

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO
ELETROQUÍMICA POR CORRENTE PULSADA: ESTABELECIMENTO DE
JANELA OPERACIONAL PARA OS AÇOS SAE 1020, V800 E INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CRISTIANO DE AZEVEDO CELENTE

RIO GRANDE

2026

CRISTIANO DE AZEVEDO CELENTE

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO
ELETROQUÍMICA POR CORRENTE PULSADA: ESTABELECIMENTO DE
JANELA OPERACIONAL PARA OS AÇOS SAE 1020, V800 E INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof.^a Dra. Henara Lillian Costa Murray

RIO GRANDE

2026

C392i	<p>Celente, Cristiano de Azevedo</p> <p>Investigação experimental dos parâmetros de texturização eletroquímica por corrente pulsada: estabelecimento de janela operacional para os aços SAE 1020, V800 e inoxidável martensítico / Cristiano de Azevedo Celente. – 2026. 112 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2026.</p> <p>Orientadora: Dra. Henara Lillian Costa Murray</p> <p>1. Engenharia Mecânica 2. Usinagem eletroquímica 3. Texturização eletroquímica. 4. Corrente pulsada. I. Murray, Henara Lillian Costa. II. Título.</p> <p>CDU 621</p>
-------	---

Catlogação na fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **3/2026** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e seis dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quinze horas, no prédio da Engenharia Mecânica, a que se submeteu o discente **Cristiano de Azevedo Celente**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Simulação e controle de Processos de Usinagem, com o seguinte título: **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO ELETROQUÍMICA POR CORRENTE PULSADA: ESTABELECIMENTO DE JANELA OPERACIONAL PARA OS AÇOS SAE 1020, V800 E INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Henara Lillian Costa Murray, Fabio Augusto Dornelles do Amaral, Thais Andrezza dos Passos e o convidado Rodrigo Jorge Macedo sob a presidência da Professora Henara Lillian Costa Murray. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Henara Lillian Costa Murray: Aprovado
2. Fabio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
3. Thais Andrezza dos Passos: Aprovado
4. Rodrigo Jorge Macedo: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

- | | |
|--|---|
| 1. _____
CPF: 847.359.106-20 |  <div style="font-size: small;">Documento assinado digitalmente
HENARA LILLIAN COSTA MURRAY
Data: 27/02/2026 08:20:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br</div> |
| 2. _____
CPF: 905.700.220-53 |  <div style="font-size: small;">Documento assinado digitalmente
FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 27/02/2026 12:15:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br</div> |
| 3. _____
CPF: 033.780.659-40 |  <div style="font-size: small;">Documento assinado digitalmente
THAIS ANDREZZA DOS PASSOS
Data: 27/02/2026 12:50:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br</div> |
| 4. _____
CPF: 805.181.920-91 |  <div style="font-size: small;">Documento assinado digitalmente
RODRIGO JORGE MACEDO
Data: 27/02/2026 10:08:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br</div> |
|  <div style="font-size: small;">Documento assinado digitalmente
CRISTIANO DE AZEVEDO CELENTE
Data: 02/03/2026 15:08:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br</div> | |

Cristiano de Azevedo Celente: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Giane Silva da Silva, pelo amor, pela paciência e pela força diária que me sustentaram nos momentos mais desafiadores desta caminhada. Seu apoio, sua presença e sua confiança foram essenciais para que eu seguisse em frente, mesmo quando o cansaço e as dúvidas apareciam.

Dedico também ao meu filho, Gustavo Celente da Silva, que, com sua existência e seu sorriso, deu sentido aos meus esforços e renovou minhas energias. Que esta conquista seja, acima de tudo, um testemunho do meu amor por vocês e do desejo de construir um futuro com mais oportunidades, aprendizado e esperança.

A vocês dois, minha gratidão, meu orgulho e minha eterna dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), por oferecer o ambiente institucional, a infraestrutura e as condições necessárias para o desenvolvimento desta dissertação, reafirmando seu compromisso com a formação acadêmica e com a produção de conhecimento científico. Ao Oceantec/FURG registro meu reconhecimento pelo suporte técnico e operacional, essencial para a execução das etapas experimentais, em particular a Samuel Vinicius Bonato.

Expresso minha sincera gratidão ao Rodrigo (IFRS), pela colaboração e disponibilidade, que contribuíram de forma significativa para o andamento das atividades e para o aprofundamento de discussões relevantes ao tema pesquisado.

À minha orientadora, Prof.^a Henara Lillian Murray, dedico um agradecimento especial pela condução responsável e atenta da orientação, pela confiança depositada e pelas contribuições criteriosas ao longo de todo o percurso. Suas observações, incentivo e rigor acadêmico foram fundamentais para a consolidação desta pesquisa e para meu crescimento como pesquisador.

Agradeço, ainda, aos colegas de trabalho técnicos Jorge Badin, Thais Andrezza Passos e Bruno Laner, pela parceria cotidiana, pela prontidão em auxiliar nas demandas do laboratório e pelo apoio em momentos decisivos, que tornaram o processo mais viável e produtivo.

Registro também meu agradecimento a Enrique Chaves Peres, pelo apoio e pelas contribuições que fortaleceram diferentes etapas do trabalho.

Por fim, agradeço ao CEME-SUL/FURG pela disponibilização de recursos e pelo apoio institucional, que contribuíram para a qualidade das atividades desenvolvidas, e ao CT-Trib pelo apoio e pela confiança depositada, fundamentais para a realização e o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos, meu reconhecimento e gratidão por terem, direta ou indiretamente, colaborado para a realização desta dissertação.

RESUMO

A texturização eletroquímica por usinagem eletroquímica tem se consolidado como alternativa para geração de microtexturas e modificação funcional de superfícies metálicas, com potencial aplicação em tribologia, adesão, retenção de lubrificante e controle de resposta superficial. Nesse contexto, o uso de corrente pulsada permite modular o regime eletroquímico na interface eletrodo–eletrólito, favorecendo maior estabilidade do processo e melhor controle da remoção de material quando comparado à aplicação contínua de corrente, especialmente em condições com mascaramento e áreas seletivas de ataque. Esta dissertação teve como objetivo definir parâmetros de texturização eletroquímica por corrente pulsada e propor uma janela operacional para os aços SAE 1020, V800 e inoxidável martensítico. O estudo foi conduzido por meio de ensaios experimentais variando combinações de tempo de pulso (t_p) e repouso (t_b), frequência e ciclo de trabalho (duty cycle), bem como níveis de corrente (pico e base), mantendo o foco na resposta geométrica e topográfica das superfícies texturizadas. A caracterização dos resultados incluiu avaliação morfológica e metrológica por interferometria, com análise de parâmetros de topografia 3D (S_q , S_v e S_z) conforme a ISO 25178-2, além de observações sobre integridade da máscara e fidelidade dimensional das regiões texturizadas. Os resultados evidenciaram condições estáveis capazes de produzir texturas homogêneas e reproduzíveis, com redução do tempo de processo para a faixa de 10–15 s, além da definição de faixas operacionais específicas para cada material, refletindo o compromisso entre remoção, acabamento e controle dimensional. A janela operacional proposta contribui como referência prática para aplicação e ajuste da texturização eletroquímica em aços com diferentes respostas eletroquímicas, apoiando a padronização do processo e estudos futuros.

Palavras-chave: usinagem eletroquímica; texturização eletroquímica; corrente pulsada.

ABSTRACT

Electrochemical texturing based on electrochemical machining has emerged as a promising approach for producing micro-textures and functional surface modifications, with potential applications in tribology, adhesion, lubricant retention, and surface response control. In this context, pulsed current electrochemical machining enables modulation of the electrochemical regime at the electrode–electrolyte interface, improving process stability and enhancing material removal control when compared with direct current operation, particularly under masking conditions and selective dissolution. This dissertation aimed to define pulsed electrochemical texturing parameters and to propose an operational window for SAE 1020 carbon steel, V800 tool steel, and martensitic stainless steel. An experimental campaign was conducted by varying on-pulse (t_p) and off-pulse (t_b) times, frequency and duty cycle, as well as peak and base current levels, focusing on the geometric and topographic responses of the textured surfaces. Surface characterization included interferometry-based morphology and metrology, with 3D surface topography parameters (S_q , S_v and S_z) assessed according to ISO 25178-2, along with observations regarding mask integrity and dimensional fidelity of the textured regions. The results demonstrated stable processing conditions capable of generating homogeneous and reproducible textures, while reducing processing time to 10–15 s, and allowed the identification of material-specific operating ranges reflecting trade-offs among material removal, surface finish, and dimensional control. The proposed operational window provides a practical guideline for electrochemical texturing adjustment and application in steels exhibiting different electrochemical behaviors, supporting process standardization and future investigations.

Keywords: electrochemical machining; pulsed electrochemical texturing; pulsed current

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas do mascaramento com resina foto resistente	9
Figura 2 - Esquema representativo do mecanismo básico de funcionamento da usinagem eletroquímica (ECM).	15
Figura 3 - Esquema usinagem eletroquímica	19
Figura 4 - Eficiência do fluxo de eletrólito	30
Figura 5-Representação esquemática da estrutura da dupla camada elétrica formada na interface eletrodo–eletrólito.	33
Figura 6-Perfil de potencial elétrico através da região da dupla camada elétrica na interface eletrodo–eletrólito.	34
Figura 7 - Sistema de texturização, Equipamento de Texturização (1), Controle do GAP (2), Célula Eletroquímica (3), Software para aquisição de dados (4).....	40
Figura 8 - Câmara de Texturização - (a) projeto da câmara - (b) Projeto concebido	41
Figura 9 - Oscilograma $I(A) \times t(ms)$ para MIG/MAG pulsado.....	43
Figura 10 - Parâmetros de corrente pulsada.....	44
Figura 11 - Projeto das máscaras	45
Figura 12 - Máscara cortada no Laser	45
Figura 13 - Corrente Normal (a), Corrente Pulsada (b)	50
Figura 14-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (A-D)	53
Figura 15-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (E-H)	54
Figura 16-Oscilograma corpo de prova E.....	55
Figura 17-Média de corrente Grupo de 100 pulso E	55
Figura 18 - Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (R-S-T).....	58
Figura 19-Oscilograma corpo de prova S.....	59
Figura 20-Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova S	59
Figura 21-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo AF3	61
Figura 22-Oscilograma corpo de prova AF3.....	62
Figura 23-Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova AF3.....	62

Figura 24-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo AIM2.1	64
Figura 25-Oscilograma corpo de prova AIM2.1	65
Figura 26-Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova AIM2.1	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aço inoxidável Martensítico - composição química	39
Tabela 2 - Composição química dos aços ferramenta (em peso, wt%)	39
Tabela 3 - Parâmetros elétricos	42
Tabela 4 - Parâmetros adotados e classificação das amostras.....	48
Tabela 5-Parâmetros para ensaio inicial	50
Tabela 6- Parâmetros de ensaio Aço SAE 1020.....	51
Tabela 7-Parâmetros topográficos (Sq, Sv e Sz) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova A–H.	57
Tabela 8 - Parâmetros topográficos (Sq, Sv e Sz) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova R-S-T	60
Tabela 9-Parâmetros de ensaio	61
Tabela 10-Parâmetros topográficos (Sq, Sv e Sz) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova AF1, AF2, AF3 e AF3.1.....	63
Tabela 11-Parâmetros de ensaio	64
Tabela 12-Parâmetros topográficos (Sq, Sv e Sz) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova AIM1, AIM2, AIM2.1 e AIM3.....	66
Tabela 13-Janela operacional proposta.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ECM	Electrochemical Machining
HAZ	Heat Affected Zones
I_b	Corrente de base
I_p	Corrente de pico
LST	Laser Surface Texturing
MECT	Maskless Electrochemical Texturing
MIG/MAG	Metal Inerte Gas - Metal Active Gas
MRR	Material Removal Rate
PCM	Photochemical Machining
PECM	Pulsed Electrochemical Machining
S_q	Altura quadrática média das asperidades da superfície
S_v	Profundidade máxima de vales da superfície
S_z	Altura máxima total das asperidades da superfície
t_b	Tempo de base
t_p	Tempo de pulso
EDL	<i>Electric Double Layer</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

µm	micrometro
ms	milisegundo
Cr	Cromo
V	Vanádio
Mn	Manganês
Si	Silício
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
Nb	Nióbio
W	Tungstênio
C	Carbono
Fe	Ferro
Sn	Estanho
B	Boro
Ca	Cálcio
Se	Selênio
N	Nitrogênio
P	Fosforo
S	Enxofre

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	4
1.1 Objetivos	7
1.2 Objetivos Específicos	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 Técnicas de Texturização de superfícies	8
2.1.1 Texturização Fotoquímica (PCT)	8
2.1.2 Texturização Eletroquímica	11
2.1.4 Comparação entre Técnicas	13
2.2 Usinagem Eletroquímica (ECM)	14
2.3 Usinagem eletroquímica com corrente pulsada	17
2.3.1 Texturização eletroquímica	19
2.3.2 Parâmetros de texturização eletroquímica	21
2.3.3 Influência dos Parâmetros Elétricos na Morfologia da Textura	26
2.4 Texturização de superfícies aplicadas à melhoria do desempenho tribológico	27
2.5 Eletrólito	28
2.6 Máscaras para texturização	30
2.7 A dupla camada elétrica e sua influência na texturização eletroquímica	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Procedimento experimental	35
3.2 Materiais	38
3.3 Equipamentos e sistemas operacionais	40
3.4 Parâmetros de corrente pulsada	42
3.5 Caracterização das superfícies	44
3.6 Produção das máscaras	44

3.7 Tratamento e organização dos dados experimentais em regime de corrente pulsada	45
3.8 Parâmetros de ensaio e identificação das amostras.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Ensaios de parametrização.....	49
4.2 AÇO SAE 1020	51
4.2.1 Definição de Parâmetros para ensaios	51
4.2.2 Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo nas peças A–H.	52
4.2.3 Análise dos dados adquiridos de tempo e corrente	54
4.2.4 Caracterização topográfica por interferometria: Sq, Sv, Sz e profundidade máxima dos bolsos	56
4.3 Avaliação de Reprodutibilidade na condição E	57
4.3.1 imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo nas peças r,s,t.	58
4.3.2 Análise dos dados adquiridos de tempo e corrente.	58
4.3.3 Caracterização topográfica por interferometria: Sq, Sv, Sz e profundidade máxima dos bolsos	60
4.4 AÇO FERRAMENTA.....	61
4.4.1 Parâmetros de ensaio	61
4.4.2 Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo nas peças AF1, AF3.....	61
4.4.3 Análise dos dados adquiridos de tempo e corrente	62
4.4.4 Caracterização topográfica por interferometria: Sq, Sv, Sz e profundidade máxima dos bolsos	63
4.5 Aço inoxidável martensítico	63
4.5.1 Parâmetros de ensaio	63

4.5.2 Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo nas PEÇAS AIM2.1	64
4.5.3 Análise dos dados adquiridos de tempo e corrente	65
4.5.4 Caracterização topográfica por interferometria: Sq, Sv, Sz e profundidade máxima dos bolsos	66
4.6 Discussão geral e proposição da janela operacional	66
5. CONCLUSÕES	69
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
7. REFERÊNCIAS.....	71
7.1 Referências por extrato	78
7.2 Referências por Qualis.....	78
7.3 Referências por data dos Artigos	79
APÊNDICE A	80
APÊNDICE B	94
APÊNDICE C	97

1. INTRODUÇÃO

A tribologia é a ciência dedicada ao estudo das interações entre superfícies em movimento relativo, englobando fenômenos como atrito, desgaste e lubrificação. Esse campo é fundamental para compreender o comportamento dos materiais em contato e possui ampla aplicação em setores como a engenharia mecânica, a manufatura e os biomateriais (Steven R. Schmid, 2023). O atrito, elemento central da tribologia, corresponde à resistência ao movimento entre superfícies, influenciado por fatores como rugosidade, propriedades dos materiais e presença de lubrificantes. O desgaste, por sua vez, caracteriza-se pela remoção progressiva de material em razão de ações mecânicas, químicas ou térmicas, manifestando-se de diferentes formas, como abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga superficial (Dohda *et al.*, 2015). Já a lubrificação desempenha papel essencial na redução do atrito e na preservação da vida útil de sistemas mecânicos (Gwidon Stachowiak; Andrew W Batchelor, 2005).

A relevância da tribologia é evidenciada em contextos industriais estratégicos. O setor automobilístico, por exemplo, responde por 20% do consumo de energia global e por 18% das emissões de gases de efeito estufa. Grande parte dessa energia é dissipada no esforço de superar as forças de atrito dos conjuntos mecânicos. Nesse cenário, a texturização superficial surge como alternativa promissora para melhorar o desempenho de contatos mecânicos, reduzindo o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, as perdas energéticas (Dias *et al.*, 2022; Holmberg *et al.*, 2017). A compreensão detalhada dos fenômenos de superfície, portanto, é estratégica para aumentar a durabilidade dos componentes, otimizar processos industriais e contribuir para a sustentabilidade. Pesquisas recentes avançam no uso de revestimentos tribológicos, nanomateriais e modelagem computacional, evidenciando o papel central da tribologia na inovação tecnológica (Yin *et al.*, 2024).

Entre as técnicas desenvolvidas para esse fim, a texturização de superfícies metálicas tem ganhado destaque por otimizar propriedades tribológicas, como a redução do atrito, o aumento da resistência ao desgaste e a retenção de lubrificantes (Rodrigues, 2020). Essa modificação controlada da topografia superficial, resultando na formação de microcavidades, é conhecida como microtextura de superfície. Os benefícios vão além do âmbito tribológico, incluindo o controle da adesão entre superfícies, a criação de superfícies super-hidrofóbicas, o aumento da absorção de

luz, a redução do arrasto aerodinâmico e a otimização de propriedades mecânicas (Parreira; Gallo; Costa, 2012).

Nas últimas décadas, a microtexturização tem sido amplamente estudada. Em condições de deslizamento a seco, ela atua como reservatório para detritos de desgaste, reduzindo atrito e degradação entre superfícies (Zum Gahr; Mathieu; Brylka, 2007). Em condições lubrificadas, além de aprisionar detritos, as cavidades funcionam como micro reservatórios de lubrificante, aumentando a pressão hidrodinâmica local e a capacidade de carga do componente (Costa; Hutchings, 2015) (Bruzzzone *et al.*, 2008; Sathish, 2019). Resultados experimentais demonstram ganhos expressivos: aumento de até 10% na capacidade de carga em regime hidrodinâmico (Rosenkranz *et al.*, 2019) e reduções de atrito de até 34,5% em ferramentas de corte, 82% em anéis de pistão, 65% em vedações e 18% em mancais de deslizamento (Kunar *et al.*, 2020; Vishnoi; Kumar; Murtaza, 2021b)

Apesar do potencial, muitas técnicas de texturização ainda enfrentam desafios em escala industrial. A texturização a laser, por exemplo, embora eficaz na criação de cavidades regulares, demanda alto consumo de energia, equipamentos caros e manutenção sofisticada. Além disso, gera zonas afetadas pelo calor e superfícies ásperas, exigindo etapas adicionais de usinagem para remoção de protuberâncias, o que encarece e prolonga o processo (kumar *et al.*, 2020).

A busca por processos capazes de atender a requisitos de precisão, qualidade superficial e produtividade tem impulsionado o desenvolvimento de métodos não convencionais de usinagem (Vishnoi; Kumar; Murtaza, 2021a). Entre eles, destaca-se a usinagem eletroquímica (*ECM, Electrochemical Machining*), baseada na dissolução anódica controlada do material, sem contato mecânico direto entre peça e ferramenta de texturização (Patel; Jain; Ramkumar, 2018). Essa característica elimina problemas comuns da usinagem convencional, como desgaste de ferramenta, tensões residuais e dificuldades no corte de materiais de elevada dureza. Contudo, a ECM tradicional, realizada com corrente contínua, apresenta limitações quanto ao controle dimensional e à ocorrência de dissolução parasita, comprometendo a fidelidade geométrica.

Nesse contexto, surge a usinagem eletroquímica com corrente pulsada (*PECM, Pulsed Electrochemical Machining*), que se configura como evolução da ECM convencional (Chen; Han; Wang, 2018a). Ao aplicar energia em pulsos intercalados por intervalos de repouso, a PECM favorece a renovação do eletrólito no espaço intereletrodos, melhora a dissipação de calor e facilita a evacuação de subprodutos (Meichsner *et al.*, 2016). Assim, proporciona maior precisão geométrica, melhor

acabamento superficial e redução do sobre corte (*overcut*), consolidando-se como técnica promissora em aplicações de alta precisão (Painuly; Singh; Trehan, 2023).

O uso da corrente pulsada (PECM) representa um avanço técnico relevante, pois permite a renovação periódica do eletrólito, reduz o aquecimento localizado e melhora a uniformidade da dissolução anódica favorecendo qualidade superficial superior e precisão dimensional (Chen; Han; Wang, 2018a).

Entretanto, apesar desses benefícios relatados em diversas ligas especiais, observa-se uma carência de estudos que comparem sistematicamente o efeito da corrente pulsada e a determinação de parâmetros de texturização eletroquímica que sirva de orientação em diferentes classes de aços, em especial o aço carbono, o aço ferramenta e o aço inoxidável martensítico. Essas ligas, pela sua composição química e microestrutura, apresentam comportamentos eletroquímicos distintos. O aço carbono, com menor teor de elementos de liga e condutividade relativamente elevada, tende a apresentar dissolução mais rápida e menos controlada; o aço ferramenta, com elevado teor de carbono e elementos de liga (Cr, Mo, V, W), tende a formar camadas passivas estáveis que dificultam a remoção eletroquímica uniforme; o aço inox martensítico, com alta resistência à corrosão e elevado teor de cromo, exibe resistência à dissolução anódica e forte formação de filmes passivos (Wali *et al.*, 2023). Em função disso, investigar como os parâmetros de corrente pulsada influenciam a taxa de remoção e a morfologia superficial nessas diferentes ligas é fundamental para a otimização do processo de texturização eletroquímica e ampliação das suas aplicações industriais (Petermann *et al.*, 2025).

Além do aspecto tecnológico, este estudo contribui para preencher uma lacuna científica existente, decorrente da escassez de pesquisas que realizem análises comparativas entre diferentes classes de aços, quando submetidos à usinagem eletroquímica em regime de corrente pulsada.

Tal abordagem comparativa permitirá compreender o papel combinado da composição química, da microestrutura e dos parâmetros elétricos (tempo de pulso, corrente de pico, frequência, razão de trabalho) na qualidade da superfície final, oferecendo subsídios para futuras aplicações industriais e para a comunidade acadêmica.

Por fim, ao direcionar-se para o efeito da corrente pulsada em três classes distintas de aços, aços carbono, ferramenta e inox martensítico, o presente trabalho propõe desenvolver um conhecimento aprofundado, experimental e comparativo, que se alinha à demanda por superfícies texturizadas com controle de geometria e

funcionalidade, e que propõe uma janela operacional para cada material, servindo como orientação inicial dos parâmetros da usinagem eletroquímica para os referidos materiais e similares.

1.1 OBJETIVOS

Investigar a influência dos parâmetros da corrente pulsada na usinagem eletroquímica de diferentes ligas de aço carbono, aço ferramenta e aço inoxidável martensítico, de modo a compreender os efeitos desse controle elétrico sobre a taxa de remoção de material, a precisão geométrica e a integridade superficial, propondo uma janela operacional que otimize o desempenho do processo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho propõe-se:

- i. Comparar os resultados obtidos com corrente contínua (ECM convencional) e corrente pulsada (PECM), avaliando diferenças quanto à taxa de remoção, acabamento superficial e fidelidade dimensional.
- ii. Analisar a influência dos parâmetros da corrente pulsada, tempo de pulso (t_p), tempo de repouso (t_b), frequência e ciclo de trabalho (Duty cycle), sobre as respostas do processo.
- iii. Avaliar a interação entre parâmetros elétricos e condições do eletrólito (tipo, concentração e temperatura), identificando tendências para maior estabilidade da distância entre eletrodos (GAP).
- iv. Caracterizar a integridade superficial das amostras usinadas por meio de parâmetros de rugosidade 3D (S_q , S_v e S_z) e análise morfológica, identificando defeitos típicos do processo.
- v. Propor um conjunto de parâmetros que possibilite a usinagem de aços carbono, aço ferramenta e aço inox martensítico com equilíbrio entre produtividade, qualidade superficial e precisão dimensional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção de fundamentação teórica reúne os conceitos essenciais que sustentam esta pesquisa, abordando os fundamentos da usinagem eletroquímica com corrente pulsada aplicada à texturização de aços. São discutidos os princípios eletroquímicos que governam a dissolução anódica (como potencial, dupla camada elétrica e transporte de massa), a influência dos parâmetros de pulso no controle do gap e na estabilidade do processo, e a relação desses aspectos com a formação do padrão texturizado e com os parâmetros de caracterização superficial utilizados no trabalho, preparando a base para a análise e discussão dos resultados.

2.1 TÉCNICAS DE TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES

A texturização de superfícies consiste em modificar de forma controlada a topografia de um material, criando padrões geométricos regulares que podem melhorar propriedades funcionais, especialmente em aplicações tribológicas. Esses padrões, conhecidos como microtexturas, podem atuar como reservatórios de lubrificante, aprisionar detritos de desgaste e reduzir o atrito entre superfícies em contato (Bruzzzone *et al.*, 2008; Zum Gahr; Mathieu; Brylka, 2007).

Segundo Costa e Hutchings (2015), as técnicas de texturização podem ser classificadas de acordo com o princípio físico envolvido em quatro categorias: (i) remoção de material; (ii) deposição de material; (iii) deslocamento/deformação de material; e (iv) superfícies autoformantes. Nesta dissertação, a revisão será focada nas técnicas de remoção de material, que incluem a texturização fotoquímica, a texturização a laser e a texturização eletroquímica.

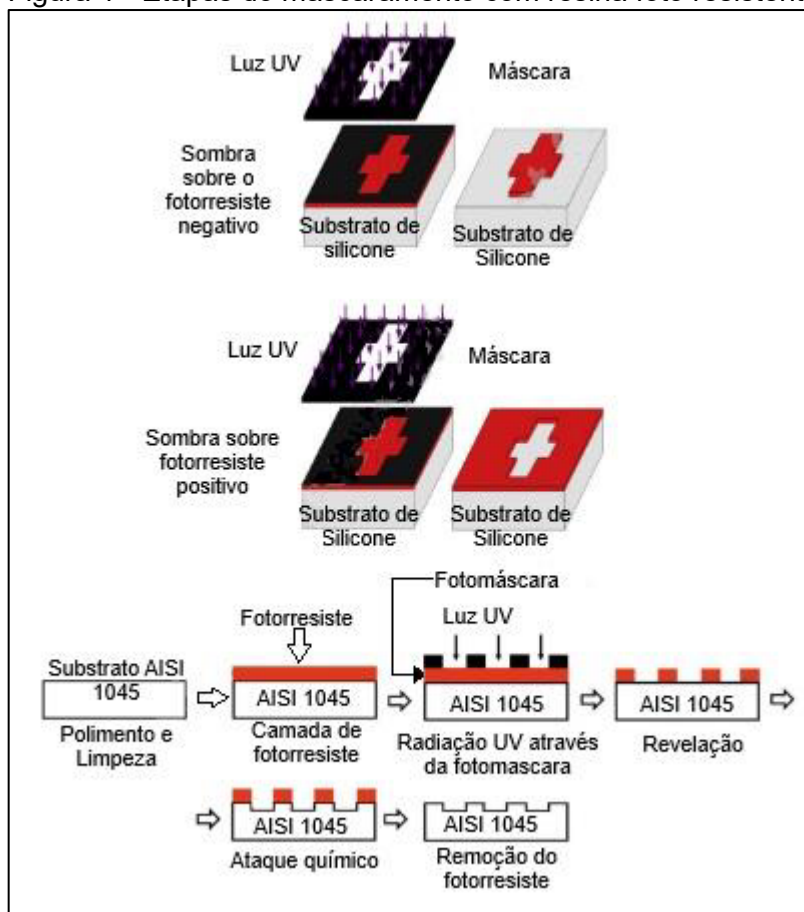
2.1.1 TEXTURIZAÇÃO FOTOQUÍMICA (PCT)

A texturização fotoquímica é um método de modificação seletiva de superfícies metálicas que combina técnica de mascaramento fotolitográfico com ataque químico controlado para gerar microestruturas planejadas no substrato. Tal procedimento permite a obtenção de relevos ou microcavidades com alta precisão geométrica, sem o contato mecânico direto ou os efeitos térmicos típicos de outras técnicas de texturização, o que o torna adequado para aplicação em ligas metálicas finas ou sensíveis ao calor.

O processo típico consiste nas seguintes etapas: limpeza e pré-tratamento da superfície metálica, aplicação de uma camada de resina foto resistente, exposição à

luz ultravioleta através de uma máscara fotográfica que define a geometria desejada, desenvolvimento da resina foto resistente, seguida pelo ataque químico (imersão ou spray) que remove o material nas áreas expostas, e por fim a remoção da resina foto resistente e tratamento de pós-processo. Um esquema ilustrativo destas etapas está apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas do mascaramento com resina foto resistente



Fonte: Quero; Perdignes; Aracil, 2018

Segundo estudo recente, a texturização por usinagem fotoquímica (*Photochemical Machining – PCM*) mostra-se uma técnica de texturização de superfície vantajosa quando comparada a métodos tradicionais, em função da ausência de tensões residuais e da alta precisão dimensional (Kar; Kulkarni, 2026a).

No que concerne aos parâmetros de processo, a literatura aponta que a concentração do agente de corrosão, a temperatura da solução e o tempo de ataque influenciam diretamente aspectos como profundidade da textura, subcorte e acabamento superficial (Sachinkumar; Patil; Chapgaon, 2019)

Na engenharia de superfícies funcionais, a texturização fotoquímica tem sido empregada para melhoria do desempenho tribológico (redução de atrito e desgaste),

otimização da adesão de revestimentos e controle de molhabilidade. Por exemplo, Kar e Kulkarni (2026), destacam a capacidade da PCM em produzir micro-geometrias livres de rebarbas e com elevada repetibilidade para sistemas de lubrificação.

No contexto da presente dissertação, que aborda a texturização de ligas de aço-carbono por usinagem eletroquímica com mascaramento, a técnica fotoquímica fornece fundamentos metodológicos e comparativos úteis (Agrawal; Kamble, 2019). Embora o processo eletroquímico apresente mecanismos distintos (corrente pulsada + máscara no ânodo/cátodo), a lógica de geração controlada de textura superficial e a necessidade de domínio dos parâmetros são comuns (Sitaram Wangikar; Kumar Patowari; Dev Misra, 2018).

Vantagens principais:

- Não requer contato mecânico direto, evitando deformações ou tensões induzidas.
- Alta resolução geométrica e boa repetibilidade de padrões.
- Adequado para peças finas e materiais sensíveis ao calor.

Limitações:

- Controle da isotropia do ataque químico: pode ocorrer sub-ataque lateral reduzindo precisão da geometria.
- Limitações em profundidades maiores ou em geometria tridimensional complexa.
- Questões ambientais e de descarte químico, exigindo atenção à sustentabilidade do processo.
- Relevância menor em materiais com menos compatibilidade ao ataque químico ou quando padrões tridimensionais são requeridos.

A compreensão dos princípios da texturização fotoquímica permite lançar luz sobre a escolha metodológica adotada na usinagem eletroquímica mascarada. A definição de máscaras, a regularidade do padrão superficial e o controle de profundidade/resultados dependem de rigor similar ao da técnica fotoquímica (Agrawal; Kamble, 2019). Assim, ao adotar um sistema eletroquímico de corrente pulsada com máscara, este trabalho se apropria dos fundamentos da geração de micro-textura e adapta-os ao ambiente eletroquímico.

Portanto, a texturização fotoquímica constitui um marco técnico relevante para o campo de engenharia de superfícies. Mesmo que o método principal da dissertação

seja o eletroquímico, a técnica fotoquímica fornece base teórica e comparativa valiosa. Permite evidenciar porque o mascaramento e o controle dimensional de textura são fundamentais, assim como justifica a necessidade de otimização de parâmetros de processo, configuração da máscara e avaliação dos resultados morfológicos. Esses elementos estruturam a ponte entre a fundamentação teórica geral e o desenho experimental específico do presente estudo.

2.1.2 TEXTURIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

A texturização eletroquímica é um processo de modificação superficial baseado nos mesmos princípios da usinagem eletroquímica (ECM), mas aplicado com o propósito específico de gerar microestruturas controladas na superfície do material (Kumar *et al.*, 2020a). Seu funcionamento baseia-se na dissolução anódica seletiva do substrato metálico, induzida pela passagem de corrente elétrica entre o ânodo (peça) e o cátodo (ferramenta), imersos em um meio eletrolítico condutor (Bruzzone *et al.*, 2008). A região do ânodo exposta à ação do eletrólito sofre remoção controlada de material, permitindo a criação de padrões geométricos ou topografias específicas sem contato mecânico direto entre as partes (Kumar; Bhattacharyya, 2018)

O processo pode ser realizado de duas formas principais: com mascaramento, quando se utiliza uma camada isolante que delimita as áreas a serem atacadas, ou sem máscara (*MECT – Maskless Electrochemical Texturing*), na qual o padrão é transferido diretamente pela ferramenta catódica. No primeiro caso, a corrente elétrica é confinada às regiões expostas do ânodo, enquanto no segundo, a geometria da ferramenta define a textura a ser reproduzida. A escolha do eletrólito (geralmente soluções de NaCl ou NaNO₃), da densidade de corrente, do tempo de exposição e da configuração geométrica dos eletrodos influencia diretamente a morfologia obtida (Painuly; Singh; Trehan, 2023)

Do ponto de vista funcional, a texturização eletroquímica permite modificar propriedades tribológicas e físico-químicas de superfícies metálicas, como a redução do coeficiente de atrito, o aumento da resistência ao desgaste, a retenção de lubrificante e a melhoria da molhabilidade e adesão de filmes (Costa *et al.*, 2022). Em aplicações industriais, é utilizada em componentes automotivos, biomédicos e aeroespaciais, onde a precisão e o acabamento superficial são essenciais (Islam *et al.*, 2022)

Entre suas principais vantagens, destacam-se:

- Ausência de contato mecânico, evitando deformações, rebarbas e tensões residuais;
- Capacidade de produzir microtexturas uniformes com alto grau de controle geométrico;
- Compatibilidade com materiais de alta dureza;
- Menor impacto ambiental em comparação a processos baseados em ablação térmica.
- Baixo custo.
- Capacidade de texturizar grandes áreas com tempo de processamento muito reduzido.

Adicionalmente, a texturização eletroquímica é energeticamente eficiente e possibilita o reuso de ferramentas catódicas em processos seriais. Contudo, limita-se a materiais condutores e requer controle rigoroso dos parâmetros eletroquímicos e do fluxo do eletrólito para garantir estabilidade e repetibilidade (Islam *et al.*, 2022); (Parreira; Gallo; Costa, 2012).

Em síntese, a texturização eletroquímica representa uma tecnologia de engenharia de superfícies de alta precisão, integrando fundamentos eletroquímicos e tribológicos para o desenvolvimento de superfícies funcionais com desempenho otimizado, sendo uma alternativa promissora às técnicas térmicas ou mecânicas convencionais. Dentre as técnicas apresentadas, a texturização eletroquímica apresenta especial relevância neste trabalho, por sua integração direta aos princípios da usinagem eletroquímica com corrente pulsada, detalhada na seção seguinte.

2.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS

O quadro 1 resume as principais características das técnicas de texturização por remoção de material.

Quadro 1-Comparação entre técnicas de texturização de superfícies

Técnica	Vantagens	Limitações	Aplicações típicas	Referências
Fotoquímica (PCT)	Alta resolução, baixo custo	Limitada a padrões 2D, uso de químicos agressivos	Microeletrônica, biomateriais	Sasaki (2023)
Laser (LST)	Alta precisão, aplicável a diversos materiais	Alto custo, presença de HAZ, retrabalho necessário	Moldes, componentes automotivos	Ibatan <i>et al.</i> (2015); Kumar <i>et al.</i> (2020a)
Eletroquímica com máscara	Padrões regulares, menor impacto no substrato	Processo lento, mascaramento trabalhoso	Tribologia, microcanais	Bruzzone <i>et al.</i> (2008b)
Eletroquímica sem máscara (MECT)	Alta reprodutibilidade, menor custo	Restrita a metais condutores	Automotivo, biomédico, aeroespacial	Da Silva & Costa (2017a); Rosenkranz <i>et al.</i> (2019)

Fonte: O Autor

A análise comparativa demonstra que a texturização fotoquímica é vantajosa para microescala e baixo custo, mas limitada em geometrias complexas. A LST oferece maior versatilidade, porém demanda elevado investimento tecnológico. Já a eletroquímica, principalmente na variante sem máscara, surge como alternativa promissora para a produção seriada de componentes metálicos com microtexturas funcionais, conciliando controle geométrico, custo competitivo e potencial de escalabilidade industrial.

2.2 USINAGEM ELETROQUÍMICA (ECM)

A usinagem eletroquímica (ECM, *Electrochemical Machining*) é um processo de remoção de material baseado na dissolução anódica, ocorrendo sob a aplicação de corrente elétrica em um meio eletrolítico. Este método é amplamente empregado para usinagem de metais de elevada dureza, difíceis de processar por técnicas convencionais, proporcionando alta precisão e acabamento superficial refinado sem gerar rebarbas ou tensões residuais (Malapati; Bhattacharyya, 2011).

Durante o processo, a peça a ser usinada é conectada ao polo positivo (ânodo), enquanto a ferramenta de usinagem atua como cátodo. Com a passagem da corrente elétrica, íons metálicos se dissolvem da superfície do ânodo, formando produtos de reação que são removidos pelo fluxo constante do eletrólito (Sathish, 2019). Esse eletrólito, normalmente uma solução salina, atua não apenas na condução da corrente elétrica, mas também auxilia na dispersão dos subprodutos gerados, evitando o acúmulo na região de usinagem (Kozak; Rajurkar; Makkar, 2004).

Diante disso, a ECM é vantajosa em aplicações onde se exige uma usinagem livre de desgaste da ferramenta, pois esta não entra em contato direto com a peça, sendo útil em setores de alta tecnologia, como a indústria aeroespacial e biomédica, para a produção de geometrias complexas e componentes de precisão (Painuly; Singh; Trehan, 2023). A ausência de contato físico entre ferramenta e peça elimina o desgaste mecânico, tornando a ECM adequada para usinar ligas de alta dureza ou geometrias complexas (Chen; Han; Wang, 2018b).

Apesar das vantagens, a ECM tradicional, realizada com corrente contínua, apresenta sérias limitações:

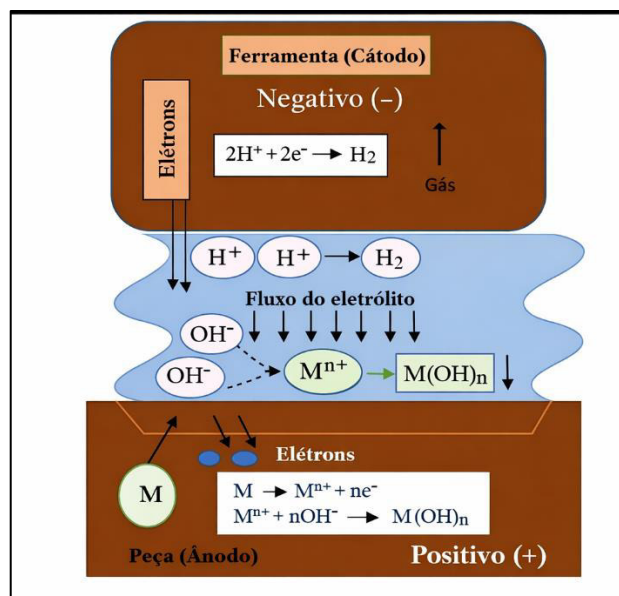
- baixa precisão dimensional;
- ocorrência de dissolução parasita, que degrada a geometria;
- rugosidade superficial elevada;
- dificuldade em controlar a evacuação de produtos da reação no espaço intereletrodos (GAP).

Esses fatores restringem a aplicação da ECM em contextos industriais que exigem maior qualidade superficial e precisão geométrica. Durante a reação eletroquímica, dois processos complementares se manifestam: a transferência de carga elétrica na interface eletrodo/eletrólito e o transporte de massa das espécies redox (oxidação-redução) no eletrólito, que pode ocorrer por meio de difusão,

convecção ou migração. Para compreender o processo em sua totalidade, é essencial dominar seus conceitos fundamentais (ROBERGE, 2005a).

A Figura 2 ilustra o princípio fundamental da usinagem eletroquímica (ECM), processo em que a remoção de material ocorre por dissolução anódica controlada em meio eletrolítico. A peça (ânodo), conectada ao polo positivo, sofre oxidação do metal (M), liberando íons metálicos (M^{n+}) que se combinam com íons hidroxila (OH^-) do eletrólito, formando hidróxidos metálicos $M(OH)_n$. Simultaneamente, na ferramenta (cátodo), conectada ao polo negativo, ocorre a reação de redução dos íons hidrogênio, resultando na formação de gás hidrogênio (H_2). O eletrólito circula continuamente entre os eletrodos, removendo os produtos da reação e mantendo o espaço Inter eletrodos limpo e ativo, o que garante a estabilidade do processo e elevada precisão na remoção do material (Painuly; Singh; Trehan, 2023).

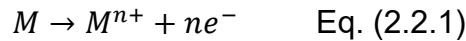
Figura 2 - Esquema representativo do mecanismo básico de funcionamento da usinagem eletroquímica (ECM).



Fonte: Adaptado de Painuly, Singh e Trehan (2023).

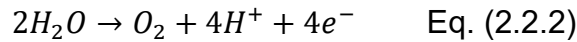
A dissolução iônica do material anódico no processo de usinagem eletroquímica (ECM) ocorre por reações eletroquímicas sob a ação de um campo elétrico estabelecido entre o ânodo (peça) e o cátodo (ferramenta), ambos imersos em uma solução eletrolítica. A aplicação de uma diferença de potencial e o fornecimento de corrente promovem a condução iônica no eletrólito e a transferência de carga nas interfaces eletrodo–eletrólito, enquanto os elétrons circulam no circuito

externo. No ânodo, ocorre a oxidação do metal, com formação de espécies iônicas e liberação de elétrons, caracterizando a dissolução anódica, descrita genericamente por:

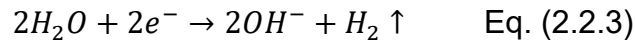


em que n corresponde ao número de elétrons transferidos por átomo de metal (associado à carga do cátion M^{n+}). Em ECM podem ser empregados eletrólitos passivantes e não passivantes, dependendo do material e do regime eletroquímico desejado.

Quando se utiliza um eletrólito passivante, como o $NaNO_3$, além da dissolução anódica pode ocorrer a desprendimento de oxigênio como reação concorrente, associada à oxidação da água na região anódica. Essa reação pode ser representada por:



No cátodo, ocorre a redução da água, com formação de íons hidroxila e liberação de hidrogênio gasoso (evolução de hidrogênio), conforme:



Essas semirreações favorecem variações locais de pH, com tendência à acidificação próxima ao ânodo (produção de H^{+}) e alcalinização próxima ao cátodo (produção de OH^{-}), o que pode influenciar estabilidade, passivação e eficiência do processo. Para relacionar o fornecimento de corrente à remoção de material, a Lei de Faraday permite estimar a massa dissolvida no ânodo por:

$$m = \frac{\eta I t M_{\text{mol}}}{nF} \quad \text{Eq. (2.2.4)}$$

onde m é a massa removida, η é a eficiência de corrente, I é a corrente, t é o tempo, M_{mol} é a massa molar do metal, n é o número de elétrons transferidos e F é a constante de Faraday.

2.3 USINAGEM ELETROQUÍMICA COM CORRENTE PULSADA

A usinagem eletroquímica com corrente pulsada (*PECM, Pulsed Electrochemical Machining*) foi desenvolvida como evolução da ECM convencional, com o objetivo de superar as limitações impostas pelo uso da corrente contínua. Na PECM, a energia elétrica é aplicada em pulsos intercalados por intervalos de repouso (*tb*), o que favorece a renovação do eletrólito, melhora a dissipação térmica e facilita a remoção dos subprodutos da dissolução anódica (Kumar *et al.*, 2020b).

Os principais parâmetros que caracterizam a corrente pulsada são:

- i. Tempo de pulso (*tp*): duração do período ativo de corrente;
- ii. Tempo de repouso (*tb*): intervalo em que não há passagem de corrente, permitindo a recuperação do eletrólito;
- iii. Frequência: número de ciclos de pulso/repouso por segundo;
- iv. Duty cycle: razão entre *tp* e o ciclo total, expressa em porcentagem, que define a intensidade média da corrente aplicada.

A escolha adequada da técnica de texturização e dos parâmetros de processamento tem impacto direto no desempenho tribológico final. A usinagem eletroquímica com corrente pulsada (PECM) apresenta vantagens significativas nesse contexto, pois permite gerar padrões regulares, repetitivos e livres de defeitos térmicos, problemas comuns em métodos térmicos como a texturização a laser (Da Silva; Costa, 2017a). Além disso, o controle preciso dos parâmetros elétricos pulsados (*tp*, *tb*, frequência e ciclo de trabalho) permite ajustar a topografia superficial em nível micrométrico, otimizando características como rugosidade, profundidade de cavidades e uniformidade do padrão (Qin *et al.*, 2024b).

Estudos recentes destacam que a redução da rugosidade média (*Ra*) e a melhora da precisão geométrica obtidas pela PECM estão diretamente associadas ao controle desses parâmetros. Valores de *tp* e ciclo de trabalho mais longos tendem a aumentar a taxa de remoção de material (MRR), porém com risco de dissolução excessiva e perda de fidelidade do padrão (Kendall *et al.*, 2019). Já valores moderados de *tb* e frequência promovem acabamento superficial mais fino e maior estabilidade do GAP inter eletrodos, fatores essenciais para a obtenção de texturas funcionais (Kunar; Bhattacharyya, 2020).

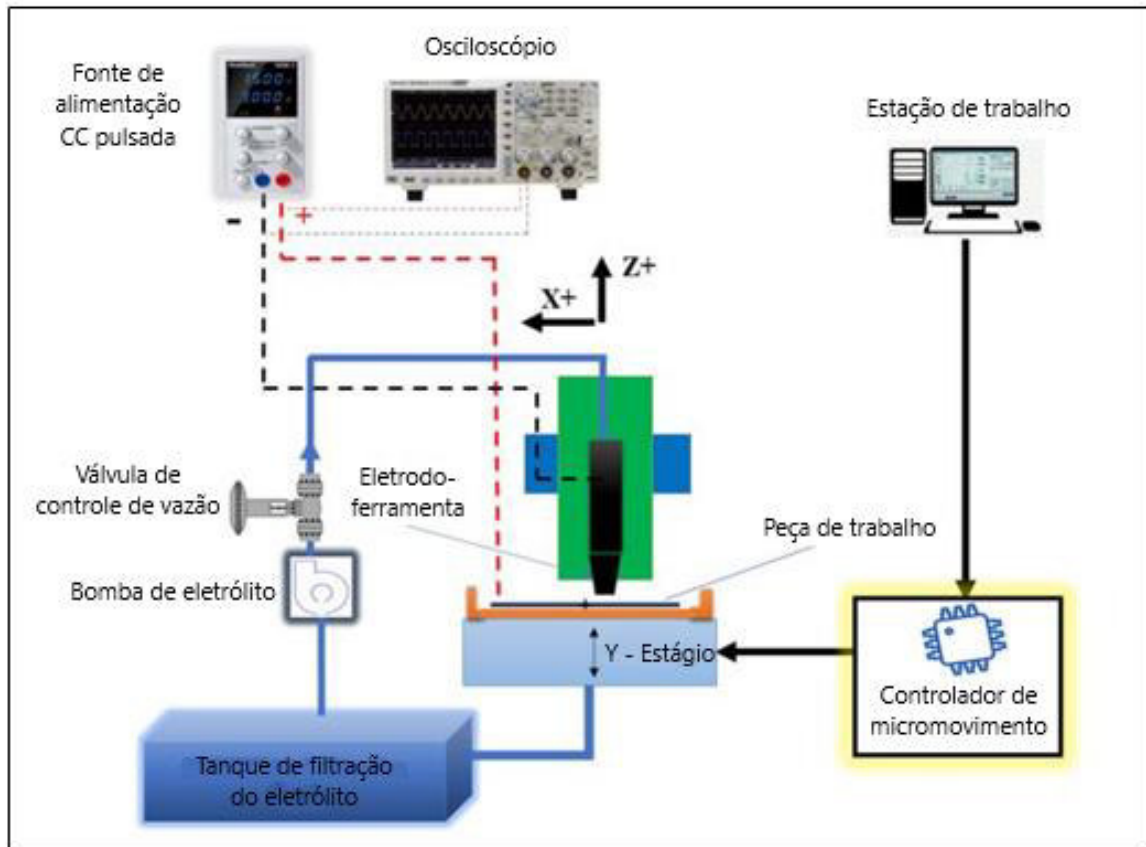
A texturização eletroquímica pulsada também se destaca pela ausência de zonas afetadas pelo calor e pela eliminação de tensões residuais, preservando a integridade metalúrgica do substrato, fator relevante para aplicações que envolvem componentes sujeitos a cargas cíclicas e ambientes corrosivos (Singh Patel *et al.*, 2020a). Dessa forma, a técnica combina precisão geométrica, acabamento superficial de alta qualidade e sustentabilidade, já que utiliza eletrólitos menos agressivos do que reagentes químicos ou processos térmicos intensos.

A manipulação desses parâmetros possibilita equilibrar a taxa de remoção de material com a qualidade superficial e precisão geométrica, tornando a PECM uma técnica mais precisa e estável do que a ECM convencional (Rosenkranz *et al.*, 2019). Estudos apontam reduções significativas da rugosidade (valores inferiores a 0,5 $\mu\text{m Ra}$), diminuição do overcut e eliminação de defeitos como rebarbas e pites (Tchoupe Sambou *et al.*, 2024).

A Figura 3 ilustra o processo de usinagem eletroquímica (ECM), o qual se distingue da texturização eletroquímica principalmente pela cinemática do sistema. Enquanto, na ECM, há movimento relativo entre a ferramenta (cátodo) e a peça (ânodo), geralmente associado ao avanço controlado da ferramenta e à manutenção do GAP, na texturização eletroquímica a peça e a ferramenta permanecem estacionárias, de modo que a formação das cavidades ou padrões ocorre sem deslocamento mecânico durante o ciclo de processamento (Evin; Tomáš; Kmec, 2020).

Além disso, essa diferença operacional implica em alterações nas condições de remoção de material e no controle do processo. Na ECM, o movimento relativo contribui para a renovação do eletrólito na zona ativa e para a estabilidade do GAP, influenciando diretamente a geometria obtida e a taxa de dissolução anódica (Mankeekar *et al.*, 2022). Já na texturização eletroquímica, a ausência de movimentação desloca o controle do resultado sobretudo para parâmetros como densidade de corrente, regime de pulso, tempo de aplicação, propriedades do eletrólito e condições hidrodinâmicas locais, favorecendo a geração de padrões superficiais delimitados pela geometria da ferramenta e pela distribuição do campo elétrico (Wang *et al.*, 2025).

Figura 3 - Esquema usinagem eletroquímica



Fonte: Adaptado de Painuly, Singh e Trehan (2023).

2.3.1 TEXTURIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

A texturização eletroquímica é um método alternativo de micro usinagem que modifica a superfície do material, criando padrões pré-determinados com geometria controlada para finalidades tribológicas, como melhorar a resistência ao desgaste e a capacidade de retenção de lubrificante. O processo envolve a aplicação de uma corrente elétrica em um eletrólito, induzindo reações de oxidação e/ou redução que alteram a microestrutura da superfície do material. No caso da texturização com mascaramento, tanto o ânodo quanto o cátodo podem ser cobertos por máscaras, definindo áreas específicas de ataque eletroquímico e criando padrões controlados (Coblas *et al.*, 2015).

Essas máscaras são feitas de materiais isolantes, como polímeros, que bloqueiam a passagem da corrente elétrica em determinadas regiões da superfície. Ao aplicar a corrente, apenas as áreas expostas são submetidas ao processo eletroquímico, gerando texturas com características específicas, como rugosidade,

porosidade ou padrões geométricos. A escolha dos parâmetros eletroquímicos, como densidade de corrente, tempo de processamento e composição do eletrólito, influencia diretamente a morfologia obtida, permitindo um controle preciso da estrutura superficial (Kunar e Bhattacharyya 2018).

Esse método oferece vantagens em relação a técnicas mecânicas de texturização, como maior uniformidade e controle de padrões, além de ser menos invasivo ao substrato. A texturização eletroquímica sem máscara (*MECT - Maskless Electrochemical Texturing*) permite a texturização de superfícies metálicas utilizando uma única ferramenta catódica que contém os padrões a serem transferidos para a peça, eliminando a necessidade de mascaramento em cada peça de trabalho. O aprimoramento dessa técnica visa torná-la economicamente viável e capaz de reproduzir padrões de forma seriada (DA SILVA; COSTA, 2017).

Kunar e Bhattacharyya (2019), realizaram um experimento utilizando o processo de texturização microeletroquímica sem máscara (*Maskless EMM*) aplicado a amostras de aço inoxidável SS-304, com o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes materiais de mascaramento e parâmetros operacionais. Para isso, foi desenvolvida uma configuração experimental com célula eletrolítica de fluxo cruzado vertical, permitindo o controle preciso da distância intereletrodos e da circulação do eletrólito. Foram testadas seis ferramentas catódicas micropadronizadas revestidas com as máscaras AZ4903, AZ4620, AZ1415H, esmalte prolite sintético, PMMA e SU-8 2150, sob variação de tensão aplicada (8–14 V), intervalo entre eletrodos (100–250 μm) e vazão do eletrólito (3,55–6,55 m^3/h). As superfícies texturizadas foram analisadas quanto ao sobre corte, profundidade de usinagem e rugosidade superficial, por meio de microscopia óptica e perfilometria tridimensional. Os autores observaram que a máscara SU-8 2150 apresentou o melhor desempenho, destacando-se pela elevada resistência, boa aderência e capacidade de reprodução de padrões precisos, possibilitando a produção repetida de até trinta amostras com alta qualidade geométrica e acabamento superficial uniforme.

Embora a texturização eletroquímica dependa fundamentalmente dos mecanismos de dissolução anódica descritos na seção anterior, o controle preciso da geometria final das microtexturas somente é possível mediante o ajuste adequado dos parâmetros elétricos aplicados ao processo (Mahata; Kunar; Bhattacharyya, 2019). A forma de onda da corrente, seus tempos característicos e a densidade de corrente exercem influência direta sobre o volume de material removido e sobre a qualidade superficial obtida. Nesse contexto, apresentam-se a seguir os principais parâmetros

eletroquímicos que regem a texturização por ECM/PECM, bem como suas formulações matemáticas e seus impactos no processo.

2.3.2 PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

A eficiência do processo e a qualidade dos padrões formados estão diretamente relacionadas aos parâmetros eletroquímicos e hidrodinâmicos utilizados, os quais determinam o regime de dissolução anódica, a distribuição de corrente e a fidelidade geométrica da texturização (Kar; Kulkarni, 2026).

Entre os principais parâmetros de controle, destacam-se a densidade de corrente, a tensão aplicada, os tempos de pico e de base da corrente pulsada (t_p e t_b), a frequência de pulsação, o GAP Inter eletrodos, a vazão e temperatura do eletrólito, bem como o tempo total de usinagem. A interação entre essas variáveis define a taxa de dissolução metálica e a formação das microestruturas na superfície (Singh Patel *et al.*, 2020).

A densidade de corrente (J) é o parâmetro fundamental do processo, pois regula a velocidade de dissolução e o tipo de superfície obtida. Densidades elevadas promovem maior remoção de material, porém podem causar perda de resolução nos padrões mascarados e irregularidades no acabamento. Por outro lado, valores moderados favorecem uma dissolução mais uniforme, resultando em microtexturas de alta definição e com menor rugosidade (Mahata e Bhattacharyya 2020).

A tensão aplicada influencia diretamente o regime de dissolução anódica, devendo situar-se entre o potencial de passivação e o potencial crítico de dissolução (Tong; Li, 2025). Tensões muito baixas conduzem à formação de películas passivas que reduzem a taxa de usinagem, enquanto tensões excessivas podem provocar dissolução não controlada e aumento da rugosidade superficial (Qin *et al.*, 2024b).

Os parâmetros da corrente pulsada, notadamente o tempo de pico (t_p) e o tempo de base (t_b), são essenciais para a estabilidade do processo e a precisão da texturização. Durante o tempo de pico, ocorre a dissolução ativa do material; no tempo de base, há um período de recuperação eletrolítica que permite a remoção de íons metálicos e a reposição do eletrólito fresco na região do GAP. Essa alternância cíclica reduz o superaquecimento local e previne a formação de camadas de concentração

iônica, resultando em superfícies com padrões bem definidos e excelente reprodutibilidade (Kunar; Bhattacharyya, 2020)

A vazão do eletrólito exerce papel determinante na uniformidade do campo elétrico e na eficiência do transporte de massa. Vazões adequadas evitam o acúmulo de subprodutos e gases na interface ânodo-eletrólito, favorecendo uma dissolução estável e homogênea. No entanto, vazões muito altas podem causar turbulência e deflexão da corrente, dificultando a transferência precisa dos padrões mascarados (Dharmadhikari *et al.*, 2024).

A temperatura da solução eletrolítica e o GAP intereletrodos também influenciam significativamente o processo. O aumento da temperatura melhora a condutividade iônica e a taxa de dissolução, mas pode comprometer a estabilidade dimensional dos padrões devido à intensificação de reações secundárias. Já o controle rigoroso do GAP é indispensável, uma vez que pequenas variações nessa distância alteram drasticamente a distribuição da corrente e, conseqüentemente, a profundidade e a qualidade das microtexturas (Rajurkar; Sundaram; Malshe, 2013).

Resumidamente, o controle integrado desses parâmetros é essencial para o sucesso da texturização eletroquímica. O equilíbrio entre corrente, tensão, tempo e fluxo garante a produção de superfícies funcionais que exibem redução de atrito, maior retenção de lubrificantes e resistência ao desgaste, características desejáveis em aplicações tribológicas avançadas, como sistemas de motores, moldes e ferramentas de corte (Kunar; Bhattacharyya, 2020).

A compreensão da influência dos pulsos elétricos sobre a dissolução anódica exige a definição rigorosa de todos os parâmetros que caracterizam o sinal elétrico aplicado durante a texturização. Esses parâmetros determinam não apenas a quantidade de material removido, mas também a fidelidade geométrica, a repetibilidade e a integridade superficial da microtextura. Assim, dando continuidade à discussão desenvolvida até aqui, apresentam-se, na sequência do texto, as formulações matemáticas e os conceitos fundamentais que descrevem o comportamento eletroquímico da PECM.

a) Densidade de corrente

A densidade de corrente é o parâmetro eletroquímico fundamental para descrever a taxa de dissolução anódica. Ela é definida como a razão entre a corrente aplicada e a área efetivamente exposta do ânodo:

$$j = \frac{I}{A} \quad \text{Eq. (2.3.2.1)}$$

onde

j é a densidade de corrente (A/cm²),

I é a corrente elétrica aplicada (A),

A é a área ativa de dissolução (cm²).

Segundo WOLYNEC (2003) e ROBERGE (2005), aumentos na densidade de corrente elevam a velocidade de dissolução, enquanto reduções tendem a estabilizar o processo e diminuir a rugosidade superficial. Em ECM e PECM, esse comportamento permanece válido, sendo amplamente utilizado para controlar profundidade e taxa de remoção de material (Malapati; Bhattacharyya, 2011).

b) Lei de Faraday aplicada à dissolução anódica

A remoção de material ocorre por dissolução eletroquímica e segue a Primeira Lei de Faraday, que relaciona a massa dissolvida à carga elétrica total que atravessa o ânodo:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{nF} \quad \text{Eq. (2.3.2.2)}$$

Onde:

m = massa removida (g),

M = massa molar do metal (g/mol),

t = tempo de passagem da corrente (s),

n = número de elétrons transferidos na reação,

$F = 96485\text{C/mol}$ é a constante de Faraday.

A conversão de massa para volume é feita por:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad \text{Eq. (2.3.2.3)}$$

em que ρ é a densidade do material (g/cm³).

Essa formulação constitui a base para a predição da profundidade das cavidades e é amplamente utilizada na literatura de ECM e PECM (PAINULY; SINGH; TREHAN, 2023).

c) Parâmetros temporais da corrente pulsada

A PECM utiliza um sinal elétrico pulsado composto por dois intervalos fundamentais: tempo de pico (t_p), no qual a corrente assume seu valor máximo, e tempo de base (t_b), durante o qual ocorre a renovação do eletrólito no GAP.

O período do ciclo é:

$$t = t_p + t_b \quad \text{Eq. (2.3.2.4)}$$

A frequência, inverso do período, é expressa por:

$$f = \frac{1}{t} \quad \text{Eq. (2.3.2.5)}$$

O ciclo de trabalho, ou *duty cycle*, representa a fração do tempo total em que a corrente permanece em seu valor de pico:

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_b} \quad \text{Eq. (2.3.2.6)}$$

ou, em percentual:

$$DC(\%) = \frac{t_p}{t_p + t_b} \times 100 \quad \text{Eq. (2.3.2.7)}$$

Autores como (Singh; Mishra; Dixit, 2022) destacam que o aumento do duty cycle tende a ampliar a profundidade das microtexturas, enquanto reduções promovem maior controle geométrico e diminuição de dissolução parasita.

d) Tempo efetivo de dissolução

Em sinais pulsados, apenas o intervalo de pico contribui de forma significativa para a dissolução anódica. Assim, o tempo efetivo de dissolução por ciclo é:

$$t_{ef} = t_p \quad \text{Eq. (2.3.2.8)}$$

O número total de ciclos aplicados durante o processo é dado por:

$$N = f \cdot t_{processo} \quad \text{Eq. (2.3.2.9)}$$

O tempo efetivo total de dissolução torna-se então:

$$t_{total,ef} = t_p \cdot N \quad \text{Eq. (2.3.2.10)}$$

Substituindo-se esse resultado na Lei de Faraday, a massa total removida no processo pulsado é expressa como:

$$m = \frac{M \cdot I_p \cdot t_p \cdot N}{nF} \quad \text{Eq. (2.3.2.11)}$$

Essa formulação foi demonstrada experimentalmente por Kunar e Bhattacharyya (2018), os quais mostraram que a profundidade final das microtexturas depende essencialmente da relação entre corrente de pico e tempo de pico.

e) Corrente média e densidade de corrente efetiva

A corrente média aplicada ao sistema ao longo de um ciclo é:

$$I_{medio} = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad \text{Eq. (2.3.2.12)}$$

A densidade de corrente de pico é definida por:

$$j_p = \frac{I_p}{A} \quad \text{Eq. (2.3.2.13)}$$

Já a densidade de corrente efetiva, considerando o ciclo de trabalho, torna-se:

$$j_{ef} = j_p \cdot DC \quad \text{Eq. (2.3.2.14)}$$

Tais relações são fundamentais para modelar a formação da microtextura e prever a profundidade das cavidades formadas (Kunar; Bhattacharyya, 2020).

2.3.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NA MORFOLOGIA DA TEXTURA

A morfologia final das cavidades texturizadas depende diretamente da interação entre os parâmetros elétricos descritos na seção anterior. A literatura demonstra que o tempo de pico e a densidade de corrente são os principais fatores associados à profundidade da cavidade, enquanto a frequência e o tempo de base influenciam a estabilidade do *GAP* e a uniformidade do padrão (Parreira; Gallo; Costa, 2012).

- **Altos tempos de pico:** aumentam a dissolução, mas elevam risco de *overcut*.
- **Baixos tempos de base:** reduzem a renovação do eletrólito, causando instabilidade.
- **Frequências elevadas:** favorecem acabamento superior e menor rugosidade.
- **Duty cycles altos:** proporcionam maior taxa de remoção, porém com maior risco de perda geométrica.
- **Densidade de corrente elevada:** aumenta profundidade, mas pode degradar máscaras.

O estudo de Kumar *et al.* (2020) indica que a combinação ótima desses parâmetros favorece a formação de cavidades com:

- Paredes mais definidas.
- Menor dissolução lateral.
- Maior repetibilidade.
- Redução de defeitos como rebarbas eletroquímicas.

2.4 TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES APLICADAS À MELHORIA DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO

A texturização de superfícies é amplamente estudada por sua capacidade de alterar o comportamento tribológico dos materiais, isto é, sua resposta frente ao atrito, ao desgaste e à lubrificação (Grützmacher; Profito; Rosenkranz, 2019). A configuração superficial de um componente mecânico exerce papel fundamental na forma como o contato ocorre entre as superfícies, influenciando diretamente a eficiência, a durabilidade e a estabilidade operacional dos sistemas. Nesse sentido, a introdução de padrões ou relevos controlados tem como principal finalidade otimizar a interação tribológica, reduzindo perdas energéticas e aumentando a vida útil dos pares em contato (Shah *et al.*, 2020).

Em aplicações tribológicas, as superfícies texturizadas funcionam como microrreservatórios de lubrificante, facilitando a formação e a manutenção do filme lubrificante durante o movimento relativo entre as peças (Sasaki, 2023). Esse efeito é particularmente importante em condições de lubrificação limite ou mista, nas quais a presença de um filme fluido contínuo é insuficiente para evitar o contato direto entre asperezas (Woydt, 2022). As microcavidades criadas na superfície armazenam o lubrificante e o redistribuem ao longo do ciclo de operação, reduzindo o atrito e prevenindo a adesão localizada (Costa *et al.*, 2022).

Além da lubrificação, a texturização contribui para reduzir o desgaste por mecanismos abrasivos e adesivos. As irregularidades controladas da superfície atuam como armadilhas para partículas de desgaste, evitando que estas permaneçam presas na zona de contato e causem riscos ou deformações (Wang *et al.*, 2022). Estudos mostram que a presença de texturas bem distribuídas pode reduzir significativamente o volume de material removido durante o deslizamento, especialmente em pares metálicos submetidos a altas pressões de contato (Luz *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante é o impacto da texturização na redução do coeficiente de atrito. Em sistemas de motores de combustão interna, por exemplo, superfícies de pistões e anéis de vedação com texturas controladas apresentaram reduções expressivas de atrito, levando a menor consumo de combustível e menores emissões de CO₂ (Dias *et al.*, 2022). Em mancais e rolamentos, a texturização promove uma

distribuição mais uniforme da carga e melhora a formação do filme hidrodinâmico, ampliando a capacidade de suporte e reduzindo vibrações (Rosenkranz *et al.*, 2019).

De modo geral, a finalidade tribológica da texturização de superfícies está associada à melhoria do desempenho funcional de componentes submetidos a contato mecânico (De Mello; Costa, 2023). Os benefícios incluem redução do atrito, menor taxa de desgaste, aumento da eficiência energética e extensão da vida útil dos sistemas. Assim, compreender a relação entre a morfologia superficial e o comportamento tribológico é essencial para o desenvolvimento de superfícies de engenharia mais duráveis e eficientes, sobretudo em aplicações que envolvem condições severas de carga, temperatura ou lubrificação deficiente (Ciulli, 2024).

A partir dessa perspectiva, observa-se que a eficiência tribológica de uma superfície está diretamente relacionada à sua morfologia e à regularidade dos padrões texturizados (Steven R. Schmid, 2023).

Desse modo, torna-se fundamental compreender como os parâmetros de processamento interferem na geração dessas microestruturas e, conseqüentemente, no desempenho funcional do material.

2.5 ELETRÓLITO

O eletrólito utilizado foi uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 15% em massa. A escolha desse eletrólito se deve à sua elevada condutividade elétrica, que favorece uma maior eficiência no transporte iônico e, conseqüentemente, uma taxa de remoção de material mais elevada durante o processo de usinagem eletroquímica (Vishnoi; Kumar; Murtaza, 2021b). Além disso, o NaCl apresenta ampla disponibilidade, baixo custo e facilidade de preparo, características que o tornam atrativo em aplicações experimentais e industriais. Embora soluções de NaCl possam aumentar a rugosidade superficial e apresentar maior agressividade química em relação ao nitrato de sódio (NaNO_3), o seu uso é justificado quando se busca intensificar a dissolução anódica e otimizar a produtividade do processo (Wei *et al.*, 2016).

O comportamento do fluxo do eletrólito nas folgas de usinagem é um dos fatores mais importantes para o bom desempenho do processo de usinagem eletroquímica (ECM). Diversos estudos têm demonstrado que o modo como o fluido

se desloca e distribui sua pressão dentro do GAP influencia diretamente a eficiência da remoção de material e a qualidade da superfície obtida (Ge *et al.*, 2024a).

Simulações realizadas indicam que é possível ajustar a energia do eletrólito modificando o grau de convergência da sua saída. Quando essa saída é alterada, ocorre uma variação entre as energias de pressão dinâmica e estática do fluido. Em outras palavras, ao reduzir a velocidade do fluxo, ou seja, ao sacrificar parte da energia dinâmica, pode-se aumentar a energia de pressão estática (Kunar; Mahata; Bhattacharyya, 2018). Esse equilíbrio é essencial para otimizar o processo, já que uma pressão estática mais elevada tende a favorecer a estabilidade do fluxo e a uniformidade da usinagem, resultando em melhores acabamentos superficiais e maior controle sobre a remoção de material.

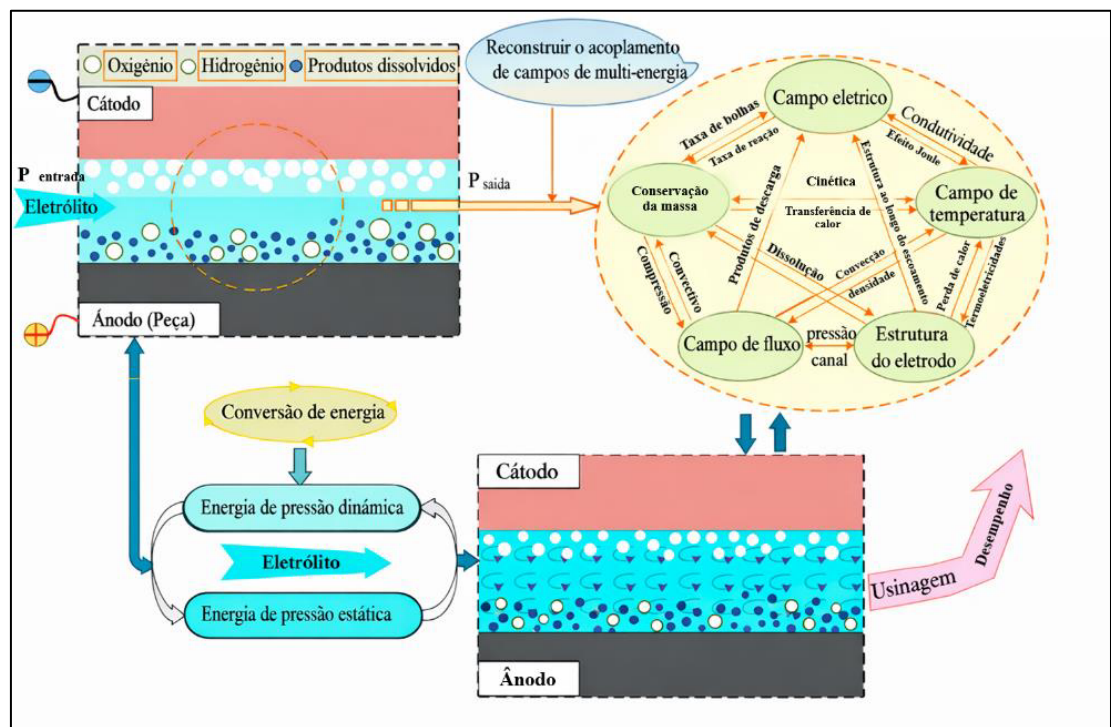
Os resultados experimentais relatados por Ge *et al.* (2024b) confirmam as tendências observadas nas simulações conduzidas pelos autores. O estudo indica que o ajuste da energia do fluido, por meio da modificação do grau de convergência da saída do eletrólito, influencia diretamente tanto a taxa de remoção de material (MRR) quanto a rugosidade superficial (Ra). Quando ocorre uma conversão moderada da energia dinâmica em energia estática, o processo tende a apresentar maior estabilidade, favorecendo uma dissolução mais uniforme e melhor qualidade superficial.

Por outro lado, quando essa conversão é excessiva, isto é, quando há perda significativa da energia dinâmica, o desempenho da usinagem tende a se deteriorar. Nesses casos, o fluxo do eletrólito perde eficiência na remoção dos produtos de reação, o que pode gerar instabilidades e comprometer o acabamento. Assim, observou-se que um grau intermediário de convergência, entre aproximadamente 50% e 70%, proporciona o melhor equilíbrio entre taxa de remoção e qualidade superficial, resultando em um desempenho global mais eficiente no processo de ECM (Liu; Zhang; Natsu, 2019).

A Figura 4 apresenta um modelo conceitual do acoplamento de campos multi-energéticos no processo de usinagem/texturização eletroquímica, evidenciando que o comportamento do sistema resulta da interação simultânea entre o campo elétrico, o campo de temperatura, o campo de escoamento, a conservação de massa e a estrutura do eletrodo. O campo elétrico governa a distribuição de corrente e a dissolução anódica, ao passo que a geração de calor por efeito Joule altera o campo térmico e, conseqüentemente, a cinética das reações eletroquímicas. Em paralelo, o

escoamento do eletrólito controla a remoção de calor, bolhas e produtos dissolvidos, influenciando a condutividade local, a concentração de espécies e a estabilidade do processo. Dessa forma, a Figura 4 reforça que o desempenho e a uniformidade da usinagem eletroquímica dependem do equilíbrio entre fenômenos de transferência de massa e calor, dissolução e reações, não sendo adequadamente descritos por parâmetros isolados, mas pelo acoplamento integrado desses campos.

Figura 4 - Eficiência do fluxo de eletrólito



Fonte: Adaptado de Ge *et al.* (2024)

2.6 MÁSCARAS PARA TEXTURIZAÇÃO

O mascaramento é uma etapa essencial nos processos de usinagem eletroquímica, pois determina com precisão as áreas expostas à dissolução anódica e, conseqüentemente, o padrão final da superfície texturizada (Martinez-Duarte, 2014). Dentre as principais técnicas utilizadas, destacam-se o mascaramento por fotolitografia, o uso de máscaras adesivas e a serigrafia condutora, que diferem principalmente quanto à resolução, custo, durabilidade e aplicabilidade em diferentes geometrias de superfície (Sun *et al.*, 2020).

A fotolitografia é amplamente reconhecida como a técnica de maior precisão para a definição de padrões micrométricos. Por meio da aplicação de uma resina fotorresistente sensível à radiação ultravioleta e do uso de máscaras ópticas, é possível obter texturas com elevado controle dimensional e reprodutibilidade (Zhao *et al.*, 2023). Essa técnica é particularmente adequada para estudos que exigem alto rigor geométrico, como investigações sobre microtexturização e transferência precisa de padrões em ligas metálicas. Contudo, apresenta desvantagens significativas relacionadas ao alto custo dos equipamentos e materiais, à necessidade de ambientes controlados e à limitação quanto à aplicação em superfícies curvas ou rugosas. Além disso, o processo é sensível a variações ambientais e a resina possui resistência limitada sob eletrólitos agressivos, o que pode comprometer a durabilidade e a uniformidade do padrão (Painuly; Singh; Trehan, 2023; Wang; Ye; Xiang, 2023)

As máscaras adesivas, por outro lado, oferecem uma alternativa mais simples e de baixo custo. Filmes de vinil, fitas técnicas e polímeros autocolantes podem ser recortados de acordo com o padrão desejado e aplicados diretamente sobre a superfície metálica, sem necessidade de equipamentos ópticos ou químicos complexos. Essa abordagem proporciona maior flexibilidade e permite a aplicação em peças com geometrias variadas. No entanto, a resolução obtida é inferior à da fotolitografia, sendo mais adequada para padrões milimétricos ou submilimétricos.

Outro desafio é a aderência do material adesivo, que pode ser afetada pela rugosidade da superfície, favorecendo a infiltração do eletrólito e comprometendo a precisão do mascaramento (Zhang; Natsu; Luo, 2024). Ainda assim, devido à sua praticidade e rapidez de aplicação, as máscaras adesivas são amplamente empregadas em testes experimentais e protótipos de usinagem eletroquímica. A serigrafia condutora surge como uma alternativa intermediária, combinando boa reprodutibilidade com custo moderado. Nesse método, tintas ou pastas isolantes são aplicadas sobre o metal por meio de uma tela serigráfica, o que permite a criação de padrões variados com aderência satisfatória e resistência razoável ao eletrólito (Wang; Chen; Du, 2013).

Embora a resolução seja inferior à da fotolitografia, a serigrafia apresenta maior durabilidade e pode ser empregada em superfícies de formatos irregulares. Além disso, dispensa etapas de exposição e revelação, reduzindo o tempo de preparação e tornando-se adequada para texturizações repetitivas e de médio porte (Liu *et al.*, 2024). De forma geral, a escolha do método de mascaramento depende do equilíbrio entre precisão, custo e aplicabilidade. A fotolitografia permanece como

referência em experimentos de alta resolução e controle geométrico, mas seu uso é restrito a contextos laboratoriais e de pequena escala (Ming *et al.*, 2018; Qin *et al.*, 2024).

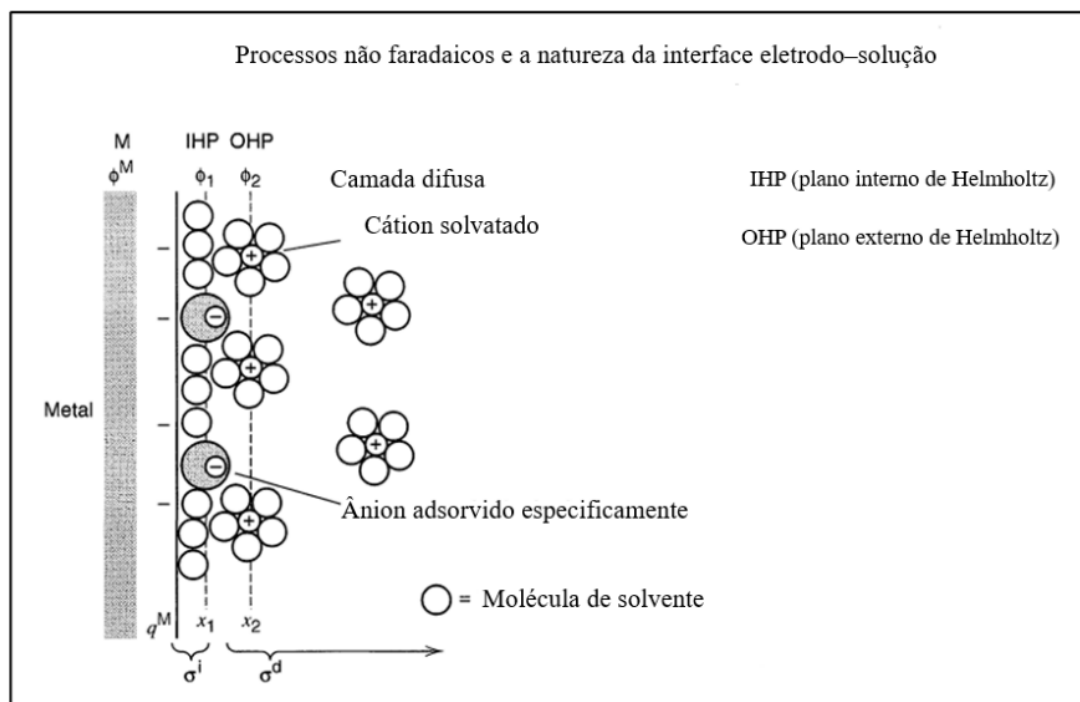
As máscaras adesivas, em contrapartida, oferecem maior versatilidade e facilidade de manuseio, sendo preferidas em situações que exigem rapidez e adaptação experimental. Já a serigrafia condutora representa uma solução intermediária, conciliando boa resistência e fidelidade de padrão com viabilidade econômica, o que a torna promissora para aplicações industriais em processos de texturização eletroquímica.

2.7 A DUPLA CAMADA ELÉTRICA E SUA INFLUÊNCIA NA TEXTURIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

Na usinagem e na texturização eletroquímica, os fenômenos responsáveis pela remoção de material estão associados aos processos que ocorrem na interface entre o eletrodo sólido e o eletrólito. Nessa interface forma-se espontaneamente a denominada dupla camada elétrica (*Electric Double layer* – EDL), resultante da redistribuição de cargas quando um material condutor entra em contato com um meio eletrolítico. A superfície metálica adquire excesso de cargas elétricas, enquanto íons de sinal oposto se organizam na região adjacente do eletrólito, estabelecendo uma estrutura interfacial característica dos sistemas eletroquímicos (Volgin *et al.*, 2021).

A Figura 5 demonstra esquematicamente essa organização interfacial, evidenciando a separação de cargas entre o eletrodo metálico e o eletrólito e a formação das regiões que compõem a dupla camada elétrica.

Figura 5-Representação esquemática da estrutura da dupla camada elétrica formada na interface eletrodo–eletrólito.



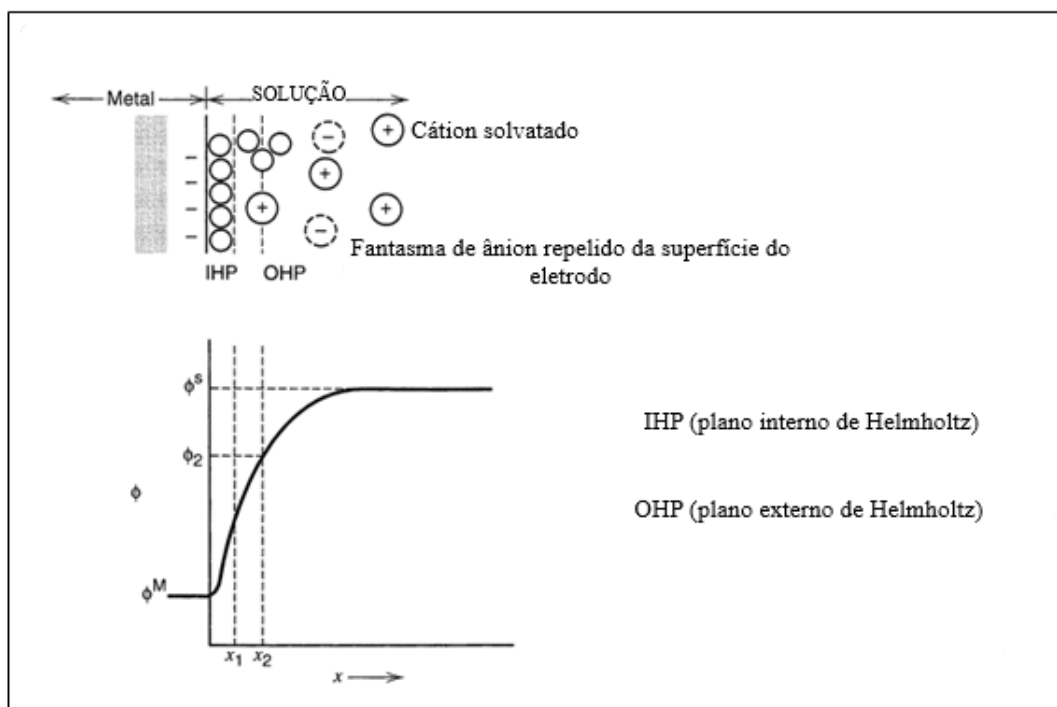
Fonte: Adaptado de Bard; Faulkner (2001, p. 13).

Conforme ilustrado na Figura 5, a EDL não constitui uma região homogênea, sendo usualmente descrita pela presença de uma camada compacta, adjacente à superfície do eletrodo, seguida por uma camada difusa que se estende para o interior da solução. Na camada compacta, frequentemente associada aos planos interno e externo de Helmholtz, encontram-se íons especificamente adsorvidos e moléculas de solvente fortemente orientadas pelo campo elétrico interfacial, enquanto na camada difusa ocorre uma distribuição gradativa de íons, governada pelo equilíbrio entre forças eletrostáticas e efeitos térmicos (Bard; Faulkner, 2001).

Do ponto de vista físico, a EDL apresenta comportamento capacitivo, podendo ser representada por um elemento de capacitância em modelos de circuito equivalente. Antes que ocorram reações faradaicas efetivas, parte da energia aplicada é armazenada nessa camada, o que introduz uma constante de tempo associada à transferência de carga na interface metal–eletrólito (Volgin *et al.*, 2021).

A Figura 6 evidencia esse comportamento ao apresentar o perfil de potencial elétrico através da região da dupla camada, mostrando que uma parcela significativa da queda de potencial ocorre nas proximidades do eletrodo, especialmente na região compacta.

Figura 6-Perfil de potencial elétrico através da região da dupla camada elétrica na interface eletrodo-eletrólito.



Fonte: Adaptado de Bard; Faulkner (2001, p. 14).

Em processos conduzidos sob corrente contínua, a dupla camada permanece continuamente carregada, mantendo o potencial interfacial em regime quase estacionário. Nessas condições, a dissolução anódica tende a ocorrer de forma menos localizada, aumentando a suscetibilidade a efeitos indesejados, como ataque lateral e corrosão parasita. A distribuição contínua do potencial mostrada na Figura 6 ajuda a compreender esse regime, no qual não há intervalos para relaxação da dupla camada.

A adoção da corrente pulsada modifica significativamente essa dinâmica interfacial. Nesse regime, a aplicação cíclica de pulsos de corrente ou tensão promove o carregamento da dupla camada durante o tempo de pulso (tp) e sua descarga ou relaxação parcial durante o tempo de base (tb). Essa alternância impede a saturação contínua da EDL e permite maior controle sobre a fração do ciclo em que ocorre dissolução anódica efetiva, favorecendo a localização espacial da remoção de material, aspecto fundamental em processos de micro e mesotexturização eletroquímica (Koyano *et al.*, 2019); (Kozak; Rajurkar; Makkar, 2004)

A literatura aponta ainda que a dinâmica de carregamento da dupla camada depende fortemente do GAP entre ferramenta e peça. Em regiões de menor distância intereletrodos, a resistência elétrica do eletrólito é reduzida, diminuindo a constante de tempo do sistema e permitindo que a EDL seja carregada mais rapidamente. Como consequência, pulsos de curta duração tendem a ativar preferencialmente essas regiões, enquanto áreas com maior GAP permanecem menos reativas, contribuindo para maior fidelidade geométrica da texturização (XU *et al.*, 2016). Esse efeito pode ser interpretado à luz do comportamento capacitivo ilustrado na Figura 6, uma vez que a constante de tempo do sistema está diretamente relacionada à resistência do eletrólito e à capacitância da dupla camada.

Além do GAP, a concentração do eletrólito influencia a estrutura da dupla camada elétrica. Em termos físico-químicos, a espessura efetiva da região difusa da EDL está relacionada ao comprimento de Debye, que diminui com o aumento da força iônica do eletrólito. Eletrólitos mais concentrados tendem, portanto, a apresentar camadas difusas mais comprimidas, alterando a capacitância interfacial e a resposta dinâmica de carregamento e descarga da EDL (Islam *et al.*, 2025), conforme representado conceitualmente na organização interfacial apresentada na Figura 5.

Nesse contexto, a dupla camada elétrica atua como um elemento regulador central da texturização eletroquímica, mediando a relação entre os parâmetros elétricos aplicados e a resposta morfológica da superfície. A correta interpretação das Figuras 5 e 6 fornece base teórica essencial para o entendimento dos mecanismos de controle da dissolução anódica em regime pulsado e para a análise da qualidade geométrica e topográfica das superfícies texturizadas (Skoczypiec *et al.*, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção descrevem-se, de forma detalhada, os materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros da corrente pulsada (*tp*, *tb*, *frequência* e *duty cycle*) sobre a usinagem eletroquímica de ligas de aço carbono, aço ferramenta e aço inoxidável martensítico. O estudo foi desenvolvido de forma experimental, buscando estabelecer uma janela

operacional que permita otimizar simultaneamente a taxa de remoção de material, a rugosidade superficial e a fidelidade geométrica das microtexturas obtidas.

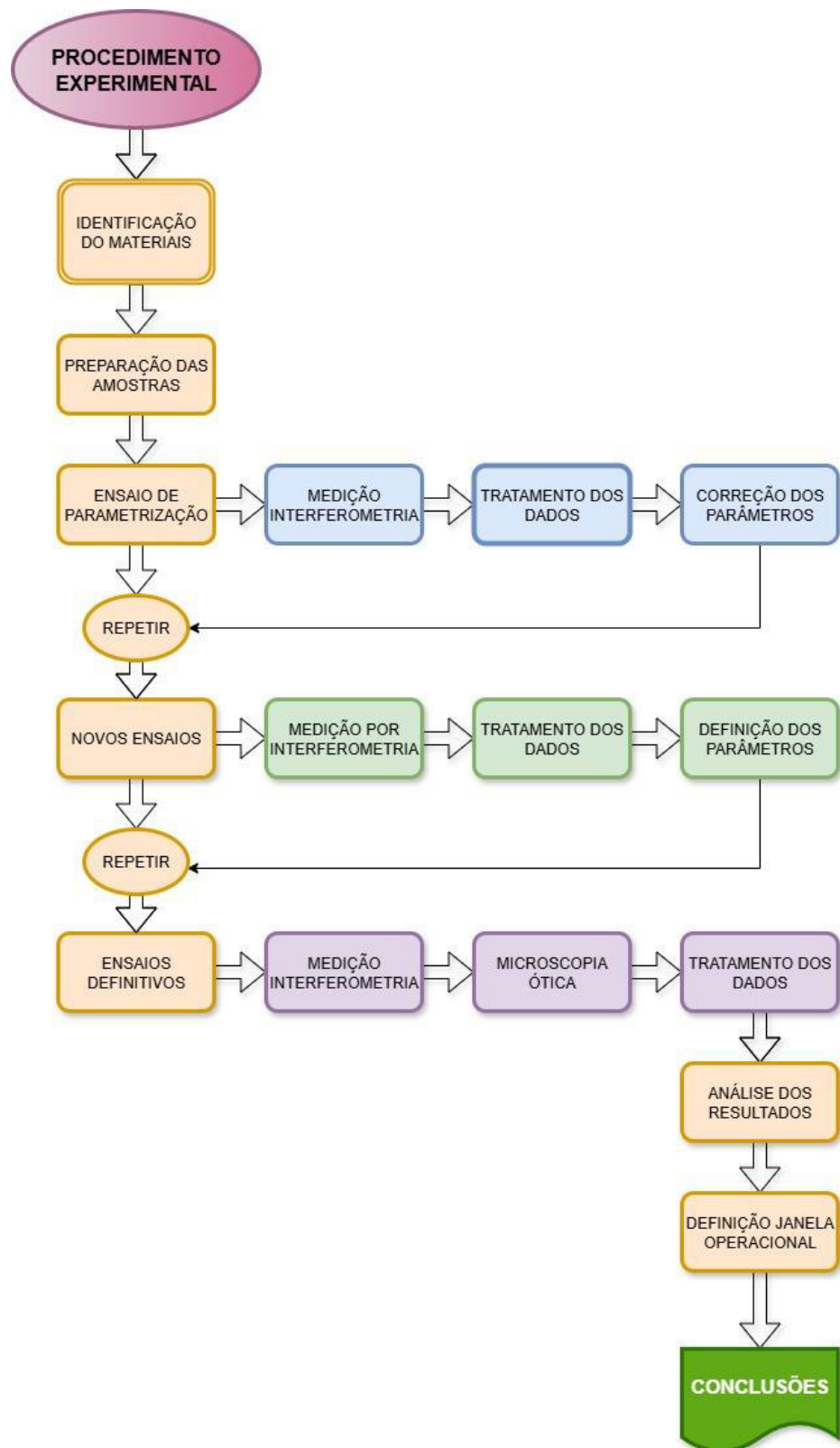
O delineamento experimental envolveu a comparação entre dois modos de operação:

- I. Usinagem eletroquímica convencional (ECM – corrente contínua)
- II. Usinagem eletroquímica com corrente pulsada (PECM – corrente pulsada controlada)

Ambos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições de eletrólito, temperatura e configuração geométrica, permitindo avaliar isoladamente o impacto dos parâmetros elétricos pulsados.

FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma apresentado sintetiza de forma organizada todas as etapas do procedimento experimental adotado na pesquisa. Inicialmente, são realizadas a identificação dos materiais e a preparação das amostras, seguidas pelos ensaios de parametrização para ajuste preliminar das variáveis do processo. As etapas de medição por interferometria e tratamento dos dados permitem a avaliação quantitativa das superfícies texturizadas e a correção dos parâmetros operacionais. Após ciclos sucessivos de repetição e refinamento, são conduzidos os ensaios definitivos, complementados por análises microscópicas. Por fim, a interpretação sistemática dos resultados possibilita a definição da janela operacional e a consolidação das conclusões do estudo.



3.2 MATERIAIS

Foram utilizadas amostras de aço com diferentes elementos de liga, representando três classes industriais de aplicação:

- I. Aço baixo carbono (SAE 1020)
- II. Aço Ferramenta VF 800
- III. Aço Inoxidável Martensítico

As amostras foram cortadas em dimensões padronizadas de 22 mm × 66 mm para o aço carbono e aço ferramenta, 39 mm x 29 mm para o aço inoxidável martensítico. Todos foram preparados por processo de usinagem conhecido como retificação, a fim de eliminar rugosidades iniciais e garantir uniformidade nas análises comparativas.

I. Aço Carbono

O aço carbono SAE 1020 é um material amplamente utilizado, com composição e enquadramento normativo bem estabelecidos, sendo classificado como aço carbono para uso mecânico conforme a ABNT NBR NM 87:2010.

II. Aço Inoxidável Martensítico

A Tabela 1 foi montada a partir de ensaio de espectrometria de emissão ótica e indica composição química média de, (C ≈ 0,325%, Cr ≈ 13,6%, Mn ≈ 0,30%, Si ≈ 0,28%, Ni ≈ 0,38% e Mo ≈ 0,06%) caracteriza o material como um aço inoxidável compatível com a classe martensítica com aproximadamente 12–14% de Cr, faixa típica do aço inoxidável martensítico tipo 420 / X30Cr13. O teor de cromo nessa faixa é suficiente para conferir resistência à corrosão em condições moderadas, associada à formação de película passiva, enquanto o teor de carbono na ordem de 0,3% confere capacidade de endurecimento por tratamento térmico, com obtenção de microestrutura predominantemente martensítica após têmpera (ATLAS STEELS, 2020; ISSF (INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM), 2021; ROLLED ALLOYS, 2026)

Tabela 1 - Aço inoxidável Martensítico - composição química

Leitura	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	84,6	0,337	0,322	0,297	0,0207	< 0,0007	13,7
3	85,0	0,310	0,318	0,294	0,0289	< 0,0007	13,5
4	84,9	0,329	0,203	0,304	0,0252	< 0,0007	13,6
Média	84,8	0,325	0,281	0,298	0,0249	< 0,0007	13,6
Leitura	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0,0596	0,372	< 0,0005	0,0153	0,0255	0,0055	0,0042
3	0,0611	0,384	< 0,0005	0,0160	0,0275	0,0051	0,0056
4	0,0614	0,385	< 0,0005	0,0158	0,0264	0,0043	0,0028
Média	0,0607	0,380	< 0,0005	0,0157	0,0265	0,0050	0,0042
Leitura	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Se
1	0,0285	< 0,0080	< 0,0025	0,0642	< 0,0003	0,0032	< 0,0035
3	0,0304	< 0,0080	< 0,0025	0,0121	< 0,0003	0,0044	< 0,0035
4	0,0302	0,0081	< 0,0025	0,0646	< 0,0003	0,0047	< 0,0035
Média	0,0297	< 0,0080	< 0,0025	0,0470	< 0,0003	0,0041	< 0,0035

Fonte: O Autor

III. Aço Ferramenta

O VF800, material utilizado nos ensaios (Tabela 2), se enquadra como um aço ferramenta de alta liga para trabalho a frio, com teores elevados de carbono e cromo, o que favorece a alta dureza e a grande resistência ao desgaste pela formação de muitos carbonetos. A presença de molibdênio contribui para a resistência ao revenimento e para a estabilidade de dureza após o tratamento térmico, enquanto vanádio e nióbio formam carbonetos duros que reforçam ainda mais o desempenho ao desgaste e a estabilidade microestrutural (VILLARES METALS S/A, 2022).

Tabela 2 - Composição química dos aços ferramenta (em peso, wt%)

Aço	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Nb	W
VF800	0,86	0,42	0,93	8,37	2,08	0,49	0,15	–

Fonte: O Autor

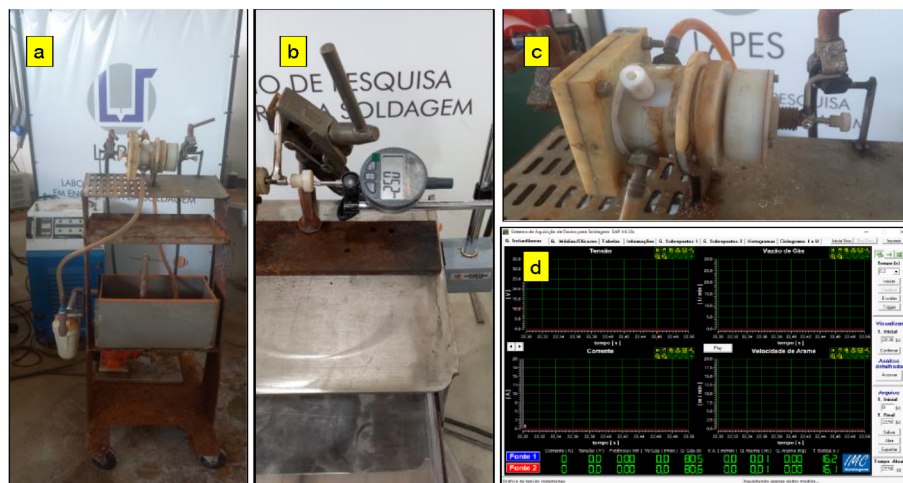
3.3 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS OPERACIONAIS

Os ensaios de usinagem eletroquímica foram realizados em um equipamento de texturização desenvolvida no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O sistema é composto por:

1. Fonte de corrente pulsada: fonte de soldagem digiplus, com controle de pulsos elétricos;
2. Sistema hidráulico: bomba de recirculação com vazão ajustável (2 a 28 L/min), garantindo fluxo constante do eletrólito;
3. Célula eletroquímica (Câmara de texturização superficial): configuração plana, com ânodo (peça) e cátodo (ferramenta) paralelos e distância controlada (GAP);
4. Sistema de aquisição de dados: sistema capaz de fazer aquisição em tempo real de corrente e tensão

A Figura 7 apresenta o sistema de texturização utilizado para a realização dos ensaios de texturização eletroquímica. A Figura 7(a) podemos observar o equipamento de texturização, a Figura 7(b) demonstra o método empregado para o controle preciso do *GAP* intereletrodos, utilizando um relógio comparador digital para ajuste e monitoramento da distância. Na Figura 7(c) observa-se a câmara de texturização desenvolvida especificamente para este experimento, cuja tecnologia encontra-se em fase final de processo de patenteamento. Por fim, a Figura 7(d) ilustra o software do sistema de aquisição de dados utilizado para registrar, com precisão, os valores de corrente e os tempos de pulso, integrado à fonte de soldagem responsável pela geração da corrente aplicada durante o processo.

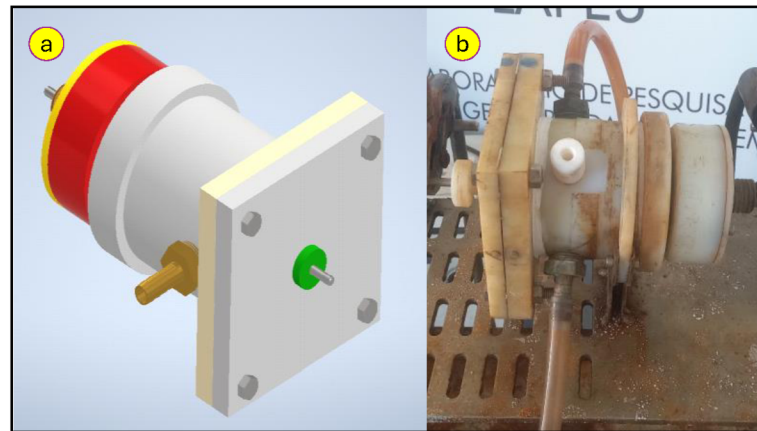
Figura 7 - Sistema de texturização, Equipamento de Texturização (a), Controle do GAP (b), Célula Eletroquímica (c), Software para aquisição de dados (d)



Fonte: O Autor

A Figura 8(a) representa o projeto da câmara de texturização desenhado em software 3D, enquanto a Figura 8(b) ilustra o conjunto fabricado.

Figura 8 - Câmara de Texturização - (a) projeto da câmara - (b) Projeto concebido



Fonte: O Autor

Para a geração de corrente, foi utilizada uma fonte de soldagem da marca DIGIPlus A7. As fontes de soldagem da linha DIGIPlus A7 possuem processador ARM de 32 bits, o que permite operar em diferentes modalidades de soldagem e com elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica. Trata-se de um equipamento versátil, pois seu sistema de controle baseado em microcontrolador ARM 7 de 32 bits possibilita a operação da fonte por meio de software, sendo a seleção dos processos e o ajuste das variáveis realizados de forma simples e prática via painel com display e teclas (IHM).

A fim de monitorar e registrar, de forma sincronizada, os parâmetros elétricos e operacionais associados ao funcionamento da fonte durante os ensaios, foi empregado um equipamento de aquisição de dados com comunicação via porta USB, taxa de aquisição de 5 kHz e conversores A/D de 10 bits. Esse sistema permite o monitoramento de diferentes grandezas nas seguintes faixas de medição: corrente de -600 a 600 A, tensão de -100 a 100 V, vazão de gás de 0 a 20 L/min e velocidade de arame de 0 a 25 m/min. Além disso, conta com autonomia de bateria de aproximadamente 10 horas, o que favorece a realização de ensaios e coletas prolongadas sem necessidade de recarga frequente.

3.4 PARÂMETROS DE CORRENTE PULSADA

Os parâmetros elétricos foram ajustados conforme a Tabela 3, abrangendo uma faixa experimental representativa.

Tabela 3 - Parâmetros elétricos

Parâmetro	Símbolo	Faixa de variação	Unidade	Observação
Corrente de pico	I_p	6 – 20	A	Corrente aplicada durante o pulso ativo
Corrente de base	I_b	0 – 2	A	Corrente durante o período de repouso
Tempo de pulso	t_p	2 – 4	ms	Define a duração da dissolução anódica
Tempo de base	t_b	2 – 6	ms	Intervalo para renovação do eletrólito
Frequência	f	83 – 167	Hz	Calculada como $1 / (t_p + t_b)$
Duty cycle	D	30 – 70	%	Razão entre t_p e o ciclo total ($t_p + t_b$)

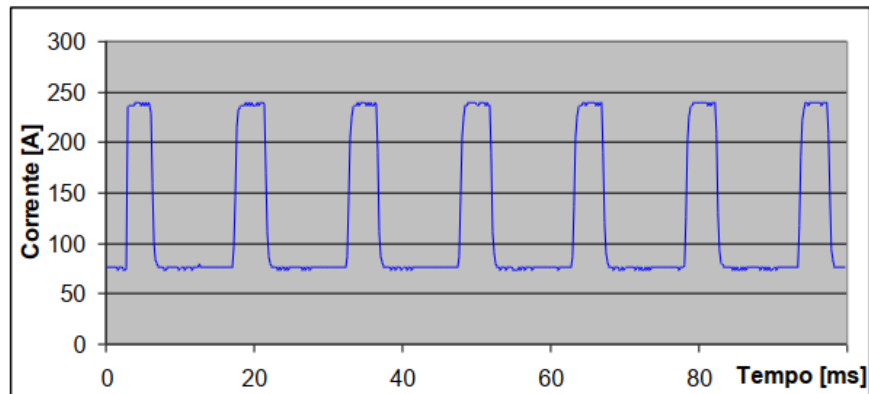
Fonte: O Autor

A texturização eletroquímica foi realizada em regime de corrente pulsada (PECM), caracterizado por ciclos periódicos compostos por um intervalo de corrente de pico I_p aplicado durante o tempo t_p , seguido por um intervalo de corrente de base I_b durante t_b . O período do ciclo foi definido por $t = t_p + t_b$, com frequência $f = 1/t$ razão cíclica (duty cycle) $D = t_p/(t_p + t_b)$. O pulso de pico foi adotado para promover a dissolução anódica e a formação da textura, enquanto o intervalo de base favoreceu a renovação do eletrólito no GAP, a remoção de produtos de reação e bolhas, e a dissipação térmica, contribuindo para maior estabilidade do processo. Os parâmetros I_p , I_b , t_p e t_b foram definidos previamente para cada ensaio e registrados juntamente com as demais condições operacionais, permitindo a rastreabilidade e a comparação entre as diferentes configurações experimentais.

As Figuras 9 e 10 ilustram, respectivamente, o oscilograma de corrente em função do tempo e o esquema conceitual dos parâmetros de corrente pulsada utilizados nos ensaios. A Figura 9 evidencia a aplicação de uma corrente periódica,

com alternância bem definida entre os níveis de corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b), indicando estabilidade do regime pulsado ao longo do tempo.

Figura 9 - Oscilograma I(A) x t(ms) para MIG/MAG pulsado

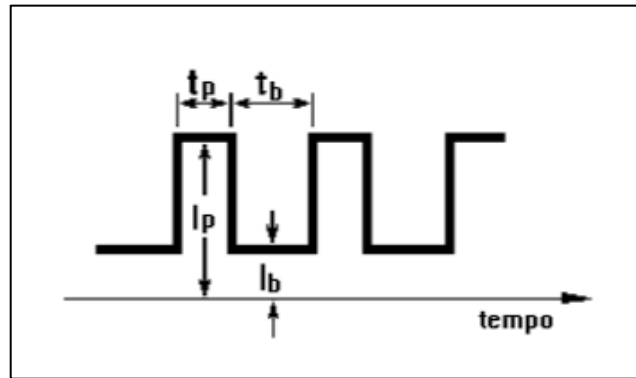


Fonte: Manual DigiPlus A7

A Figura 10 apresenta a definição dos parâmetros que caracterizam a forma de onda pulsada, destacando o tempo de pico (t_p), o tempo de base (t_b), bem como as intensidades associadas a cada patamar de corrente.

Esses parâmetros foram adotados como variáveis de controle do processo, permitindo ajustar a intensidade e a duração da dissolução eletroquímica, assim como os intervalos destinados à renovação do eletrólito e à dissipação térmica no GAP. A utilização desse regime pulsado possibilitou maior controle do processo em comparação ao modo contínuo, assegurando repetibilidade dos ciclos de corrente durante a execução dos ensaios.

Figura 10 - Parâmetros de corrente pulsada



Fonte: Manual Digi Plus A7

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

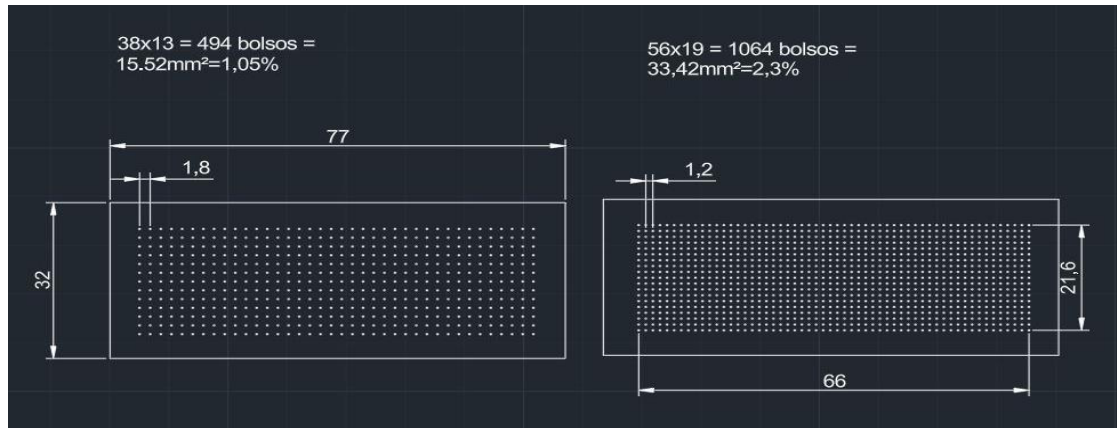
A análise morfológica das superfícies foi realizada por meio de interferometria óptica tridimensional, utilizando o Interferômetro marca POLYTEC modelo TopMap MicroView+, disponível no CEME-SUL FURG. Essa técnica permitiu a medição não destrutiva de parâmetros de rugosidade e a reconstrução tridimensional das cavidades formadas.

As imagens foram processadas no software MountainsMap® versão 9.0, possibilitando a extração de dados quantitativos de profundidade, diâmetro, espaçamento entre cavidades e rugosidade aritmética (R_a). A análise por interferometria foi fundamental para o trabalho, possibilitando através do perfil de rugosidade definir os melhores parâmetros para obtenção dos resultados desejados.

3.6 PRODUÇÃO DAS MÁSCARAS

A produção das máscaras foi realizada no OCEANTEC, parque tecnológico da Universidade Federal do Rio Grande, que dispõe de máquina de corte a laser. Neste trabalho, optou-se pelo mascaramento adesivo em função do baixo custo e da facilidade de fabricação e aplicação. A Figura 11 apresenta o projeto desenvolvido em AutoCAD, utilizado como base para o corte das máscaras.

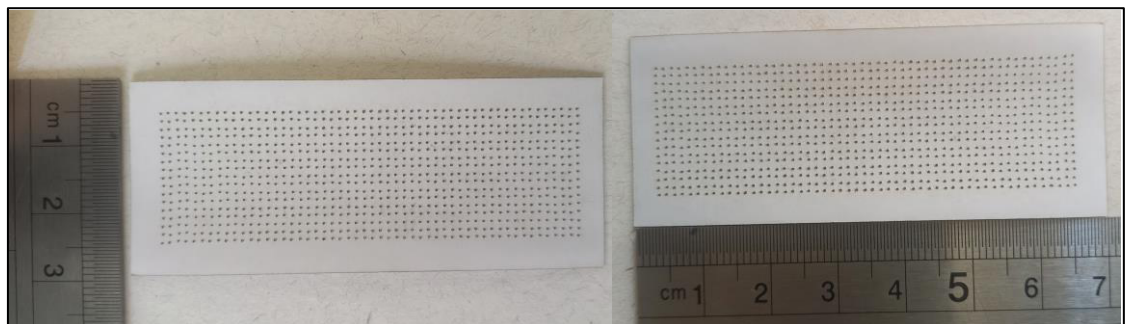
Figura 11 - Projeto das máscaras



Fonte: O Autor

Figura 12 apresenta a máscara já cortada no Laser. Foram adotadas duas configurações de mascaramento, diferenciadas pela densidade de bolsos, correspondentes a **1,05%** e **2,3%** de área usinada em relação à área total da superfície.

Figura 12 - Máscara cortada no Laser



Fonte: O Autor

3.7 TRATAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS EM REGIME DE CORRENTE PULSADA

Os dados de corrente elétrica analisados neste estudo foram obtidos durante ensaios de usinagem eletroquímica operando em regime de corrente pulsada. A aquisição do sinal foi realizada de forma contínua, com resolução temporal constante de 0,2 ms (0,0002 s), registrando pares de valores de tempo e corrente ao longo de todo o experimento. Devido ao grande volume de dados coletados, foi necessário aplicar procedimentos de cálculo para organizá-los e separá-los por pulsos. Para essa

etapa, utilizou-se a planilha eletrônica Microsoft Excel, tanto para o processamento e tratamento dos dados quanto para a geração dos gráficos correspondentes. Buscou-se, nesta etapa, fixar o período total de pulso (T) como condição de controle e, a partir disso, variar os tempos de corrente de pico (t_p) e de base (t_b) para avaliar seus efeitos no processo. Como exemplo de uma das combinações investigadas, adotou-se $t_p = 1$ ms e $t_b = 15$ ms, o que resulta em $T = t_p + t_b = 16$ ms, conforme expresso pela Equação:

$$T = t_p + t_b \quad \text{Eq. (3.8.1)}$$

Substituindo-se os valores adotados no experimento, obtém-se:

$$T = 1 \text{ ms} + 15 \text{ ms} = 16 \text{ ms} = 0,016 \text{ s} \quad \text{Eq. (3.8.2)}$$

Considerando a taxa de amostragem de 0,2 ms, o número total de pontos adquiridos por pulso (N) pode ser determinado pela razão entre o período do pulso e o intervalo de aquisição, conforme a Equação (3):

$$N = \frac{T}{\Delta t} \quad \text{Eq. (3.8.3)}$$

em que $\Delta t = 0,0002$ s. Assim,

$$N = \frac{0,016}{0,0002} = 80 \text{ pontos por pulso} \quad \text{Eq. (3.8.4)}$$

Desse total, aproximadamente 5 pontos correspondem à fase de pico:

$$N_p = \frac{t_p}{\Delta t} = \frac{0,001}{0,0002} = 5 \quad \text{Eq. (3.8.5)}$$

e 75 pontos à fase de base:

$$N_b = \frac{t_b}{\Delta t} = \frac{0,015}{0,0002} = 75 \quad \text{Eq. (3.8.6)}$$

a) Identificação do número do pulso

Para possibilitar a análise pulso a pulso, cada amostra foi associada a um número de pulso n , calculado a partir do tempo absoluto de aquisição ta . O número do pulso foi determinado pela divisão do tempo absoluto pelo período total do pulso, com aplicação da função de truncamento inteiro, conforme a Equação:

$$n = \left\lfloor \frac{ta}{t} \right\rfloor \quad \text{Eq. (3.8.7)}$$

Como exemplo numérico, para uma amostra adquirida no instante $t = 0,037$ s, tem-se:

$$n = \left\lfloor \frac{0,037}{0,016} \right\rfloor = [2,31] = 2 \quad \text{Eq. (3.8.8)}$$

Portanto, essa amostra pertence ao terceiro pulso aplicado ao sistema (considerando a indexação iniciando em $n = 0$).

b) Cálculo do tempo relativo e classificação das fases do pulso

Após a determinação do número do pulso, foi calculado o tempo relativo t_r de cada amostra dentro do respectivo ciclo, conforme a Equação:

$$t_r = ta - n \cdot t \quad \text{Eq. (3.8.9)}$$

Aplicando-se o exemplo anterior, para $ta = 0,037$ se $n = 2$:

$$t_r = 0,037 - 2 \cdot 0,016 = 0,005 \text{ s} = 5 \text{ ms} \quad \text{Eq. (3.8.10)}$$

A classificação da fase do pulso foi então realizada com base no valor de t_r , segundo o critério estabelecido na Equação (11):

$$\begin{cases} t_r < t_p \Rightarrow \text{fase de pico} \\ t_r \geq t_p \Rightarrow \text{fase de base} \end{cases} \quad \text{Eq. (3.8.11)}$$

No exemplo apresentado, como $t_r = 5 \text{ ms} > 1 \text{ ms}$, a amostra é classificada como pertencente à fase de base do pulso.

Uma vez segmentados os dados por pulso e por fase, foi possível extrair parâmetros elétricos representativos de cada ciclo. O valor de corrente de pico foi definido como o maior valor de corrente registrado durante a fase de pico de cada pulso, enquanto a corrente de base foi caracterizada por meio do valor médio (ou mínimo, conforme a análise adotada) da corrente registrada durante a fase de base.

Esse procedimento permitiu reduzir o volume de dados mantendo a representatividade física do sinal, possibilitando a análise comparativa do

comportamento elétrico pulso a pulso e sua correlação com os resultados de texturização superficial obtidos no processo de usinagem eletroquímica.

3.8 PARÂMETROS DE ENSAIO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A Tabela 4 sintetiza os parâmetros adotados nos ensaios e apresenta o critério de identificação/classificação das amostras, permitindo reconhecer cada condição experimental e sua respectiva codificação ao longo do estudo.

Tabela 4 - Parâmetros adotados e classificação das amostras

Material	Amostra	$I_p(A)$	$I_b(A)$	$t_p(ms)$	$t_b(ms)$
Aço carbono	A	10	5	1	15
Aço carbono	B	10	5	2	14
Aço carbono	C	10	5	4	12
Aço carbono	D	10	5	6	10
Aço carbono	E	20	5	1	15
Aço carbono	F	20	5	2	14
Aço carbono	G	20	5	4	12
Aço carbono	H	20	5	6	10
Aço carbono	R	20	5	1	15
Aço carbono	S	20	5	1	15
Aço carbono	T	20	5	1	15
Aço Ferramenta	AF1	20	5	1	4
Aço Ferramenta	AF2	20	5	2	3
Aço Ferramenta	AF3	20	5	4	4
Aço Ferramenta	AF3.1	20	5	4	4
Aço Inox Martensítico	AIM1	20	10	1	5
Aço Inox Martensítico	AIM2	20	10	2	4
Aço Inox Martensítico	AIM2.1	20	10	2	4
Aço Inox Martensítico	AIM3	20	10	3	3

Fonte: O Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados tem como objetivo interpretar de forma sistemática os efeitos dos parâmetros da corrente pulsada, tempo de pulso (t_p), tempo de repouso (t_b), frequência e duty cycle, sobre o comportamento eletroquímico e morfológico das superfícies usinadas. As análises foram realizadas com base nas respostas experimentais de taxa de remoção de material (MRR), nos parâmetros topográficos de área S_q , S_v e S_z , e na fidelidade geométrica dos padrões texturizados, possibilitando compreender a influência individual e combinada de cada variável elétrica no desempenho do processo.

Inicialmente, são apresentados os resultados referentes à comparação entre a ECM convencional (corrente contínua) e a PECM (corrente pulsada), evidenciando as diferenças em termos de remoção de material e qualidade superficial. Em seguida, são discutidos os efeitos de cada parâmetro pulsado de forma isolada, bem como as interações entre eles, a fim de identificar tendências e correlações significativas.

A partir dessa interpretação, foi possível propor uma janela operacional otimizada para a usinagem eletroquímica pulsada de aços carbono, capaz de equilibrar produtividade, precisão geométrica e integridade superficial.

4.1 ENSAIOS DE PARAMETRIZAÇÃO

Os ensaios de parametrização foram inicialmente realizados em aço carbono 1020, considerando que sua maior taxa de remoção favoreceria a identificação preliminar das faixas operacionais, resultando em parâmetros de referência mais baixos e sensíveis às variações do processo. Essa etapa permitiu compreender como o material reage às mudanças no regime de alimentação elétrica, e também servir como referência para definição dos parâmetros iniciais para o Aço Ferramenta e Inoxidável martensítico posteriormente.

A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios iniciais com os corpos de prova de aço carbono SAE 1020. Testes preliminares mostraram que os melhores resultados para tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b), estariam entre 1 a 2 ms e 15,3 a 31,6 ms, respectivamente.

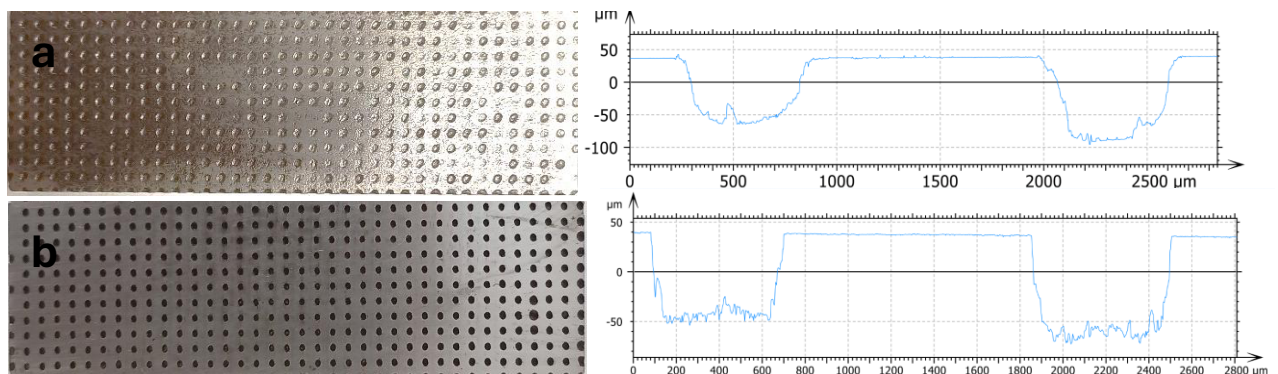
Tabela 5-Parâmetros para ensaio inicial

Modo corrente	CP	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	I_m (A)	U_m (V)	t(s)	Duty Cycle (%)	Fator de pulso (I_p/I_b)
Normal	A	10	5	2	15,3	82	19,7	15	11,6	2
Normal	B	10	5	2	31,6	98	19,9	15	5,95	2
Pulsada	C	10	5	1	15,3	98	19,6	15	6,13	2
Pulsada	D	10	5	1	31,6	88	19,5	15	3,07	2

Fonte: O Autor

A Figura 13 apresenta os melhores resultados obtidos nas condições de corrente contínua (condição A) e corrente pulsada (condição C). Observa-se que, na corrente contínua (condição A), a área da amostra não foi totalmente texturizada (Figura 13a) e ocorreu maior sobre corte lateral. Em contraste, na corrente pulsada (condição C), a área foi integralmente texturizada (Figura 13b), com redução do sobre corte em comparação à condição A.

Figura 13 - Corrente Normal (a), Corrente Pulsada (b)



Fonte: O Autor

A partir destes resultados, definiu-se a condição “C” de corrente pulsada, como mostra a Figura 13b, como parâmetros iniciais de ensaio.

4.2 AÇO SAE 1020

Os ensaios de parametrização indicaram o caminho a ser seguido com relação ao tipo de corrente, tensão, corrente de pico e base. Foram executados mais ensaios como objetivo de confirmar estes valores.

4.2.1 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA ENSAIOS

Após a etapa inicial de ensaios de parametrização, na qual foi definido um espectro de variáveis de processo, procedeu-se à ampliação do intervalo dessas variáveis, com o objetivo de avaliar de forma sistemática seu comportamento, foram executados oito ensaios, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6- Parâmetros de ensaio Aço SAE 1020

Corpo de prova	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	I_m (A)	U_m (V)	T_t (s)	Duty Cycle (%)	Frequência (hz)	Nº ciclos	Fator de pulso (lp/lb)
A	10	5	1	15	38	21,4	10	6,25	62,5	625	2
B	10	5	2	14	58	20,4	10	12,5	62,5	625	2
C	10	5	4	12	46	21	10	25	62,5	625	2
D	10	5	6	10	38	21,9	10	37,5	62,5	625	2
E	20	5	1	15	57	20	10	6,25	62,5	625	4
F	20	5	2	14	56	20,7	10	12,5	62,5	625	4
G	20	5	4	12	51	21,4	10	25	62,5	625	4
H	20	5	6	10	52	20,4	10	37,5	62,5	625	4

Fonte: O Autor

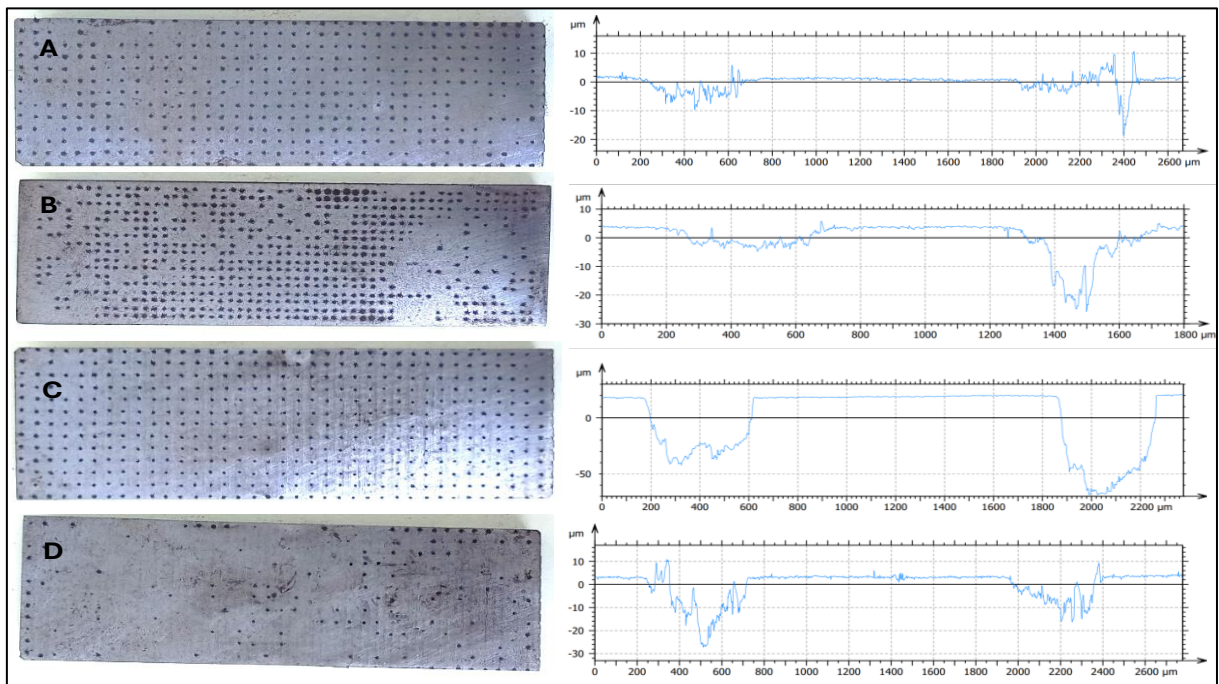
4.2.2 IMAGENS MACROSCÓPICAS E PERFIS INTERFEROMÉTRICOS AO LONGO DE TRAÇADO REPRESENTATIVO NAS PEÇAS A–H.

Neste primeiro ensaio, realizado após a etapa de parametrização que estabeleceu valores iniciais de referência, os corpos de prova foram organizados em dois grupos experimentais. No Grupo 1 (corpos de prova A, B, C e D), adotou-se corrente de pico constante de $I_p = 10$ A. No Grupo 2 (corpos de prova E, F, G e H), a texturização foi conduzida com $I_p = 20$ A. Em ambos os grupos, foram mantidas as mesmas variações dos tempos de pulso e de base (t_p e t_b), bem como a corrente de base I_b , a fim de isolar o efeito do nível de I_p sobre os resultados de texturização conforme Tabela 6.

De acordo com a Figura 14, as condições de ensaio mantiveram I_p (10 A), I_b (5 A), frequência (62,5 Hz) e número de ciclos (625) constantes, variando-se principalmente os tempos de pulso (t_p) e de base (t_b), o que resultou em diferentes valores de duty cycle. Nessa comparação, a Peça C ($t_p = 4$ ms; $t_b = 12$ ms; duty cycle = 25%) apresentou o resultado mais satisfatório, com maior uniformidade macroscópica e cavidades mais bem definidas no perfil topográfico.

Em contrapartida, a Peça D ($t_p = 6$ ms; $t_b = 10$ ms; duty cycle = 37,5%) apresentou o desempenho menos favorável, dentro do intervalo investigado, o aumento do tempo em pico e do duty cycle não se traduziu em melhoria da regularidade das cavidades.

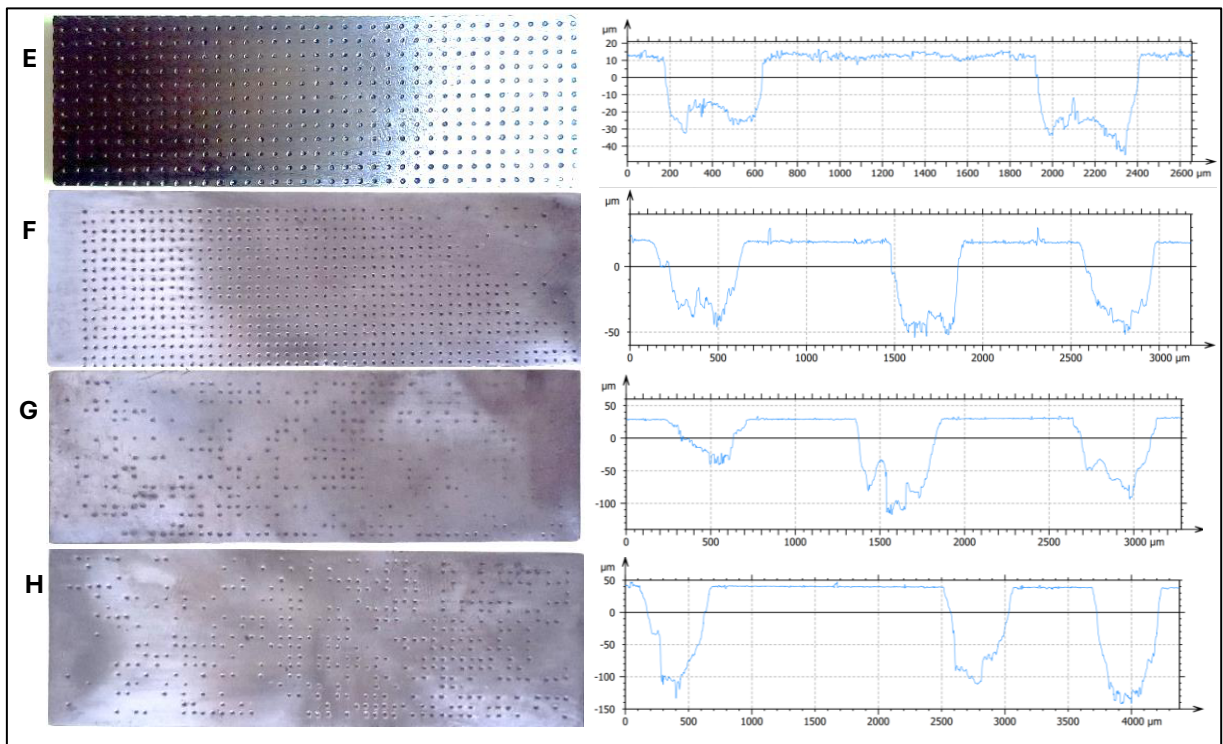
Figura 14-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (A-D)



Fonte: O Autor

Na Figura 15, observa-se que na comparação entre os dois grupos experimentais, os ensaios foram conduzidos com $I_b = 5$ A, frequência de 62,5 Hz e 625 ciclos, variando-se t_p e t_b de modo a obter duty cycle de 6,25%, 12,5%, 25% e 37,5%. A principal diferença entre os grupos foi o nível da corrente de pico, sendo adotado $I_p = 10$ A para as peças A–D ($I_p/I_b = 2$) e $I_p = 20$ A para as peças E–H ($I_p/I_b = 4$). Em termos de resposta morfológica, a melhor condição no grupo $I_p = 10$ A foi observada na peça C ($t_p = 4$ ms; $t_b = 12$ ms; duty cycle = 25%), enquanto no grupo $I_p = 20$ A o melhor desempenho ocorreu na peça E ($t_p = 1$ ms; $t_b = 15$ ms; duty cycle = 6,25%). De forma análoga, os desempenhos menos favoráveis foram registrados na peça D no grupo $I_p = 10$ A e na peça G no grupo $I_p = 20$ A. Esses resultados mostram que, no intervalo investigado, a qualidade da texturização depende da combinação entre o nível de I_p e a razão temporal entre t_p e t_b , não variando de forma sistemática com o duty cycle.

Figura 15-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (E-H)



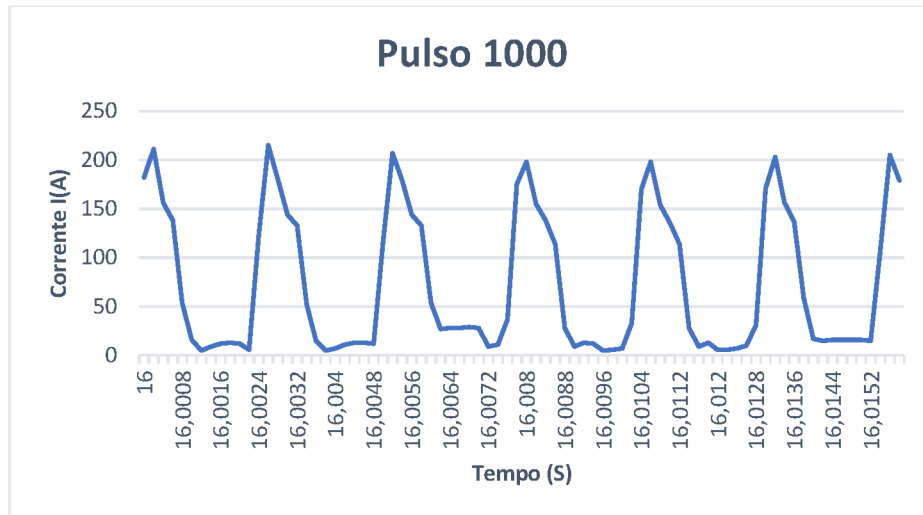
Fonte: O Autor

4.2.3 ANÁLISE DOS DADOS ADQUIRIDOS DE TEMPO E CORRENTE

Nesta seção são apresentados e discutidos com maior detalhamento apenas os dados referentes à melhor condição de ensaio (E), selecionada por ter apresentado o desempenho mais consistente entre as variações avaliadas. Os demais resultados são apresentados de forma sintética, apenas para fins de comparação geral, sem aprofundamento interpretativo.

A Figura 16, oscilograma do pulso 1000 na condição E, mostra picos de corrente significativamente mais elevados (compatível com o grupo de maior I_p), mantendo forma altamente repetitiva entre ciclos. Observa-se subida rápida ao pico, trecho de pico bem definido e retorno à base, com pequena dispersão entre pulsos, um indicativo de boa estabilidade do regime pulsado mesmo com maior I_p .

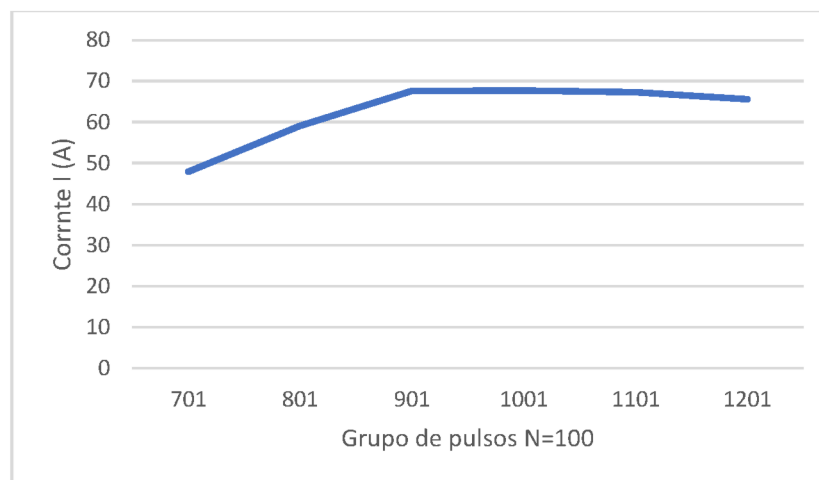
Figura 16-Oscilograma corpo de prova E



Fonte: O Autor

Na Figura 17, gráfico de corrente média por grupo (N=100), há aumento acentuado nos grupos iniciais seguido por patamar bem definido, com leve redução ao final. Tecnicamente, o duty cycle reduzido (6,25%) implica menor tempo de permanência em pico por ciclo e maior tempo em base, o que pode favorecer estabilidade térmica/eletroquímica média e reduzir flutuações acumuladas, isso é compatível com a tendência observada de estabilização clara da corrente média e com o melhor desempenho morfológico do grupo $I_p = 20A$.

Figura 17-Média de corrente Grupo de 100 pulso E



Fonte: O Autor

4.2.4 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA POR INTERFEROMETRIA: SQ, SV, SZ E PROFUNDIDADE MÁXIMA DOS BOLSOS

Com base nos parâmetros quantitativos apresentados na Tabela 7, observa-se que os resultados interferométricos corroboram a avaliação morfológica das peças. No grupo $I_p = 10$ A, a peça C (melhor desempenho) apresenta maiores amplitudes topográficas, com $S_q = 11,35 \mu\text{m}$, $S_v = 91,79 \mu\text{m}$ e $S_z = 104,2 \mu\text{m}$, além de profundidade máxima de bolso de $92,43 \mu\text{m}$, indicando cavidades mais pronunciadas e consistentes.

Em contraste, a peça D (pior desempenho) apresenta $S_q = 3,022 \mu\text{m}$ e profundidade máxima de bolso relativamente baixa ($38,71 \mu\text{m}$), ainda que com S_v e S_z elevados ($85,63 \mu\text{m}$ e $100,1 \mu\text{m}$), sugerindo que parte da amplitude topográfica decorre de depressões/irregularidades localizadas, sem correspondência direta com bolsos profundos e regulares. No grupo $I_p = 20$ A, a peça E (melhor desempenho) apresenta valores intermediários e compatíveis com texturização mais controlada ($S_q = 13,35 \mu\text{m}$; profundidade máxima de bolso $67,65 \mu\text{m}$), enquanto a peça H (pior desempenho) exibe os maiores valores de amplitude e profundidade ($S_q = 29,30 \mu\text{m}$; $S_v = 183,6 \mu\text{m}$; $S_z = 356,0 \mu\text{m}$; profundidade máxima de bolso $179,9 \mu\text{m}$), indicando um regime mais agressivo e heterogêneo de remoção, associado à menor uniformidade do padrão observado.

Os resultados complementares referentes às peças A, B, F e G, que não foram detalhados no corpo do texto, incluindo os oscilogramas de corrente em função do tempo e os gráficos de corrente média por grupo de pulsos, encontram-se apresentados no Apêndice A, assegurando o registro completo do conjunto experimental.

Tabela 7-Parâmetros topográficos (S_q , S_v e S_z) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova A–H.

Testes	S_q (μm) (Superf.)	S_v (μm) (Superf.)	S_z (μm) (Superf.)	Profundidad e Máxima (μm) (Bolso)	Distância Vertical Máxima(μm) (Bolso)	Distância Horizontal Máxima (μm) (Bolso)	Distância entre bolsos horizontal (μm)	Distância entre bolsos (vertical) (μm)
A	1.343	27.92	41.35	28	417	544	1236	1613
B	2.596	49.62	65.89	41,71	478,6	554,8	603,6	605
C	11.35	91.79	104.2	92,43	467,9	482,5	1482	1227
D	3.022	85.63	100.1	38,71	523,2	496,8	1235	1184
E	13.35	66.84	185.0	67,65	510,6	551,7	1271	1272
F	18.36	100.7	156.7	106	483,22	503,22	813,2	621,2
G	28.37	141.3	198.0	148,3	532,6	462,6	768	600
H	29.30	183.6	356.0	179,9	556,5	480,6	622	778

Nota: S_q é a altura quadrática média (rugosidade RMS) da superfície; S_v é a profundidade do vale mais profundo na área medida; e S_z é a altura máxima total, definida pela diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo ($S_z = S_p + S_v$).

Fonte: O Autor

4.3 AVALIAÇÃO DE REPRODUTIBILIDADE NA CONDIÇÃO E

Com base nos resultados obtidos e na análise dos oscilogramas de corrente em função do tempo, verificou-se que o corpo de prova E apresentou o desempenho mais satisfatório entre as condições avaliadas. Em função desse resultado, foi realizada a avaliação de reprodutibilidade da condição E, por meio da confecção e texturização de três novas peças sob os mesmos parâmetros operacionais.

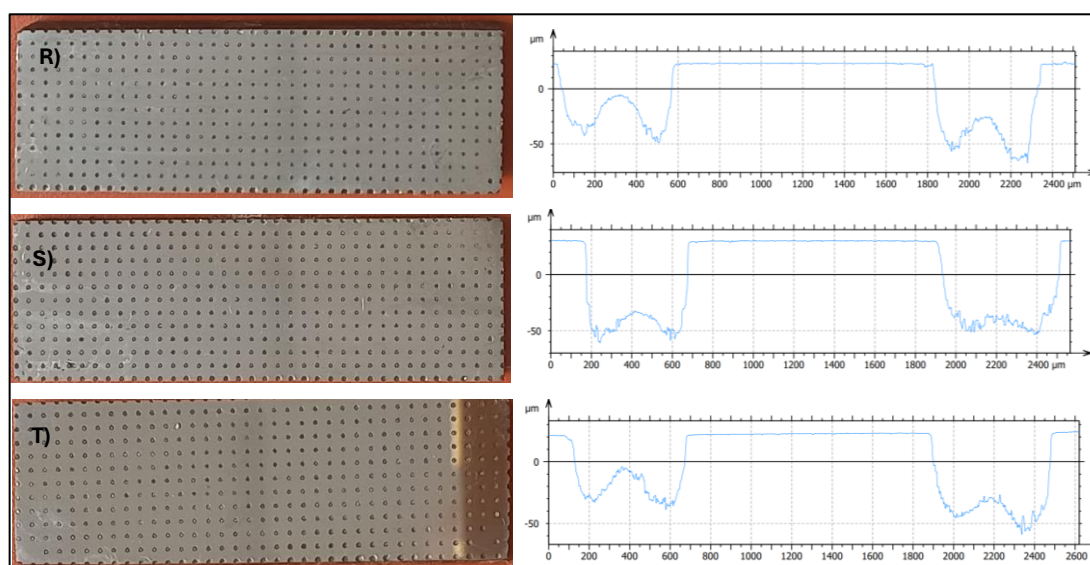
Os resultados dessas repetições corroboraram a tendência observada inicialmente, permitindo verificar a consistência do comportamento elétrico e da resposta morfológica associados à condição selecionada. Na sequência, são apresentados os resultados correspondentes.

4.3.1 IMAGENS MACROSCÓPICAS E PERFIS INTERFEROMÉTRICOS AO LONGO DE TRAÇADO REPRESENTATIVO NAS PEÇAS R,S,T.

As imagens macroscópicas das três novas peças (**R**, **S** e **T**) presentes na Figura 18, evidenciam a formação do padrão de cavidades ao longo da área texturizada, com distribuição visualmente contínua e sem descontinuidades marcantes no campo observado. De modo geral, nota-se repetição espacial do arranjo de bolsos e boa semelhança entre as amostras, o que indica consistência do processo quando aplicada a mesma parametrização da condição E.

Os perfis interferométricos obtidos ao longo de um traçado representativo apresentam comportamento compatível entre as três peças, caracterizado por trechos de “patamar” intercalados por depressões associadas aos bolsos. A presença de vales com profundidades da mesma ordem de grandeza e morfologia semelhante entre R, S e T reforça a reprodutibilidade geométrica das feições geradas, com variações pontuais esperadas entre peças distintas.

Figura 18 - Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo (R-S-T)



Fonte: O Autor

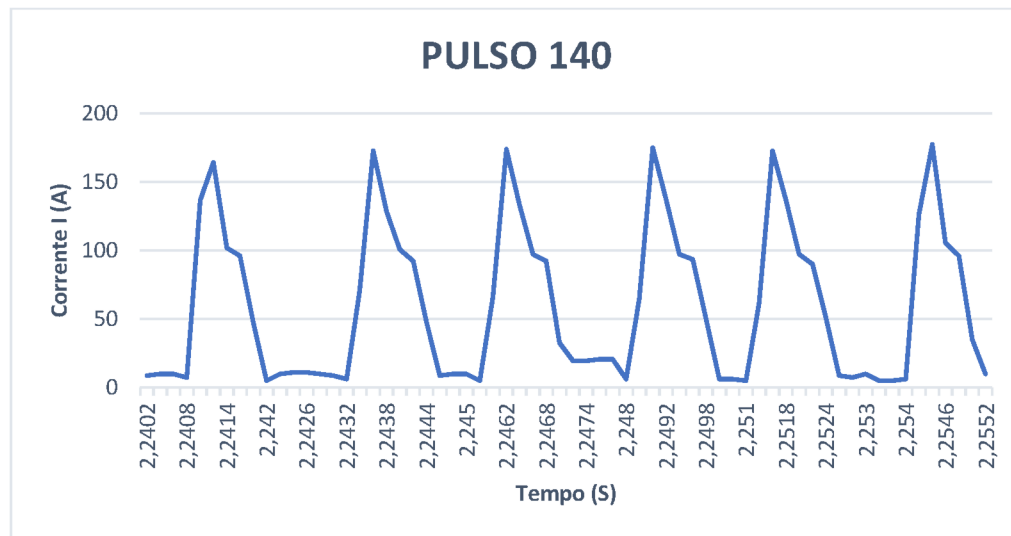
4.3.2 ANÁLISE DOS DADOS ADQUIRIDOS DE TEMPO E CORRENTE.

Nesta seção são apresentados e analisados os dados do corpo S, devido a semelhança dos resultados obtidos em função da repetição dos parâmetros.

O oscilograma referente ao pulso 140 do corpo de prova S (Figura 19) caracteriza um regime pulsado bem definido, com picos de corrente recorrentes e transições consistentes entre os níveis de base e de pico. A repetição da forma de

onda entre ciclos consecutivos indica estabilidade do sinal elétrico intrapulso no intervalo analisado, sem evidência de distorções abruptas ou perda de periodicidade.

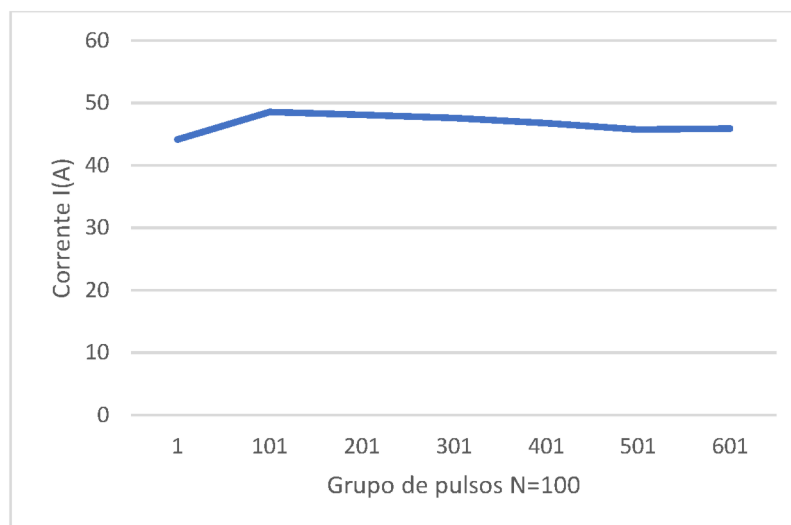
Figura 19-Oscilograma corpo de prova S



Fonte: O Autor

No gráfico de corrente média por grupo de 100 pulsos $N=100$ (Figura 20), observa-se um comportamento global estável, ocorre um aumento discreto no início (fase de acomodação), seguido por manutenção em faixa aproximadamente constante, com leve tendência de redução ao longo dos grupos finais. Em conjunto, os dois gráficos sugerem que, para a peça S, o processo operou com boa estabilidade elétrica e com corrente média global pouco dispersa, condição coerente com um ensaio reproduzível sob os mesmos parâmetros operacionais.

Figura 20-Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova S



Fonte: O Autor

4.3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA POR INTERFEROMETRIA: S_q , S_v , S_z E PROFUNDIDADE MÁXIMA DOS BOLSOS

Os parâmetros interferométricos obtidos para as três peças (Tabela 8) confirmam a proximidade quantitativa entre os resultados. Os valores de S_q são semelhantes ($R = 18,39 \mu\text{m}$, $S = 19,52 \mu\text{m}$, $T = 15,68 \mu\text{m}$), indicando amplitudes de rugosidade da mesma ordem de grandeza, com leve redução em T. De forma análoga, S_v e S_z mantêm-se próximos entre R e S ($R: 88,30 \mu\text{m}$ e $114,0 \mu\text{m}$; $S: 88,54 \mu\text{m}$ e $117,8 \mu\text{m}$), enquanto T apresenta valores menores ($77,44 \mu\text{m}$ e $100,6 \mu\text{m}$), sugerindo menor amplitude topográfica global nessa repetição.

A profundidade máxima dos bolsos também se mantém na faixa ($R = 89,83 \mu\text{m}$, $S = 93,01 \mu\text{m}$, $T = 82,36 \mu\text{m}$), o que reforça a consistência dimensional das cavidades. As distâncias entre bolsos são igualmente próximas (horizontal: $1296\text{--}1183 \mu\text{m}$; vertical: $1221\text{--}1167 \mu\text{m}$), indicando manutenção do espaçamento característico do padrão entre as repetições.

O restante dos resultados relativos à avaliação de reprodutibilidade da condição E, obtidos a partir da confecção e texturização de três novas peças sob os mesmos parâmetros operacionais, incluindo os respectivos oscilogramas e gráficos de corrente média por grupo de pulsos, estão reunidos no Apêndice B, aqui são apresentados os resultados do corpo de prova S.

Tabela 8 - Parâmetros topográficos (S_q , S_v e S_z) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova R-S-T

Amostr as	S_q (μm) (Superf .)	S_v (μm) (Superf .)	S_z (μm) (Superf .)	Profundida de Máxima (μm) (Bolso)	Distância Vertical Máxima(μm) (Bolso)	Distância Horizontal Máxima (μm) (Bolso)	Distânci a entre bolsos horizont al (μm)	Distânci a entre bolsos (vertica l) (μm)
R	18.39	88.30	114.0	89,83	574,9	543,6	1296	1221
S	19.52	88.54	117.8	93,01	626,1	561,3	1218	1215
T	15.68	77.44	100.6	82,36	635	6854,6	1183	1167

Fonte: O Autor

4.4 AÇO FERRAMENTA

Nesta seção apresenta-se a análise dos dados referentes à melhor condição de ensaio obtida (AF3). As demais condições serão apenas apresentadas, sem discussão ou comentários.

4.4.1 PARÂMETROS DE ENSAIO

Os parâmetros iniciais de ensaio foram estabelecidos a partir da definição do período do pulso (t), adotando-se valores de 5 ms e 8 ms. A partir de $t = t_p + t_b$, foram combinados diferentes tempos de pico (t_p) e de base (t_b), o que resultou em variações de frequência, número de ciclos (para o mesmo tempo total de ensaio) e duty cycle, conforme sintetizado na Tabela 9.

Tabela 9-Parâmetros de ensaio

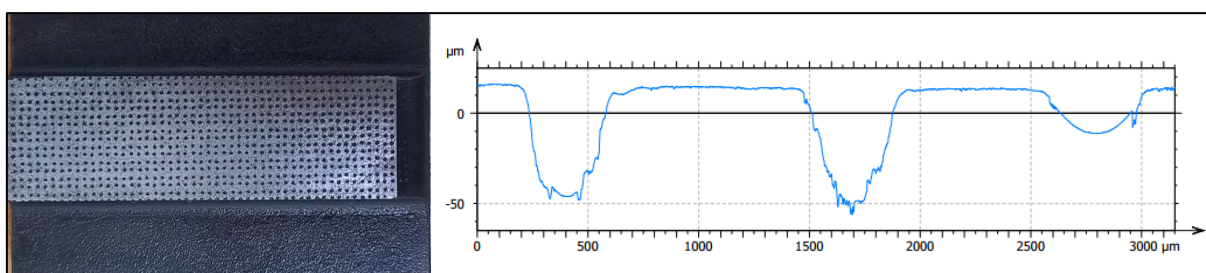
Amostra	$I_p(A)$	$I_b(A)$	$t_p(ms)$	$t_b(ms)$	$I_m(A)$	$U_m(V)$	$Tt(s)$	Duty Cycle(%)	Frequência	N° ciclos
AF1	20	5	1	4	95	20	15	20,00	200,00	3000,00
AF2	20	5	2	3	100	20	15	40,00	200,00	3000,00
AF3	20	5	4	4	91	20	15	50,00	125,00	1875,00
AF3.1	20	5	4	4	100	19,9	15	50,00	125,00	1875,00

Fonte: O Autor

4.4.2 IMAGENS MACROSCÓPICAS E PERFIS INTERFEROMÉTRICOS AO LONGO DE TRAÇADO REPRESENTATIVO NAS PEÇAS AF1, AF3

Na Figura 21 podemos observar a amostra AF3, definida como o melhor resultado, apresenta padrão homogêneo, com cavidades visualmente mais regulares e melhor continuidade do acabamento ao longo da área texturizada, essa tendência é confirmada pelo perfil interferométrico, que exhibe depressões bem definidas e trechos entre cavidades estáveis, indicando maior repetibilidade morfológica na condição analisada.

Figura 21-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo AF3

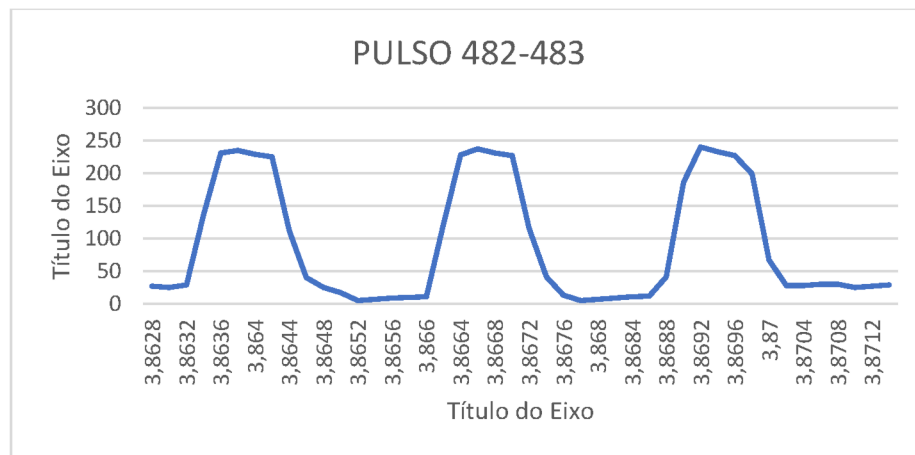


Fonte: O Autor

4.4.3 ANÁLISE DOS DADOS ADQUIRIDOS DE TEMPO E CORRENTE

Com base na análise dos sinais elétricos, observa-se que, para a amostra AF3, o oscilograma referente aos pulsos 482-483, evidencia um regime pulsado bem definido, com picos de corrente recorrentes e forma semelhante entre ciclos consecutivos, indicando estabilidade intrapulso no trecho analisado (Figura 22).

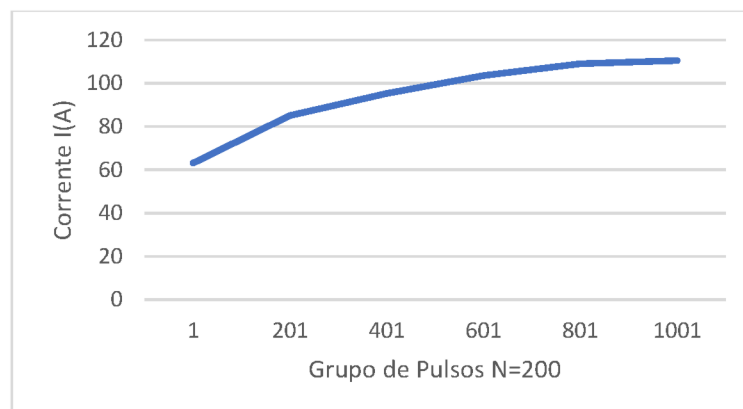
Figura 22-Oscilograma corpo de prova AF3



Fonte: O Autor

Na Figura 23 o gráfico mostra que a corrente $I(A)$ cresce de cerca de 60 A para 110 A entre os grupos de pulsos ($N = 200$), com maior aumento inicial (1–201) e tendência à estabilização nos grupos seguintes (801–1001). Isso indica aproximação de um regime quase estacionário do sistema.

Figura 23-Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AF3



Fonte: O Autor

4.4.4 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA POR INTERFEROMETRIA: SQ, SV, SZ E PROFUNDIDADE MÁXIMA DOS BOLSOS

A Tabela 10 quantifica com clareza as diferenças morfológicas entre as amostras e, ao reunir parâmetros de rugosidade e dimensões dos bolsos, sustenta a classificação da AF3 como a melhor condição no conjunto analisado. A AF3 se destaca por apresentar valores intermediários e bem controlados ($S_q = 11,91 \mu\text{m}$, $S_v = 80,18 \mu\text{m}$, $S_z = 88,46 \mu\text{m}$ e profundidade máxima de $75,11 \mu\text{m}$), indicando menor amplitude topográfica e tendência a um padrão mais uniforme. Além disso, os bolsos apresentam dimensões máximas de $455,3 \mu\text{m}$ (vertical) e $508,6 \mu\text{m}$ (horizontal), com espaçamento vertical de $584,9 \mu\text{m}$, o que favorece melhor separação entre os bolsos e maior regularidade do arranjo.

Tabela 10-Parâmetros topográficos (S_q , S_v e S_z) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova AF1, AF2, AF3 e AF3.1

Testes	S_q (um) (Superf.)	S_v (um) (Superf.)	S_z (um) (Superf.)	Profundidade Máxima (um) (Bolso)	Distância Vertical Máxima(um) (Bolso)	Distância Horizontal Máxima (um) (Bolso)	Distância entre bolsos horizontal (um)	Distância entre bolsos (vertical) (um)
AF1	18.81	121.8	135.8	105,1	672,4	620,9	786,1	432,5
AF3	11.91	80.18	88.46	75,11	455,3	508,6	834,8	584,9
AF3.1	13.09	65.22	78.15	60,47	535,5	563,8	740,7	552,2
AF2	10.61	64.47	79.77	53,98	540,8	606,8	753,7	746,3

Fonte: O Autor

4.5 AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO

Nesta seção apresenta-se a análise dos dados referentes à melhor condição de ensaio obtida (AIM2.1). As demais condições serão apenas apresentadas, sem discussão ou comentários.

4.5.1 PARÂMETROS DE ENSAIO

Os parâmetros de ensaio apresentados na Tabela 11 foram definidos mantendo-se constantes a corrente de pico ($I_p = 20 \text{ A}$), a corrente de base ($I_b = 10 \text{ A}$), a tensão média e o tempo total de ensaio ($T_t = 15 \text{ s}$), de modo que o efeito principal avaliado estivesse associado à variação dos tempos do pulso.

A partir da relação $t = t_p + t_b$, foram estabelecidas combinações de tempo de pico (t_p) e tempo de base/repouso (t_b) que modificam o duty cycle (16,67% a 50%),

permitindo investigar a influência da fração de tempo em pico sobre o comportamento do processo. Como consequência da escolha de t , a frequência permaneceu equivalente entre as condições (166,67 Hz) e, para o mesmo tempo total, o número de ciclos foi mantido constante, assegurando comparabilidade direta entre os testes.

Tabela 11-Parâmetros de ensaio

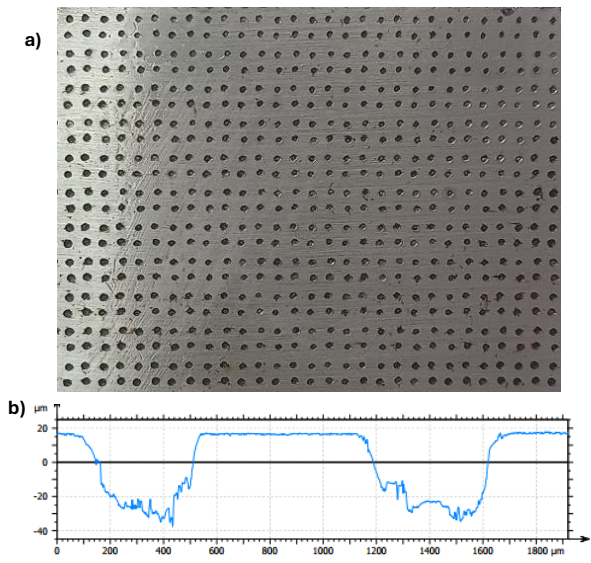
Amostra	$I_p(A)$	$I_b(A)$	$t_p(ms)$	$t_b(ms)$	$I_m(A)$	$U_m(V)$	$T_t(s)$	Duty Cycle(%)	Frequência	N° ciclos	Fator pulso (I_p/I_b)
AIM1	20	10	1	5	37	20,5	15	16,67	166,67	2500,00	2,00
AIM2	20	10	2	4	37	21,4	15	33,33	166,67	2500,00	2,00
AIM2.1	20	10	2	4	37	21,4	15	33,33	166,67	2500,00	2,00
AIM3	20	10	3	3	24	17	15	50,00	166,67	2500,00	2,00

Fonte: O Autor

4.5.2 IMAGENS MACROSCÓPICAS E PERFIS INTERFEROMÉTRICOS AO LONGO DE TRAÇADO REPRESENTATIVO NAS PEÇAS AIM2.1

A condição AIM2.1, definida como o melhor resultado, apresenta na imagem macroscópica (Figura 24a) um padrão homogêneo e contínuo, com melhor regularidade na distribuição das cavidades na área analisada. O perfil interferométrico correspondente (Figura 24b) evidencia depressões mais bem definidas e trechos entre cavidades relativamente mais estáveis, indicando maior repetibilidade geométrica do processo e melhor controle da remoção eletroquímica ao longo do traçado.

Figura 24-Imagens macroscópicas e perfis interferométricos ao longo de traçado representativo AIM2.1

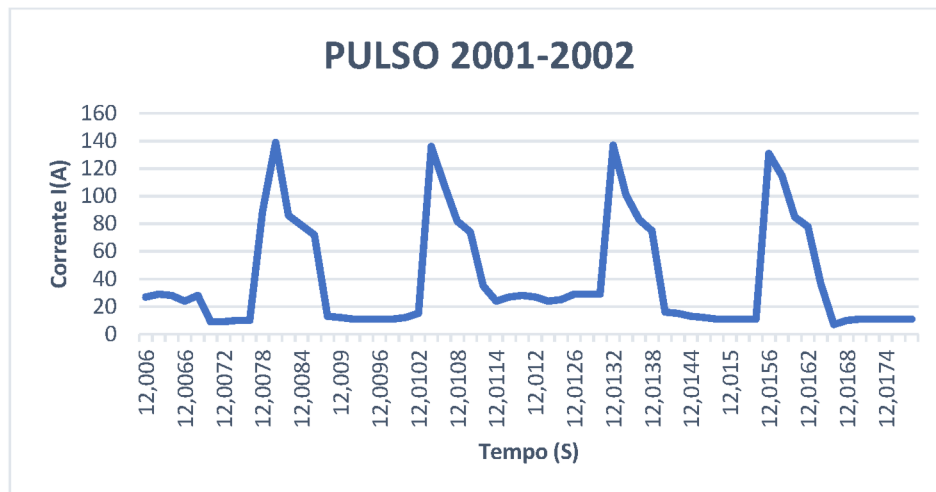


Fonte: O Autor

4.5.3 ANÁLISE DOS DADOS ADQUIRIDOS DE TEMPO E CORRENTE

O oscilograma da condição AIM2.1, (Figura 25) evidencia pulsos com maior repetibilidade de forma e transições mais consistentes entre os níveis de base e pico, indicando melhor estabilidade intrapulso no trecho avaliado

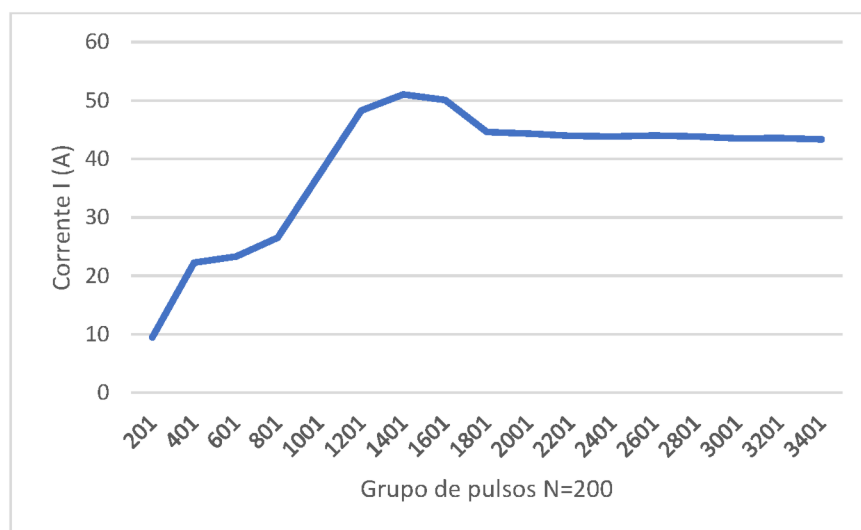
Figura 25-Oscilograma corpo de prova AIM2.1



Fonte: O Autor

No gráfico de corrente média por grupo (Figura 26), observa-se aumento inicial mais acentuado até um patamar, seguido por estabilização e leve tendência de redução/constância nos grupos subsequentes, o que sugere que o processo atingiu um regime mais controlado após o transiente inicial.

Figura 26-Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AIM2.1



Fonte: O Autor

Em conjunto, os resultados indicam que AIM2.1 apresenta comportamento elétrico mais consistente e estabilização mais clara da corrente média ao longo do ensaio.

4.5.4 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA POR INTERFEROMETRIA: SQ, SV, SZ E PROFUNDIDADE MÁXIMA DOS BOLSOS

A Tabela 12 reúne os parâmetros topográficos areais S_q , S_v , S_z e a profundidade máxima do bolso, obtidos por interferometria para as condições AIM1, AIM2, AIM2.1 e AIM3, permitindo comparar a amplitude da topografia gerada e a intensidade de remoção associada às diferentes condições de texturização.

A condição AIM2.1 apresenta os menores valores de profundidade e uma das menores amplitudes do conjunto: $S_q = 12,45 \mu m$, $S_v = 68,11 \mu m$, $S_z = 82,68 \mu m$ e profundidade máxima de $62,8 \mu m$. Esses resultados indicam redução dos extremos topográficos e vales menos acentuados, compatível com uma texturização mais estável e uniforme do ponto de vista morfológico.

Tabela 12-Parâmetros topográficos (S_q , S_v e S_z) e métricas geométricas dos bolsos obtidos por interferometria para os corpos de prova AIM1, AIM2, AIM2.1 e AIM3

Amostras	S_q (um) (Superf.)	S_v (um) (Superf.)	S_z (um) (Superf.)	Profundidade Máxima (um) (Bolso)	Distância Vertical Máxima(um) (Bolso)	Distância Horizontal Máxima (um) (Bolso)	Distância entre bolsos horizontal (um)	Distância entre bolsos (vertical) (um)
AIM1	17.31	98.00	112.5	94,08	477	404	868	697
AIM2	14.56	76.80	89.62	67,35	557,8	454,8	777,8	869,2
AIM2.1	12.45	68.11	82.68	62,8	584,3	568,2	807	565
AIM3	11.57	66.78	77.80	64,08	488,6	403,5	788,9	658,9

Fonte: O Autor

4.6 DISCUSSÃO GERAL E PROPOSIÇÃO DA JANELA OPERACIONAL

Nesta seção apresenta-se uma discussão geral dos resultados obtidos para os três materiais, à luz da literatura, e propõe-se a janela operacional recomendada para cada liga. Para discutir a janela operacional proposta com base na literatura, os parâmetros do pulso foram interpretados em termos de frequência e ciclo de trabalho, a partir de $T = t_p + t_b$, $f = \frac{1}{T}$ e $D = t_p / (t_p + t_b)$. Essa padronização permite comparar os “melhores casos” de cada material com tendências reportadas em estudos de

texturização eletroquímica por ferramenta/máscara, como McCrabb *et al.* (2009), e com resultados experimentais sistemáticos de Kunar e Bhattacharyya (2018).

Em Kunar e Bhattacharyya (2018), o aumento do ciclo de trabalho eleva o sobrecorte, a profundidade e a rugosidade, pois a dissolução passa a ocorrer de forma menos controlada quando o tempo ligado supera o tempo desligado; ao contrário, em ciclo de trabalho menor, os autores destacam que os produtos reativos são removidos com mais facilidade devido ao maior tempo desligado, melhorando a localização do processo e a precisão geométrica.

Isso dialoga diretamente com o princípio discutido por McCrabb *et al.* (2009) sobre a função do tempo desligado na estabilidade do processo. No presente trabalho, esse racional sustenta (i) o aço carbono, cuja melhor condição ocorre com ciclo de trabalho reduzido (Peça E; $t_p = 1\text{ms}$ e $t_b = 15\text{ms} \rightarrow D \approx 6,25\%$), privilegiando o relaxamento do sistema eletroquímico entre pulsos, e (ii) o inox martensítico, em que se adotou I_b mais elevado para manter a interface ativa entre ciclos (AIM2.1), reduzindo sensibilidade a interrupções do regime.

Ainda segundo Kunar e Bhattacharyya (2018), a frequência de pulso influencia a qualidade, ao elevar a frequência (2–5 kHz), observou-se redução do sobrecorte e melhoria da precisão, atribuída a uma dissolução mais controlada e à redução de efeitos de corrente dispersa; além disso, a rugosidade diminui no intervalo de 2–5 kHz.

Embora o presente trabalho opere em outra ordem de grandeza de frequência mais elevada, a tendência reportada (maior controle eletroquímico quando o pulso evita tempos ativos longos) dá suporte qualitativo à escolha de janelas estreitas e ao cuidado em não elevar excessivamente o ciclo de trabalho. Na mesma linha, os autores enfatizam que ciclos de trabalho muito altos deterioram a forma e a precisão, enquanto ciclos muito baixos podem prejudicar a formação do padrão, indicando a existência de uma faixa ótima.

Assim, a janela operacional apresentada (Tabela 13) foi definida a partir das condições de melhor desempenho observadas no conjunto de ensaios realizados até o momento para cada material. O critério de seleção considerou, de forma integrada:

(i) a qualidade morfológica do padrão texturizado, avaliada por inspeção macroscópica e pelos perfis interferométricos;

(ii) a estabilidade do comportamento elétrico durante o processo, verificada por meio dos oscilogramas de corrente em função do tempo e da evolução da corrente média por grupos de pulsos;

(iii) os parâmetros topográficos de área obtidos por interferometria (como S_q , S_v e S_z), com ênfase na obtenção de feições bem definidas e com topografia controlada.

Dessa forma, os valores de I_p , I_b , t_p e t_b da condição de referência foram utilizados como ponto central, e uma faixa estreita em torno desses parâmetros foi proposta como janela recomendada, visando orientar novos ensaios e o refinamento progressivo do processo.

Com os resultados apresentados e discutidos neste capítulo, foi possível estabelecer uma relação consistente entre os parâmetros elétricos adotados, o comportamento do sinal de corrente (oscilogramas e corrente média por grupos de pulsos) e a resposta morfológica das superfícies texturizadas, verificada por inspeção macroscópica e interferometria. A partir dessa análise integrada, identificaram-se as condições de melhor e pior desempenho para cada material e propôs-se uma janela operacional baseada nos melhores resultados obtidos até o momento, incluindo a verificação de reprodutibilidade para a condição selecionada.

Tabela 13-Janela operacional proposta

Material	Condição de referência (melhor caso)	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	Janela operacional recomendada*	S_q	S_v	S_z
Aço carbono	Peça E	20	5	1	15	(I_p) : 20 A (I_b) : 5 A (t_p) : 1 – 2 ms (t_b) : 14 – 15 ms	15,68 18,39	66,84 88,54	117,8 100,6
Aço ferramenta	AF3	20	5	4	4	(I_p) : 20 A (I_b) : 5 A (t_p) : 3 – 5 ms (t_b) : 3 – 5 ms	11.91 13.09	64.47 65.22	78.15 79.77
Aço inoxidável martensítico	AIM2.1	20	10	1	5	(I_p) : 20 A (I_b) : 10 A (t_p) : 1 – 2 ms (t_b) : 4 – 6 ms	14.56 12.45	68.11 76.80	82.68 89.62

Fonte: O Autor

Na sequência, o capítulo de Conclusões sintetiza os principais achados do trabalho, destacando as contribuições obtidas, as limitações observadas e as recomendações para etapas futuras de investigação e refinamento do processo.

5. CONCLUSÕES

- I. O trabalho confirmou a pertinência de empregar corrente pulsada (PECM) como estratégia de controle do processo, ao permitir uma comparação direta com a condição de corrente contínua (ECM convencional) e evidenciar diferenças de desempenho associadas ao modo de fornecimento de energia elétrica.
- II. A análise sistemática dos parâmetros elétricos da corrente pulsada (tempo de pulso/repouso, frequência e duty cycle) mostrou-se decisiva para o comportamento do processo, pois esses parâmetros governam a alternância entre dissolução anódica e etapa de renovação do eletrólito/remoção de subprodutos no GAP, refletindo em estabilidade e repetibilidade do resultado.
- III. A caracterização topográfica via interferometria, sintetizada pelos parâmetros Sv, Sq e Sz, foi adequada para discriminar condições de texturização, permitindo comparar, de forma quantitativa, a dispersão da rugosidade (Sq), a profundidade de vales (Sv) e a altura total (Sz) como resposta aos ajustes de corrente pulsada.
- IV. Do ponto de vista de produtividade, o principal avanço foi a redução expressiva do tempo de usinagem/texturização: enquanto trabalhos reportam tempos na ordem de minutos (por exemplo, 1–5 min em condições típicas de MECT/ECM, neste estudo foi possível reduzir o tempo para aproximadamente 10–15 s, mantendo o objetivo de produzir texturas em aço carbono, aço ferramenta e aço inoxidável martensítico com foco em qualidade e fidelidade.
- V. A proposta de um conjunto de parâmetros e de uma janela operacional mostrou-se viável como entrega tecnológica do trabalho, pois organiza as condições capazes de equilibrar produtividade, qualidade superficial e precisão dimensional para diferentes classes de aços, dentro do escopo experimental adotado.
- VI. Os objetivos do estudo foram atingidos no escopo definido, contemplando a comparação entre ECM e PECM, a análise da influência de Tp, Tb, frequência e duty cycle nas respostas do processo e a proposição de uma janela operacional. As condições de eletrólito foram mantidas com temperatura constante e não foram realizados ensaios específicos de corrosão; assim, as conclusões se fundamentam nas respostas dimensionais e na caracterização topográfica/superficial (Sq, Sv e Sz).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar a validação da janela operacional: repetir ensaios nas condições “ótimas” para cada material (SAE 1020, V800 e inox martensítico) com maior número de réplicas, quantificando repetibilidade (média, desvio-padrão) de S_q , S_v e S_z e da fidelidade dimensional.
- Expandir a faixa de parâmetros elétricos: além de T_p/T_b /frequência/duty cycle, investigar sistematicamente corrente de pico (I_p) e, se aplicável, corrente de base (I_b), incluindo diferentes níveis de energia por pulso e regimes de duty cycle extremos para mapear limites de estabilidade.
- Incluir avaliação de estabilidade do processo em tempo real: correlacionar os registros de corrente/tensão com a formação de textura e com eventos de instabilidade (ex.: oscilações, tendência a curto), definindo critérios quantitativos para “regime estável” durante a texturização.
- Avaliar a influência da hidrodinâmica do eletrólito: estudar efeito de vazão, pressão, geometria de entrada/saída e direção do fluxo, pois isso impacta remoção de subprodutos e renovação do eletrólito no GAP, afetando diretamente S_v e S_z .
- Investigar diferentes eletrólitos e concentrações: comparar sistemas (ex.: cloretos vs nitratos, quando compatível com segurança e disponibilidade) e faixas de concentração, visando reduzir defeitos (pites/rebarbas eletroquímicas) e melhorar uniformidade topográfica.
- Ensaios funcionais ligados à aplicação: realizar testes de tribologia (atrito e desgaste) e/ou de molhabilidade, correlacionando desempenho funcional com S_q , S_v e S_z , para justificar tecnicamente a escolha da textura.
- Escalonamento e aplicação industrial: testar áreas maiores e geometrias mais complexas, verificando se o ganho de produtividade observado (10–15 s) se mantém ao aumentar área texturizada e ao operar por ciclos mais longos e outras formas de mascaramento.

7. REFERÊNCIAS

AGRAWAL, D.; KAMBLE, D. Effect and optimization of photochemical machining process parameters for manufacturing array of micro-hole. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 4, 2019. DOI: 10.1007/s40430-019-1678-y.

ARUMUGAPRABU, V. *et al.* A brief review on importance of surface texturing in materials to improve tribological performance. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 53, n. 1, p. 40-48, 2018. DOI: 10.1515/rams-2018-0003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 87:2010: aço carbono e ligados para construção mecânica — designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20809/abnt-nbrnm87-aco-carbono-e-ligados-para-construcao-mecanica-designacao-e-composicao-quimica>. Acesso em: 23 jan. 2026.

ATLAS STEELS. Atlas Quality Management Scope: National Doc: Information Notice Stainless Steel 420 Grade Data Sheet. 2020. Disponível em: <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/06/Stainless-Steel-420-Grade-Data-Sheet-28-04-21.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2026.

BRUZZONE, A. A. G. *et al.* Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals**, v. 57, n. 2, p. 750-769, 2008. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.003.

CHEN, W.; HAN, F.; WANG, J. Influence of pulse waveform on machining accuracy in electrochemical machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1-4, p. 1367-1375, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-1594-9.

CHEN, Z. *et al.* A short review on functionalized metallic surfaces by ultrafast laser micromachining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 11-12, p. 6919-6948, 2022. DOI: 10.1007/s00170-021-08560-8.

CIULLI, E. Vastness of tribology research fields and their contribution to sustainable development. **Lubricants**, v. 12, n. 2, p. 33, 2024. DOI: 10.3390/lubricants12020033.

COSTA, H. L. *et al.* Optimizing the surface of manufactured components for friction, adhesion, and convective heat transfer. **MRS Bulletin**, v. 47, n. 12, p. 1247-1259, 2022. DOI: 10.1557/s43577-022-00467-3.

DHARMADHIKARI, S. *et al.* Micro-fabrication of textured surfaces using wire-mesh electrode in reverse μ EDM. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 18, n. 10, p. 6939-6952, 2024. DOI: 10.1007/s12008-023-01203-0.

DIAS, L. C. *et al.* ZDDP tribofilm formation from a formulated oil on textured cylinder liners. **Lubricants**, v. 10, n. 6, 2022. DOI: 10.3390/lubricants10060118.

DOHDA, K. *et al.* Tribology in metal forming at elevated temperatures. **Friction**, v. 3, n. 1, p. 1-27, 2015. DOI: 10.1007/s40544-015-0077-3.

EVIN, E.; TOMÁŠ, M.; KMEC, J. Optimization of electro-discharge texturing parameters for steel sheets' finishing rollers. **Materials**, v. 13, n. 5, 2020. DOI: 10.3390/ma13051223.

GARCIA-FERNANDEZ, J. *et al.* Laser surface texturing of cutting tools for improving the machining of Ti6Al4V: a review. **Metals**, v. 14, n. 12, p. 1422, 2024. DOI: 10.3390/met14121422.

GE, Z. *et al.* Study on improving electrochemical machining performances through energy conversion of electrolyte fluid. **Coatings**, v. 14, n. 4, 2024. DOI: 10.3390/coatings14040406.

GRÜTZMACHER, P. G.; PROFITO, F. J.; ROSENKRANZ, A. *Multi-Scale Surface Texturing in Tribology: Current Knowledge and Future Perspectives*. **Lubricants**, v. 7, n. 11, 95, 2019. DOI: 10.3390/lubricants7110095.

HOLMBERG, K. *et al.* Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. **Tribology International**, v. 115, p. 116-139, 2017. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.

HYNES, N. R. J.; KUMAR, R. *Electrochemical Machining of Aluminium Metal Matrix Composites*. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**, v. 54, n. 4, 2018. DOI: 10.3103/S1068375518040087.

IBATAN, T.; UDDIN, M. S.; CHOWDHURY, M. A. K. *Recent Development on Surface Texturing in Enhancing Tribological Performance of Bearing Sliders*. **Surface and Coatings Technology**, v. 272, 2015. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.017.

INTERNATIONAL STAINLESS-STEEL FORUM. ISSF martensitic stainless steels. 2021. Disponível em: https://worldstainless.org/wp-content/uploads/2021/08/ISSF_Martensitic_Stainless_Steels.pdf. Acesso em: 19 jan. 2026.

ISLAM, M. J. *et al.* Material wear of the tool electrode and metal workpiece in electrochemical discharge machining. **Wear**, v. 500-501, 204346, 2022. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204346.

KAR, S.; KULKARNI, S. D. Surface texturing through photochemical machining for enhanced tribological performance: a review. **Journal of Tribology**, 2026. DOI: 10.1115/1.4069558.

KENDALL, T. *et al.* A review of physical experimental research in jet electrochemical machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 1-4, p. 651-667, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-04099-x.

KOZAK, J.; RAJURKAR, K. P.; MAKKAR, Y. Selected Problems of Micro-Electrochemical Machining. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 426-431, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.031.

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Electrochemical microsurface texturing with reusable masked patterned tool. **Engineering Science and Technology, an**

International Journal, v. 21, n. 5, p. 1095–1103, 2018. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.08.001.

KUMAR, A. *et al.* Surface texturing by electrochemical micromachining: a review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 804, n. 1, 012011, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/804/1/012011.

KUNAR, S. *et al.* Fabrication of array of micro circular impressions using different electrolytes by maskless electrochemical micromachining. **Manufacturing Review**, v. 7, 2020. DOI: 10.1051/mfreview/2020012.

KUNAR, S. Optimization of maskless electrochemical microtexturing. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, p. 10493-10507, 2025. DOI: 10.15282/jmes.19.1.2025.5.0822.

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Electrochemical micromachining of micro square pattern using reusable masked tool. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 5, p. 487-493, 2019. DOI: 10.1080/10426914.2018.1532582.

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Electrochemical microsurface texturing with reusable masked patterned tool. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, n. 5, p. 1095-1103, 2018. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.08.001.

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Fabrication of cascade micropattern by maskless electrochemical micromachining. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 22, n. 3-4, p. 233-247, 2020. DOI: 10.1504/IJMMM.2020.107054.

KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Fabrication of various micropatterns by maskless micro-electrochemical texturing. **Manufacturing Review**, v. 6, 2019. DOI: 10.1051/mfreview/2019006.

KUNAR, S.; MAHATA, S.; BHATTACHARYYA, B. Influence of electrolytes on surface texture characteristics generated by electrochemical micromachining. **Journal of Micromanufacturing**, v. 1, n. 2, p. 124-133, 2018. DOI: 10.1177/2516598418765355.

LI, G. *et al.* Mechanism of multi-physical fields coupling in macro-area processing via laser–electrochemical hybrid machining (LECM). **Metals**, v. 14, n. 12, 2024. DOI: 10.3390/met14121390.

LIN, Z.; HONG, M. Femtosecond laser precision engineering: from micron, submicron, to nanoscale. **Ultrafast Science**, 2021. DOI: 10.34133/2021/9783514.

LIU, G. *et al.* Electrochemical dissolution behavior of stainless steels with different metallographic phases and its effects on micro electrochemical machining performance. **Electrochemistry Communications**, v. 160, 107677, 2024. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107677.

LIU, G.; ZHANG, Y.; NATSU, W. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool. **International Journal of**

Machine Tools and Manufacture, v. 142, p. 66-75, 2019. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.04.010.

LUZ, F. K. C. *et al.* Deterministic simulation of surface textures for the piston ring/cylinder liner system in a free piston linear engine. **Lubricants**, v. 12, n. 1, 2024. DOI: 10.3390/lubricants12010012.

MAHATA, S.; BHATTACHARYYA, B. Experimental investigation into micro-textured surface generation by through-mask electrochemical micromachining. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**, v. 56, n. 4, p. 440-452, 2020. DOI: 10.3103/S1068375520040092.

MAHATA, S.; KUNAR, S.; BHATTACHARYYA, B. Fabrication of different micro patterned arrays by through mask electrochemical micromachining. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 166, n. 8, p. E217-E225, 2019. DOI: 10.1149/2.0131908jes.

MALAPATI, M.; BHATTACHARYYA, B. Investigation into electrochemical micromachining process during micro-channel generation. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 26, n. 8, p. 1019-1027, 2011. DOI: 10.1080/10426914.2010.525575.

MANKEEKAR, T. *et al.* Fabrication of micro-structured tools for the production of curved metal surfaces by pulsed electrochemical machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 5-6, p. 2825-2833, 2022. DOI: 10.1007/s00170-021-08146-4.

MARTINEZ-DUARTE, R. SU-8 photolithography as a toolbox for carbon MEMS. **Micromachines**, v. 5, n. 3, p. 766-782, 2014. DOI: 10.3390/mi5030766.

MCCRABB, H.; LOZANO-MORALES, A.; SNYDER, S.; GEBHART, L.; TAYLOR, E. J. Through mask electrochemical machining. **ECS Transactions**, v. 19, n. 26, p. 19–33, 2009. DOI: 10.1149/1.3247988.

MEICHSNER, G. *et al.* Fast determination of the material removal characteristics in pulsed electrochemical machining. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 123-126, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.175.

MELLO, J. D. B. DE; COSTA, H. L. Brazilian tribology: origin, status quo and future perspectives. **Surface Topography: Metrology and Properties**, 030201, 2023. DOI: 10.1088/2051-672X/ace83e.

MING, P. *et al.* Investigation of foamed cathode through-mask electrochemical micromachining developed for uniform texturing on metallic cylindrical surface. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9-12, p. 3043-3056, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-1755-x.

MOSKAL, D.; MARTAN, J.; HONNER, M. Scanning strategies in laser surface texturing: a review. **Micromachines**, 2023. DOI: 10.3390/mi14061241.

PAINULY, M.; SINGH, R. P.; TREHAN, R. *Electrochemical Machining and Allied Processes: A Comprehensive Review. Journal of Solid State Electrochemistry*, p. 3189-3256, 2023. DOI: 10.1007/s10008-023-05610-x.

PANDEY, A. K. S.; SAROJ, A.; SRIVASTAVA, A. *Process Parameter Optimization of Abrasive Jet, Ultrasonic, Laser Beam, Electrochemical, and Plasma Arc Machining Processes Using Optimization Techniques: A Review. SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, v. 16, n. 3, 2023. DOI: 10.4271/05-16-03-0018.

PARREIRA, J. G.; GALLO, C. A.; COSTA, H. L. *New Advances on Maskless Electrochemical Texturing (MECT) for Tribological Purposes. Surface and Coatings Technology*, v. 212, p. 1-13, 2012. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.08.043.

PATEL, D.; JAIN, V. K.; RAMKUMAR, J. *Micro Texturing on Metallic Surfaces: State of the Art. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, p. 941-964, 2018. DOI: 10.1177/0954405416661583.

PATIL, S. R.; CHAPGAON, A. N. *Review of Process Parameter Optimization of Photochemical Machining. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 6, n. 6, p. 2990-2993, jun. 2019. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V6/i6/IRJET-V6I6607.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

PETERMANN, R. *et al.* Method for the characterisation of the material removal in modulated pulsed electrochemical machining. *Procedia CIRP*, p. 134-139, 2025. DOI: 10.1016/j.procir.2025.01.110.

QIN, G.; LI, M. *et al.* Electrochemical machining process for micropit arrays using a rolling device with a linear cathode and a soft mask. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 131, n. 5-6, p. 2653-2665, 2024. DOI: 10.1007/s00170-023-11968-z.

QIN, G.; PENG, H. *et al.* Hard particle mask electrochemical machining of micro-textures. *Materials*, v. 17, n. 20, 2024. DOI: 10.3390/ma17204986.

QUERO, J. M.; PERDIGONES, F.; ARACIL, C. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications. In: SMART sensors and MEMs. *Woodhead Publishing*, 2018. p. 291-311. DOI: 10.1016/B978-0-08-102055-5.00011-5.

RAJURKAR, K. P.; SUNDARAM, M. M.; MALSHE, A. P. *Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. Procedia CIRP*, p. 13-26, 2013. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.

ROBERGE, P. R. *Corrosion engineering: principles and practice*. New York: McGraw-Hill, 2008.

RODRIGUES, T. A. *et al.* Roughness analysis of electrochemically textured surfaces: effects on friction and wear of lubricated contacts. *Surface Topography: Metrology and Properties*, v. 8, n. 2, 024011, 2020. DOI: 10.1088/2051-672X/ab96da.

ROLLED ALLOYS. 420_DS_USA. 2026. Disponível em: https://www.rolledalloys.com/wp-content/uploads/420_DS_USA.pdf. Acesso em: 19 jan. 2026.

ROSENKRANZ, A. *et al.* Surface texturing in machine elements: a critical discussion for rolling and sliding contacts. **Advanced Engineering Materials**, 2019. DOI: 10.1002/adem.201900194.

SASAKI, S. Advances in tribology driven by surface science. **E-journal of Surface Science and Nanotechnology**, v. 21, n. 2, 2023. DOI: 10.1380/ejssnt.2023-036.

SATHISH, T. Experimental investigation of machined hole and optimization of machining parameters using electrochemical machining. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4354-4363, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.07.046.

SCHMID, S. R. Schey's tribology in metalworking: friction, lubrication, and wear. **Materials** Park, OH: ASM International, 2023.

SHAH, R. *et al.* Green tribology. **Tribology in Industry**, v. 42, n. 4, 2020. DOI: 10.24874/ti.987.10.20.11.

SILVA, L. R. R. DA; COSTA, H. L. Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing. **Wear**, v. 376-377, p. 1601-1610, 2017. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.028.

SINGH, T.; MISHRA, D. K.; DIXIT, P. Effect of Pulse Frequency and Duty Cycle on Electrochemical Dissolution Behavior of Multi-Tip Array Tool Electrode for Reusability in the ECDM Process. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 52, n. 4, p. 667-682, 2022. DOI: 10.1007/s10800-021-01662-x.

SINGH PATEL, D. *et al.* Micro-texturing on free-form surfaces using flexible-electrode through-mask electrochemical micromachining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 282, 116644, 2020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116644.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. Engineering tribology. 4. ed. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.

SUN, Y. *et al.* Through-mask electrochemical micromachining of micro pillar arrays on aluminum. **Surface and Coatings Technology**, v. 401, 126277, 2020. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126277.

TCHOUPÉ SAMBOU, E. *et al.* Investigating workpiece deflection in precise electrochemical machining of turbine blades. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 8, n. 4, 2024. DOI: 10.3390/jmmp8040138.

TONG, W.; LI, L. Analysis of flow field and machining parameters in RUREMM for high-precision micro-texture fabrication on SS304 surfaces. **Processes**, v. 13, n. 8, 2025. DOI: 10.3390/pr13082326.

VILLARES METALS S/A. VF800AT/ATIM: aço para trabalho a frio. 2022. Disponível em:

https://www.villaresmetals.com.br/app/uploads/sites/189/2025/05/VF800AT_ATIM_P T.pdf. Acesso em: 19 jan. 2026.

VISHNOI, M.; KUMAR, P.; MURTAZA, Q. Surface texturing techniques to enhance tribological performance: a review. **Surfaces and Interfaces**, 2021. DOI: 10.1016/j.surf.2021.101463.

WALI, A. *et al.* Micro structuring tool steel components using precise electrochemical machining (PECM). **Production Engineering**, v. 17, n. 3-4, p. 473-481, 2023. DOI: 10.1007/s11740-022-01167-2.

WANG, H. *et al.* Wear properties of textured lubricant films filled with graphite and polytetrafluoroethylene (PTFE) via laser surface texturing (LST). **Tribology International**, v. 167, 2022. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107414.

WANG, T.-Y.; CHEN, C.-H.; DU, C.-H. Formation of a honeycomb texture for silicon-based solar cells using a mask-less process. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, v. 2, n. 7, p. P321-P323, 2013. DOI: 10.1149/2.017307jss.

WANG, Y. *et al.* Research progress of electrochemical machining technology in surface processing: a review. **Micromachines**, v. 16, n. 10, p. 1174, 2025. DOI: 10.3390/mi16101174.

WANG, Z.; YE, R.; XIANG, J. The performance of textured surface in friction reducing: a review. **Tribology International**, v. 177, 2023. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.108010.

WANGIKAR, S. S.; PATOWARI, P. K.; MISRA, R. D. Parametric Optimization for Photochemical Machining of Copper Using Overall Evaluation Criteria. **Materials Today: Proceedings**, p. 4736-4742, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.046.

WEI, H. *et al.* Formation of porous hydrophobic stainless steel surfaces by maskless electrochemical machining. **Surface Engineering**, v. 32, n. 2, p. 132-138, 2016. DOI: 10.1179/1743294415Y.0000000084.

WOLYNEC, S. Técnicas eletroquímicas em corrosão. São Paulo: Edusp, 2003.

WOYDT, M. Material efficiency through wear protection: the contribution of tribology for reducing CO₂ emissions. **Wear**, v. 488-489, 204134, 2022. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204134.

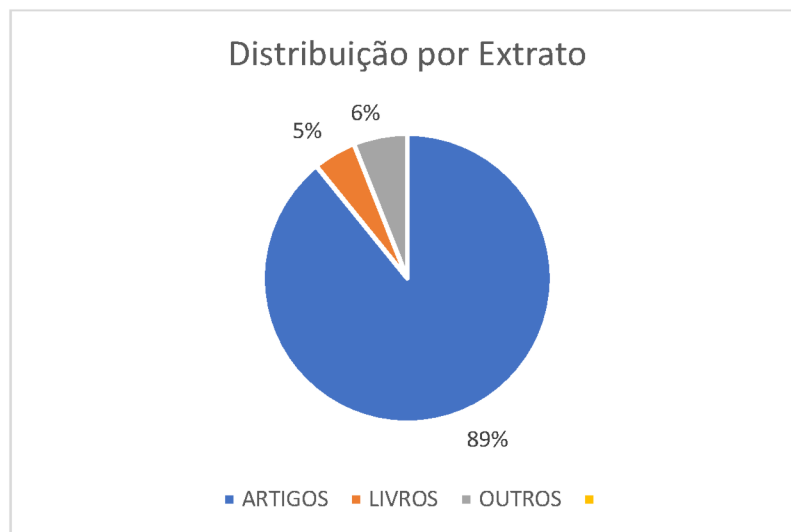
YIN, N. *et al.* AI for tribology: present and future. **Friction**, v. 12, n. 6, p. 1060-1097, 2024. DOI: 10.1007/s40544-024-0879-2.

ZHANG, Q.; NATSU, W.; LUO, H. Realization of high-precision electrochemical machining by active use of hydrogen bubbles generated in non-machining area. **Precision Engineering**, v. 91, p. 59-76, 2024. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2024.09.007.

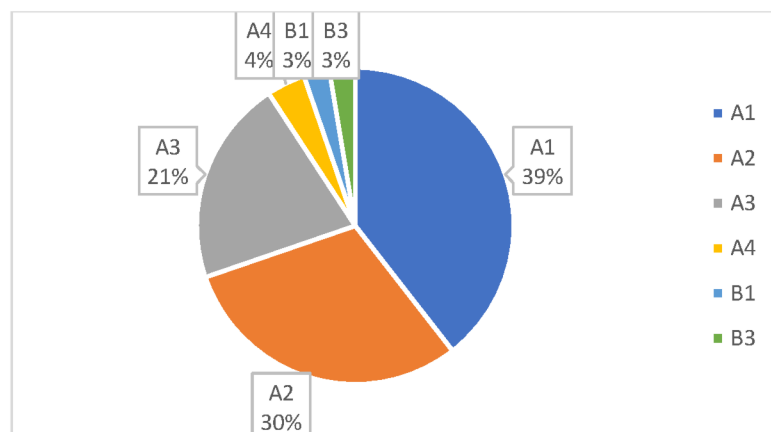
ZHAO, H. *et al.* Investigation of through-mask electrochemical machining process using a rib-connected photoresist for microcone array with large height-to-diameter ratio. **Precision Engineering**, v. 81, p. 68-83, 2023. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2023.02.001.

ZUM GAHR, K. H.; MATHIEU, M.; BRYLKA, B. *Friction Control by Surface Engineering of Ceramic Sliding Pairs in Water*. **Wear**, v. 263, n. 7-12, p. 920-929, 2007. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.024.

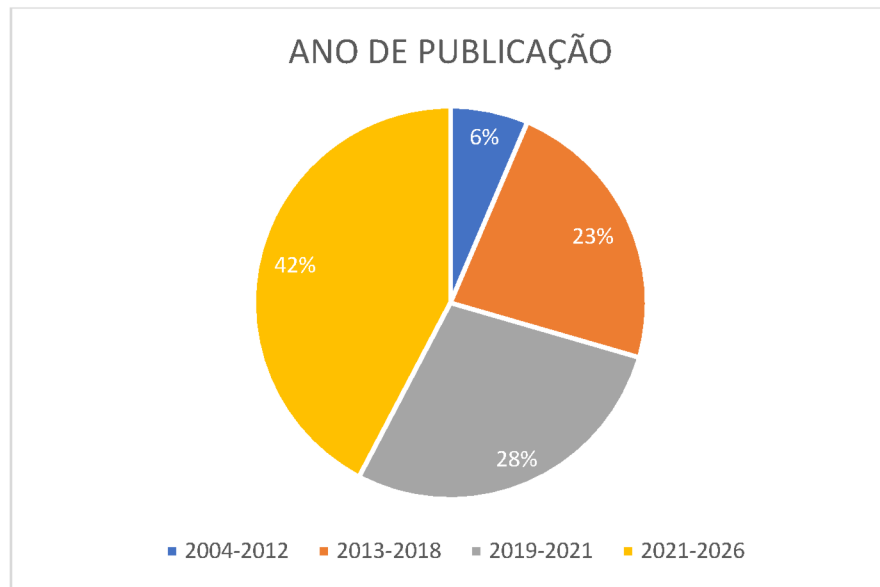
7.1 REFERÊNCIAS POR EXTRATO



7.2 REFERÊNCIAS POR QUALIS



7.3 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS

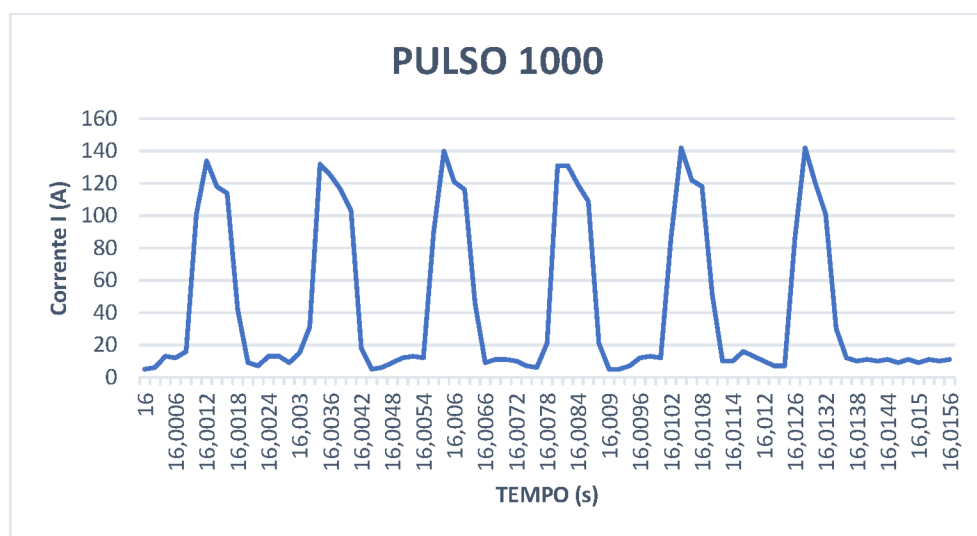


APÊNDICE A

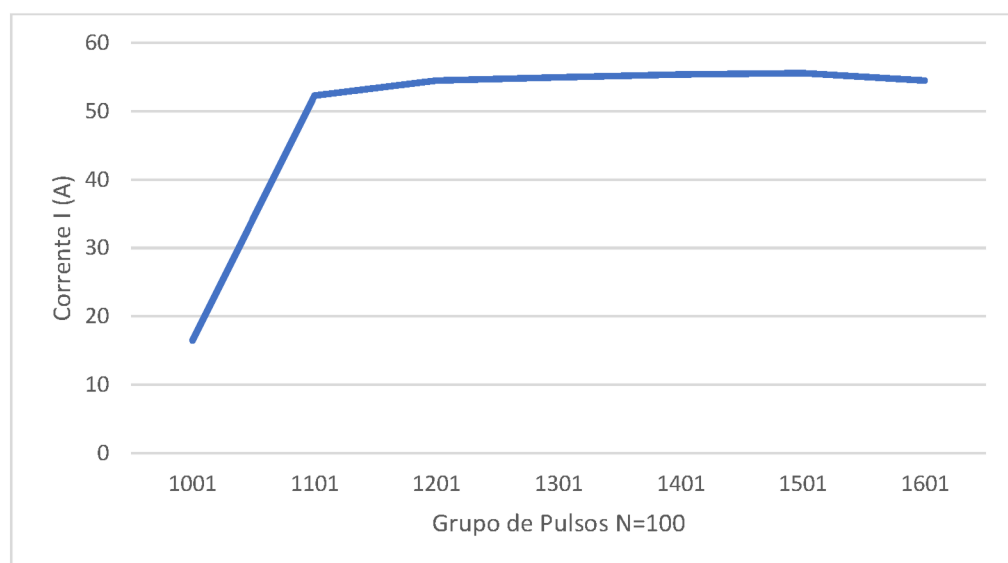
Oscilogramas e gráficos de corrente média das peças aço SAE 1020, aço ferramenta e inoxidável martensítico

Este apêndice apresenta os oscilogramas e os gráficos de corrente média por grupo de pulsos referentes às peças que não foram detalhados no corpo do texto. Esses resultados complementam a análise apresentada no capítulo de Resultados, assegurando o registro completo dos sinais adquiridos para todas as condições experimentais.

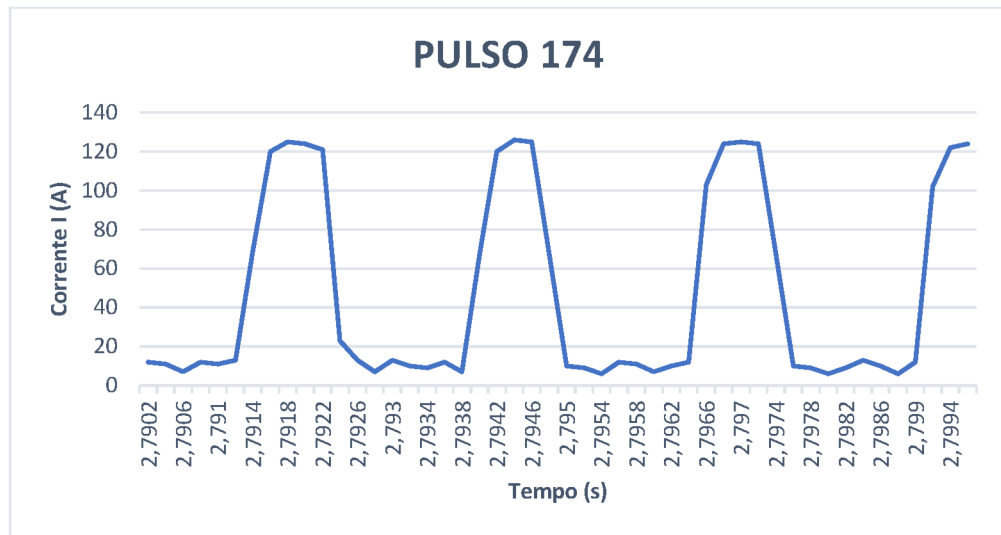
Oscilograma Corpo de prova A



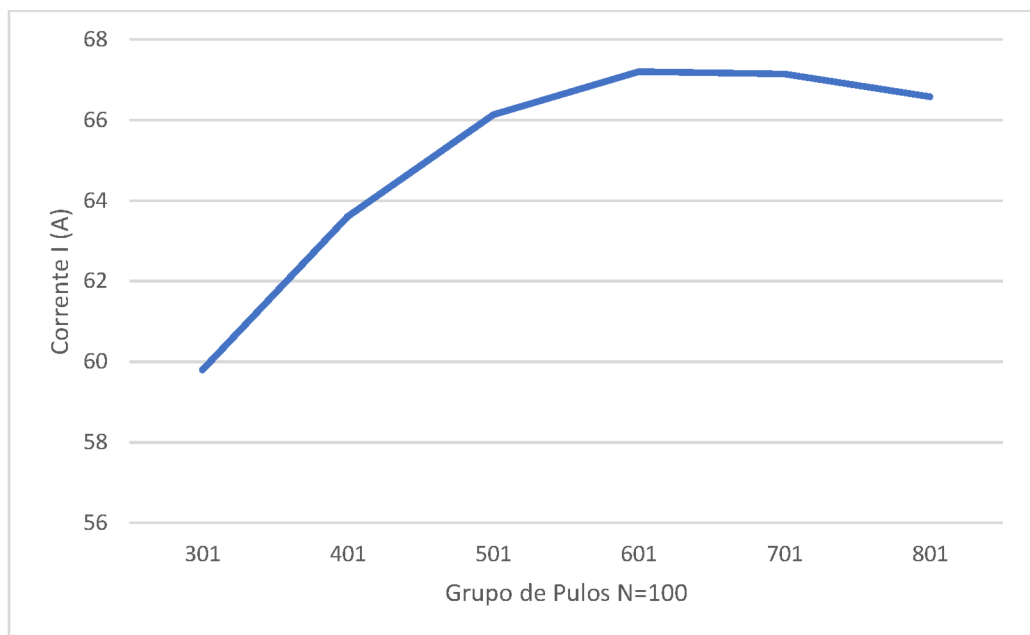
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova A



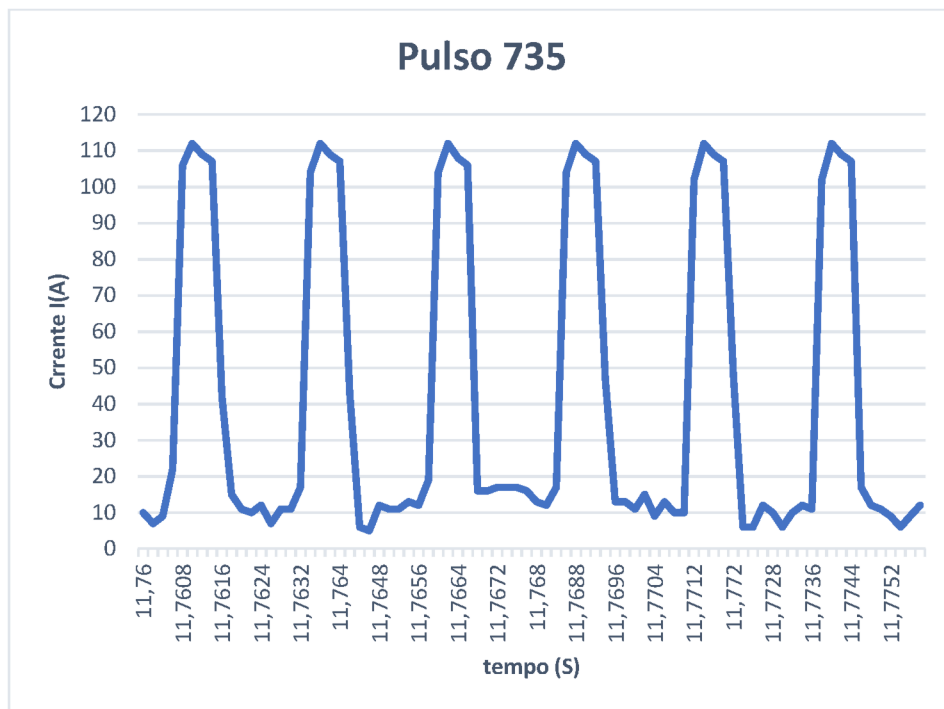
Oscilograma corpo de prova B



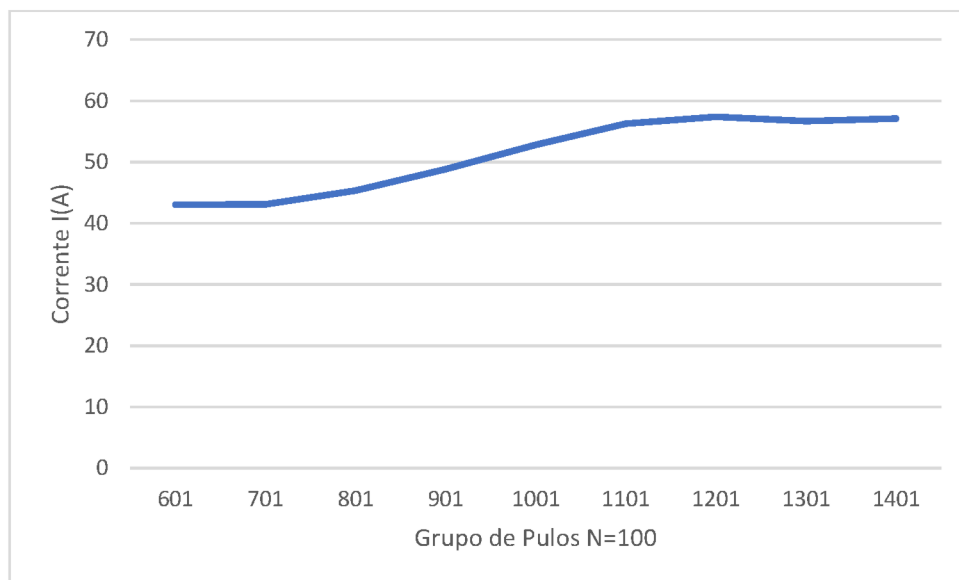
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova B



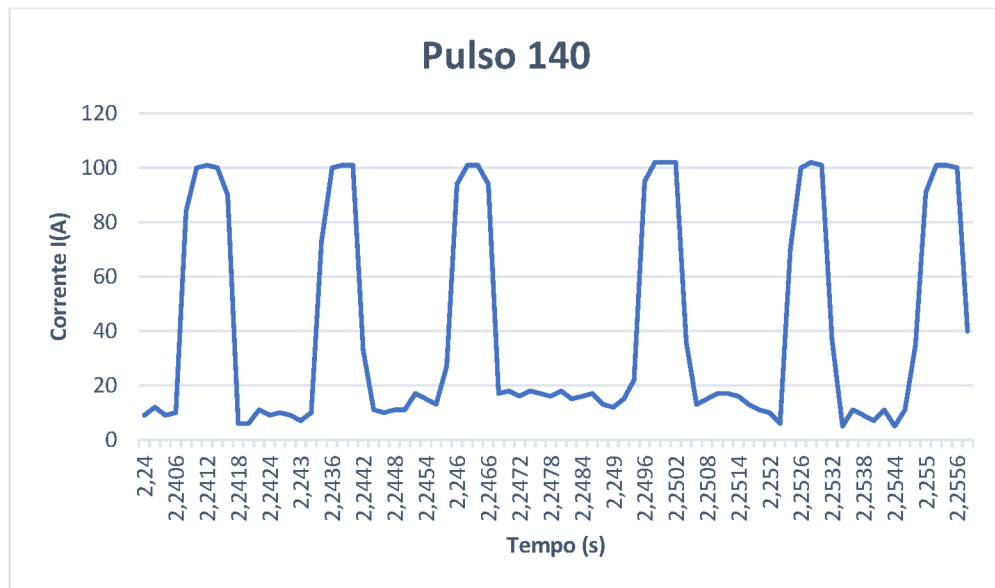
Oscilograma Corpo de prova C



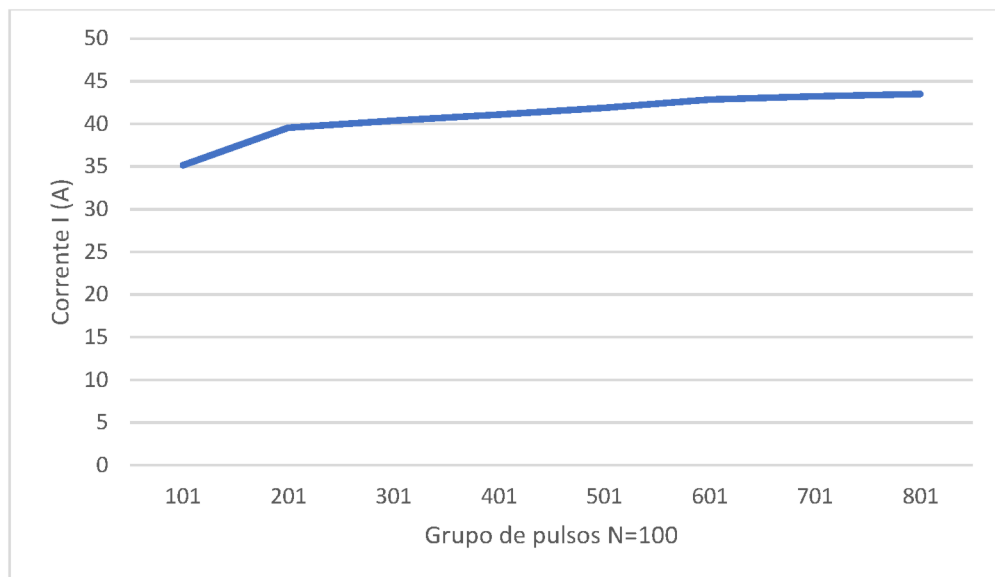
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova C



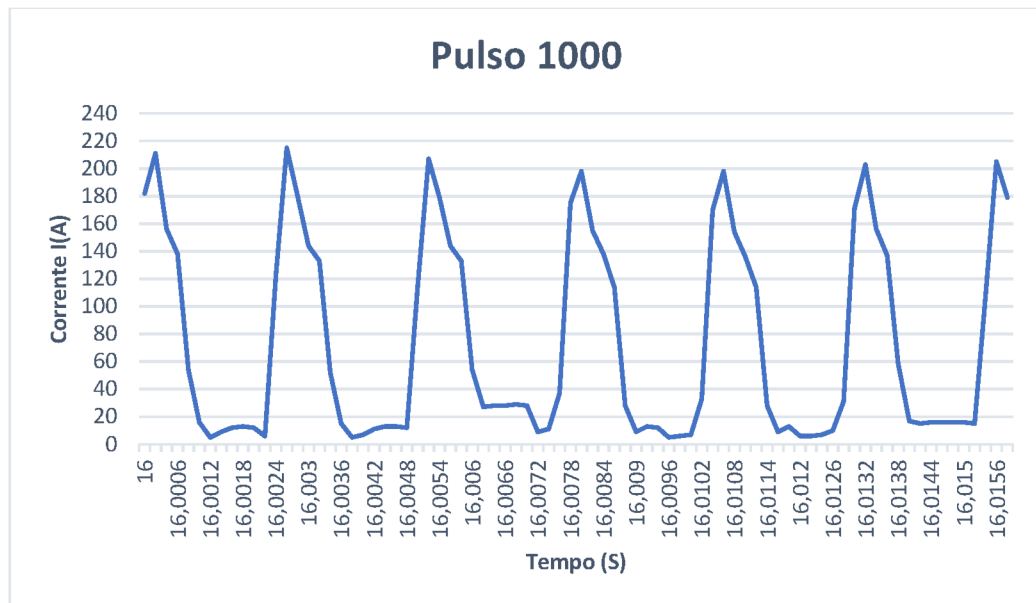
Oscilograma Corpo de prova D



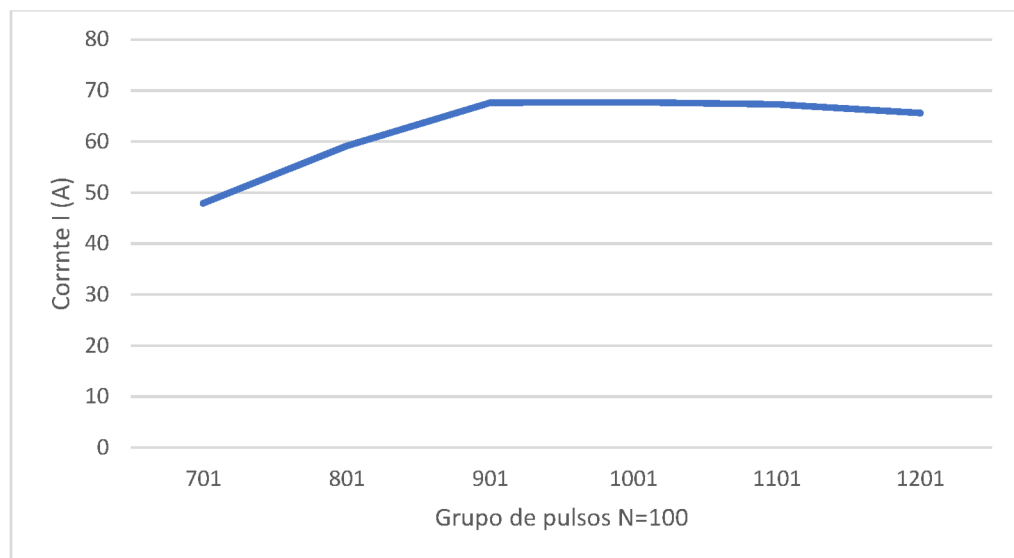
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova D



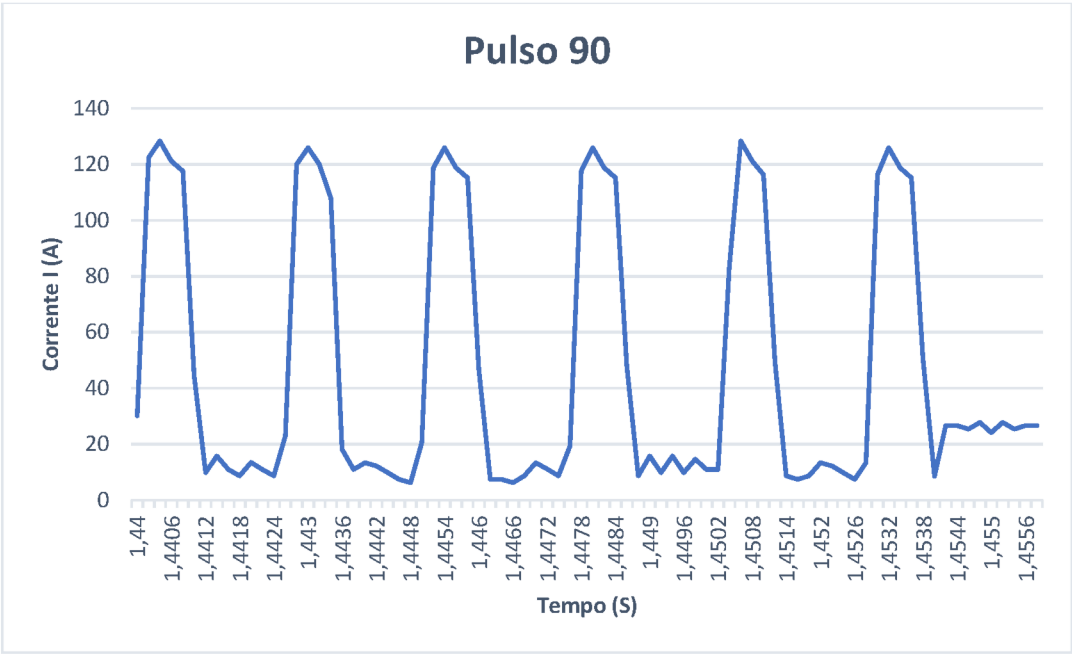
Oscilograma Corpo de prova E



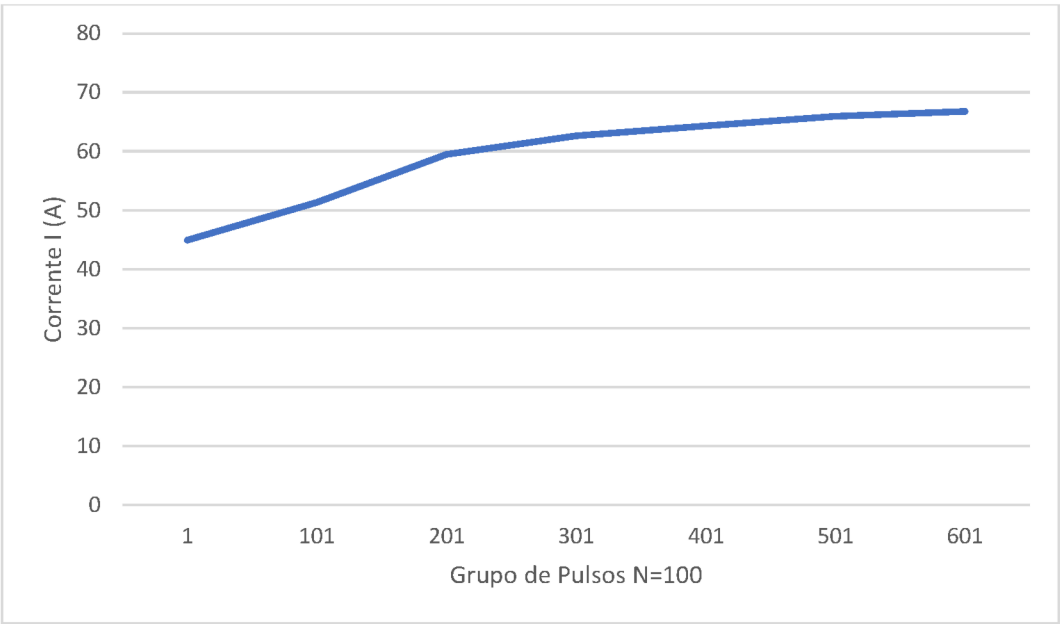
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova D



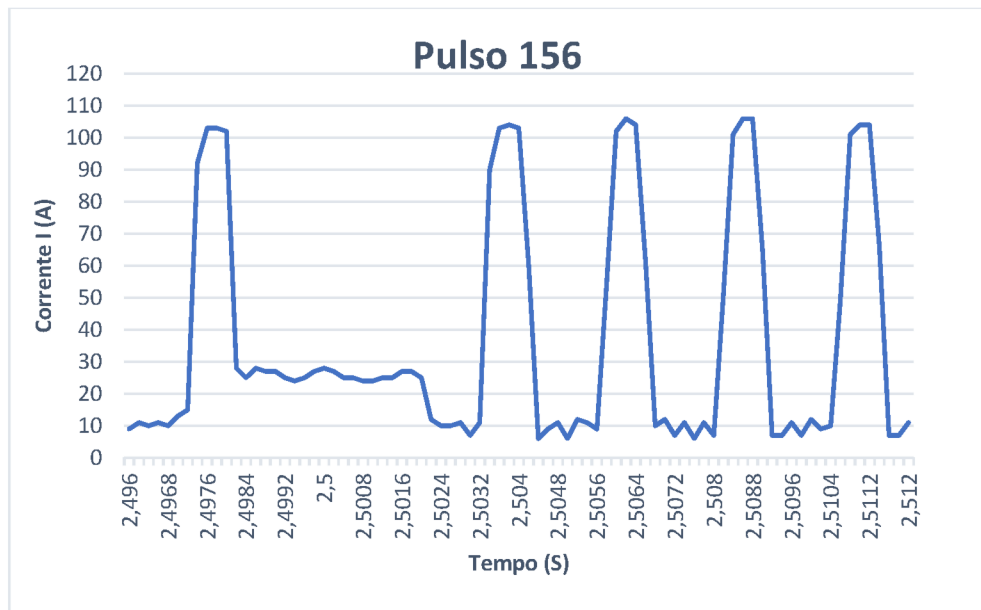
Oscilograma corpo de prova F



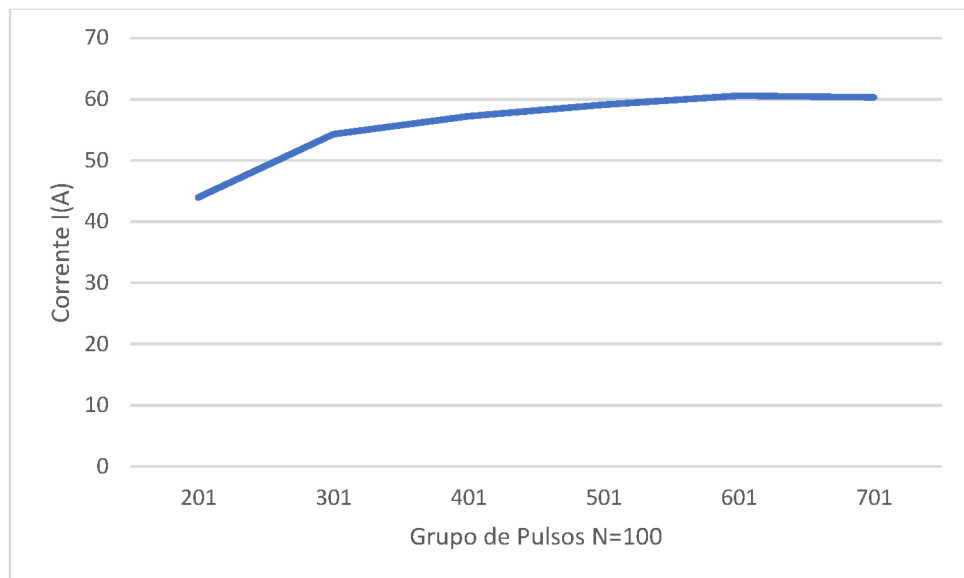
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova F



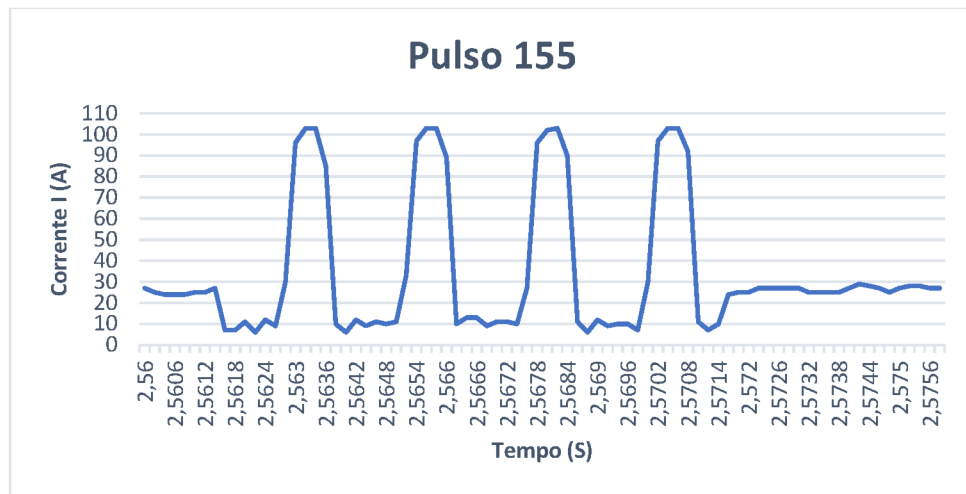
Oscilograma corpo de prova G



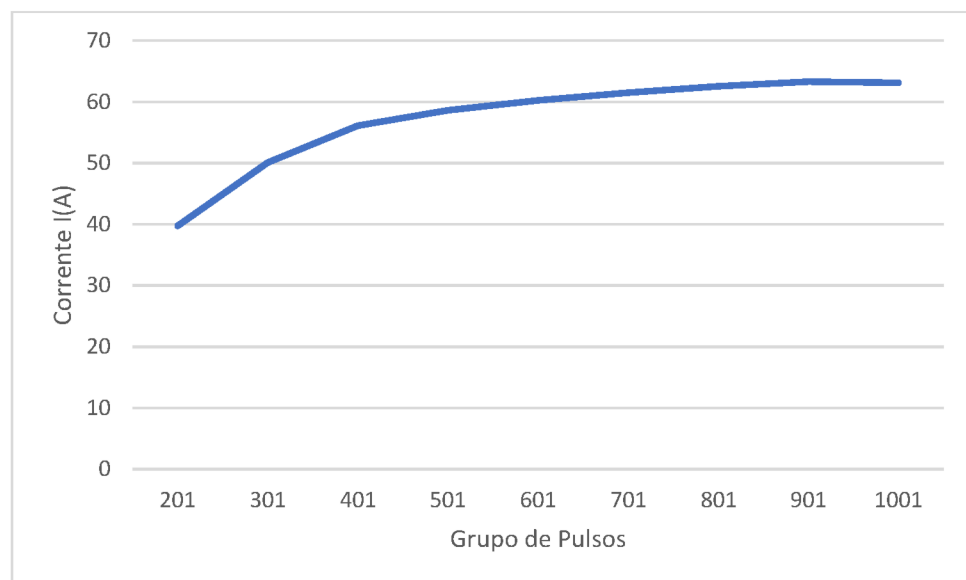
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova G



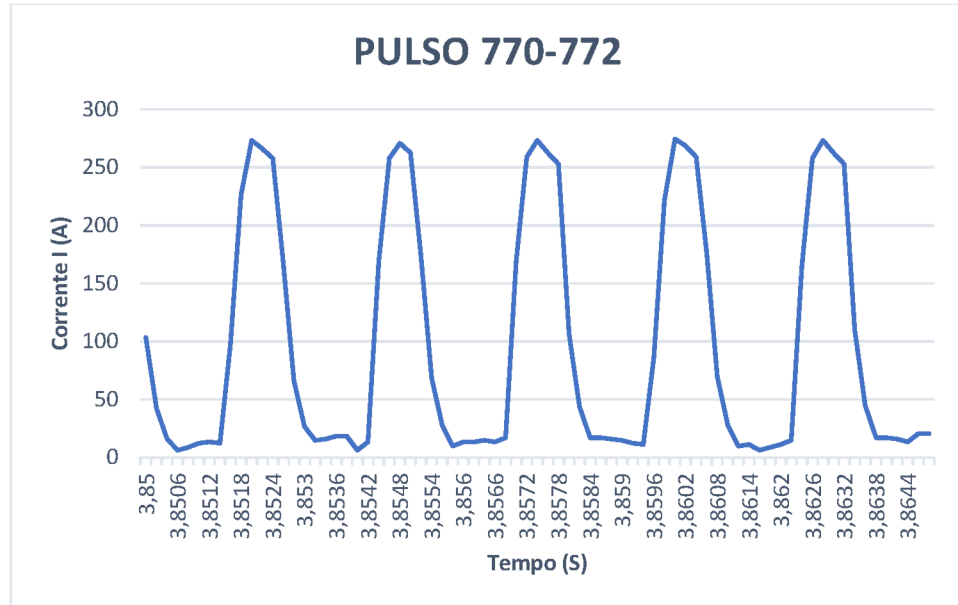
Oscilograma corpo de prova H



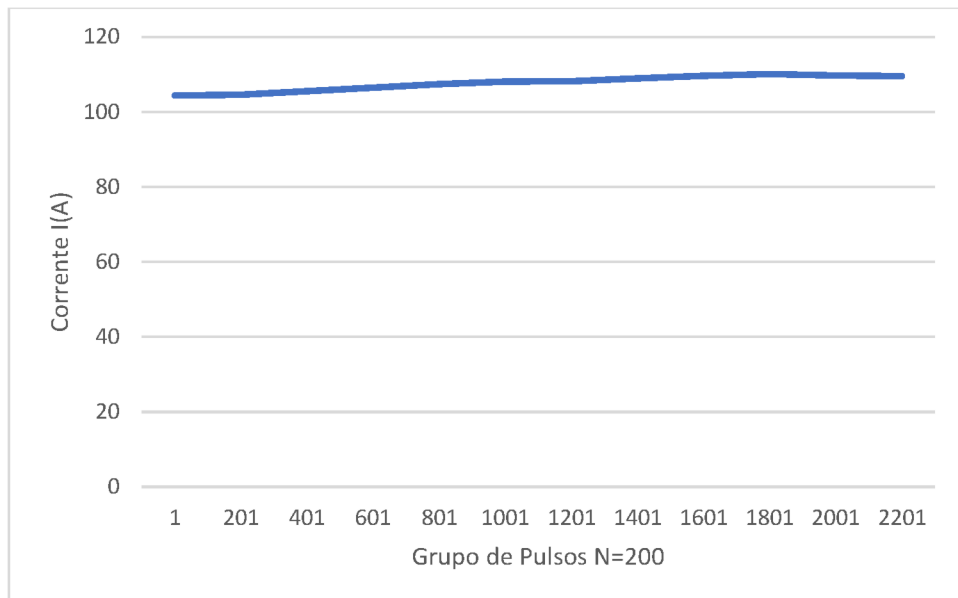
Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova G



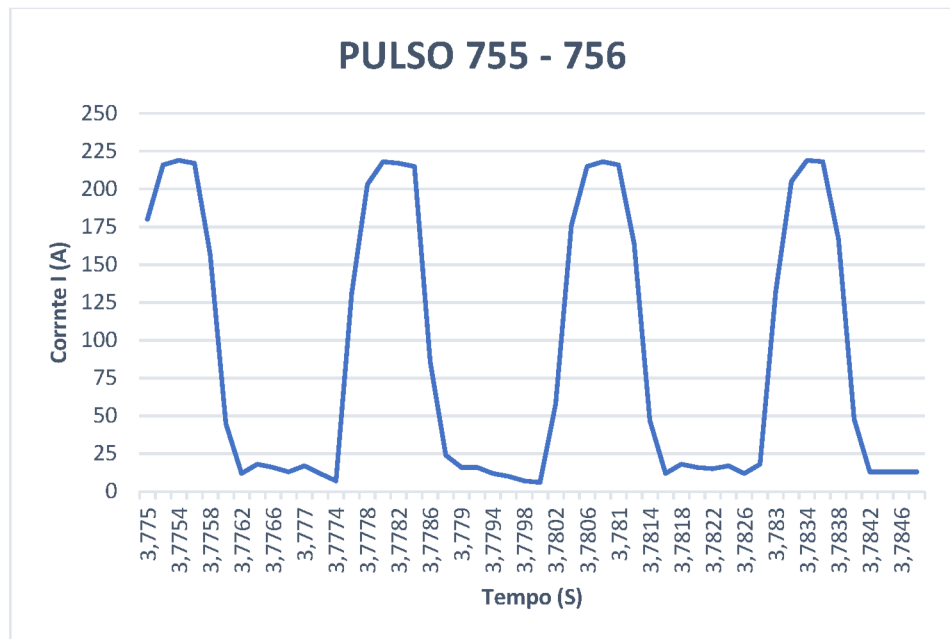
Oscilograma corpo de prova AF1



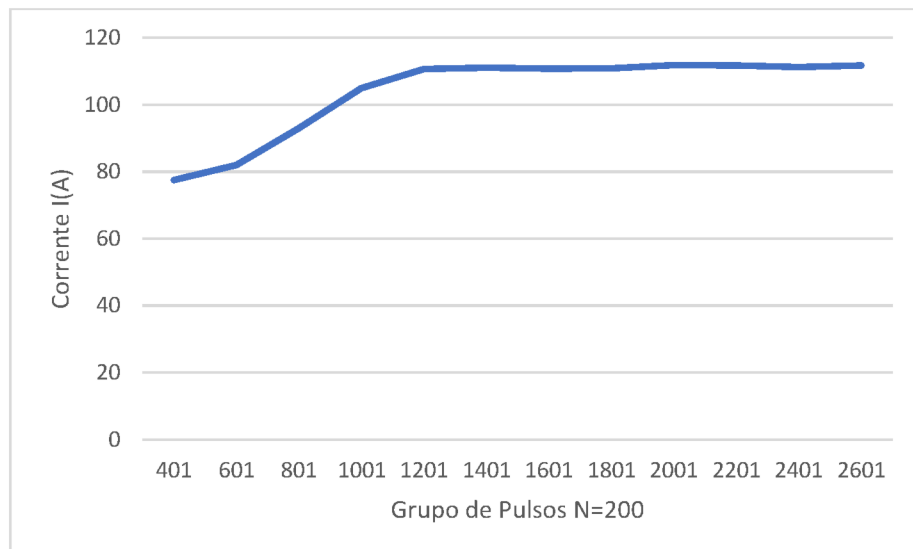
Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AF1



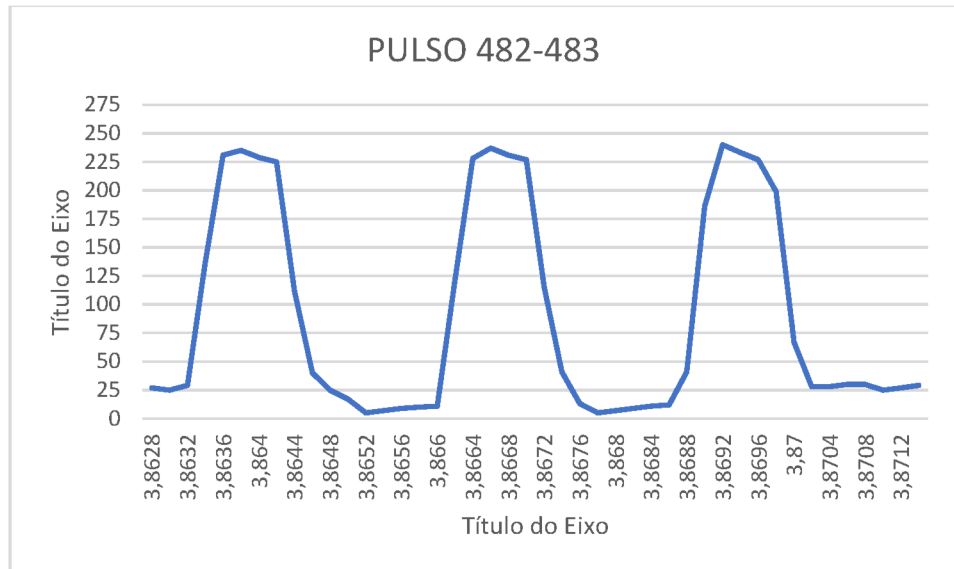
Oscilograma corpo de prova AF2



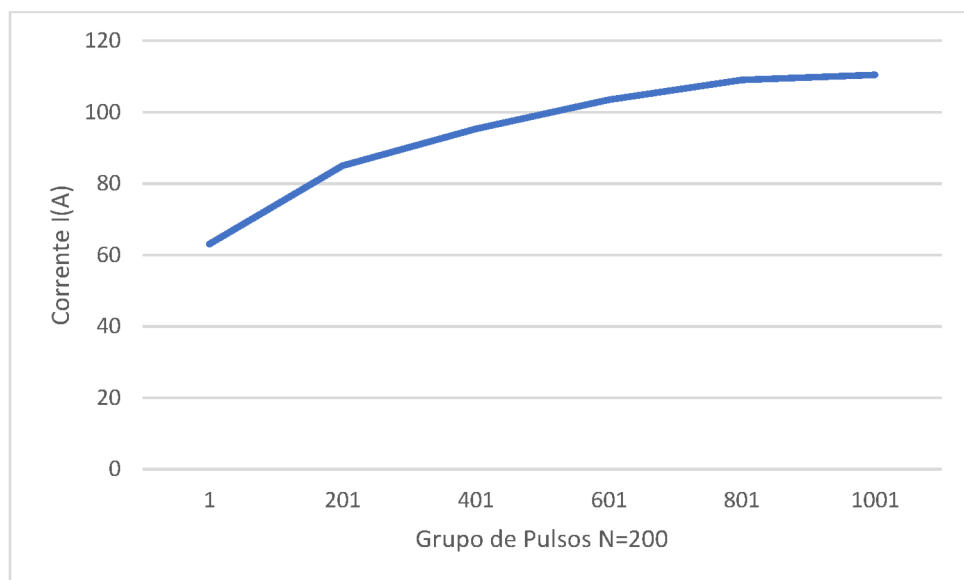
Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AF2



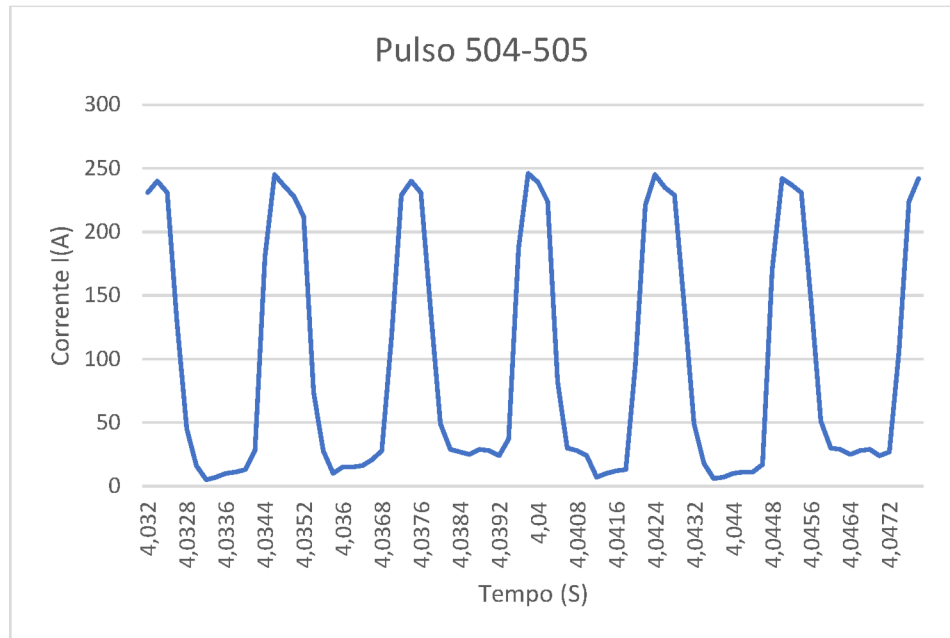
Oscilograma corpo de prova AF3



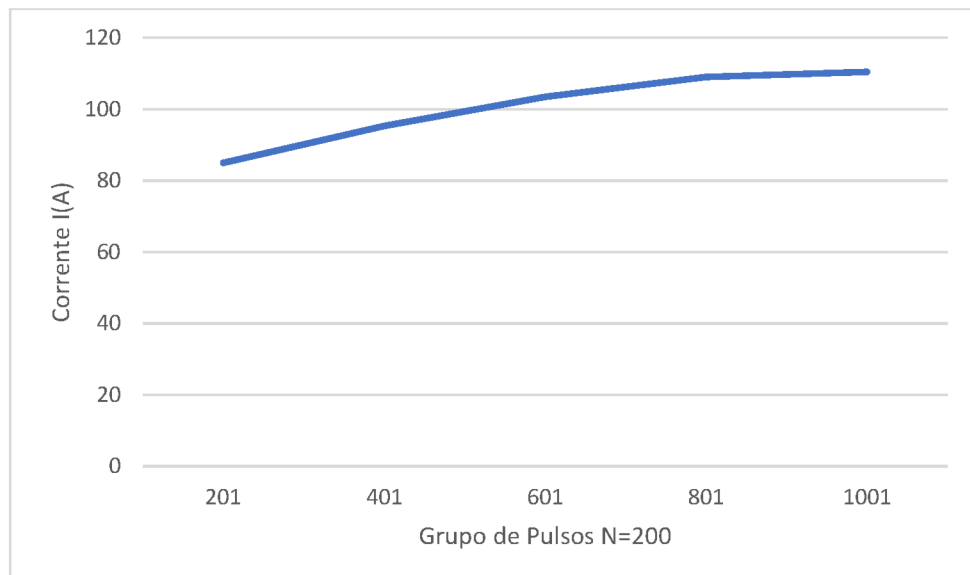
Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AF3



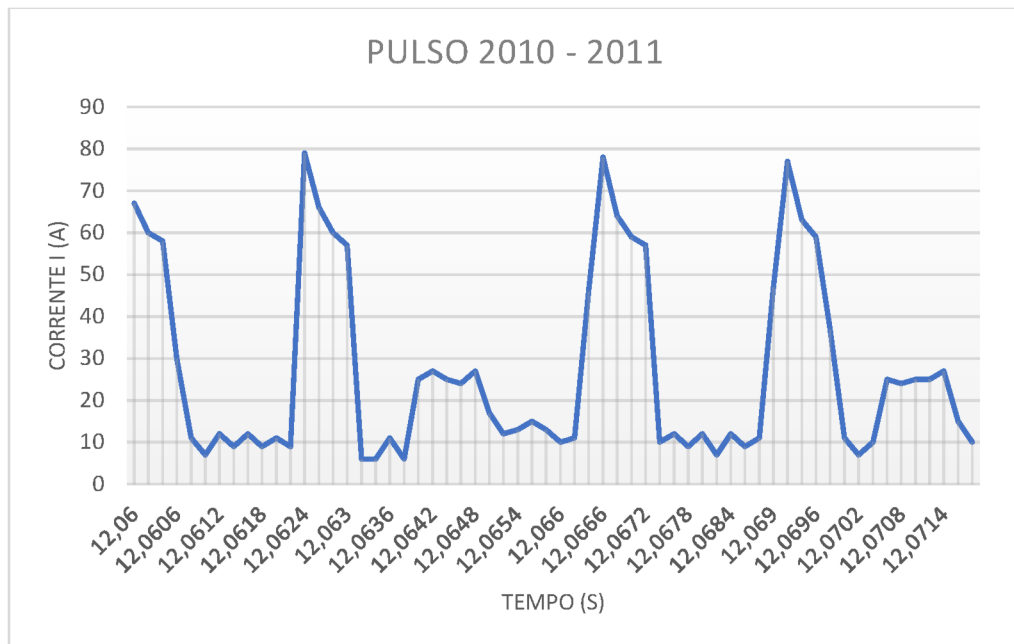
Oscilograma corpo de prova AF3.1



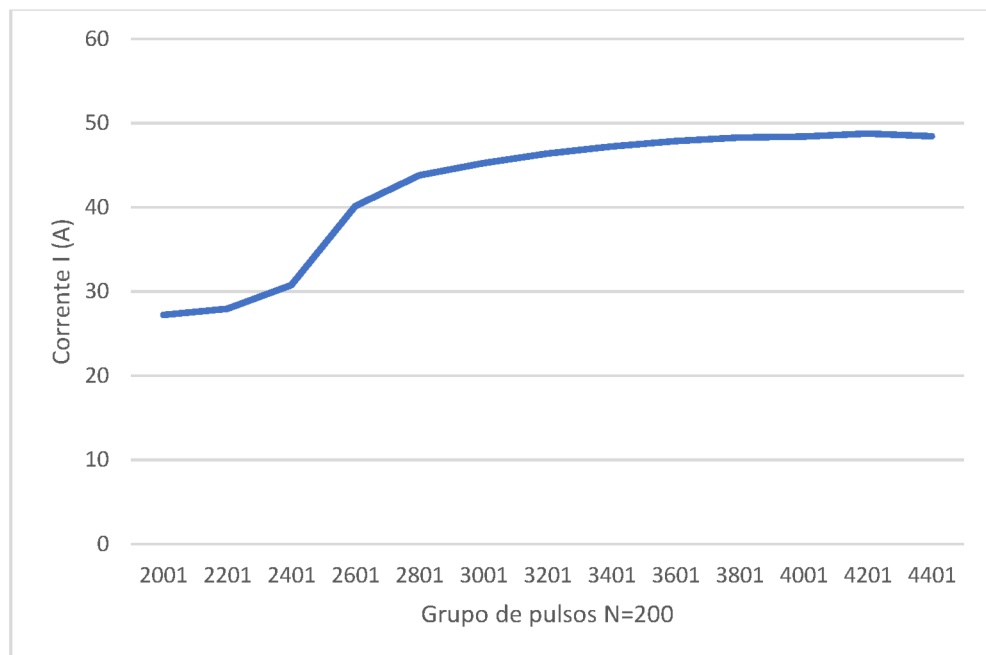
Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AF3.1



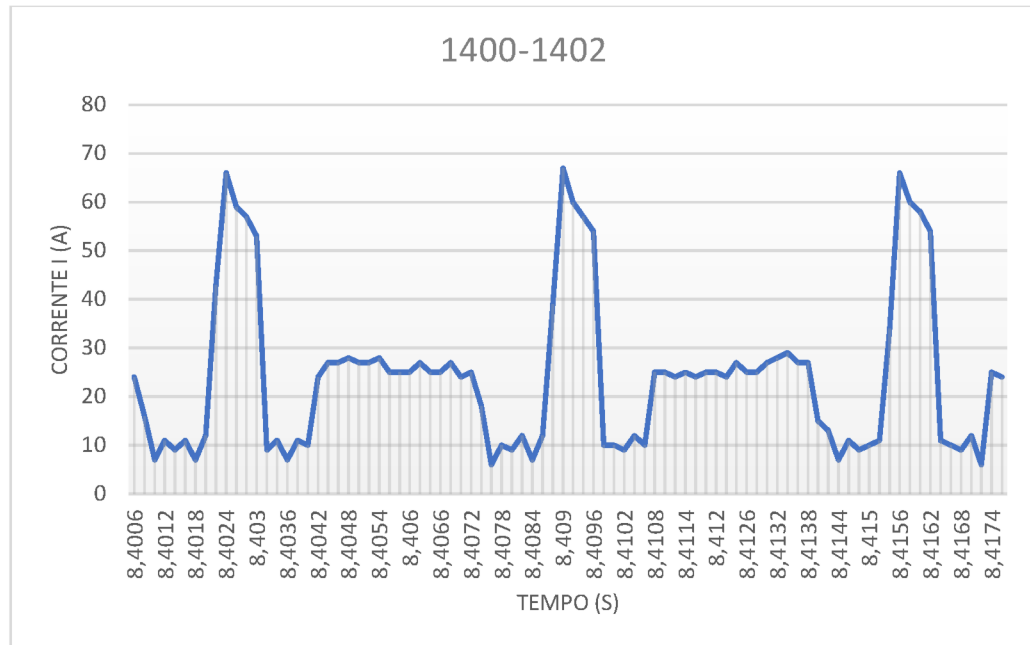
Oscilograma corpo de prova AIM 1



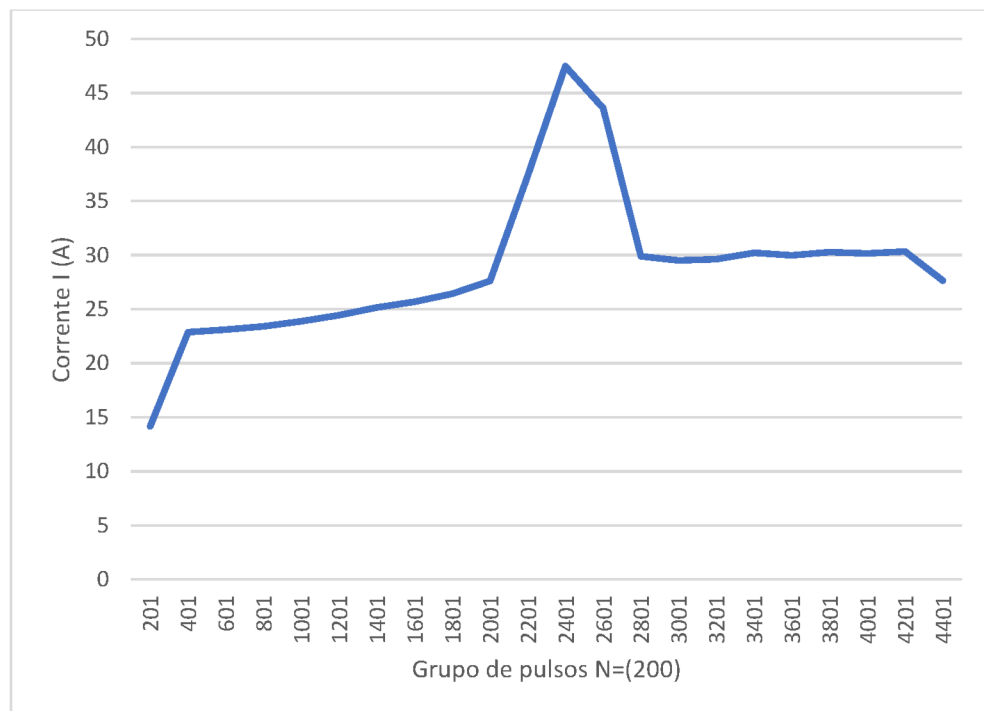
Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AIM 1



Oscilograma corpo de prova AIM 3



Corrente Média por grupo de 200 pulsos Corpo de prova AIM 3

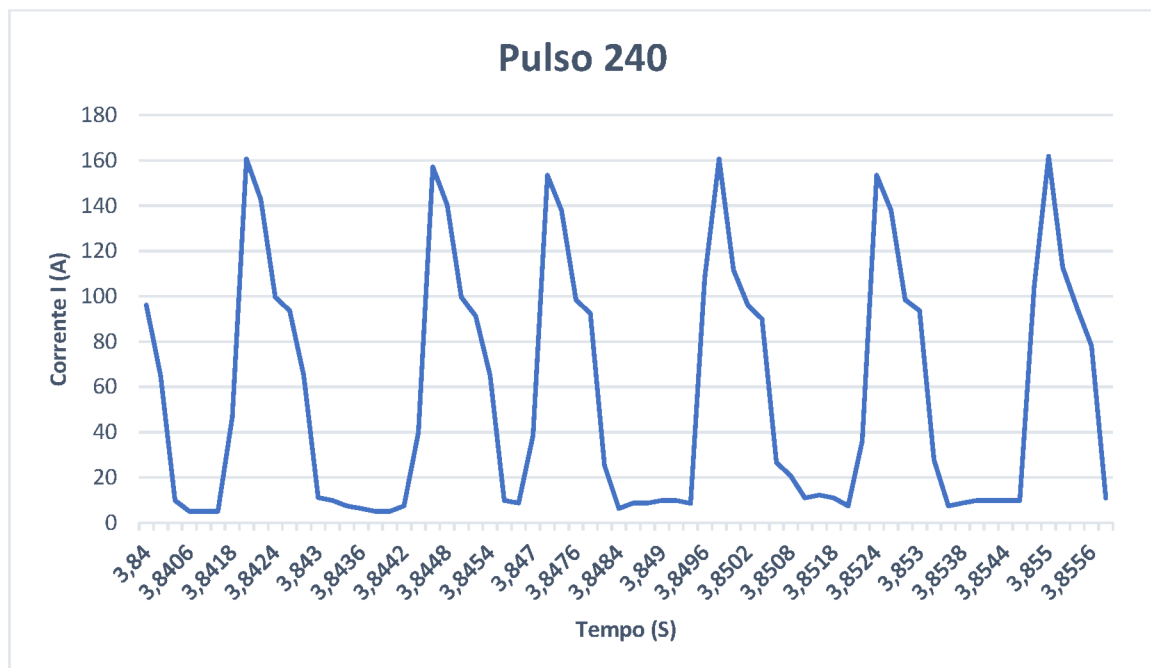


APÊNDICE B

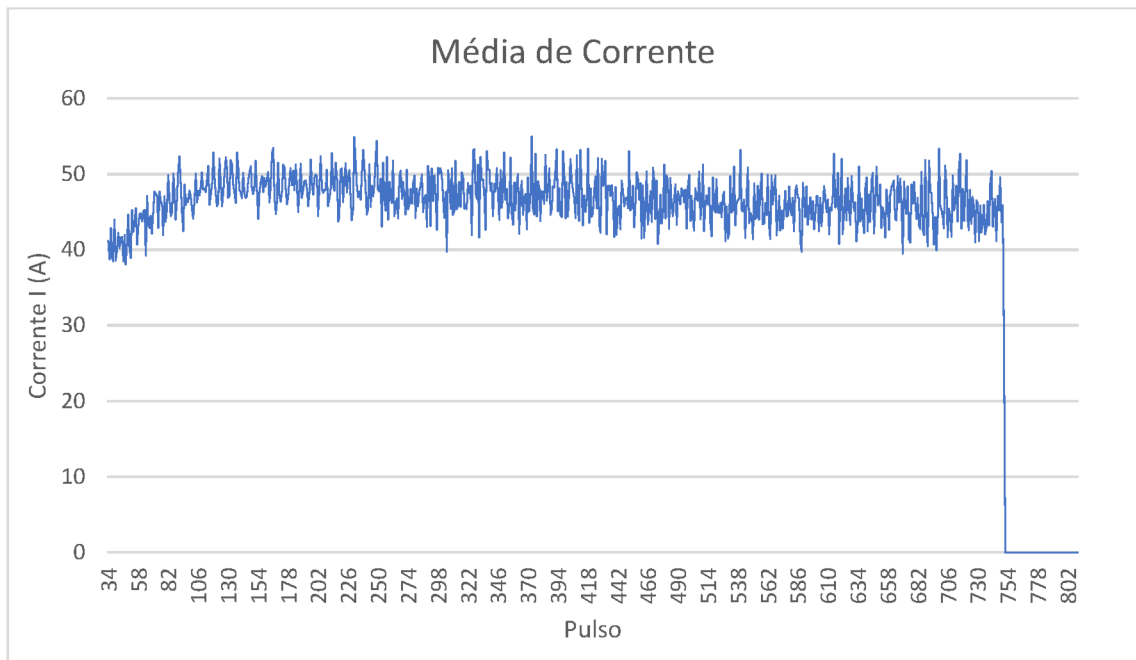
Avaliação de reprodutibilidade da condição E (Aço SAE 1020)

Este apêndice apresenta os resultados complementares referentes à avaliação de reprodutibilidade da condição E. Após a identificação dessa condição como a de melhor desempenho no conjunto inicial de ensaios, foram confeccionadas e texturizadas três novas peças sob os mesmos parâmetros operacionais, com o objetivo de verificar a consistência do comportamento do processo. São apresentados os oscilogramas de corrente em função do tempo e os gráficos de corrente média por grupo de pulsos correspondentes às repetições, de modo a registrar integralmente os sinais adquiridos e subsidiar a análise de reprodutibilidade discutida no corpo do trabalho.

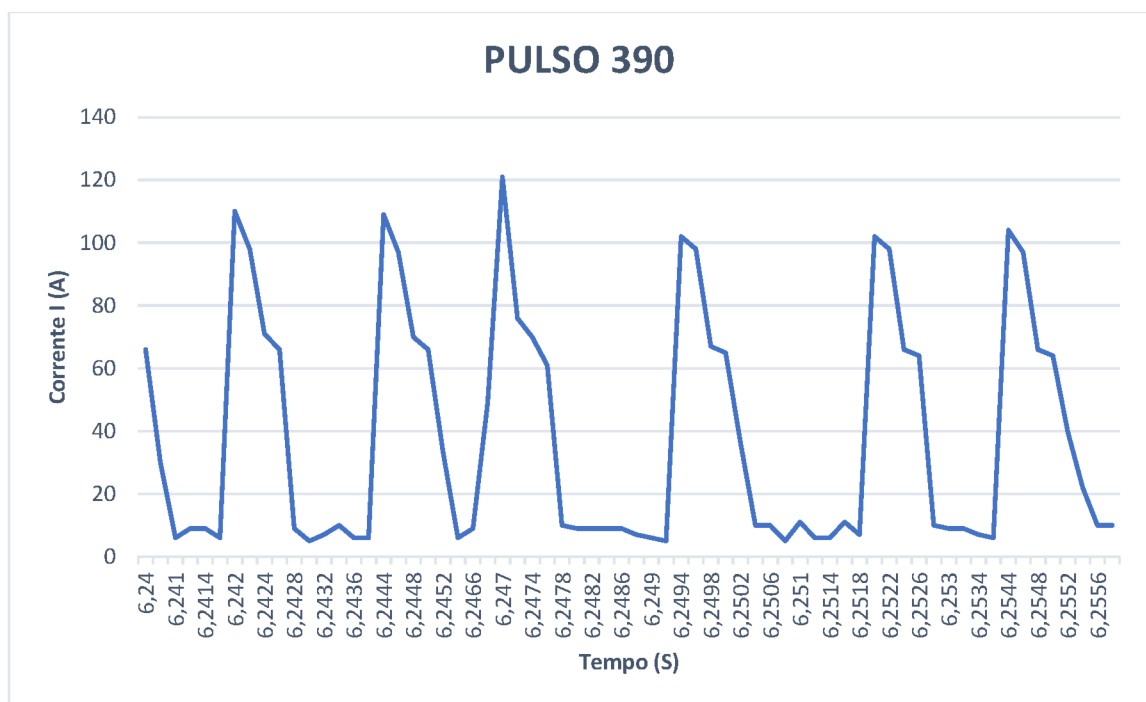
Oscilograma Corpo de prova R



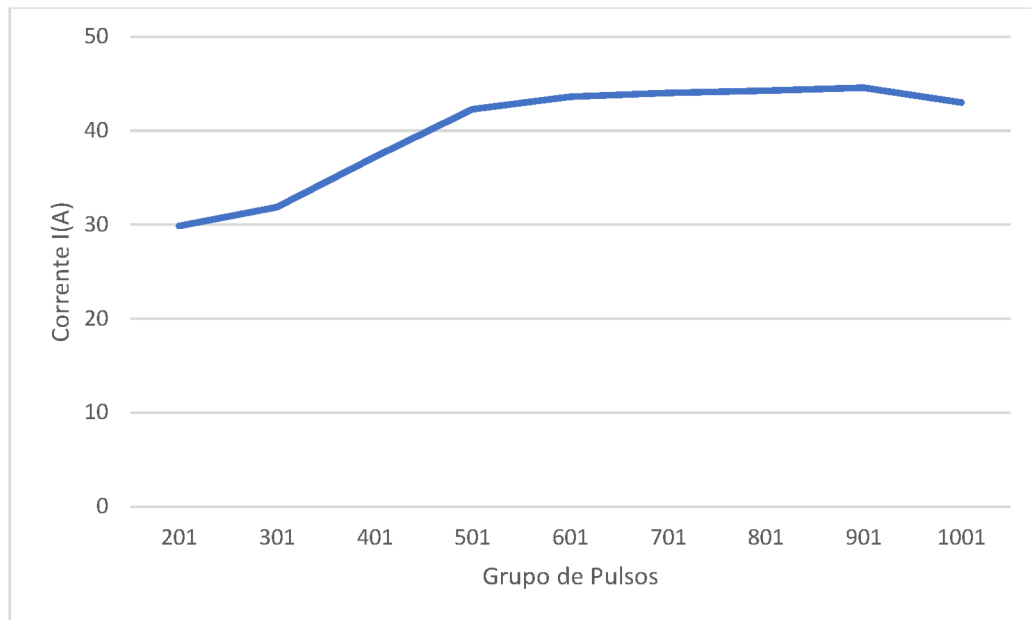
Média de Corrente do ciclo total Corpo de prova R



Oscilograma Corpo de prova T



Corrente Média por grupo de 100 pulsos Corpo de prova T



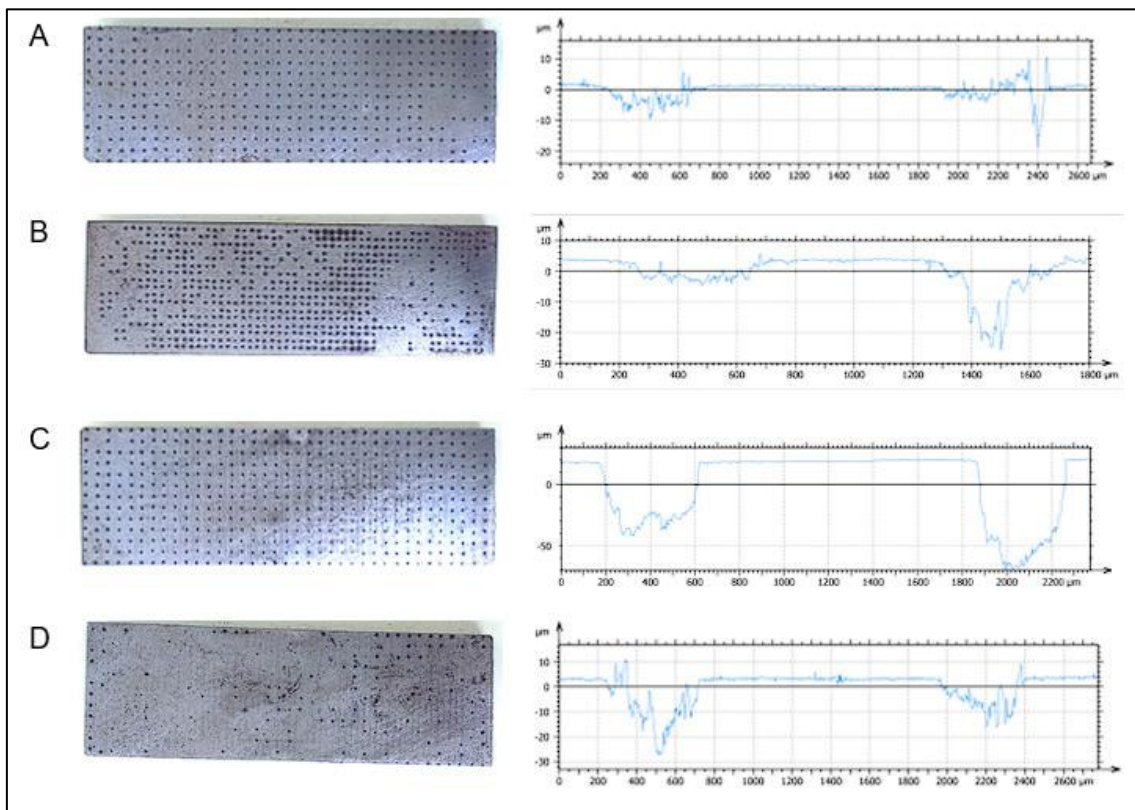
“De modo geral, os resultados apresentados neste apêndice evidenciam a **consistência** dos sinais adquiridos nas três repetições da condição E, com manutenção do padrão pulsado nos oscilogramas e comportamento global semelhante nos gráficos de corrente média por grupo de pulsos. Assim, as figuras reunidas neste apêndice complementam o capítulo de resultados, assegurando a **rastreabilidade** e o registro completo da avaliação de reprodutibilidade da condição E.”

APÊNDICE C

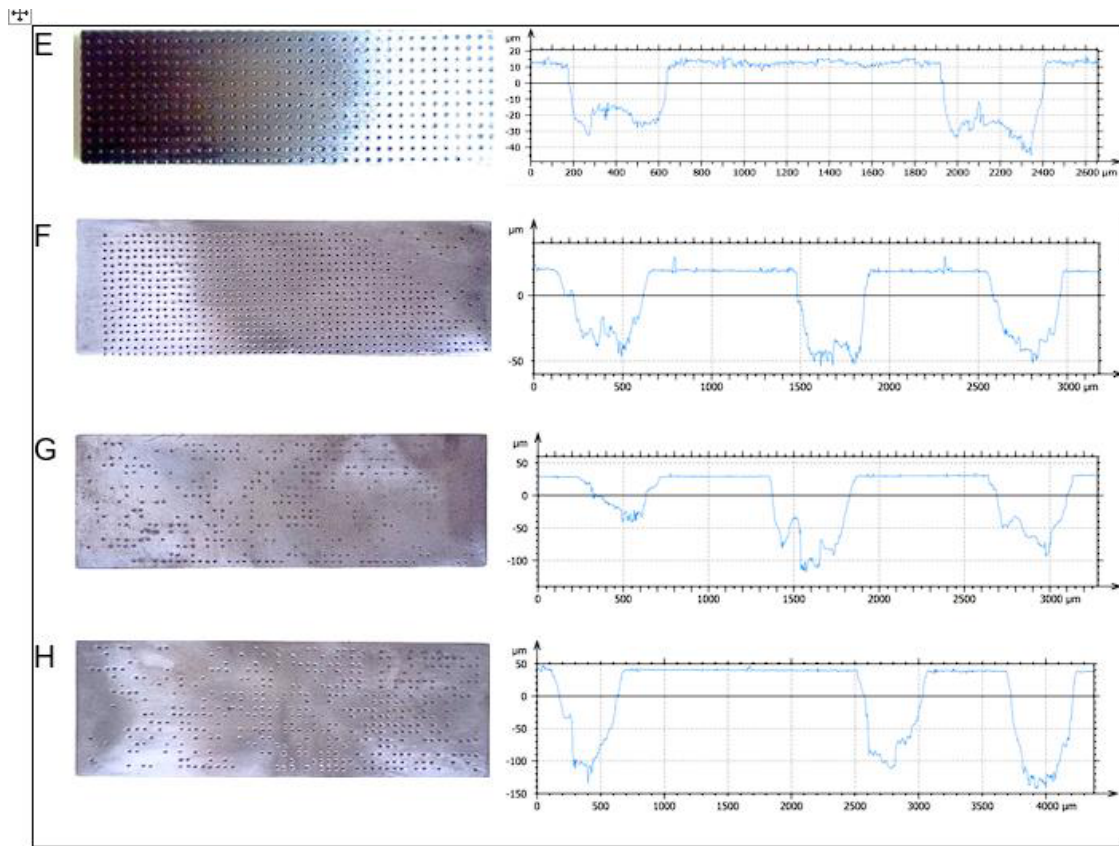
Registro macroscópico e perfis interferométricos das peças de Aço SAE1020, Aço Ferramenta e Inox Martensítico

Este apêndice reúne as imagens macroscópicas das superfícies texturizadas e os perfis topográficos obtidos por interferometria correspondentes às peças avaliadas no estudo. O objetivo é disponibilizar, de forma organizada, o registro completo da caracterização morfológica, complementando a análise apresentada no capítulo de Resultados e permitindo a visualização comparativa das feições geradas sob as diferentes condições de texturização.

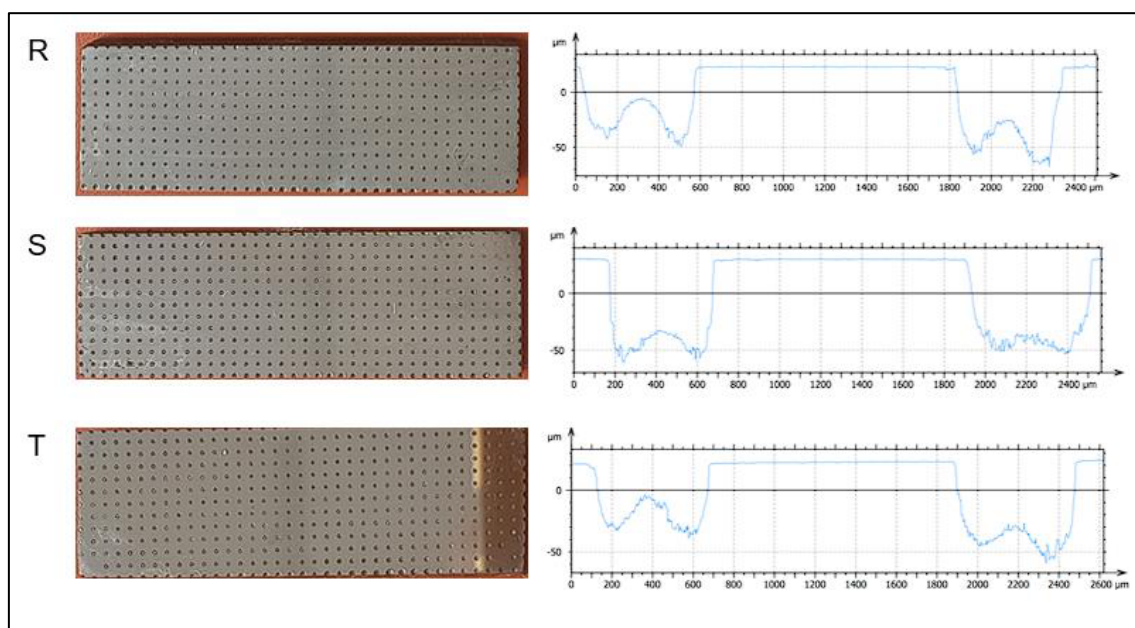
Aço carbono 10A



Aço Carbono 20A

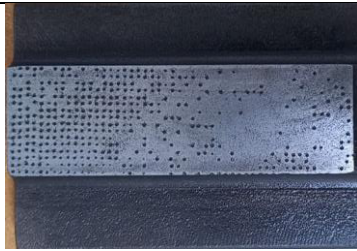
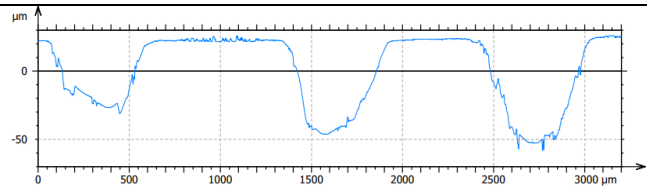


Aço Carbono 20A – Reprodutibilidade Condição E

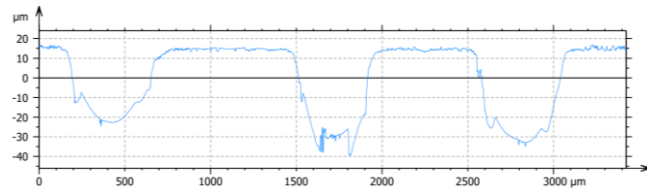


Aço Ferramenta

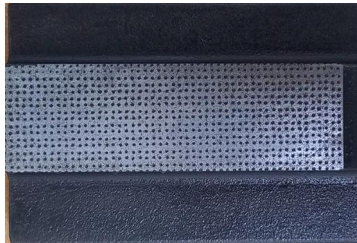
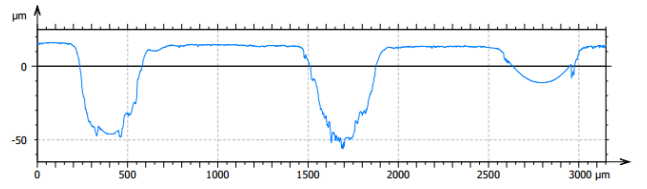
AF1



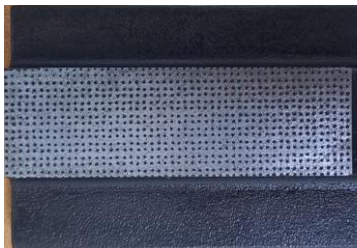
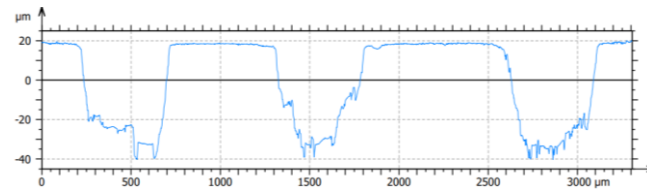
AF2



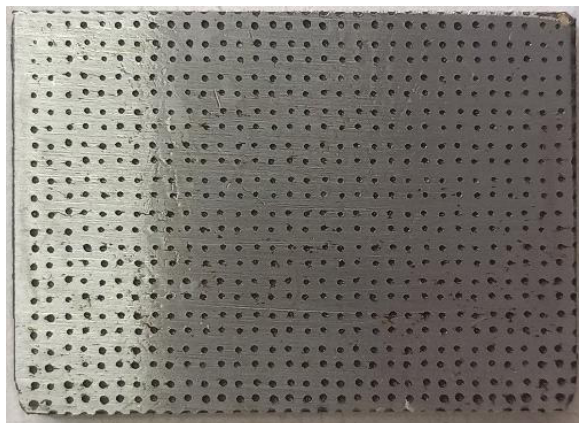
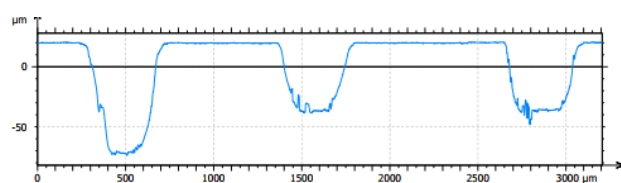
AF3



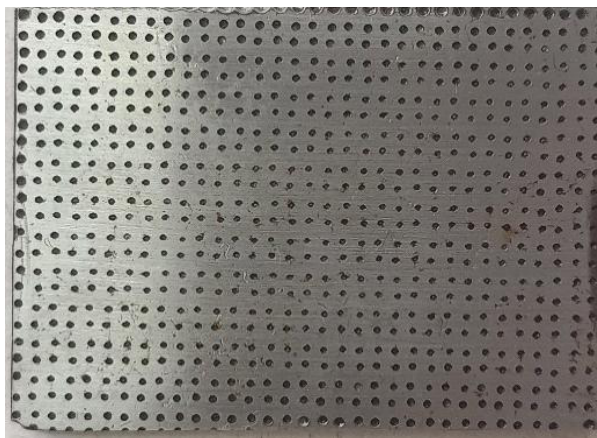
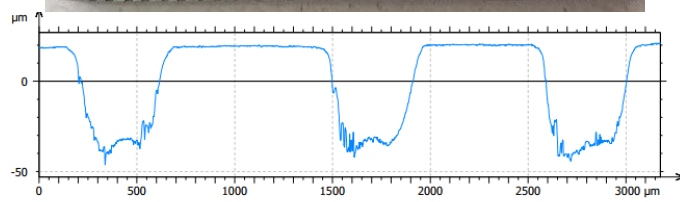
AF3.1



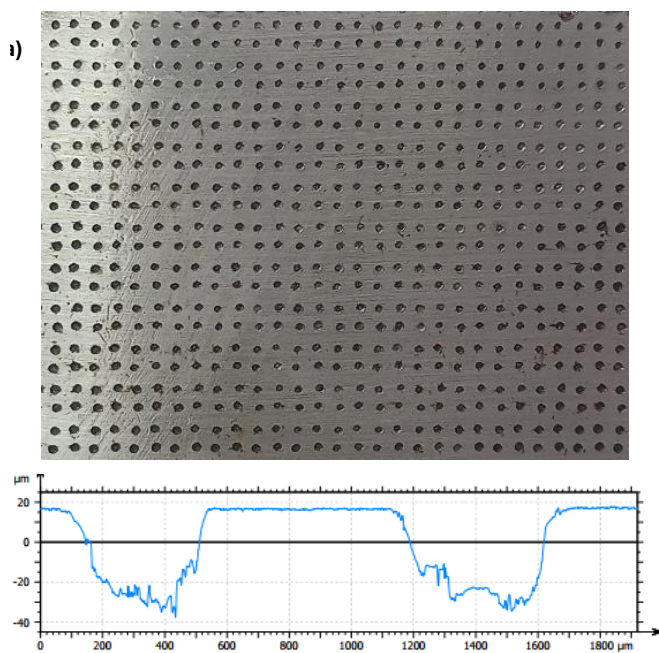
Aço Martensítico Peça 1



Aço Martensítico Peça 2



Aço Inoxidável Martensítico Peça 2.1



Aço Inoxidável Martensítico Peça 3

