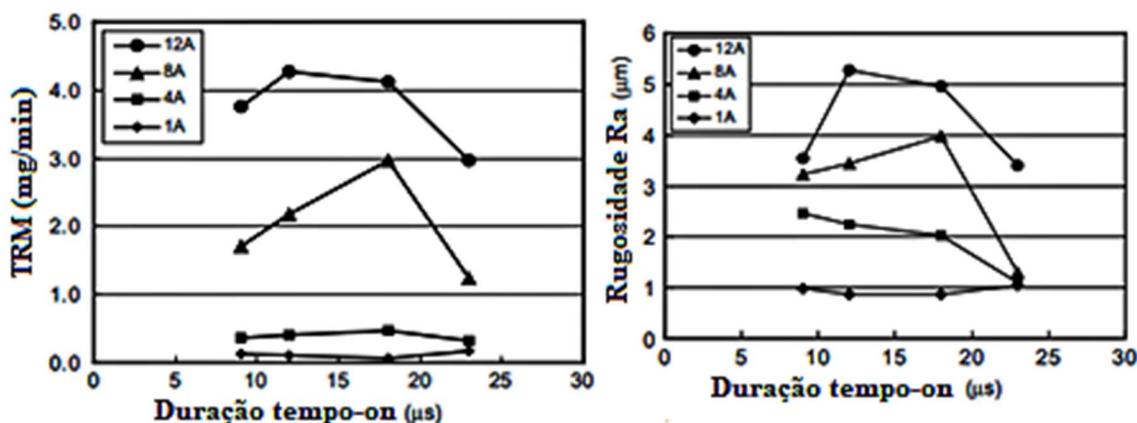
Fonte: McGEOUGH, 1988; EL-HOFY, 2005

O intervalo de tempo entre as descargas, é a pausa necessária para a reionização do dielétrico. Este tempo permite que o material fundido se solidifique e seja levado para

fora do GAP. Com T_{off} muito curto, as faíscas ficarão instáveis e então, mais curto-circuito ocorrerá. Por outro lado, um T_{off} muito alto resulta em um tempo de usinagem maior, mas que pode fornecer a estabilidade necessária para obter sucesso com o processo EDM em uma determinada aplicação (FULLER, 1996).

Lee *et al.* (2004) investigaram no aço AISI 1045, o processo EDM de uma pequena área, usando eletrodo de cobre-tungstênio. Observou-se que a TRM aumenta com o aumento da corrente de pulso, em uma duração de pulso (T_{on}) constante. Além disso, é observado que o aumento da duração de pulso não necessariamente aumenta a TRM. Isso é particularmente evidente para correntes mais altas. Em relação a rugosidade, também notou-se que o aumento da duração de pulso, acarretou uma diminuição da rugosidade, para correntes mais altas, após determinados tempos de pulso. Conforme dados apresentados na Figura 8.

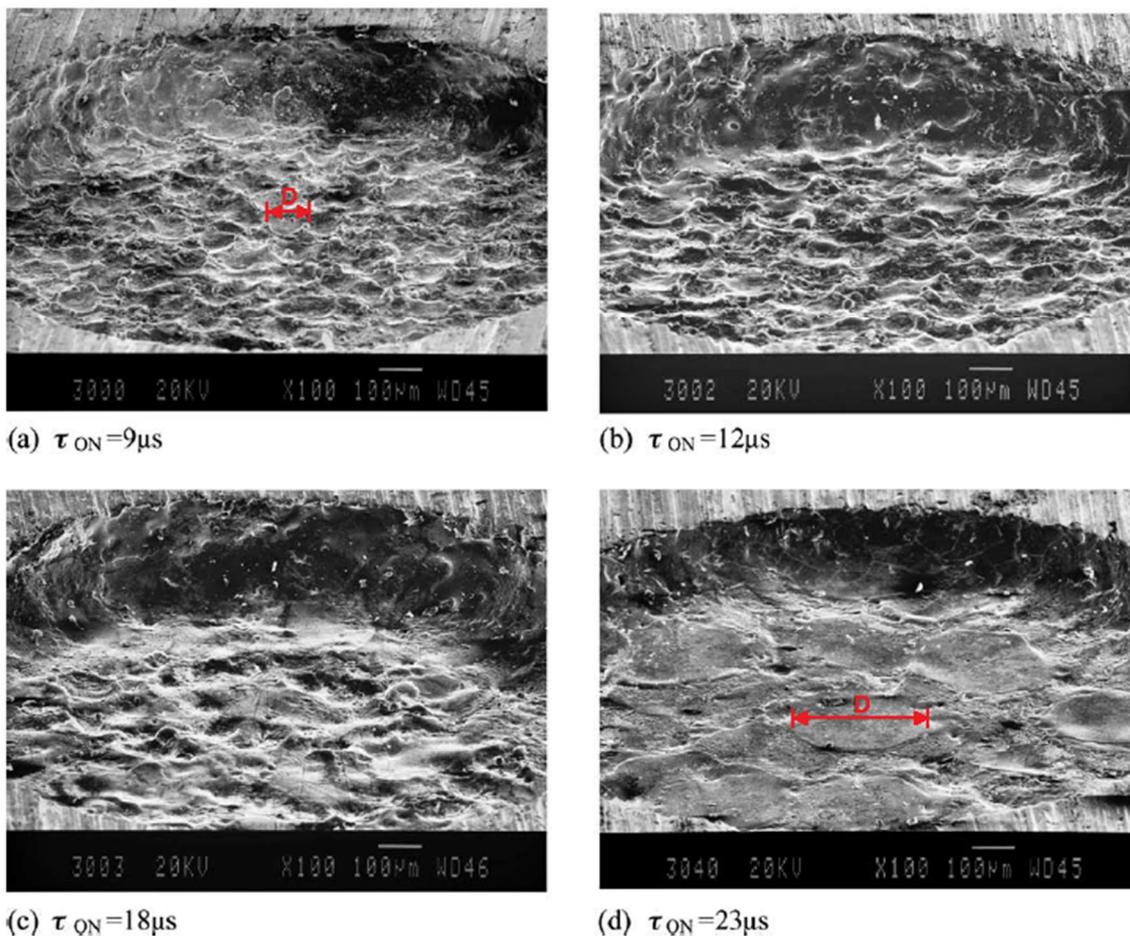
Figura 8 - Variação da TRM e da rugosidade como o aumento do tempo de pulso



Fonte: LEE *et al.*, 2004

A redução da TRM notada em valores de corrente mais altos com o aumento do tempo de pulso, é atribuído ao aumento do canal de plasma, associada a uma duração excessiva do tempo de descarga. Quando o canal de plasma aumenta após certo limite de tempo de pulso, sua densidade de energia diminui e ocorre a perda de energia térmica por unidade de área e, portanto, o TRM diminui. Para o caso da rugosidade, conforme a duração do pulso é estendida, ocorre a expansão do canal de plasma e isso resulta em crateras maiores, porém mais planas, reduzindo assim os valores de rugosidade (LEE *et al.*, 2004). Conforme pode-se observar na Figura 9.

Figura 9 - Diâmetro das crateras do aço AISI 1045 de acordo com a duração do tempo de pulso



Fonte: LEE *et al.*, 2004

Amorim e Weingaertner (2005) reforçam esta teoria, ao realizarem experimentos aplicados ao aço AISI P20, onde constataram a diminuição da TRM e da rugosidade da superfície, após certos valores máximos de duração de pulso, independentemente do nível da corrente e da polaridade do eletrodo. Este fenômeno está relacionado à excessiva duração do tempo de pulso, que causa um aumento demasiado do diâmetro do canal de plasma, o que diminui a energia e a pressão do plasma sobre as cavidades fundidas. Entretanto, nestas condições o processo pode-se tornar instável em função das condições inadequadas de lavagem.

Utilizar tempo de pulso (T_{on}) excessivo, gera um período de maior resistência à passagem do fluido dielétrico, prejudicando assim a limpeza do GAP, o que pode gerar mais material refundido na superfície usinada (OLINIKI, 2009). O intervalo entre as descargas e o afastamento da ferramenta, não é fator tão relevante quando comparado com o pulso de descarga (T_{on}), pois não afeta de forma tão significativa a rugosidade,

nem a espessura da camada reformulada/branca, desde que não prejudique a correta aplicação da lavagem pelo dielétrico (DEWANGAN *et al.* 2015).

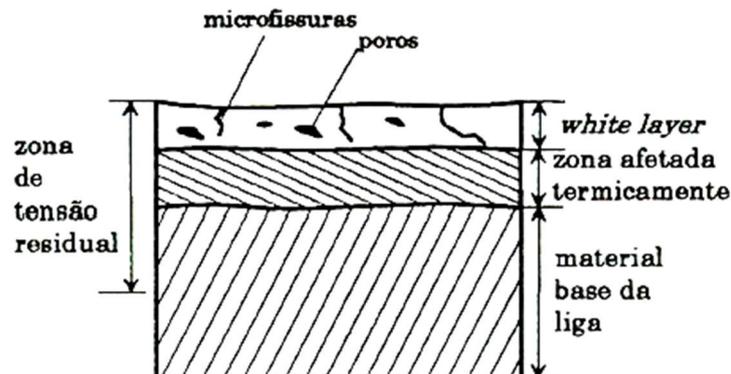
Segundo Amorim e Weingaertner (2005), ao se estabelecer o tempo de pulso igual ao intervalo de pulso ($t_i = t_o$), normalmente observa-se uma boa estabilidade no processo EDM. Valores maiores de t_o ($t_i < t_o$), que é comumente estabelecido mantendo t_i constante e aumentando o valor de t_o , levariam a frequências de descargas muito baixas, conseqüentemente diminuindo a taxa de remoção de material. Por outro lado, níveis maiores de t_i ($t_i > t_o$), definidos pela aumento do valor de t_i mantendo t_o constante, possivelmente ocasionaria uma concentração excessiva de detritos no GAP; isso causaria uma remoção não uniforme ao longo das superfícies frontais dos eletrodos, bem como um possível aumento da rugosidade.

2.6 Camadas afetadas

A usinagem por eletroerosão é um processo baseado predominantemente por mecanismo térmico de remoção de partículas. Devido ao efeito térmico, as camadas subsuperficiais, também podem sofrer modificações na sua composição química e estrutural. As altas variações de temperatura que o material sofre durante o processo de eletroerosão, em função do ciclo de aquecimento e resfriamento, origina a zona de tensão residual, que inicia na camada superficial, podendo atingir até áreas do material base. Estas tensões residuais podem causar microfissuras, que sob esforço, podem se propagar até o substrato (OLINIKI, 2009).

Na Figura 10 é identificado as camadas afetadas pelo processo EDM. Neste processo, a energia de descarga desenvolve temperatura muito alta, que funde e vaporiza o material. Parte deste material fundido é levado pelo fluido e o restante é resfriado pelo dielétrico, que posteriormente se ressolidifica na face usinada. Este material ressolidificado sobre a superfície usinada, é chamado de camada reformulada, ressolidificada ou de camada branca (BHATTACHARYYA *et al.*, 2007). A superfície reformulada consiste na incorporação de camadas de carbono, resultando em dureza localizada e tensão de tração na superfície (MAIDEEN *et al.* 2021). A camada reformulada em ligas ferrosas é frequentemente referida como uma camada branca não detectável (LIM *et al.*, 1991).

Figura 10 - Representação esquemática da seção transversal de uma amostra eletroerodida



Fonte: AMORIM, 2002

Utilizando reagentes adequados, foi verificado que dependendo do material de aço e das condições de usinagem, uma variedade de microestruturas pode resultar na camada branca (LIM *et al.*, 1991). Ekmekci *et al.* (2005) constatou que a camada branca do aço para moldes de plástico (DIN 1.2738), usinados em líquido dielétrico de hidrocarboneto, contém mais carbono que no material base, devido aos produtos da pirólise do dielétrico, ocorrido durante a descarga. Conseqüentemente, a camada branca é composta por cementita e martensita distribuída na matriz de austenita retida, formando estruturas dendríticas, devido à rápida solidificação do metal fundido. Arooj *et al.* (2014) na usinagem EDM da liga de alumínio 6061-T6, verificou em análise de espectrógrafo de energia dispersiva (EDS), que devido ao carbono adicionado a camada reformulada, esta consiste em uma camada de óxido de alumínio com carbono aprisionado.

A camada branca frequentemente vem acompanhada da formação de microfissuras (HO e NEWMAN, 2003; SANTOS, 2010). Dentre os defeitos superficiais, as microfissuras são os mais significativos, pois ocasionam à redução da resistência do material à fadiga, à abrasão e a corrosão, principalmente sob condições de tração, sendo que a existência de microfissuras diminuirá a vida útil do molde (LEE e TAI, 2003). Em anexo a camada reformulada, podem aparecer microglóbulos. Os microglóbulos são formados por gotículas de metal fundido que são expelidas aleatoriamente durante a descarga e posteriormente solidificados na superfície da peça de trabalho. Na usinagem em aços, são visualizados quando é empregado alta energia de descarga (LIM *et al.*, 1991).

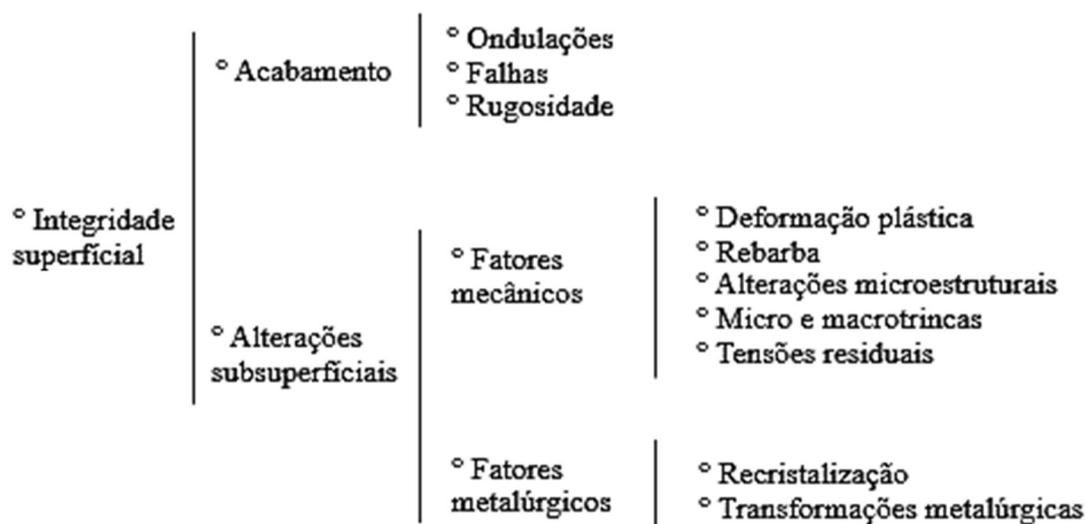
Abaixo da camada reformulada, uma zona afetada pelo calor é gerada, devido aos ciclos rápidos de aquecimento e têmpera (EKMEKCI, 2007; BORMANN, 1991). A zona termicamente afetada é uma região onde não ocorreu fusão do material, e, é de difícil identificação através de exame microscópico (CRUZ jr, 2015). Há possibilidade de reduzir drasticamente a camada branca, ajustando os parâmetros de usinagem, porém, não há formas de eliminar totalmente a zona afetada termicamente (HO e NEWMAN, 2003).

Uma das formas de verificar a profundidade da influência térmica da zona termicamente afetada, é através de ensaios de microdureza na seção transversal do corpo de prova. O ensaio de microdureza Vickers (HV) é uma das técnicas mais utilizadas, sendo vastamente aplicado na caracterização mecânica de materiais em pesquisas e na área industrial (GONTARSKI, 2021). Este método apresenta alta precisão, e as impressões são sempre proporcionais à carga, desta maneira o valor de microdureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada (BARBOSA e CURY, 2019; SOUZA, 1982).

2.7 Integridade superficial

A integridade superficial trata basicamente de dois aspectos, às irregularidades geométricas na superfície topográfica e às possíveis alterações metalúrgicas das camadas subsuperficiais (DABADE *et al.*, 2007; OLIVEIRA, 2006; JAIN, 2002). A Figura 11 exemplifica os fatores englobados pela integridade superficial.

Figura 11 - Classificação da integridade superficial



Fonte: MACHADO *et al.*, 2015

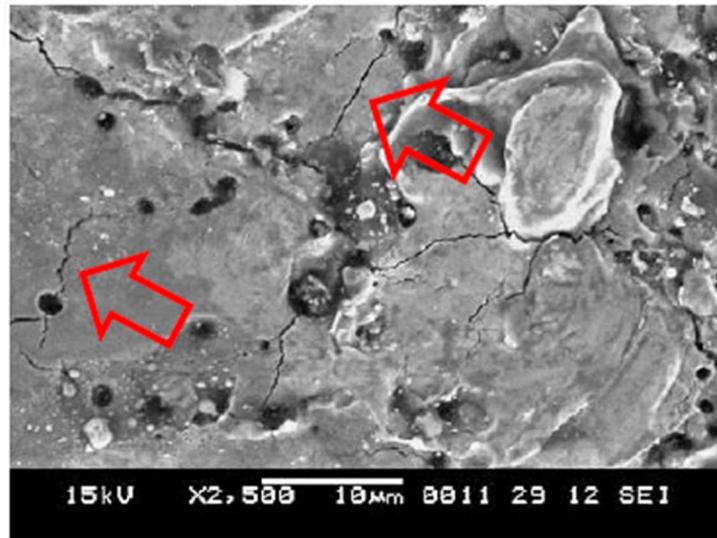
O material usinado sofre efeitos mecânicos e térmicos que podem modificar de forma significativa as características das camadas afetas (WHITEHOUSE, 2000). A intensidade desses efeitos depende da interação das energias envolvidas, que sofrem a influência dos diversos parâmetros relativos ao processo de usinagem empregado. A condição da integridade superficial gerada pela usinagem, determina a longevidade e confiabilidade dos produtos (DEBADE *et al.*, 2007; JAVIDI *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2015).

O intenso calor gerado associado a cada descarga durante a usinagem EDM, resulta em gradientes de temperatura severos nos locais da superfície usinada. Quando cessa a descarga, a camada superficial esfria rapidamente, desenvolvendo uma tensão residual de tração, que muitas vezes é suficiente para produzir microfissuras sobre a superfície (PINEDO, 2016; ZEID, 1997) Como as microfissuras e os poros se formam durante o estágio de resfriamento, parece haver alguma relação entre os dois (LIM *et al.*, 1991; TAI, LU e CHEN, 2011).

A microestrutura da camada branca é bastante diferente do material original, e, embora seja benéfica em termos de abrasão e resistência à erosão, os defeitos dentro dela, como poros, microfissuras, etc, podem causar uma deterioração geral das propriedades mecânicas do componente (LEE e TAI, 2003). A formação de microfissuras está associada ao desenvolvimento de altas tensões térmicas do material, bem como à deformação plástica e tensão de tração na superfície do componente usinado. As microfissuras se formam por que as tensões térmicas e de transformação geradas no material, associadas à taxa extrema de resfriamento após a descarga, frequentemente se aproximam da resistência à tração final do material (DEWANGAN, 2014; LEE e TAI, 2003; LEE e LI, 2003; LIM *et al.*, 1991).

Lee e Li (2003), analisaram a integridade superficial de uma peça de carboneto de tungstênio, utilizando eletrodo Cu-W. Foi observado que aumentando a corrente de pico e a duração de pulso, originavam-se crateras mais profundas e a quantidade de material ressolidificados era mais evidente. Outra característica foi a abundância de microfissuras na camada superficial, conforme mostrado na Figura 12.

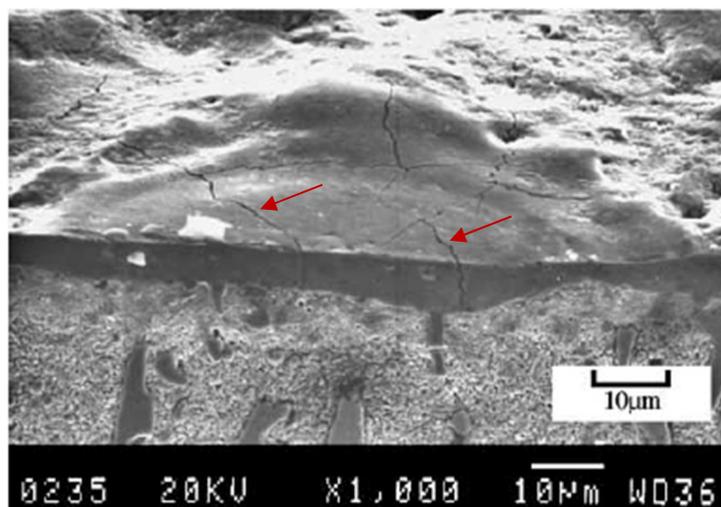
Figura 12 - Microfissuras superficiais no carboneto de tungstênio electroerodido



Fonte: LEE e LI, 2003

Lee e Tai (2003) estudaram a relação entre os parâmetros EDM e as microfissuras superficiais nos aços-ferramenta D2 e H13, baseado na variação dos parâmetros de corrente e do tempo de pulso de descarga. Em ambos os materiais, a espessura da camada branca aumenta de forma mais significativa com o aumento da duração do pulso, porém a corrente também tem sua contribuição. Todas as microfissuras se iniciam na superfície da amostra e penetram perpendicularmente na camada branca, terminando dentro desta camada ou em seu contorno inferior, conforme mostra Figura 13.

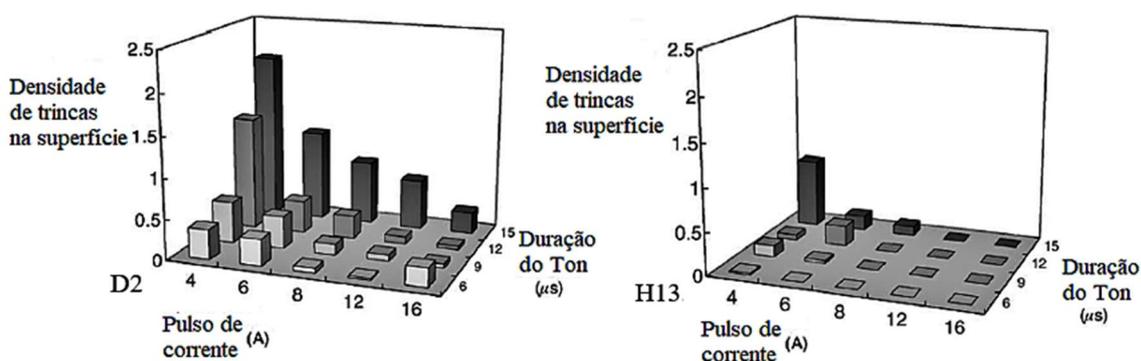
Figura 13 - Microfissuras na camada branca (material: D2; 4 A / 15 μ s)



Fonte: LEE e TAI, 2003

Uma vez que a condutividade térmica do aço H13 é maior que do aço D2, a tendência para a formação de microfissuras no H13 é comparativamente menor que no D2. O estudo revelou um fenômeno interessante para estes materiais, que não há uma relação linear entre a densidade de microfissuras superficiais e a energia de pulso, ou seja, o aumento da energia de pulso não leva automaticamente ao aumento da formação de microfissuras. Neste caso, observou-se que a densidade máxima de trinca, ocorreu sob as condições de usinagem com corrente de pulso mínima e duração máxima de pulso (LEE e TAI, 2003), conforme ilustração da Figura 14.

Figura 14 - Distribuição da densidade de microfissuras superficiais no aço D2 e H13



Fonte: LEE e TAI, 2003

2.7.1 Rugosidade

Nos moldes de injeção de termoplásticos fabricados pelo processo EDM, a rugosidade do molde será transferida para o produto final, sendo de suma importância o seu conhecimento e avaliação. Em aplicações que se requeiram baixos níveis de rugosidade, o correto controle deste fator é fundamental para o acabamento desejado (ALMEIDA e SOUZA, 2015). A rugosidade de uma superfície é integrada de irregularidades finas ou erros geométricos, resultado das ações comuns do processo de usinagem e podem ser medidas por diversos parâmetros (VIEIRA, 2012).

No Brasil, a regulamentação da avaliação da rugosidade é feita através da Norma NBR ISO 4287, que define o desvio aritmético médio (R_a) como sendo a média aritmética dos valores absolutos das cotas da ordenada no comprimento de amostragem. A rugosidade média (R_a) apresenta a vantagem de ser um parâmetro de rugosidade aplicável à maioria dos processos de fabricação, quase todos os equipamentos de medição apresentam este parâmetro e os riscos inerentes ao processo alteram pouco seu valor (ALCOVER Jr., 2017).

Outro parâmetro de medida da rugosidade útil no controle de um processo produtivo é o R_z . Este pode ser empregado em casos em que a função da peça a ser controlada não seja influenciada por pontos isolados. Este parâmetro tem como principais vantagens definir muito bem a superfície em perfis periódicos e facilidade de obtenção de gráfico pelos equipamentos que os fornecem (MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICO, 2021). De acordo com a norma ABNT ISO 4287:2002, equivalente a norma ISO 4287:1997, o parâmetro R_z corresponde a soma da altura máxima dos picos do perfil (Z_p) e a maior das profundidades dos vales do perfil (Z_v), no comprimento de amostragem.

A rugosidade média (R_a) usual de um processo de eletroerosão fica na faixa de 1,6 μm a 5 μm nas aplicações mais comuns, e pode se estender até 12,5 μm (ASM, 1989). Dewangan *et al.* (2015) usinando o aço AISI P20 com diferentes níveis de parâmetros, usando eletrodo de cobre de diâmetro 12 cm na polaridade negativa, chegou à rugosidade (R_a) mínima de 1,66 μm e 7,13 μm de máxima. Constatando através de seus resultados que os fatores de maior influência na rugosidade foram a corrente e a duração do pulso. Sendo que o aumento dos níveis destes fatores provoca aumento da rugosidade, devido a geração de crateras maiores e mais profundas, e a formação de microfissuras mais profundas e largas, em decorrência da alta energia da centelha associada à alta duração de pulso.

Markopoulos *et al.* (2019) na sua investigação experimental da usinagem EDM na liga de alumínio Al5052, usando eletrodo de cobre. Verificou para este material, que em contraste com o claro efeito da duração do tempo de pulso, a corrente elétrica não afeta tão significativamente a rugosidade da superfície. Obtendo R_a cerca de 50% maior para tempo de pulso de 500 μs , do que para o tempo de pulso de 100 μs , mantendo outros parâmetros constantes.

2.8 Materiais para moldes de injeção de termoplásticos

Este capítulo descreve os materiais de análise desta pesquisa, no caso, o aço ferramenta baixa liga AISI P20, tradicionalmente usado na confecção de moldes de injeção para termoplásticos, e da liga de alumínio 7075-T6, que se apresenta como possível substituta ao AISI P20. A seguir é apresentado a descrição dos materiais que serão utilizados na pesquisa.

O aço AISI P20 pertencente ao grupo dos aços específicos para moldes de injeção de plásticos, ainda é o material mais utilizados para esta finalidade, principalmente pelo baixo custo e fácil disponibilidade no mercado, entre outras propriedades (ARIETA *et al.*, 2019). É amplamente utilizado em moldes de grande e média precisão, devido à sua alta temperabilidade e boas propriedades mecânicas (KARA, 2018; HOSEINY *et al.*, 2015). O aço AISI P20 em geral é fornecido no estado beneficiado (temperado e revenido) e com dureza entre 24 e 34 HRC. Nos moldes fabricados com este aço, em geral não se utiliza tratamentos térmicos posteriores (PINEDO, 2004; FAVORIT, 2020).

O Aço AISI P20 tem sua liga normatizada segundo ASTM A 681, sendo um aço pré-endurecido, podendo ser utilizado após usinagem no seu estado de fornecimento, e, é aplicado onde não há requisitos severos de resistência à corrosão (AÇOESPECIAL, 2021). Este metal pode ser classificado conforme sua composição química, como um aço com baixo teor de liga (INFOMET, 2020). A tabela 1 apresenta as composições químicas do aço AISI P20, que podem variar conforme sua configuração.

Tabela 1 - Composição química típica do aço AISI P20 em termos percentuais

AISI	W Nr.	Carbono	Manganês	Silício	Cromo	Molibidênio	Níquel	Vanádio	Fósforo	Enxofre
P20	12.311	0,35 - 0,45	1,30 - 1,60	0,20 - 0,40	1,80 - 2,10	0,15 - 0,25	-	-	0,035	0,035
P20	12.738	0,35 - 0,45	1,30 - 1,60	0,20 - 0,40	1,80 - 2,10	0,15 - 0,25	0,90 - 1,20	-	0,03	0,03
P20	12.711	0,50 - 0,60	0,50 - 0,80	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	0,25 - 0,35	1,50 - 1,80	0,07 - 0,12	0,025	0,025

Fonte: FAVORIT, 2020

A aplicação do aço AISI P20 ocorre principalmente na fabricação de moldes e matrizes, onde necessita-se elevada resistência à abrasão e ao desgaste, com boa polibilidade. A alta polibilidade, possibilita obter superfícies espelhadas, o que o torna este aço apropriado para a confecção de moldes de injeção para plásticos. Em caso onde requeira-se maior resistência ao desgaste e a corrosão, pode utilizar-se de tratamentos termoquímicos como a nitretação e cementação (FAVORIT, 2020).

A liga de alumínio 7075-T6 pertence a classe de alumínios da série 7xxx, são ligas passíveis de endurecimento por precipitação e são tratáveis termicamente. São amplamente utilizados na indústria aeronáutica. Os moldes em alumínio para injeção de termoplásticos, são geralmente fabricados com alumínio das séries 6000 e 7000. Os tipos de alumínio QC-7 e QC-10, produzidos pela empresa Alcoa (alumínios da série 7000),

são os mais utilizados nesta aplicação. Possuem elevada condutividade térmica e há também possibilidade de soldagem nesta liga (CTBORRACHA, 2019).

A combinação de propriedades mecânicas e físicas desejadas para as ligas de alumínio da série 7XXX, podem ser obtidas através de tratamento térmico. Devido aos tratamentos térmicos, resultam altos índices de resistência mecânica e tenacidade. Nesta liga, combinações de zinco com magnésio, proporcionam a formação de $MgZn_2$, composto que possibilita o seu tratamento térmico (CTBORRACHA, 2019).

Para a liga de alumínio 7075 é indicado o tratamento por solubilização seguido por um envelhecimento, que corresponde ao tratamento térmico T6 (CALLISTER, 2008). Os tratamentos térmicos designados pela letra “T”, são muito importantes para que ocorra o endurecimento e aumento nas propriedades de resistência das ligas de alumínio (OLIVEIRA, 2012). A Tabela 2 apresenta a composição típica da liga de alumínio 7075 em porcentagem de massa, sendo o zinco o principal elemento da liga.

Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio 7075

Silício	Ferro	Cobre	Manganês	Magnésio	Cromo	Zinco	Outros	Alumínio
0,4	0,5	1,20 - 2,00	0,3	2,10 - 2,90	0,18 - 0,28	5,10 - 6,10	0,3	87,22

Fonte: METALTHAGA, 2021

As ligas de alumínio 7075 são em geral exploradas para produzir trocadores de calor, peças antidesgaste e de turbinas a gás, com vantagem única na fabricação de moldes e matrizes, para áreas automotivas, espaciais e aplicações alternativas. O alumínio 7075 tem uma das ligas de alumínio mais dura, e apresenta boa usinabilidade e resistência à fadiga. Além disso, possui a melhor resistência à corrosão do que qualquer outra série de ligas de alumínio (SELVARAJAN *et al.*, 2021; SINGH, SINGHAL e KUMAR, 2020).

2.8.1 Desempenho do aço e do alumínio como moldes de injeção

Em países como EUA, Alemanha, Itália, França, Japão e Reino Unido, as ligas de alumínio de resistência mais elevada, da série 7XXX, têm sido usadas há mais de 20 anos em substituição aos aços típicos para a confecção de moldes de injeção para termoplásticos, e seu uso tem crescido de forma expressiva. As ligas trabalhadas da série 7XXX endurecidas por precipitação, suportam de forma adequada as solicitações mecânicas e térmicas exigidas ao molde durante a injeção de termoplásticos (ARIETA *et al.*, 2019).

As prioridades e requisitos dos moldes de aço e de alumínio para plásticos são diferentes para cada projeto. Para moldes destinados a várias execuções de produção, o aço é mais adequado, pois possui uma vida útil mais longa. Já o molde de alumínio, oferece grandes benefícios na redução do tempo de ciclo de injeção, que por sua vez, poderá produzir peças com mais rapidez. Embora tanto o aço quanto o alumínio sejam normalmente adequados para uma ampla gama de resinas de moldagem por injeção, o aço oferece a vantagem de trabalhar com resinas de formulações mais complexas ou avançadas, como as reforçadas com vidro, fibra ou outros aditivos, sem danificar o acabamento do molde (REVPART, 2018).

Uma das vantagens consideráveis aos moldes de alumínio, é a superior dissipação de calor, que propicia ao molde maior capacidade de se aproximar de tempos uniformes de aquecimento e resfriamento, e fazê-lo mais rapidamente, e, desta forma, apresenta como benefício a redução do número de peças defeituosas e rejeitadas. O aquecimento e o resfriamento não uniformes estão entre os fatores que mais causam defeitos em peças plástica injetadas, como marcas de afundamento, vazios e marcas de queimadura. Quando usados na aplicação certa, os moldes de alumínio podem oferecer a vantagem de reduzir custos, devido às menores taxas de rejeição de peças. Os moldes de alumínio também são bem receptivos ao reparo, e, por ser um material mais dúctil, pode ser modificado facilmente nos casos de erros de produção. Já os moldes de aço, em geral são descartados (REVPART, 2018).

No final do ano de 1991, a IBM (International Business Machines) anunciou formalmente que havia concluído um estudo de cinco anos sobre o uso de moldes de alumínio para produção de alto volume. Este estudo demonstrou que em comparação com moldes de aço concebidos e construídos de forma idêntica, os moldes de alumínio custam 50 % menos, foram entregues na metade do tempo, produziram produtos de maior qualidade e a duração do ciclo foi reduzido de 25 a 40 %. Esses dados foram compilados para vários moldes e vários designs de produtos, usando uma variedade de compostos de moldagem de plástico (BRYCE, 2002).

Zironi (2005) realizou simulações de computador em 12 peças, que apresentavam características muito diferentes em termos de forma, tamanho e materiais plásticos injetados, concluindo que houve uma economia significativa no tempo total do ciclo, utilizando o alumínio como material do molde, ao invés do aço. Uma economia do tempo

do ciclo de 10 a 20 % foi observada em casos onde não haviam tolerâncias críticas ligadas à deformação da peça devido ao efeito do calor. No entanto, uma economia acima de 60 % foi observada nos casos em que a deformação pelo calor afetou os níveis críticos de tolerância do projeto.

Bank *et al.* (2012) compararam as características de fluidez de resinas de uso geral em moldes de alumínio QC-10 (alumínio da série 7xxx) e moldes de aço AISI P20. O estudo demonstrou que as peças de plástico moldadas em alumínio minimizaram a deformação e aumentaram a estabilidade dimensional, permitindo que os moldes encham mais rápido e com mais eficiência, possibilitando que o material plástico flua por distâncias maiores com menor pressão de injeção quando comparado ao aço. O molde de alumínio permitiu que o plástico fundido se mova rapidamente, portanto, não ocorreu uma mudança de densidade devido ao excesso de pressão de injeção. O molde de aço adquiriu e reteve muito mais calor e durante a fase de injeção, o plástico preencheu a cavidade e permaneceu fundido por muito mais tempo, necessitando pressão de injeção adicional, o que causou mudanças de densidade antes da solidificação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de eletroerosão nas amostras, foram realizados principalmente nos laboratórios da Universidade de Passo Fundo, em uma máquina EDM modelo AgieCharmilles SP 1U. Os equipamentos de suporte para a coleta de dados, além da própria máquina EDM, foram: rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-410, máquina embutidora modelo Struers Termopress 2, microscópio óptico modelo ZEISS Acope A.1, durômetro digital marca Shimadzu, microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan modelo Vega LM3. No Instituto Federal do Campus Erechim, utilizou-se de cortadeira metalográfica, tipo *cut off*, marca Arotec e modelo Arocor 40, disco abrasivo de corte para metais não ferrosos (marca Fortel, modelo FV) e disco de corte abrasivo (marca Fortel, modelo FII) para materiais ferrosos de dureza entre 25 a 50 HRC.

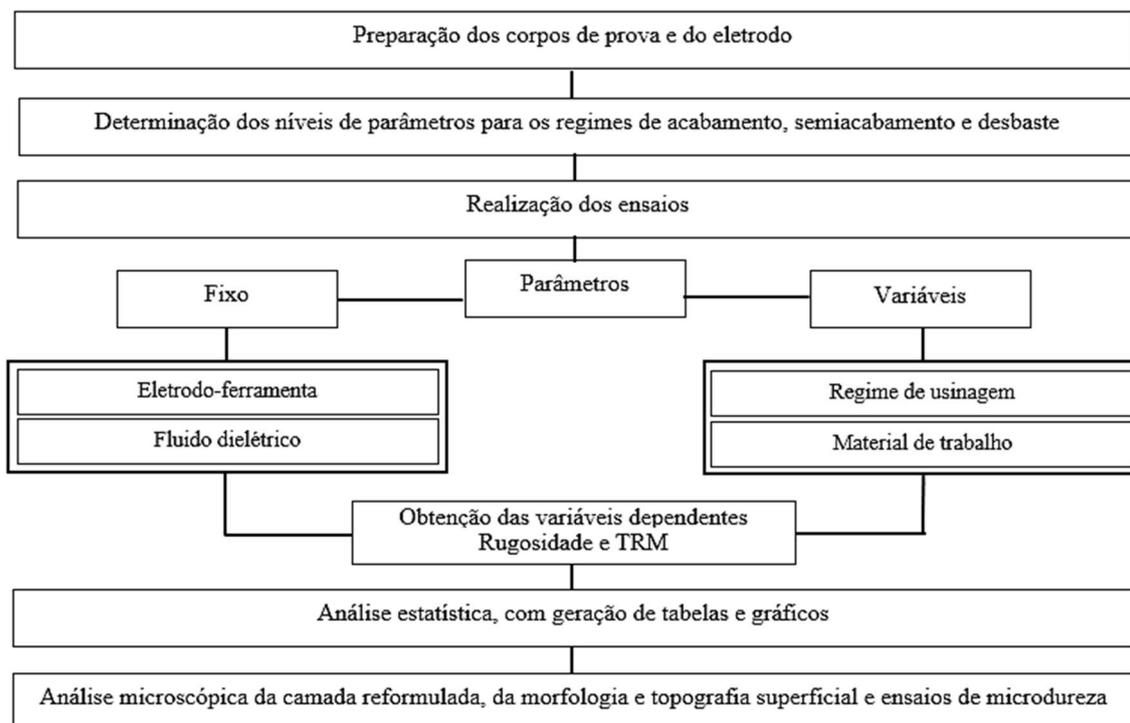
O fluido dielétrico utilizado na usinagem EDM foi da marca Giroto, modelo G ERO 10, próprio para processos de eletroerosão por penetração, composto pela mistura de solvente hidrogenados (composto principalmente de hidrocarbonetos). Possui ponto de fulgor elevado e devido a sua baixa viscosidade permite rápida decantação das partículas metálicas e dissipação do calor. Sendo um produto biodegradável, não classificado como perigoso, de acordo com ABNT NBR14725-2.

Selecionou-se o eletrodo de cobre eletrolítico para os experimentos, pois propicia baixos valores de rugosidades e tem boa característica de usinabilidade, além de ser amplamente utilizado como eletrodo-ferramenta (JAIN, 2002; EL-HOFY, 2005; WURZEL, 2015). O cobre eletrolítico cilíndrico utilizado nesta pesquisa, foi adquirido da empresa Metal Express, com 99 % de pureza e diâmetro de 15,8 mm. A peça de aço AISI P20 foi doação da empresa Plaxmetal da cidade de Erechim. E o material de alumínio 7075-T6 foi adquirido com a empresa C-Metal da cidade de Curitiba.

3.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi dividido em etapas, e segue uma sequência coerente de desenvolvimento dos estágios da pesquisa, conforme o fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma do desenvolvimento experimental



Fonte: AUTOR, 2021

A preparação dos corpos de prova constou na retificação do material de aço AISI P20, e do faceamento da seção transversal do eletrodo-ferramenta, em cada novo ensaio o eletrodo-ferramenta era novamente faceado por torneamento. O corpo de prova de alumínio foi obtido com dimensões e acabamento adequado, para ser utilizado sem a necessidade de operações de usinagem precedentes a sua aplicação nos ensaios EDM.

Sempre que o eletrodo-ferramenta era preso ao porta-ferramenta, utilizou-se o relógio comparador para ajustar a perpendicularidade entre o eixo longitudinal do eletrodo-ferramenta e da superfície da peça de trabalho, e assim garantir que a seção transversal do eletrodo-ferramenta esteja paralela com a face do material a ser usinado. Após isso procedeu-se o zeramento automático da face do eletrodo na superfície da peça. Programou-se no sistema de controle da máquina EDM, uma profundidade de erosão de 0,2 mm. Escolheu-se esta profundidade devido ao tempo elevado de usinagem, principalmente nos ensaios em regime de acabamento; e também baseado em outras pesquisas que utilizaram profundidade semelhantes, ou iguais, como na pesquisa de Lee e Tai (2003) e Tai, Lu e Chen (2011).

Os corpos de prova durante a usinagem ficaram submerso por completo em fluido dielétrico. A lavagem no GAP ocorreu através do direcionamento do bico de lavagem, com pressão do fluido de 2 bar (0,2 MPa), manteve-se a mesma configuração em todos os ensaios, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Usinagem EDM no corpo de prova de aço



Fonte: AUTOR, 2021

Os regimes de usinagem foram selecionados diretamente na máquina EDM, visto que a máquina possui tabelas tecnológicas, em que consta os níveis dos parâmetros com a indicação aproximada para cada regime de trabalho. Intitulou-se os regimes de usinagem de acordo com as rugosidades a serem obtidas, em níveis baixos, para que se possa usinar o molde de injeção para termoplástico, sem a necessidade de posteriores processos de acabamento. Segundo Tai, Lu e Chen (2011), o pós-processamento para remover a camada reformulada não apenas estende o processo de fabricação, mas também aumenta seu custo. A Tabela 3 apresenta os níveis dos parâmetros utilizados em cada regime.

Tabela 3 - Níveis dos parâmetros dos regimes

Regime de acabamento							
Corrente de pico (A)	Tensão de descarga (V)	T _{on} (μs)	T _{off} (μs)	GAP (mm)	Polaridade	Erosão (x 10 ⁻¹ s)	Retração (x 10 ⁻¹ s)
3	85	2	2	0,009	negativa	20	2
Regime de semiacabamento							
Corrente de pico (A)	Tensão de descarga (V)	T _{on} (μs)	T _{off} (μs)	GAP (mm)	Polaridade	Erosão (x 10 ⁻¹ s)	Retração (x 10 ⁻¹ s)
4	80	10	6	0,05	positiva	22	4
Regime de desbaste							
Corrente de pico (A)	Tensão de descarga (V)	T _{on} (μs)	T _{off} (μs)	GAP (mm)	Polaridade	Erosão (x 10 ⁻¹ s)	Retração (x 10 ⁻¹ s)
6	75	14	10	0,07	positiva	28	4

Fonte: AUTOR, 2021

Para o planejamento experimental, optou-se por utilizar 3 repetições. Segundo Campos (2020), é trivial escolher 3 réplicas, pois 3 repetições evita a invariabilidade que ocorre utilizando somente uma, e não corre o risco da repetição coincidente, no caso de 2 réplicas, e já apresenta alguma variação, que na maioria das vezes já basta para testar a variabilidade determinada pelos fatores de variação e pelas próprias réplicas.

Os valores de rugosidade foram mensurados através do rugosímetro. Utilizou-se a seguinte configuração: Norma Padrão Internacional ISO 4287; Ajuste da resolução por range de medição = +/- 40μm; Filtro RC (filtro analógico 2RC com diferença de fase); *Cut-off* de 0,8*5 mm. Para obter a taxa de remoção de material, aplicou-se a seguinte Equação:

$$TRM = \frac{\text{volume de material removido da peça (mm}^3\text{)}}{\text{tempo de erosão (min)}} \quad \text{Eq. 1}$$

Após colhidos os resultados, estes foram processados no software *Statistica*, para análise de variância (ANOVA), a qual gerou tabelas e gráficos para facilitar a visualização das diferenças de desempenho obtidas com os tratamentos investigados, e para verificar as diferenças significativas das médias amostrais. A análise foi realizada com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A ANOVA é uma técnica estatística aplicada com a finalidade de testar a hipótese, de que as médias amostrais não são semelhantes, por meio de determinado nível de significância (ASSIS *et al.*, 2019). A técnica ANOVA é utilizada para identificar as variáveis do processo que mais afetam a medida de desempenho em questão (DICKENS *et al.*, 1996).

Através de planilha eletrônica (Excel), foram calculados, em cada resultado obtido, os aumentos percentuais das variáveis dependentes (TRM, R_a e R_z), alcançados na liga de alumínio 7075-T6 em relação ao aço AISI P20. Utilizou-se da Equação 2 para este cálculo, após foram feitas as médias dos resultados obtidos e gerado os gráficos.

$$\text{Ganho percentual (\%)} = \frac{(\text{variável dependente Al} - \text{variável dependente aço}) \cdot 100\%}{\text{variável dependente do aço}} \quad \text{Eq. 2}$$

Após a análise estatística e da obtenção das diferenças percentuais entre os desempenhos dos materiais, as amostras nos três regimes de usinagem, passaram pelo processo de metalografia. As amostras de aço foram cortadas e embutidas em resina baquelite, lixadas em lixas d'água de granulometrias decrescentes sucessivas (220, 400, 600 e 1200 mesh). O polimento foi executado na politriz, com pasta de alumínio (alumina) de 1 μm . O ataque químico foi executado por uma solução de Nital, cuja composição foi de 2% em volume de ácido nítrico e 98% em volume de água destilada, com tempo de exposição médio de 8 segundos.

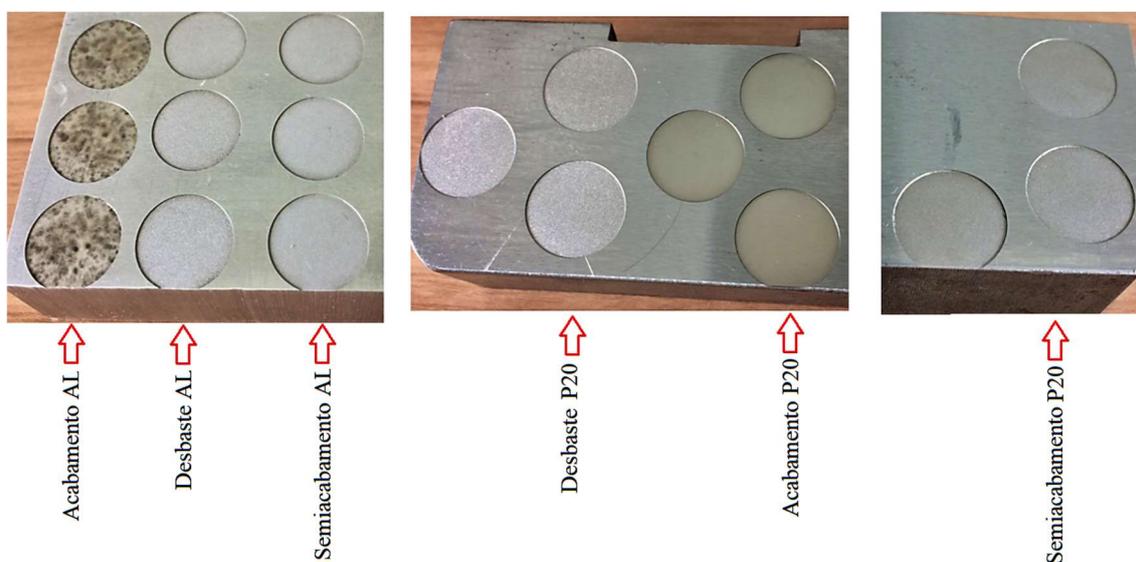
Para as amostras de alumínio, utilizou-se os mesmos procedimentos das amostras de aço, porém usou-se além das lixas utilizadas no aço, uma mais fina de 2000 mesh. No polimento utilizou-se pasta de diamante de 1 μm . O ataque químico foi feito com uma solução de 5% em volume de ácido fluorídrico para 95% em volume de água destilada, com tempo médio de exposição de 12 segundos. Os procedimentos metalográficos foram baseados nos experimentos utilizados por Amorim (2002), no aço e no alumínio.

Após a etapa metalográfica, foram obtidas as imagens de microscopia óptica da seção transversal de corte das amostras. Em seguida, foram feitos os ensaios de microdureza, em escala Vickers. Os procedimentos para os ensaios seguiram as orientações da norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008. A carga de teste utilizada foi de 245,2 mN (HV 0,025) e tempo de duração de 15 segundos, sendo o equipamento compatível com a norma ISO 6507-1/2019. Para a análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV), as amostras foram limpas em ultrassom com acetona. Cada amostras passou pelo banho de ultrassom durante três minutos, foi repetido esta operação uma vez para cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova dos materiais foram submetidos aos ensaios EDM, conforme os parâmetros da Tabela 3, resultando nas imagens da Figura 17. Obteve-se em cada regime de usinagem, cavidades medindo o diâmetro do eletrodo-ferramenta, mais duas vezes o valor do comprimento da centelha, ou seja, duas vezes o valor referente ao GAP correspondente a cada regime de usinagem, conforme especificado na Tabela 3.

Figura 17 - Ensaio feitos nos corpos de prova



Fonte: AUTOR, 2021

As amostras da liga de alumínio 7075-T6 usinadas em regime de acabamento, apresentaram alguns pontos escuros na sua camada superficial. Amorim (2002) na usinagem da liga de alumínio AMP 8000, também observou uma camada escura sobre a superfície das amostras usinadas. Este efeito pode ser explicado devido às altas temperaturas ocorridas durante a descarga elétrica, que provocam a desintegração do dielétrico, ocasionando a deposição de carbono na superfície usinada. Segundo Ekmekci (2007), a superfície do material usinado pelo EDM, fica saturada com carbono, independentemente do material do eletrodo-ferramenta, ao utilizar fluido dielétrico à base de hidrocarboneto.

Essas manchas escuras ocorridas nas amostras usinadas sob regime de acabamento, se deve a dificuldade de lavagem na região do GAP, pois em condições de acabamento a fenda de trabalho média (GAP) é bastante pequena e o intervalo entre as descargas (T_{off}) também é reduzido. Portanto, para minimizar esta camada escura, é

recomendável melhorar a lavagem no GAP pelo dielétrico (AMORIM, 2002). As amostras de acabamento do aço AISI P20 também apresentaram manchas escuras na superfície, porém não aderiram visualmente ao material, como na liga de alumínio.

Após atingir a profundidade de erosão, foram colhidos na máquina EDM, os registros dos tempos de usinagem, para aplicar na Equação 1 e obter a TRM. O volume de material removido foi de 39,033 mm³ no regime de acabamento, 39,711 mm³ no regime de semiacabamento e 39,911 mm³ no regime de desbaste. Os dados referentes a produtividade para os dois materiais, encontram-se nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 - Tempos de erosão e TRM do aço AISI P20

Tempo de erosão AISI P20 (min)			
Regimes	Acabamento	Semiacabamento	Desbaste
Ensaio amostra 1	891,516	257,250	75,200
Ensaio amostra 2	911,516	267,416	70,333
Ensaio amostra 3	889,016	273,350	72,250
Médias	897,349	266,005	72,594
Desvio padrão	12,332	8,142	2,452
TRM AISI P20 (mm³/min)			
Regimes	Acabamento	Semiacabamento	Desbaste
Ensaio amostra 1	0,0441	0,1544	0,5307
Ensaio amostra 2	0,0431	0,1485	0,5675
Ensaio amostra 3	0,0442	0,1453	0,5524
Médias	0,0438	0,1494	0,5502
Desvio padrão	0,0006	0,0046	0,0184

Fonte AUTOR, 2021

Quadro 2 - Tempos de erosão e TRM da liga de alumínio 7075-T6

Tempos de erosão Al 7075-T6 (min)			
Regimes	Acabamento	Semiacabamento	Desbaste
Ensaio amostra 1	716,833	37,983	20,716
Ensaio amostra 2	704,683	39,400	21,150
Ensaio amostra 3	709,166	35,883	18,550
Médias	710,227	37,755	20,139
Desvio padrão	6,1441	1,7695	1,3928
TRM Al 7075-T6 (mm³/min)			
Regimes	Acabamento	Semiacabamento	Desbaste
Ensaio amostra 1	0,055	1,045	1,927
Ensaio amostra 2	0,056	1,008	1,887
Ensaio amostra 3	0,055	1,107	2,152
Médias	0,055	1,053	1,988
Desvio padrão	0,0005	0,0498	0,1426

Fonte: AUTOR, 2021

Os valores de rugosidade R_a e R_z do aço AISI P20 e da liga de alumínio 7075-T6, são apresentados nos Quadros 3 e 4, respectivamente. Os ensaios foram executados de forma igual para todas as amostras. Foram feitas três medições em diferentes pontos de cada amostra, uma próxima ao centro e duas outras medições paralelas a feita no ensaio central.

Quadro 3 - Rugosidade (R_a) do aço AISI P20 e da liga de alumínio 7075-T6

Rugosidades AISI P20 (μm)									
Regimes	Acabamento			Semiabamento			Desbaste		
Amostra	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ensaio 1	0,349	0,312	0,322	1,531	1,256	1,407	2,112	2,115	2,053
Ensaio 2	0,333	0,328	0,337	1,403	1,271	1,383	2,213	2,179	2,026
Ensaio 3	0,326	0,382	0,327	1,472	1,299	1,57	2,148	2,172	2,009
Médias	0,336	0,341	0,329	1,469	1,275	1,453	2,158	2,155	2,029
Média total	0,335			1,399			2,114		
Des. padrão	0,0060			0,1074			0,0734		
Rugosidades Al 7075-T6 (μm)									
Regimes	Acabamento			Semiabamento			Desbaste		
Amostra	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ensaio 1	0,739	0,657	0,709	1,666	1,604	1,464	2,473	2,132	2,357
Ensaio 2	0,729	0,709	0,738	1,562	1,466	1,607	2,488	2,597	2,299
Ensaio 3	0,725	0,71	0,705	1,537	1,516	1,66	2,617	2,281	2,51
Médias	0,731	0,692	0,717	1,588	1,529	1,577	2,526	2,337	2,389
Média total	0,713			1,565			2,417		
Des. padrão	0,0197			0,0316			0,097		

Fonte: AUTOR, 2021

Quadro 4 - Rugosidade (R_z) do aço AISI P20 e da liga de Alumínio 7075-T6

Rugosidades aço AISI P20 (μm)									
Regimes	Acabamento			Semiabamento			Desbaste		
Amostra	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ensaio 1	1,836	1,96	1,956	9,347	8,255	10,11	12,78	11,7	13,27
Ensaio 2	1,808	1,72	2,062	8,704	8,628	9,864	12,34	13,3	12,19
Ensaio 3	1,956	2,243	1,896	9,795	9,187	9,375	13,14	12,36	12,94
Médias	1,867	1,974	1,971	9,282	8,690	9,783	12,753	12,453	12,800
Média total	1,937			9,252			12,669		
Des. padrão	0,0613			0,5471			0,1881		
Rugosidades Al 7075-T6 (μm)									
Regimes	Acabamento			Semiabamento			Desbaste		
Amostra	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ensaio 1	5,26	4,483	4,716	11,21	10,6	9,567	14,5	13,13	14,91
Ensaio 2	4,852	4,624	4,967	9,239	10,54	10,07	14,84	15,44	13,51
Ensaio 3	4,923	4,96	5,007	10,33	9,079	11,81	16,51	15,24	16,8
Médias	5,012	4,689	4,897	10,260	10,073	10,482	15,283	14,603	15,073
Média total	4,866			10,272			14,987		
Des. padrão	0,1635			0,2049			0,3482		

Fonte: AUTOR, 2021

Observa-se nos resultados obtidos nos Quadros 1,2,3 e 4, que o aumento da severidade dos regimes de usinagem, aumentou a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial, resultados coerentes com as pesquisas da área. Os fatores que mais contribuem no aumento da severidade da usinagem e na influência nos parâmetros de desempenho analisados, são a corrente elétrica e o tempo de pulso de descarga (T_{on}). Segundo Amorim e Weingaertner (2005), outros parâmetros, como o intervalo entre as descargas e a tensão elétrica, também são significativos para o desempenho do processo, porém têm menor influência que a corrente elétrica e o tempo de pulso de descarga.

A intensidade da corrente elétrica é um dos parâmetros determinantes na energia do processo de erosão, sendo muito relevante para a taxa de remoção de material. Com a elevação dos níveis de energia empregada, gera-se bolhas de gás de maior intensidade e energia térmica acumulada, que produzirá crateras mais profundas, e conseqüentemente aumentará a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial (OLINIKI, 2009; SANTOS, 2007; JOSHI e JOSHI, 2019). Lee e Li (2003) pesquisando a influência dos parâmetros de usinagem por eletroerosão por penetração na superfície do material de carboneto de tungstênio, verificou que em corrente de pico baixa e duração de pulso de descarga curta, origina-se pequenas e rasas crateras, e a densidade de material ressolidificado é menor.

Outro fator de forte influência para o aumento da rugosidade e da TRM, é o tempo de pulso de descarga. Quanto maior T_{on} , mais tempo a ponte de energia estará em contato com o material, que proporcionará maior erosão, devido ao aumento do tamanho das crateras geradas pelas bolhas de gases. Além disso, o aumento da duração da descarga elétrica, gera um período de maior resistência à passagem do fluido dielétrico, prejudicando assim a limpeza da área usinada, o que geralmente ocasiona aumento da densidade de material ressolidificado e conseqüentemente da rugosidade superficial (DEWANGAN *et al.*, 2015; OLINIKI, 2009, AMORIM, 2002, WURZEL, 2015).

4.1 Análise estatística

Após obtidos os valores das taxas de remoção de material e das rugosidades (R_a e R_z) superficiais, gerou-se as análises de variância para as variáveis dependentes, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de variância das variáveis

Análise de variância para a rugosidade (Ra)						
Efeitos	SS (soma dos quadrados)	Df (graus de liberdade)	MS (média dos quadrados)	F (distribuição de Fischer)	P (valor-p)	PCR (%)
Materiais	0,35865	1	0,35865	76,998	0,000001	3,74518
Regimes	9,12679	2	4,56339	979,717	0,000000	95,3064
Materiais*Regimes	0,03493	2	0,01746	3,749	0,054339	0,36471
Resíduos	0,05589	12	0,00466			0,58368
Total	9,57626	17				100

Análise de variância para a rugosidade (Rz)						
Efeitos	SS (soma dos quadrados)	Df (graus de liberdade)	MS (média dos quadrados)	F (distribuição de Fischer)	P (valor-p)	PCR (%)
Materiais	18,599	1	18,599	177,89	0,000000	5,23277
Regimes	332,172	2	166,086	1588,50	0,000000	93,4541
Materiais*Regimes	3,413	2	1,706	16,32	0,000377	0,96016
Resíduos	1,255	12	0,105			0,35299
Total	355,439	17				100

Análise de variância para a TRM (mm³/min)						
Efeitos	SS (soma dos quadrados)	Df (graus de liberdade)	MS (média dos quadrados)	F (distribuição de Fischer)	P (valor-p)	PCR (%)
Materiais	2,657588	1	2,657588	710,537	0,000000	31,1217
Regimes	4,349935	2	2,174968	581,503	0,000000	50,9400
Materiais*Regimes	1,486923	2	0,743461	198,773	0,000000	17,4126
Resíduos	0,044883	12	0,003740			0,5256
Total	8,539329	17				100

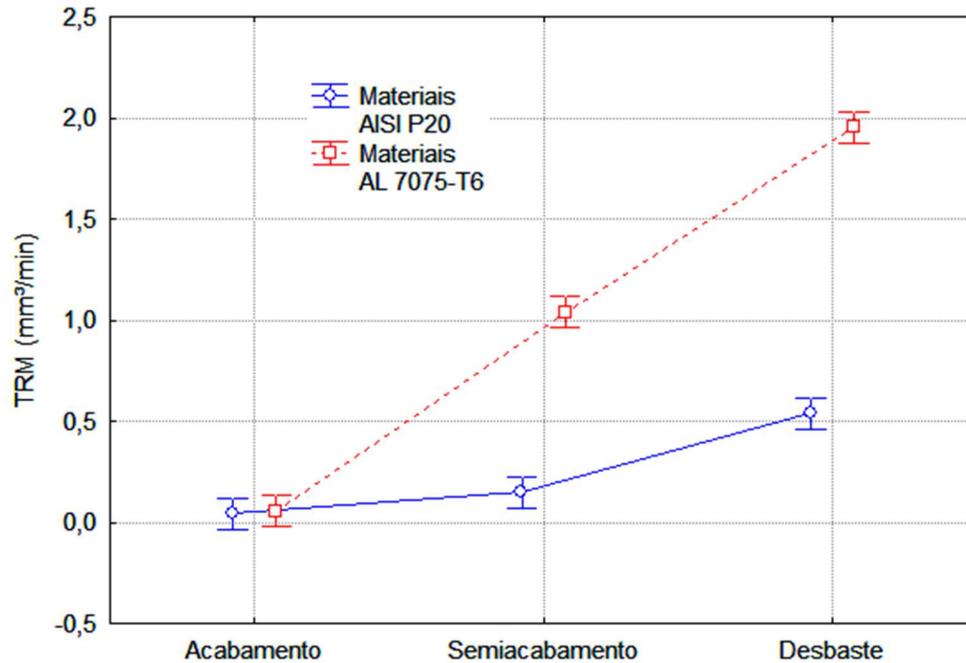
Fonte: AUTOR, 2021

Conforme as análises de variância dos parâmetros dependentes, todos os fatores e suas interações apresentaram efeitos significativos nas variáveis de desempenho, exceto o efeito da interação dos materiais e dos regimes na rugosidade (R_a), que apresentou um nível de significância maior que 5 %, porém marginalmente significativo ($0,05 < p < 0,1$).

De acordo com os resultados da ANOVA, o regime de usinagem é o fator que mais afeta a rugosidade da superfície usinada, com proporção de contribuição percentual (PCR) para R_a e R_z , respectivamente de 95,3060 % e 93,4541%. No caso da TRM, a proporção de contribuição percentual ficou mais distribuída entre as variáveis independentes, resultando em 50,94% correspondente ao regime de usinagem e 31,1217% ao material, sendo que a interação entre as variáveis também apresentou efeito relevante, com contribuição de 17,4126%.

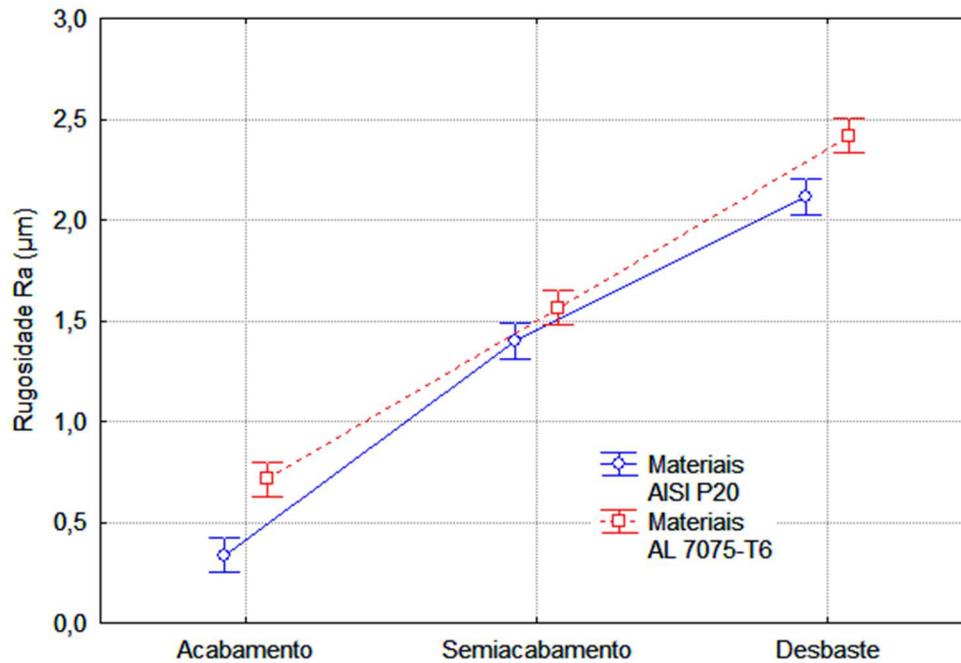
As Figuras 18, 19 e 20 apresentam graficamente o desempenho da TRM, do R_a e do R_z dos materiais analisados, em seus diferentes regimes.

Figura 18 - Desempenho da TRM do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6

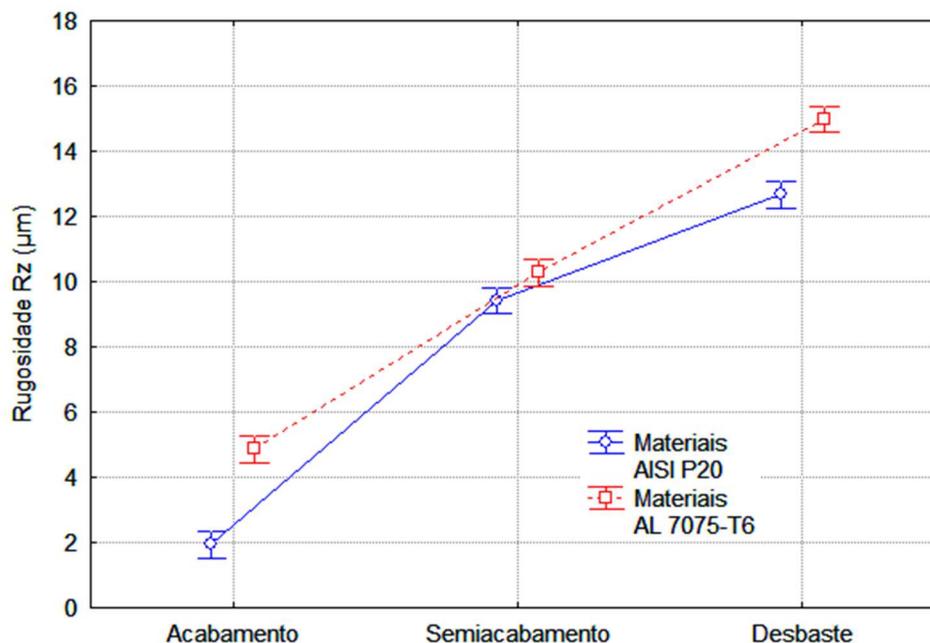


Fonte: AUTOR, 2021

Figura 19 - Desempenho do R_a do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 20 - Desempenho do R_z do aço AISI P20 e da liga Al 7075-T6

Fonte: AUTOR, 2021

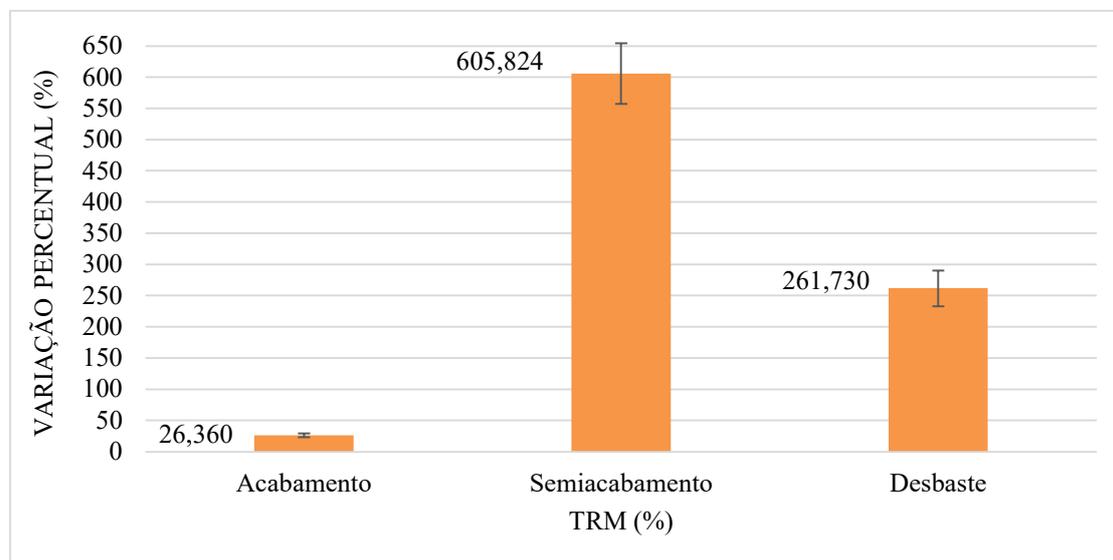
Observa-se no gráfico da TRM da Figura 18, que o aço AISI P20, entre o regime de acabamento e semi-acabamento não apresentou grandes diferenças, somente a partir do regime de desbaste que há um ganho considerável de produtividade. No caso da liga de alumínio, observou-se que a TRM ficou bem distinta entre os três regimes, com um aumento linear do rendimento do processo como as mudanças das configurações de usinagem.

Para as rugosidades dos gráficos das Figuras 19 e 20, observa-se que tanto o R_a quanto o R_z da liga de alumínio, apresentaram diferenças significativas entre os seus valores de rugosidades, devido a mudança dos regimes. Apresentam também um aumento linear com a variação dos regimes. No caso do aço, também houve diferenças significativas entre as rugosidades (R_a e R_z) geradas em cada regime, porém de forma menos linear.

No regime de semi-acabamento, a rugosidade (R_a e R_z) do aço tendeu a um aumento, aproximando-se dos valores de rugosidades do alumínio, já nos outros dois regimes, a rugosidade do aço foi mais refinada, apresentando menores valores de rugosidade que nas amostras de alumínio. Com estas considerações, é possível indicar o regime de semi-acabamento, em relação a rugosidade, como o mais indicado a ser utilizado na liga de alumínio, pois foi o regime que apresentou menores diferenças de valores de

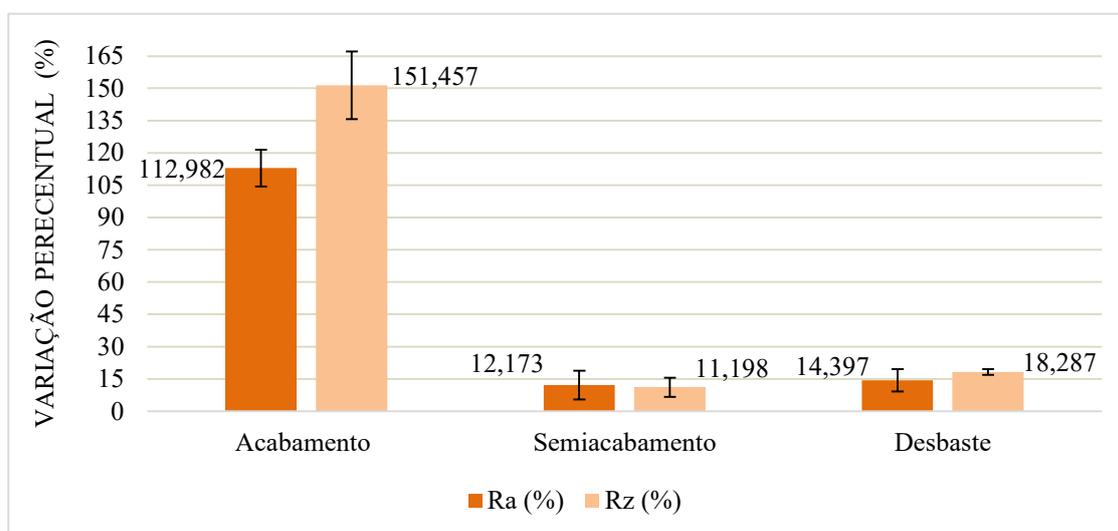
rugosidades em relação ao aço AISI P20. Nas Figuras 21 e 22, é apresentado os aumentos percentuais das variáveis dependentes da liga de alumínio em comparação com as do aço.

Figura 21 – Ganho percentual médio da produtividade da liga Al 7075-T6 em relação ao aço AISI P20



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 22 - Aumento percentual médio da rugosidade da liga Al 7075-T6 em relação ao aço AISI P20



Fonte: AUTOR, 2021

Com os dados percentuais obtidos da produtividade (TRM) entre os materiais, fica evidente que no regime de semi-acabamento, a liga de alumínio apresentou excelentes índices de produtividade em relação ao aço, acima de 600% de ganho na taxa de remoção de material. Para o regime de acabamento, a TRM do alumínio não resultou em grande diferença percentual; porém, em situações de acabamento o tempo de usinagem é elevado, e qualquer aumento na TRM, por mínimo que seja, já propicia várias horas a menos de

usinagem. Em relação as rugosidades, a menor variação ocorreu no regime de semiacabamento, porém com índices percentuais próximos do regime de desbaste.

A TRM no regime de semiacabamento apresentou aumento da variação percentual em comparação com o regime de acabamento e redução da variação percentual em comparação com o regime de desbaste. Demonstrando que no regime de semiacabamento, se obtêm os valores ótimos de rendimento da usinagem, e com menor variação da rugosidade (R_a e R_z) da liga de alumínio em relação aos apresentados pelo aço AISI P20. Na Tabela 5 constam os desvios padrões, obtidos com os valores percentuais da variação dos parâmetros de desempenho dos materiais analisados.

Tabela 5 - Desvio padrão das variáveis de desempenho

Variáveis	Acabamento	Semiacabamento	Desbaste
TRM	3,095 %	48,549 %	28,556 %
R_a	8,538 %	6,662 %	5,191 %
R_z	15,717 %	4,420 %	1,365 %

Fonte: AUTOR, 2021

Não se encontrou pesquisas comparativas entre os resultados de usinagem EDM para estes dois materiais. Porém, Amorim (2002) comenta que na liga de alumínio AMP 8000, utilizando eletrodos-ferramenta de cobre, foi observado taxas de remoção de material superiores àquelas apresentadas pelo aço, tanto na usinagem sob condições de desbaste quanto de acabamento.

4.2 Microscopia óptica

Neste item, a seção transversal das amostras dos materiais em seus distintos regimes, foram analisados através de imagens de microscopia óptica com ampliação de 500 vezes. Para verificação da espessura da camada reformulada, além de possíveis alteração na microestrutura da ZTA.

4.2.1 Camada reformulada do aço AISI P20

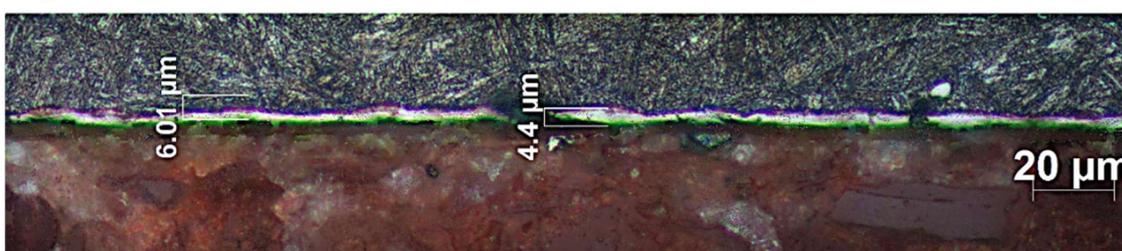
Na Figura 23 constam as micrografias ópticas do aço AISI P20. Nas imagens é possível observar a camada branca gerada pela usinagem EDM. Em comparação como os regimes de semiacabamento e desbaste, o regime de acabamento apresentou uma camada reformulada menos espessa e com espessura mais uniforme, ao longo do comprimento da amostra. Nos regimes de semiacabamento e desbaste, a camada branca

não apresentou uniformidade de espessura, mas é possível visualizar que quantitativamente a camada branca aumenta com a severidade dos regimes de usinagem.

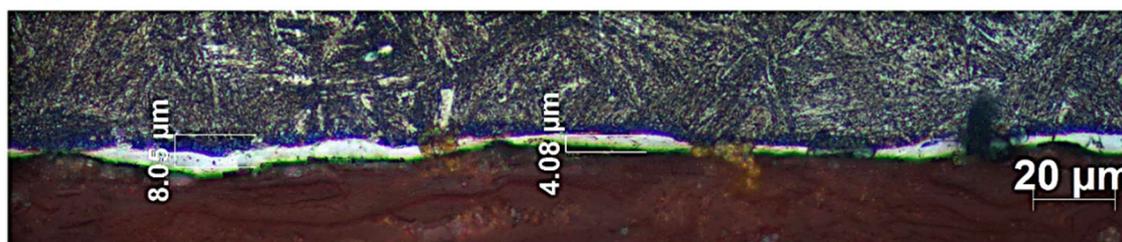
Ablyaz *et al.* (2021) reforça esta constatação ao analisar a influência do aumento da energia de descarga na liga de aço 40CrNi. A mesma constatação foi verificada nas pesquisas Lee e Tai (2003) e Lee *et al.* (2004), nos aços D2, H13 e AISI 1045, nos quais apresentaram aumento e alto desvio da espessura da camada branca, à medida que os níveis de corrente e a duração do pulso aumentaram. LEE *et al.* (2004) na usinagem do aço carbono AISI 1045, revelam que quanto mais espessa a camada branca média, maior é a magnitude e a profundidade de tensão residual induzida e mais profunda é a ZTA. Sendo assim, o regime de acabamento seria benéfico para minimizar estes efeitos.

Figura 23 – Camada reformulada/branca do aço AISI P20 ampliação de 500 vezes

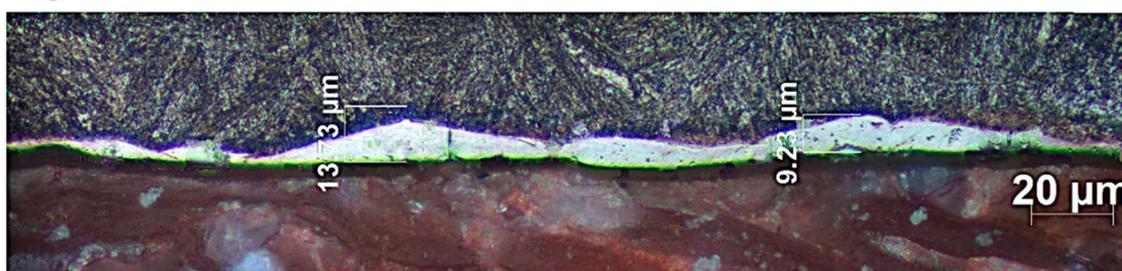
Regime de acabamento



Regime de semiacabamento



Regime de desbaste



Fonte: AUTOR, 2021

Não foi possível identificar na seção transversal das amostras, a zona termicamente afetada, sendo um bom sinal para a integridade subsuperficial do material, pois desta forma, a microestrutura do material não sofreu danos como as altas variações

de temperatura ocorridas durante a usinagem. Segundo Cruz jr (2015) e Amorim (2005, *apud* JUTZLER, 1982 e STEVENS, 1998), a camada da zona termicamente afetada geralmente é extremamente difícil de ser identificada por exames de microscopia.

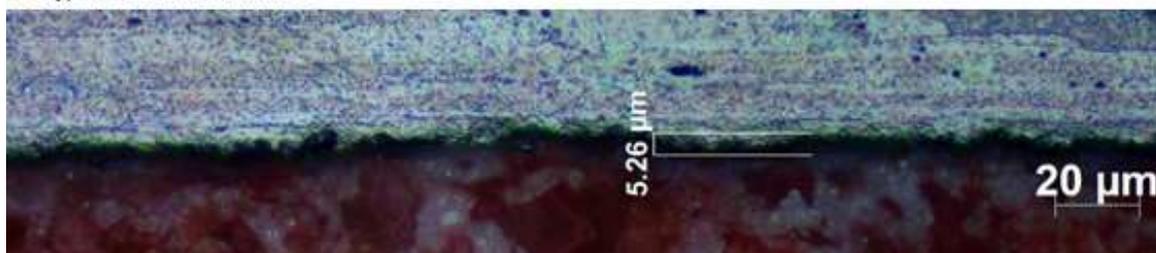
Lee e Li (2003) somente verificaram mudança na microestrutura de uma peça de carboneto de tungstênio (WC), usando níveis de parâmetros elétricos bem superiores aos aplicados nesta pesquisa. Em corrente de pico de 16 A e tempo de pulso 1,6 μ s, não houve diferença significativa na microestrutura. Ao aumentar a corrente de pico para 64 A e o tempo de pulso para 12,8 μ s, verificou-se uma microestrutura afetada, até uma profundidade de cerca de 15 μ m, com microfissuras perpendiculares ou paralelas à superfície usinada.

4.2.2 Camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6

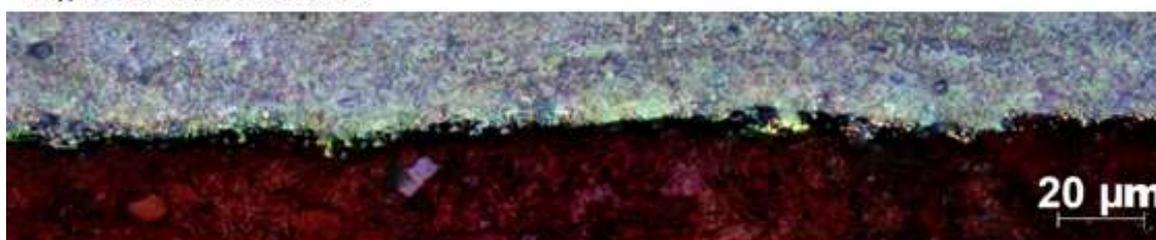
Na Figura 24 estão expostas as micrografias ópticas da seção transversal das amostras da liga de alumínio 7075-T6, usinadas sob os diferentes regimes.

Figura 24 - Camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6 ampliação de 500 vezes

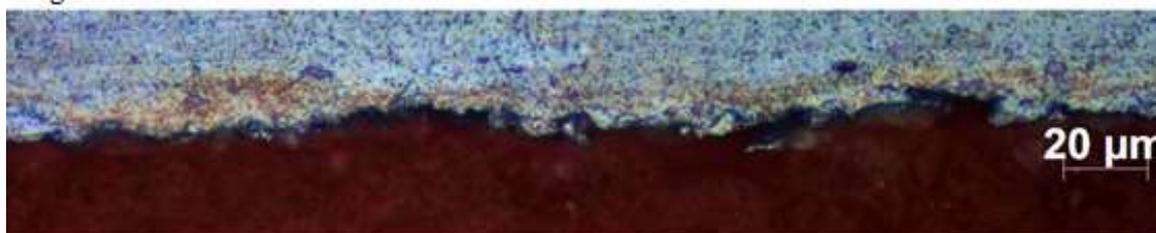
Regime de acabamento



Regime de semiacabamento



Regime de desbaste



Fonte: AUTOR, 2021

Pelas micrografias ópticas da liga de alumínio, é possível observar a presença de uma camada escura na superfície do material. Esta é a camada reformulada/branca para o alumínio, que não apresenta a cor branca característica em materiais ferrosos, como no aço AISI P20, o que dificulta sua percepção e mensuração. Da mesma forma que nas amostras de aço, nas de alumínio não se observou modificações microestruturais na ZTA.

A espessura das camadas reformuladas do aço, apresentaram-se mais espessas que as da liga de alumínio, e visivelmente maiores como o aumento da intensidade dos parâmetros. A pesquisa de Amorim (2002) colabora com esta constatação, ao verificar que, em comparação ao aço AISI P20, a espessura da camada reformulada produzida na liga de alumínio AMP 8000 é bastante inferior.

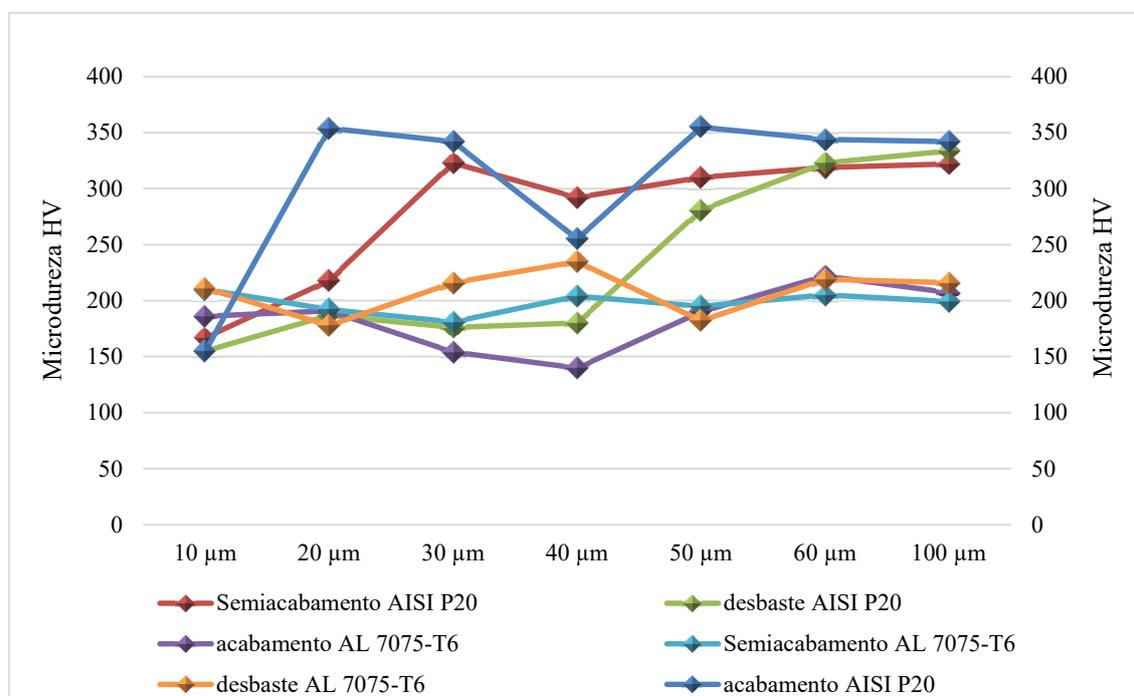
A camada reformulada da amostra de acabamento da liga de alumínio apresentou-se mais uniforme e retilínea que nos outros regimes. Conforme aumentou a severidade dos regimes de usinagem, é possível observar que as superfícies dos materiais demonstraram estar mais deterioradas, o que é confirmado pelo aumento da rugosidade. Em comparação com as amostras do aço AISI P20, o aumento da severidade dos regimes aparentemente não apresentou grandes diferenças na espessura das camadas reformuladas, sendo até possível uma leve redução desta camada. Arooj *et al.* (2014) examinou detalhadamente a morfologia da superfície usinada na liga de alumínio 6061-T6, e verificou que em correntes mais elevadas, acima de 9A, a camada reformulada tende a se desintegrar, reduzindo sua espessura.

Especificamente para moldes de injeção de termoplásticos fabricados com alumínio, obter uma camada reformulada com boas propriedades de resistência, seria extremamente vantajoso para prolongar sua vida útil. Atualmente várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas no melhoramento das superfícies em ligas de alumínio, através da adição de elementos químicos ao fluido dielétrico. A nitretação por descargas elétricas (NDE), pesquisada por Fernandes *et al.* (2020), é uma das técnicas que vem sendo desenvolvidas, com a adição de ureia ao fluido dielétrico. Maideen *et al.* (2021) também buscando a melhoria da camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6, obteve sucesso ao adicionar pó de molibdênio (Mo), níquel (Ni) e tungstênio (W) ao fluido dielétrico. Os pós suspensos formaram uma camada superficial fina, com maior dureza e resistência ao desgaste.

4.3 Microdureza Vickers e zona termicamente afetada

Foram executadas medições da microdureza Vickers a partir de aproximadamente 10 μm da borda usinada. Acima de 50 μm , foram encontrados valores médios de microdureza dentro do esperado para o metal base das amostras. Obteve-se para o aço AISI P20, valores médios de microdurezas, coerentes para este aço que é comercialmente fornecido no estado beneficiado. A liga de alumínio 7075-T6 também apresentou valores médios de dureza procedentes ao material base, aproximadamente 200 HV. Conforme observa-se no gráfico da Figura 25, e mais detalhadamente no Quadro 6 do Apêndice B.

Figura 25 – Comportamento da microdureza Vickers na ZTA



Fonte: AUTOR, 2021

Para estes ensaios não foi possível a medição da microdureza na camada reformulada/branca, devido à baixa espessura gerada nas amostras. Outro fator que dificultou a mensuração, é a distância que deve haver entre o centro da impressão e a borda do corpo de prova, de no mínimo 2,5 ou 3 vezes o comprimento médio das diagonais de impressão, a depender do material ensaiado, segundo a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008. Santos (2007) relata que outra dificuldade desta medição é a de posicionar o penetrador nesta área, pois na maioria das vezes apresenta-se um leve arredondamento da borda, que pode gerar deformações nas impressões, causando imprecisões na leitura.

Apesar da microdureza da camada reformulada não ser medida, há um consenso entre os pesquisadores, que esta região possui elevada dureza. Segundo Amorim (2002), a camada branca nos aços, geralmente apresenta dureza superior ao material base, principalmente devido à interação do carbono liberado pela desintegração do dielétrico, que se difunde nesta camada, formando carboneto de ferro (Fe_3C). Nas ligas de alumínio, a camada reformulada também apresenta dureza superior, devido a incorporação do carbono na camada reformulada. Conforme relatado nas pesquisas de Fernandes *et al.* (2020) com a liga alumínio-silício, de Maideen *et al.* (2021) na liga alumínio 7075, e na de Kuo *et al.* (2017), que verificou dureza de 270 HV na camada reformulada da liga Al 6061, sendo 108 HV a dureza do material base.

Nos ensaios de microdureza no aço AISI P20, é possível notar que o aumento da severidade dos regimes provoca um aumento da ZTA, haja vista que menores valores de microdureza atingiram região mais extensas da borda do material usinado, com o aumento da intensidade dos regimes. Desta forma, para o aço AISI P20, é possível verificar que a ZTA se torna mais profunda com o aumento da espessura da camada reformulada. Verificação coerente com a pesquisa de LEE *et al.* (2004) na usinagem EDM no aço carbono AISI 1045. Diferentemente do aço, a liga de alumínio apresentou para os três regimes durezas médias semelhantes na ZTA, levemente reduzidas em relação a dureza média do material base. A partir de 50 μm , em todas amostras, os valores de microdurezas medidos apresentaram menores variações. Variando aproximadamente entre 310 e 350 HV para o aço, e entre 190 a 230 HV para a liga de alumínio.

Os valores de microdureza para a liga de alumínio resultaram em bons resultados próximos a superfície usinadas, provavelmente a leve mudança na microdureza na ZTA ocorreu devido aos níveis de corrente e o tempo de pulso serem baixos, e também pelo material dissipar mais facilmente o calor. Amorim (2002) aplicando corrente de descarga de 32 A e tempo de descarga de 400 μs , bem superior as usadas nestes ensaios, obteve para liga de alumínio AMP 8000, uma leve redução perceptível na microdureza do material, somente até os 60 μm da borda usinada. Markopoulos *et al.* (2019) também verificou a existência da ZTA na liga Al 5052, devido a diminuição da microdureza nesta região.

Uma das possíveis causas da redução da microdureza na ZTA do aço AISI P20, pode ter sido a descarbonetação ocorrida nesta região. Santos (2007) em seus

experimentos com EDM, colabora com este possível fator, ao verificar uma redução na microdureza Vickers da ZTA, em relação ao metal base do aço AISI H13 beneficiado, na região próxima à camada branca, até uma distância aproximada de 50 μm . A partir de 100 μm , os valores de microdureza tenderam a se igualar ao longo da superfície do substrato.

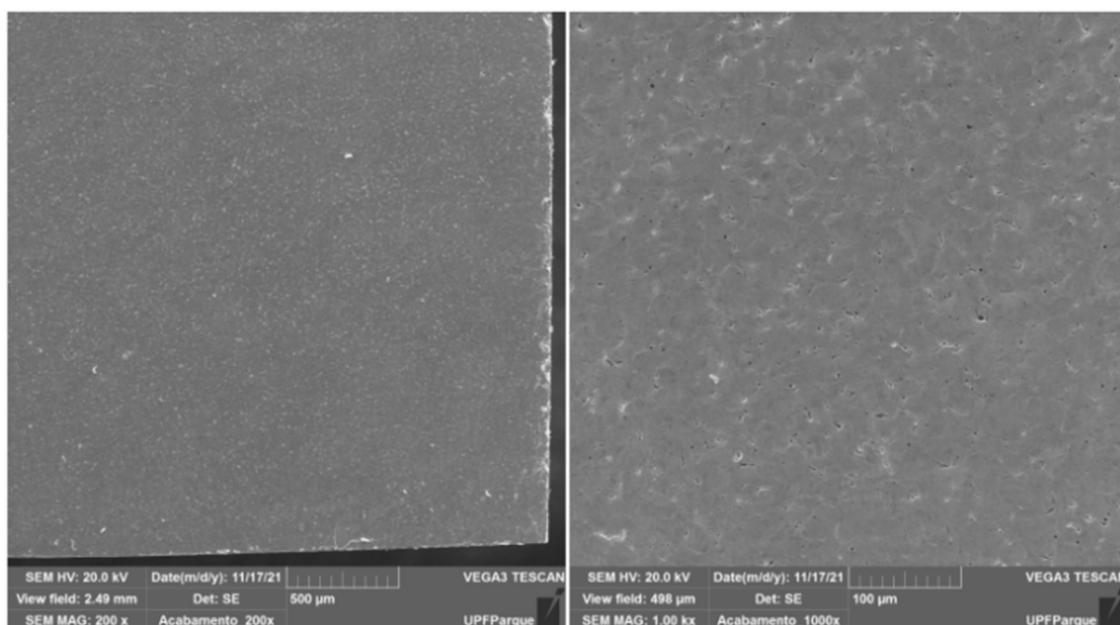
4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nesta seção, as amostras dos materiais em seus distintos regimes, foram analisadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura, para análise da morfologia (textura superficial) e topografia superficial, com a verificação de defeitos na camada reformulada. Foram geradas micrografias com ampliação de 200 e 1000 vezes, sendo que nas imagens com ampliação de 200x foram medidos os diâmetros das crateras. Para verificação de defeitos, como microfissuras e poros/vazios na superfície e na espessura da camada reformulada, utilizou-se micrografias com ampliação de 5000 vezes na vista superior, e 8000 vezes na vista inclinada.

4.4.1 Morfologia superficial do aço AISI P20

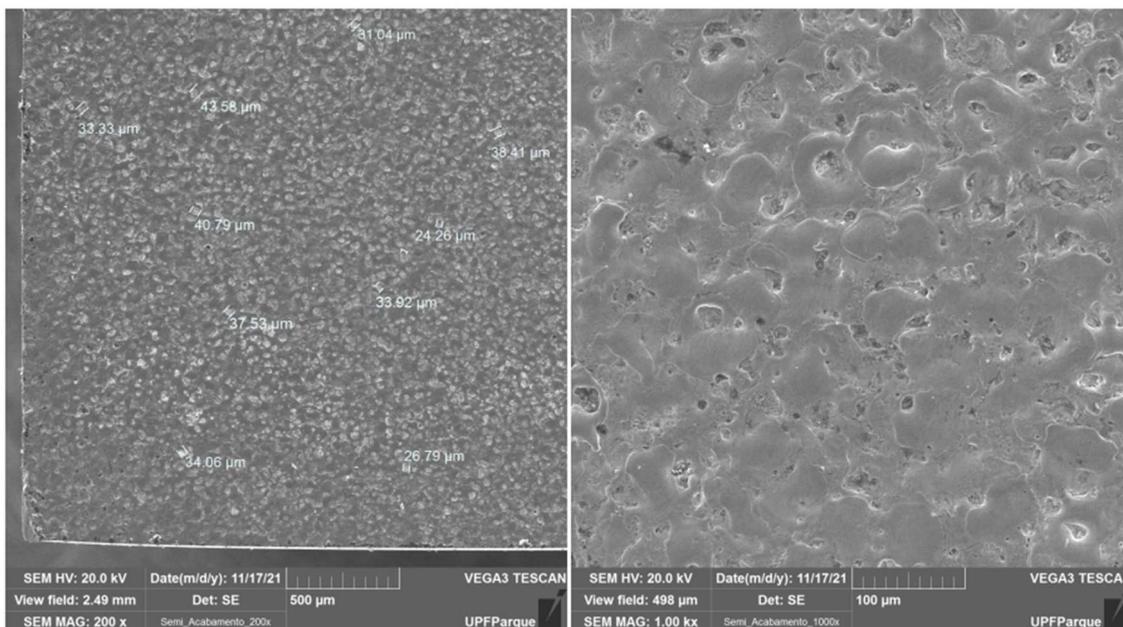
Nas Figuras 26, 27 e 28 constam as imagens das micrografias das amostras de aço AISI P20.

Figura 26 – Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de acabamento



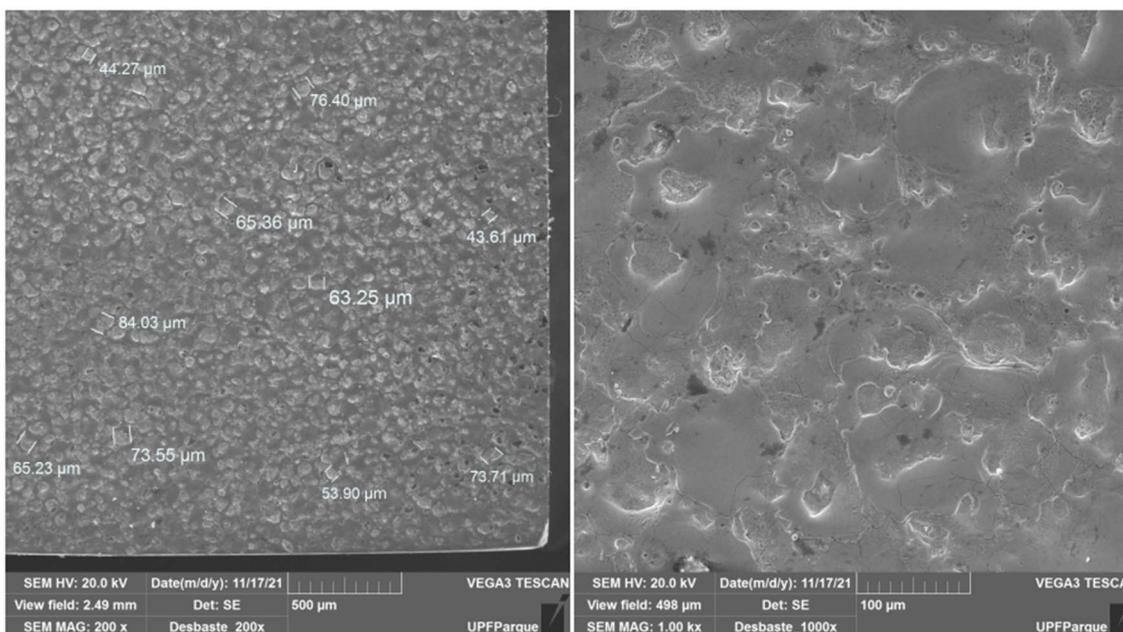
Fonte: AUTOR, 2021

Figura 27 - Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de semiacabamento



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 28- Morfologia superficial do aço AISI P20 em regime de desbaste



Fonte: AUTOR, 2021

Na amostra de acabamento, não foi possível medir os diâmetros das crateras, porém para as amostras do regime de semiacabamento e desbaste, foi possível mensurar os diâmetros das crateras, as quais são características típicas resultantes deste processo de usinagem. De acordo com as medições feitas nas amostragens das crateras, os seus

diâmetros tenderam a um aumento de acordo com o incremento na severidade dos regimes, conforme pode ser constatado na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Dados referentes as crateras geradas na superfície do aço AISI P20

Regime de semiacabamento		Regime de desbaste	
Quantidade	10 crateras	Quantidade	10 crateras
Soma	343.71 μm	Soma	643.32 μm
Valor mínimo	24.26 μm	Valor mínimo	43.61 μm
Valor máximo	43.58 μm	Valor máximo	84.03 μm
Valor médio	34.37 μm	Valor médio	64.33 μm
Desvio padrão	5.70 μm	Desvio padrão	12.85 μm

Fonte: AUTOR, 2021

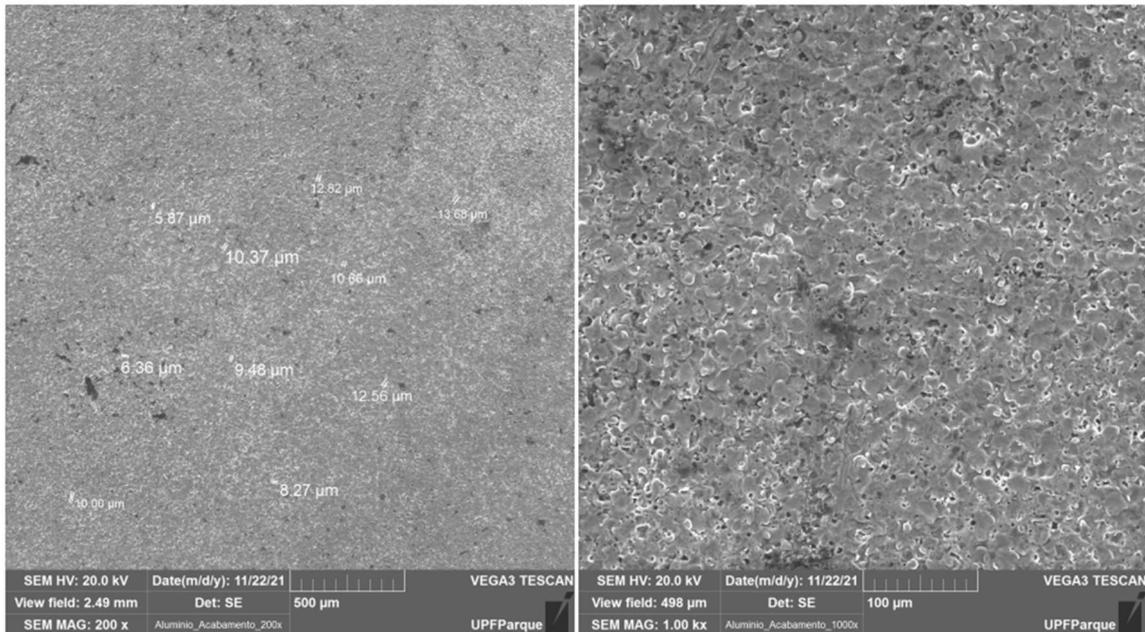
Na amostra do regime de acabamento, não foi medido o diâmetro das crateras, pois elas praticamente não ficaram visível para este regime, isto ocorreu em decorrência da baixa energia empregada. Esta constatação reflete na rugosidade da superfície obtida com este regime, que apresentou valores bem baixos de rugosidade, em consequência provável da extrema redução do diâmetro e profundidade das crateras. Explica Lim *et al.* (1991), que dependendo da energia de descarga, os tamanhos e a profundidade das crateras podem variar.

4.4.2 Morfologia superficial da liga de alumínio 7075-T6

Nas Figuras 29, 30 e 31 constam as micrografias feitas no MEV das amostras da liga de alumínio. Para este material, as amostras de todos os regimes apresentaram crateras, usando a mesma ampliação de imagem. Aparentemente, para a liga de alumínio 7075-T6, as crateras não são bem definidas como nas do aço, e apresentam serem mais irregulares. A formação das crateras na liga de alumínio ocorreu de forma mais esparsa, e não tão próximas como nas amostras do aço em estudo.

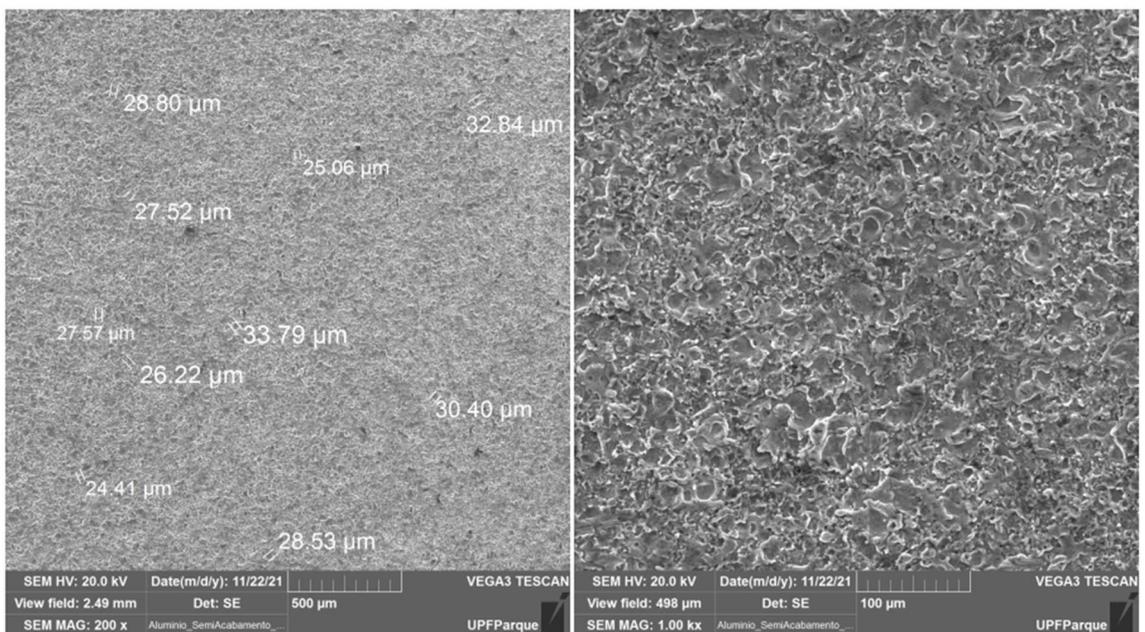
O diâmetro médio das crateras da liga de alumínio foi menor que as do aço, a não ser no regime de acabamento, em que as crateras do aço não ficaram visível, conforme pode-se verificar comparando os dados da Tabela 6 com a Tabela 7 abaixo. Porém a rugosidade superficial do alumínio foi maior, provavelmente isto ocorreu devido a maior quantidade de material ressolidificado, que não foi expulso pelo dielétrico, incorporando-se à camada reformulada do alumínio e gerando maiores valores de rugosidade.

Figura 29 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de acabamento



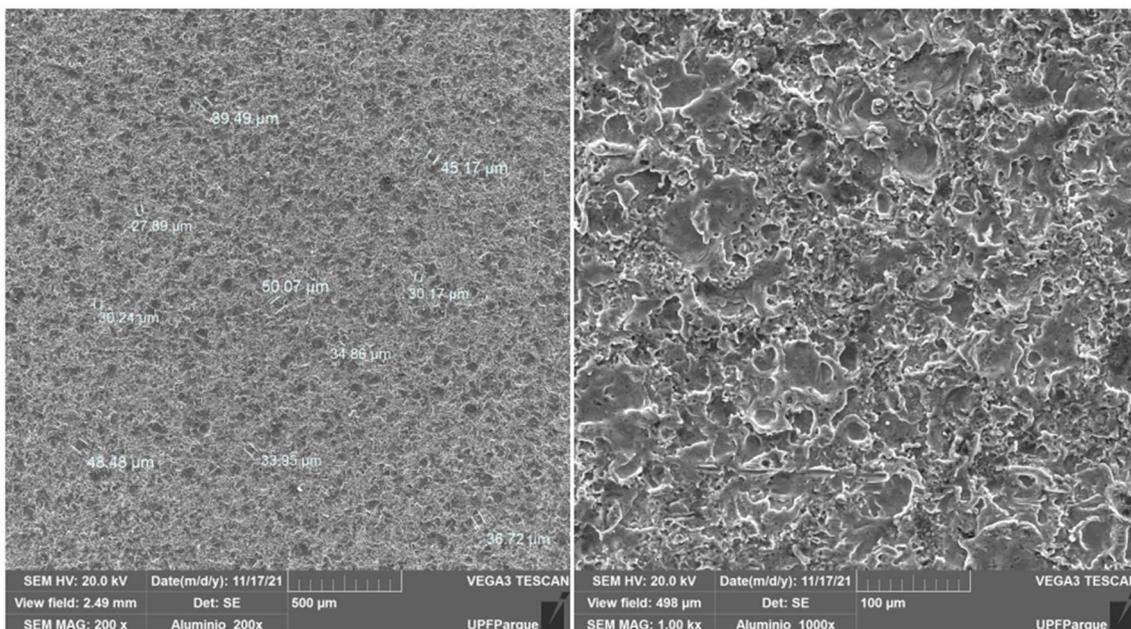
Fonte: AUTOR, 2021

Figura 30 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de semiacabamento



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 31 - Morfologia superficial da liga Al 7075-T6 em regime de desbaste



Fonte: AUTOR, 2021

Tabela 7 - Dados referentes as crateras geradas na superfície da liga Al 7075-T6

Regime de acabamento		Regime de semiacabamento		Regime de desbaste	
Quantidade	10 crateras	Quantidade	10 crateras	Quantidade	10 crateras
Soma	100.08 µm	Soma	285.14 µm	Soma	377.04 µm
Valor mínimo	5.87 µm	Valor mínimo	24.41 µm	Valor mínimo	27.89 µm
Valor máximo	13.68 µm	Valor máximo	33.79 µm	Valor máximo	50.07 µm
Valor médio	10.01 µm	Valor médio	28.51 µm	Valor médio	37.70 µm
Desvio padrão	2.49 µm	Desvio padrão	2.93 µm	Desvio padrão	7.48 µm

Fonte: AUTOR, 2021

Na tabela 7, nota-se que dá mesma forma que para o aço, as crateras tendem a aumentar seu diâmetro médio e conseqüentemente a profundidade, com o aumento da severidade da usinagem. Jahan (2015) corrobora com esta constatação, ao afirmar que tempos de pulso mais altos permitem que o canal de plasma se expanda produzindo crateras relativamente grandes e largas, enquanto o aumento da corrente de pulso está relacionado com o aumento da profundidade das crateras.

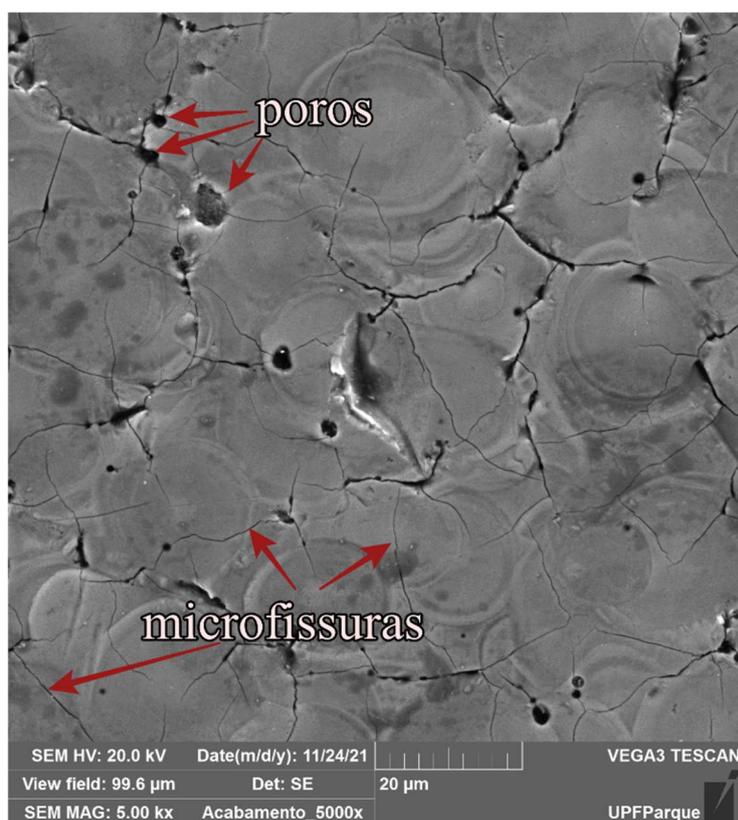
Comparando a rugosidade superficial de um material em diferentes regimes, o aumento do diâmetro e profundidade das crateras pode ser critério para relacionar com o aumento ou a diminuição da rugosidade. Conforme relata Jahan (2015), as características geométricas das crateras formadas na superfície usinada, estão claramente relacionadas à

rugosidade superficial. Porém, comparando dois materiais distintos, tem que haver um cuidado maior nesta relação, haja vista que dependendo do material, a superfície gerada pode ser bem distinta, com diferentes características que influenciam nos valores de rugosidade, como no caso dos materiais desta pesquisa.

4.4.3 Topografia da camada reformulada do aço AISI P20

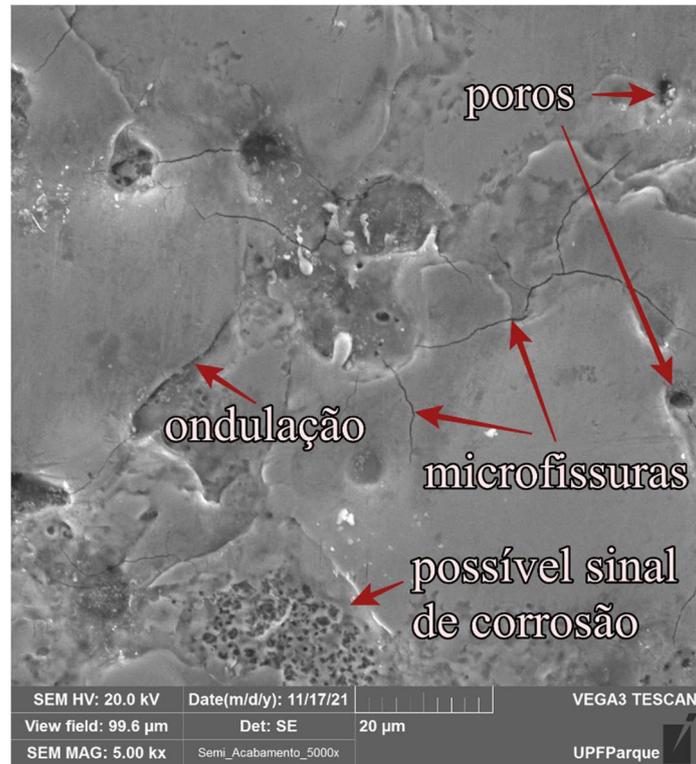
Nas Figuras 32, 33 e 34 são expostas as micrografias de topo das amostras de aço AISI P20. Conforme estas imagens, percebe-se que a topografia superficial das amostras revela uma estrutura que apresenta crateras, manchas, poros e microfissuras em todos os regimes, além de possíveis sinais de corrosão nas amostras de semiacabamento.

Figura 32 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de acabamento no aço AISIP20



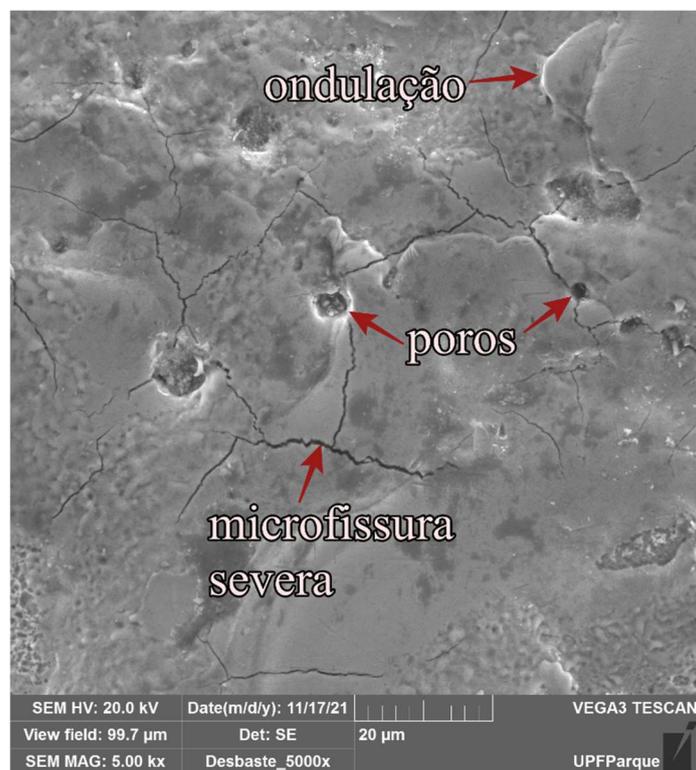
Fonte: AUTOR, 2021

Figura 33 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de semiacabamento no aço AISIP20



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 34 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de desbaste no aço AISIP20



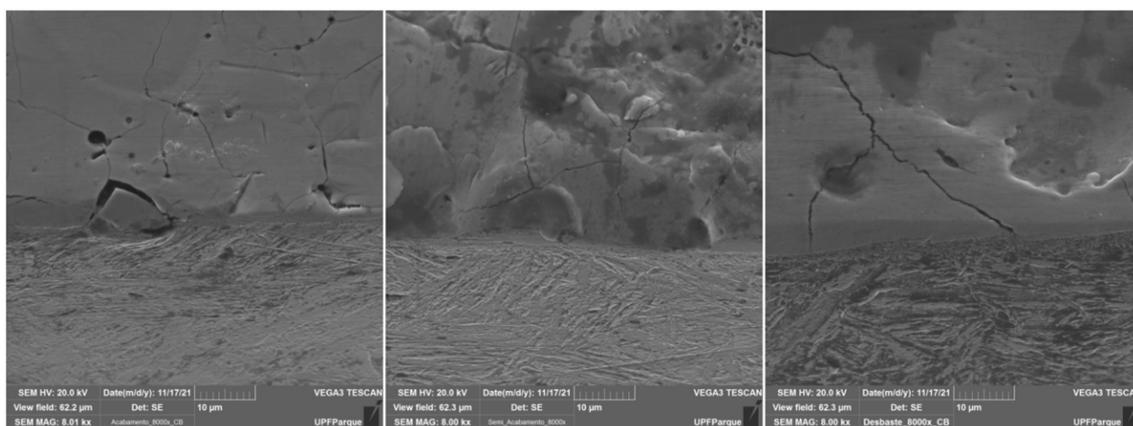
Fonte: AUTOR, 2021

Uma constatação interessante nas micrografias do aço AISI P20 foi a densidade de microfissuras, onde ficou visível que em regimes de acabamento gerou-se maior quantidade por área; porém com microfissuras em geral menos largas que dos regimes mais severos. Constatação coerente com a pesquisa de Lee *et al.* (2004) no aço AISI 1045, que verificou que uma abertura maior das microfissuras está associada com a menor densidade deste defeito. Lee e Tai (2003) colaboram com esta pesquisa ao afirmar que o aumento da energia de pulso não leva automaticamente ao aumento da densidade de microfissuras.

Lee *et al.* (1992) comparou a densidade de microfissuras do ferro puro, do aço 0,15 C e 0,5 C. E verificou que nos materiais com maior teor de carbono, a densidade de microfissuras é maior. Segundo o autor, camadas reformuladas mais duras, com mais carbono, tendem a ser mais sujeitas a microfissuras, durante a rápida têmpera após cada descarga elétrica. Desta forma, pode-se sugerir uma analogia com a camada branca da amostra do regime de acabamento, que apresentou maior densidade de microfissuras. Durante este regime pode ter ocorrido maior inserção de carbono na camada branca, devido a desintegração do dielétrico. Haja vista, que neste regime, o GAP e o T_{off} são bastante reduzidos, favorecendo a maior concentração de carbono na camada reformulada.

A Figura 35 apresenta a vista inclinada da camada reformulada/branca e do metal base, das amostras de aço nos três regimes, acabamento, semiacabamento e desbaste, respectivamente.

Figura 35 - Material base e camada reformulada do aço AISI P20



Fonte: AUTOR, 2021

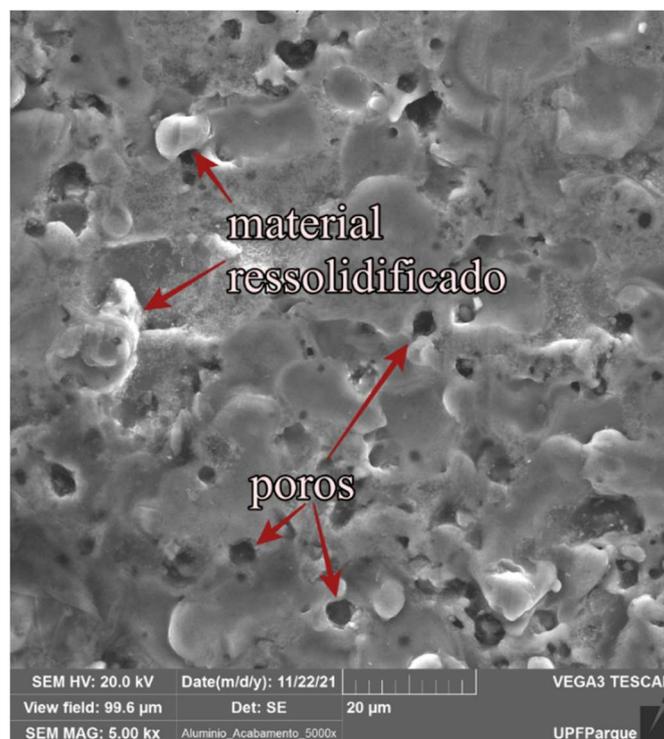
A Figura 35 mostra que as microfissuras estão presente nas amostras de todos os regimes, porém não atingem o metal base, ficando restritas somente a camada branca. As microfissuras em regime de acabamento e semiacabamento, parecem serem mais superficiais à camada branca, já no regime de desbaste, penetram na camada branca até próximas ao substrato. Essa constatação reforça o cuidado que deve haver em relação a integridade superficial do aço, quando se utiliza regimes severos de usinagem, principalmente em relação ao aumento da largura e profundidade das microfissuras.

Segundo Lim *et al.* (1991), está bem estabelecido que as superfícies EDM de aços ferramenta contêm microfissuras abundantes que degradam o desempenho das peças. Portanto, na maioria das aplicações onde forem submetidas a cargas extremas, as camadas superficiais são removidas por um tratamento de pós-processamento. Isso, do ponto de vista da utilização do material, é um grande desperdício, porque a camada reformulada apresenta maior dureza e resistência melhorada a ácidos, se estiver livre de microfissuras.

4.4.4 Topografia da camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6

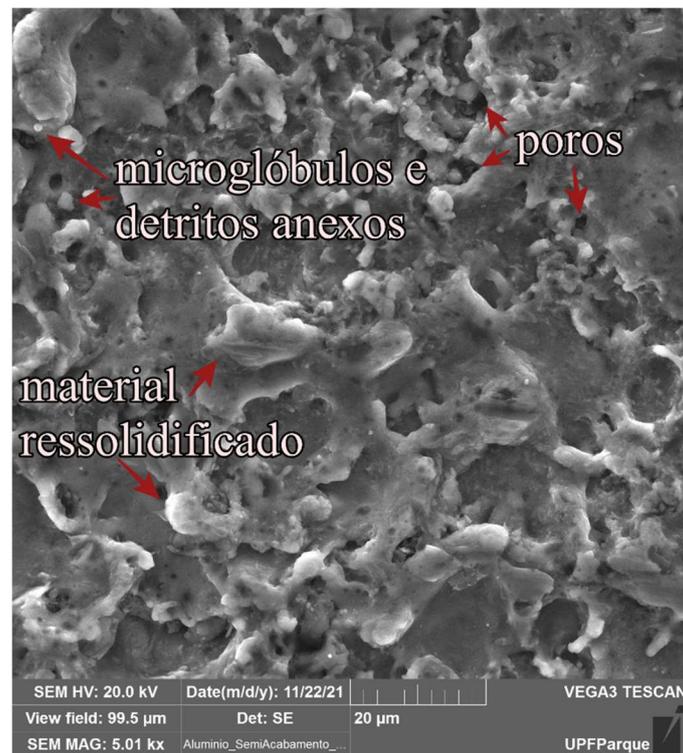
Nas Figuras 36, 37 e 38 constam as micrografias da vista de topo, das amostras da liga de alumínio 7075-T6.

Figura 36 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de acabamento na liga de alumínio 7075-T6



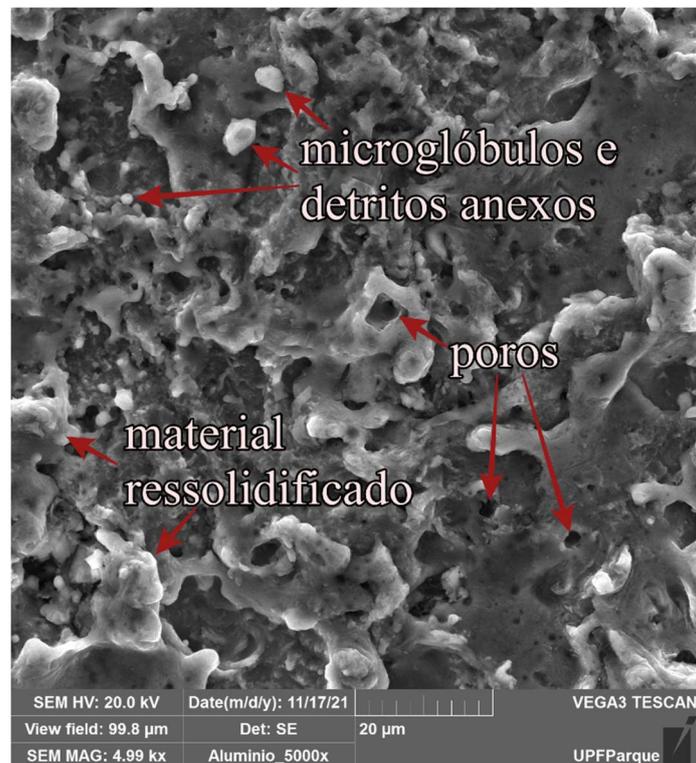
Fonte: AUTOR, 2021

Figura 37 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de semiacabamento na liga de alumínio 7075-T6



Fonte: AUTOR, 2021

Figura 38 - Defeitos superficiais gerados pelo regime de desbaste na liga de alumínio 7075-T6

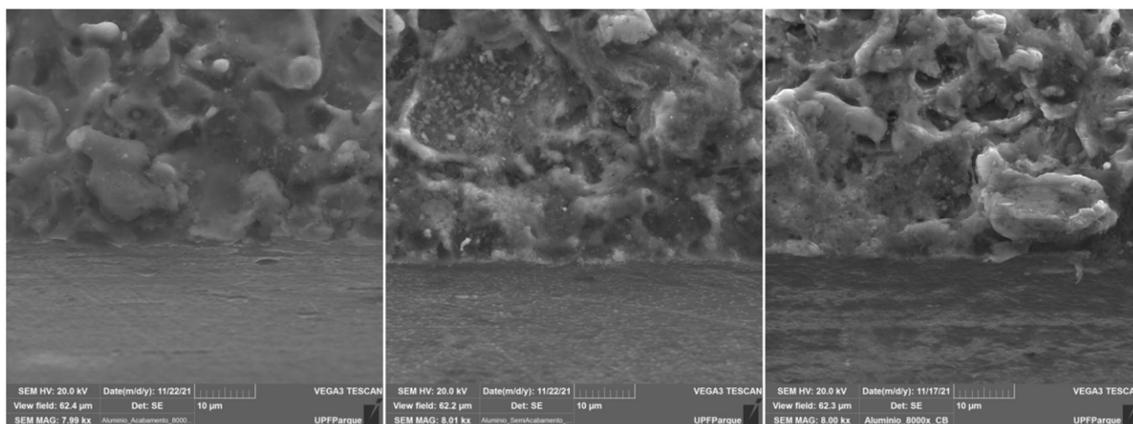


Fonte: AUTOR, 2021

As amostras da liga alumínio apresentaram grande quantidade de poros/vazios na superfície, com microglóbulos de materiais ressolidificados anexos a camada reformulada. Também apresentam uma grande quantidade de material ressolidificado sem forma definida. O aumento destas características, torna-se mais evidente à medida que a intensidade dos regimes aumenta.

É verificado nas micrografias da liga de alumínio, que a superfície no regime de acabamento apresenta maior uniformidade, com defeitos mais uniformemente dispersos, e com materiais ressolidificados com aparência achatada. Com o aumento da intensidade dos regimes, os defeitos ficam mais evidentes, além de dispersos de maneira desigual. Uma característica interessante apresentada na camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6, foi a ausência de microfissuras, que é um bom sinal para a vida útil de uma ferramenta de moldagem. Na Figura 39, tem-se imagens das vistas inclinadas da liga de alumínio, para os regimes de acabamento, semiacabamento e desbaste, respectivamente.

Figura 39 – Material base e camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6



Fonte: AUTOR, 2021

As micrografias da liga de alumínio apresentaram topografias bem distintas das do aço. Porém até mesmo como grande ampliação microscópica, não foi possível detectar microfissuras na superfície e na espessura da camada reformulada. De acordo com Tai, Lu e Chen (2011), em condições de processamento EDM constantes, o grau de microfissuras na superfície varia significativamente de um material para outro. Na Figura 39 é possível confirmar que à medida que aumenta a severidade dos regimes de usinagem, a camada reformulada do alumínio torna-se mais heterogênea na sua espessura.

A ausência de microfissuras na camada reformulada da liga de alumínio 7075-T6, em corrente baixa como as utilizadas nesta pesquisa, estão em conformidade com a

pesquisa de Arooj *et al.* (2014), na liga de alumínio 6061-T6. Nos seus experimentos foi constatado que utilizando valores de corrente de 3A, 4,5A e 6A, não foram detectados microfissuras nos corpos de prova. Nas amostras usinadas com corrente de 9 A, verificou-se o surgimento de microfissuras. Com corrente de 12 A, o mesmo tipo de microfissura é visível, mas apenas em pequenas partes da amostra. Isso por que a corrente alta desintegrou a camada reformulada, reduzindo a espessura da camada reformulada em algumas partes.

Como as características dos materiais em análise são diferentes, é provável que para a liga de alumínio, as tensões térmicas geradas no material pelas altas variações de temperatura, não afetaram tão drasticamente a ponto de causar microfissuras na camada reformulada, pois este material tem maior facilidade de dissipar calor que os aços, ou seja, maior condutividade térmica. Além disso, a camada reformulada da liga de alumínio é diferente do aço, devido a composição química dos materiais serem diferentes, o que pode ser outro fator de influência na formação de microfissuras.

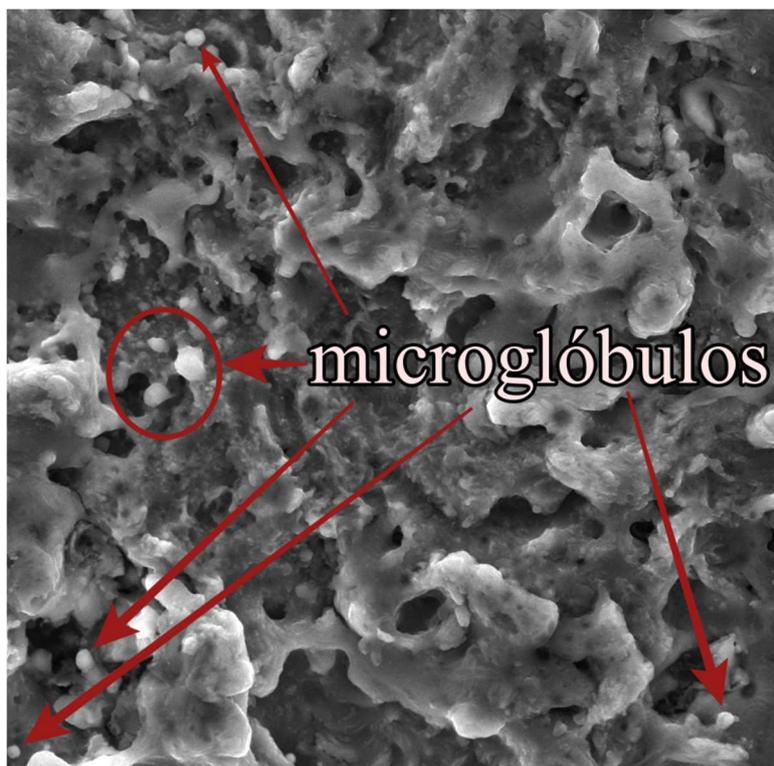
Conforme já mencionado, a diferença de condutividade térmicas entre os materiais, pode ser um fator de suscetibilidade de um material apresentar microfissuras. Observações feitas por alguns pesquisadores reforçam esta constatação. Como nas pesquisas de Lee e Tai (2003) nos aços D2 e H13 e Tai, Lu e Chen (2011) em aços comuns de engenharia. Os resultados apresentados revelam que a suscetibilidade à microfissuras aumenta com a redução da condutividade térmica do material, além de citarem outros fatores, como a quantidade de carbono equivalente.

A ausência de microfissuras na camada reformulada da liga Al 7075-T6, é uma característica que colabora com o desenvolvimento de pesquisas sobre melhorias nas superfícies das ligas de alumínio, através da adição de elementos químicos ao fluido dielétrico. Pois as microfissuras na camada superficial, são as principais preocupações da utilização de componentes usinados pelo processo EDM. Obter um molde fabricado de alumínio 7075-T6 com a camada reformulada melhorada (aumento da dureza e da resistência mecânica), sem microfissuras, e com todas as vantagens já citadas do molde de alumínio em comparação aos de aço, seria muito benéfico para viabilizar ainda mais seu uso e aumentar a vida útil do molde.

É possível notar que as amostras das ligas de alumínio apresentaram alguns microglóbulos de material ressolidificado, sobre a camada reformulada, conforme

apresentado na Figura 40. No aço AISI P20, os microglóbulos praticamente não ficaram perceptíveis, provavelmente devido aos baixos níveis de energia utilizados nos regimes. Lim *et al.* (1991) observou que nos aços ferramentas, os microglóbulos somente são produzidos quando se emprega alta energia de descarga no processo EDM.

Figura 40 - Microglóbulos na superfície da amostra de desbaste da liga de alumínio 7075-T6 ampliação 5000 vezes



Fonte: AUTOR, 2021

Os microglóbulos na superfície da liga de alumínio, tornaram-se mais pronunciados à medida que a intensidade dos regimes de usinagem aumentou. Markopoulos *et al.* (2019) verificou na camada reformulada da liga de alumínio Al5052, que o incremento no tempo de duração de pulso de descarga, é um dos principais fatores no aumento do tamanho dos microglóbulos. Tai, Lu e Chen (2011) relatam que os microglóbulos podem distorcer as medições de rugosidade na superfície do material usinado, e possivelmente aumentar os valores de rugosidade superficial das peças injetadas.

5 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento desta pesquisa, foi possível chegar as seguintes conclusões em relação aos objetivos propostos ao projeto de pesquisa:

- A liga de alumínio 7075-T6 apresentou aumentos consideráveis na taxa de remoção de material, em todos os regimes analisado em relação ao aço AISI P20. O regime de semiacabamento gerou maior produtividade, com ganho superior a 600% na TRM. As rugosidades superficiais (R_a e R_z) do aço, apresentaram menores valores de rugosidade que na liga de alumínio. No regime de semiacabamento, as rugosidades (R_a e R_z) da liga de alumínio, apresentaram maior proximidade com os valores de rugosidade do aço, em comparação com os outros regimes.

- A análise de variância demonstrou que os fatores (regimes e materiais) foram significativos para as variáveis de respostas analisadas (TRM, R_a e R_z). Indicando também significância na interação entre os fatores, exceto entre a interação dos materiais e dos regimes para a rugosidade (R_a); porém esta interação apresentou um nível de significância bem próximo ao estipulado de 5 %.

- Para as rugosidades superficiais (R_a e R_z), a análise de variância demonstrou que o principal fator para a variação destas respostas, foi a mudança no regime de usinagem, apresentando proporção de contribuição percentual (PCR) maior que 92%. Para a TRM, a PCR distribuiu-se entre os fatores e a interação, porém o regime de usinagem apresentou a maior contribuição percentual, com aproximadamente 50%.

- A camada reformulada/branca no aço, apresentou-se mais espessa e menos uniforme com o aumento da severidade dos regimes. Na amostra da liga de alumínio no regime de acabamento, a camada reformulada demonstrou uniformidade na sua espessura. Nos outros regimes esta camada apresentou espessura heterogênea, porém, aparentemente sem aumento de espessura.

- A zona termicamente afetada da liga de alumínio, para as amostras dos três regimes, gerou microdureza média levemente reduzida em relação ao metal base e com extensões da ZTA aproximadas. No aço também ocorreu a redução da microdureza na ZTA, com um leve acréscimo na sua extensão devido ao aumento da severidade dos regimes. A profundidade máxima da ZTA foi de 50 μm .

- O diâmetro das crateras aumentou com o aumento da severidade dos regimes, para os dois materiais. No regime de acabamento, para o aço, praticamente não houve crateras visíveis. Na liga de alumínio, as crateras não ficaram bem definidas e ocorreram de forma mais esparsa que no aço. O diâmetro médio das crateras no alumínio, para os regimes comparados, foi menor.

- No aço AISI P20, a topografia superficial das amostras revelou principalmente crateras, manchas, poros e microfissuras em todos os regimes. O regime de acabamento demonstrou maior densidade de microfissuras. Com o aumento da severidade dos regimes, as microfissuras aumentaram em largura e profundidade, porém ficaram restritas a camada branca. A camada reformulada da liga de alumínio não apresentou microfissuras, porém observou-se grande quantidade de poros/vazios, materiais ressolidificados sem forma definida e microglóbulos.

- A liga de alumínio 7075-T6 apresentou resultados positivos em alguns pontos em relação ao aço AISI P20, principalmente no aumento considerável da produtividade, na baixa redução da microdureza na ZTA e na ausência de microfissuras na camada reformulada. Resultados suficientes foram obtidos, para indicar como viável a utilização do processo EDM na liga de alumínio 7075-T6 para confecção de moldes para termoplásticos. Porém, para esta substituição, há necessidade de serem feitas avaliações e testes práticos criteriosos, específicos para cada caso, relacionados a outros fatores que envolvem o processo de injeção de termoplásticos.

6 SUGESTÕES DE NOVAS PESQUISAS NA ÁREA

Em função do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, do levantamento bibliográfico e das publicações atuais sobre o tema, é possível sugerir como pesquisa futura, a otimização dos parâmetros de usinagem EDM na liga de alumínio 7075-T6 por meio de técnicas estatísticas. Juntamente com a análise da influência das variáveis do processo, em respostas como taxa de remoção de material, taxa de desgaste da ferramenta e rugosidade superficial.

Também seria relevante um estudo da integridade superficial da liga de alumínio 7075-T6, utilizando níveis mais elevados de parâmetros elétricos, como o aumento da corrente elétrica e do tempo de descarga de pulso. Para possibilitar verificar se ocorrerá formação de microfissuras, além de outros defeitos, e principalmente no estudo mais aprofundado da formação de camada reformulada neste material. Haja vista que a camada reformulada na liga de alumínio demonstrou diferenças significativas em relação a formação desta camada no aço AISI P20.

Outra sugestão interessante, seria efetivamente a fabricação de um molde de liga alumínio 7075-T6, em substituição a um molde tradicional de aço AISI P20. Com este experimento, verificar a qualidade superficial das peças injetadas, os possíveis ganhos de produtividade com materiais termoplásticos específicos, os eventuais problemas que na prática a substituição do material pode ocasionar, entre outros fatores. Além do desenvolvimento de análises como elementos finitos.

7 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 4287:2002**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<https://fdocumentos.tips/document/abnt-nbr-iso-4287-2005pdf.html>>. Acesso em: 03 nov. de 2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008**. Materiais metálicos — Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, ago. 2008.

ABLYAZ, T. R. et al. Influence of discharge energy on the properties steel alloy after EDM. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 1409–1412, 2021.

AÇOESPECIAL. **Sobre o aço AISI P20**. 2020. Disponível em: <<https://www.acoespecial.com.br/aco-aisi-p20.php>>. Acesso em: 03 nov. de 2020.

ALCOVER Jr., Paulo Roberto Campos. **Metrologia mecânica**. 2017. 57 slides. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/paulorjunior/2017-02/pg0022-em31b-metrologia-mecanica-eng.-mecanica-qui/Aula%2007%20-%20Metrologia%20Mecanica.pdf/view>>. Acesso em: 03 nov. de 2020.

ALMEIDA, G.; SOUZA, W. **Moldes e matrizes: características, desenvolvimento e funcionalidades para transformação de plásticos**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2015. 136p.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. 175 f. Tese de Doutorado em Engenharia - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 166, p. 411-416, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604010945>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

ARANTES, L. J. **Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. 2001, 86 f. Dissertação de Mestrado em engenharia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

ARIETA, F. G.; MARCHINA, P. M.; DIHLMANN, C.; GONÇALVES, M.; Aplicação de ligas de alumínio em moldes para injeção de termoplásticos. **Revista Ferramental**, Joinville, ed. 82, p. 13-25, mar/abr 2019.

AROOJ, S. *et al.* Effect of Current in the EDM Machining of Aluminum 6061 T6 and its Effect on the Surface Morphology. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 5, p. 4187–4199, 26 mar. 2014.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Machining**. 9^a ed., v.16, 1989, 1089 p.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 10^a ed., v. 2. 1990. 3470p.

ASSIS, J. P.; SOUSA, R. P., DIAS, C.T.S. **Glossário de estatística**. Mossoró: EdUFERSA, 2019. 483 p.

BANK, David; KLAFHEN, Dave; SMIERCIAK, Ron. Why Plastic Flows Better in Aluminum Injection Molds. **Plastics Business**, 2012.

BHATTACHARYYA, B.; GANGOPADHYAY, S.; SARKAR, B. R., Modelling and analysis of EDMed job surface integrity. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189(1-3), pp. 169–177, 2007.

BARBOSA, F.; CURY, A. **Apostila do Curso de Laboratório de Resistência dos Materiais da Faculdade de Engenharia da UFJF**. Disponível em: <https://www.ufjf.br/lrm/files/2010/03/apostilalrm_2019_1.pdf>.

BENEDICT, Gary F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: CRC Press, 1987. 402 p.

BORMANN, R. Getting those better EDM'd surfaces. **Modern Machine Shop**, v. 63, n. 9, p. 56-66, 1991

BRYCE, Douglas. Why Offer Aluminum Molds for Production. **Moldmaking Technology**, abril de 2002.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 590p.

CAMPOS, Geraldo Maia. **Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos**. 2020. Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_cap04.html>. Acesso em: 03 fev. de 2021.

CAMPOS, J. A. D. **Avaliação experimental do desgaste de campo durante o processo de eletroerosão do AISI H13**. 2014. 101 p. Dissertação Mestrado em Engenharia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CHAKRABORTY, S.; Dey V.; GHOSH, S.K. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. **Precision Engineering**, v. 40, p. 1 – 6, 2015.

ISSN 0141-6359. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.11.003>.

CRUZ jr, E. J. **A influência do tamanho de grão ferrítico na integridade superficial de peças erodidas**. 2015. 51f. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

CTBORRACHA. **Sobre materiais utilizados para a construção de molde**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/materiais-utilizados-na-construcao-de-moldes/>. Acesso em: 27 de mar. 2021.

DABADE, U.A.; JOSHI, S.S.; BALASUBRAMANIAM, R.; BHANUPRASAD, V.V. Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiCp composites. **Journal of Materials Processing Technology**, 192-193:166-174. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.044>

DEWANGAN, SHAILESH KUMAR. Multi-objective optimisation and analysis of EDM of AISI P20 tool steel - thesis. Nitrkl.ac.in, ago. 2014. Disponível em: <https://1library.net/document/q503vmgz-multi-objective-optimisation-analysis-edm-aisi-tool-steel.html>. Acesso em: 26 nov. 2021.

DEWANGAN, S.; GANGOPADHYAY, S.; BISWAS, C. K. Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis. **Measurement**, v. 63, p. 364-376, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114005867>. Acesso em: 12 dez 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.025>.

DIBITONTO, D. D. *et al.* Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion mode. **Journal of Applied Physics**, Texas, v. 66, n. 9, p. 4095-4103, nov. 1989. <http://dx.doi.org/10.1063/1.343994>

DICKENS, P. M.; ARTHUR, A.; COBB, R. C. Using Rapid Prototyping to Produce Electrical Discharge Machining Electrodes. **Rapid Prototyping Journal**, v. 02, n 1, p. 4-12, 1996.

EL-HOFY, Abdel-Gawad Hassan. **Advanced Machining Processes: Nontraditional and hybrid machining processes**. Nova York: The McGraw-Hill Companies, 2005. 286p.

EKMEKCI, B.; ELKOCA, O.; ERDEN, A. A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining, **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 36(1), pp. 117–124, 2005. doi:10.1007/s11663-005-0011-6

EKMEKCI, B. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). **Applied Surface Science**, v. 253, n. 23, p. 9234–9240, set. 2007.

EKMEKCI, B. White layer composition, heat treatment, and crack formation in electric discharge machining process”, **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 40, n.1, pp. 70-81, 2009.

FAVORIT. **Favorit Aços Especiais**. Site da Favorit Aços Especiais, 2020. Disponível em: <<https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-para-ferramentas/aco-aisi-p20>>. Acesso em: 2 nov. de 2020.

FULLER, J. E. **Electrical Discharge Machining**. ASM Machining Handbook, v.16, p. 557–564, 1996.

GRAND VIEW RESEARCH INC. **Injection molded plastic market analysis and segment forecasts to 2025**. USA, 2018.

GRAND VIEW RESEARCH INC. **Injection Molded Plastics Market Size, Share & Trends Report Injection Molded Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Polypropylene, ABS, HDPE, Polystyrene), By Application (Packaging, Automotive & Transportation, Medical), By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028**. p. 140, 2021.

GATTO, A., BASSOLI, E., & IULIANO, L. Performance Optimization in Machining of Aluminium Alloys for Moulds Production: HSM and EDM. **Aluminium Alloys, Theory and Applications**. Torino, 2011.

GOUDA, D. *et al.* Recently evaluated Electrical Discharge Machining (EDM) process performances: A research perspective, **Materials Today: Proceedings**, 2021. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.180>.

GONTARSKI, Thiago de Lima. **Análise da definição de dureza Vickers pela teoria da propagação de incertezas**. 2021, 122 f. Dissertação Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, 2021.

GUITRAU, E.B. **The EDM Handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1997, 306 p.

GUPTA, K.; GUPTA M.K. Developments in non conventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review. **Proceed. Institut. Mechan. Eng., Part C: J. Mechan. Eng. Sci.**, 233 (12), p. 4213-4232, 2019.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM), **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p.1287-1300, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503001627> Acesso em 17 dez. 2020.

HOSEINY, H. et al., The Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of a Pre-hardened Mold Steel, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 46, n. 5, p. 2157–2171, 18 fev. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2789-4>

INFOMET. **Sobre classificação dos aços.** Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=13>>. Acesso em: 03 jan. de 2021.

JAHAN, M.P. Electrical Discharge Machining (EDM) Types, Technologies and applications, **Nova Science Publishers**, New York, 2015.

JAIN, Vijay. K. **Advanced Machining Processes**. New Delhi: Allied Publisher Private Limited, 2002. 369 p.

JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, vol. 30, p. 2050-2055, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005>

JOSHI, A. Y., JOSHI, A. Y. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining. **Heliyon**, v. 5, n. 12, Dez. 2019.

KARA, F. Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel. **Materiali in tehnologije**, v. 52, n. 2, p. 195–200, 25 mar. 2018.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - 3: abtragen und generieren**. Berlin: Springer, 1997. 269 p.

KLOCKE, F. The process sequence in tool and diemaking, **Proc. of the Int. Symposium for Electromachining**, v. 1.p. 65-97, Germany, mai. 1998.

KUO, C. G. *et al.* Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 11, nov. 2017.

KUNIEDA, M. *et al.* Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. **CIRP Annals**, v. 54, p. 64-87, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600201>>. Acesso em: 07 dez. 2020. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Review. **J. Mater. Process. Technol.** v.209, p.3675–3687, 2009. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>.

KUMAR, Suresh S.; VAROL, T.; CANAKCI, A.; Kumaran, S. T.; M. UTHAYAKUMAR, M. A review on the performance of the materials by surface modification through EDM, **International Journal of Lightweight Materials and**

Manufacture, v.4, Issue1, p.127-144, 2021. ISSN 2588-8404.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.08.002>.

LEÃO, F.N.; Pashby, I.R. A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining, **Journal of Materials Processing Technology**. V. 149, Issues 1–3, p. 341-346, 2004. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.043>.

LEE, L.C.; LIM, L.C.; WONG, Y.S, F; FONG, H.S. Crack susceptibility of electro-discharge machined surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 29 (1-3), p. 213–221, 1992. doi: 10.1016 / 0924-0136 (92) 90436-v

LEE, L.C.; LIM, L.C.; WONG, Y.S.; Lu, H.H. Towards a better understanding of the surface features of electro-discharge machined tool steels, **J. Mater. Process. Technol.** v. 24, pp. 513–523, 1990.

LEE, H. T.; TAI, T. Y.; HSU. Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper–tungsten electrode. **Materials Science and Engineering: A**. V.364, p. 346-356, 2004. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509303007548>>. Acesso em 27 fev de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.046>.

LEE, H. T.; TAI, T. Y. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 142, p. 676-683, 2003. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603006885>> Acesso em 15 dez. 2020. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00688-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00688-5).

LEE, S. H.; LI, X. Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**, Singapura, 2003. v. 139, p. 315-321, 2003. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603005478>>. Acesso em: 15 dez. 2020. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00547-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00547-8).

LIM, L. C., LEE, L. C., WONG, Y. S., & LU, H. H. (1991). Solidification microstructure of electrodischarge machined surfaces of tool steels. **Materials Science and Technology**, v. 7 (3), pp. 239–248, 1991. doi:10.1179/mst.1991.7.3.239

LIMA, Renato M. de; **Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração**. 2008. 105 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

MACHADO, Álisson Rocha et.al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015. 408 p.

MAIDEEN, A. H.; DURAISELVAM, M.; VARATHARAJULU, M. Surface modification of aluminium 7075 by electrical discharge alloying and influence of surface roughness using RSM. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 1440–1449, 2021.

MARKOPOULOS, A. P. et al. An Experimental Investigation of Machining Aluminum Alloy Al5052 with EDM. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 787–794, 2019.

MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICO. **Sobre Parâmetros de avaliação da rugosidade - acabamento superficial.** Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>>. Acesso em 18 fev. 2021.

McGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**, 1st ed.; Chapman and Hall: USA, 1988. ISBN: 0-412-31970-5.

METALTHAGA. **Sobre ligas de alumínio.** Disponível em: <<https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>>. Acesso em: 03 de jan. de 2021.

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

OLIVEIRA, Guilherme Ruivo Gordalina de. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn.** 2012. 75 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

OLIVEIRA, J.M. **Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes.** 2006. 110 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

PARK, C.; SIM, A.; AHN, S.; KANG, H; CHUN, E.; Influence of laser surface engineering of AISI P20-improved mold steel on wear and corrosion behaviors. **Surface and Coatings Technology**. V. 377, 2019. ISSN 0257-8972. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.006>.

PAULINUS, Chinaenye Eze *et al.* Positioning Control of Electrical Discharge Machining Device for Improved Transient Response Performance. **Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing**, v. 6, n. 3, p. 29-34, 2017. doi: 10.11648/j.cssp.20170603.11

PINEDO, C. E. Danos superficiais causados em aços-ferramenta pelo processo de eletroerosão. **Revista Ferramental**, Joinville, ed. 82, p. 35-40, mar/abr 2016.

PINEDO, Carlos Eduardo. Nitretação por plasma para endurecimento superficial de aços ferramenta. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, p. 122-133, jul 2004.

RASHID, O; LOW, K.W.Q; PITTMAN, J.F.T. Mold cooling in thermoplastics injection molding: Effectiveness and energy efficiency, **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121375>.

RAZAK, M.A.; ABDUL-RANI, A.M.; NANIMINA; A.M. Improving EDM efficiency with silicon carbide powder-mixed dielectric fluid. **Int. J. Mater., Mechan. Manufact.**, 3 (1), p. 40-43, 2015.

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. 1ª. ed. Curitiba: Intersaberes, 2016. 292 p.

FERNANDES, L.S.R *et al.* Nitretação por descargas elétricas de liga Alumínio-silício. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v.12, p.71-90, 2020.

SANTOS, Irapuan. **Análise dos Parâmetros de Entrada na Eletroerosão de Penetração da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**. 2010. 130f. Dissertação de 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**. 2007. 132f. Dissertação Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica – Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

REVPART. **Plastic Injection Molds: Steel Vs. Aluminum**. 2018. Disponível em: <<https://revpart.com/steel-vs-aluminum-injection-molds/>>. Acesso em: 28 mar. 2021.

SELVARAJAN, L.; RAJAVEL, R.; VENKATARAMANAN, K.; ELANGO, T.; DHINAGARAN, M. An experimental investigations and optimization of performance measures in EDM using copper and graphite electrodes. **Materials Today: Proceedings**. 2020. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.816>.

SELVARAJAN, L. et al. Effect of EDM parameters on material removal rate, tool wear rate and geometrical errors of aluminium material. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 9392–9396, 2021.

SHIOU, F.J.; CHENG, C.H.; Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 201, Issues 1–3, p. 554-559, 2008. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.235>.

SILVA, N. H. **Usinagem de Furos de Pequenos Diâmetros na Liga de Titânio Ti6Al4V em Máquina de Eletroerosão por Penetração**. 2006. 110f. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.

SINGH, A. K.; SINGHAL, D.; KUMAR, R. Machining of aluminum 7075 alloy using EDM process: An ANN validation. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 2839–2844, 2020.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: E. Blucher, 1982.

STORR, M.; SPETH, J.; REHBEIN, W.; SCHULZE, H.; A new additive and application system for wire-EDM. **Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining**, 2016.

TAI, T.-Y.; LU, S. J.; CHEN, Y. H. Surface crack susceptibility of electrodischarge-machined steel surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 57, n. 9-12, p. 983–989, 5 maio 2011.

VERMA, Vijay; SAHU, Rohit. Process parameter optimization of die-sinking EDM on Titanium grade – V alloy (Ti6Al4V) using full factorial design approach. **Materials today: Proceedings**, v. 4, p.1893–1899, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.034>

VIEIRA, E. P.; MACIEL, E. R.; RIBAS, M. A relevância da gestão de custos e sua efetividade no sistema de informações contábil gerencial. **ConTexto**, Porto Alegre, v. 9, n. 16, 2009.

VIEIRA, L. F. **Influência de parâmetros de processamento e geometria em propriedades mecânicas de peças de PS, PC e PLA moldadas por injeção**. 2012. 167f. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

WHITEHOUSE, D.J. 2000. Surfaces and their measurement. London, **Hermes Penton Science**, 395 p.

WURZEL, C. A. **Estudo para a fabricação de eletrodos por metalurgia do pó e desenvolvimento de parâmetros de eletroerosão com ligas de cobre-nióbio**. 2015. 109f. Dissertação Mestrado em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ZEID Abu O.A. On the effect of electrodischarge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 68, Issue 1, p. 27-32, 1997. ISSN 0924-0136. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02523-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02523-X).

ZIRONI, Claudia. Competitive Advantages of Aluminum Molds for Injection Molding Applications: Process Simulation Used to Evaluate Cycle Times, **Flowfront Magazine**, abril de 2005.

8 APÊNDICE

8.1 Apêndice - A

Quadro 5 - Tempos de erosão dos materiais em h,min,s

Tempo de erosão AISI P20 (h:min:s)			
Regimes	Acabamento	Semi-acabamento	Desbaste
Ensaio 1	14:51:31	04:17:15	01:15:12
Ensaio 2	15:11:31	04:27:25	01:10:20
Ensaio 3	14:49:01	04:33:21	01:12:15
Médias	14:57:21	04:26:00	01:12:36
Tempos de erosão Al 7075-T6 (h:min:s)			
Regimes	Acabamento	Semi-acabamento	Desbaste
Ensaio 1	11:56:50	00:37:59	00:20:43
Ensaio 2	11:44:41	00:39:24	00:21:09
Ensaio 3	11:49:10	00:35:53	00:18:33
Médias	11:50:14	00:37:45	00:20:08

Fonte: AUTOR, 2021

8.2 Apêndice - B

Quadro 6 - Valores da microdureza Vickers

Distância da borda usinada	Microdureza aço AISI P20 (HV)			Microdureza alumínio 7075-T6 (HV)		
	acabamento	Semi-acabamento	desbaste	acabamento	Semi-acabamento	desbaste
10 µm	155	167	155	186	210	211
20 µm	354	218	187	191	192	178
30 µm	342	323	176	154	181	216
40 µm	255	292	180	140	204	235
50 µm	355	310	281	190	195	182
60 µm	344	319	303	222	205	219
100 µm	342	322	334	207	199	216
150 µm	328	311	317	218	217	214
Centro da seção transversal da amostra	338	339	326	223	210	231

Fonte: AUTOR, 2021



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br