

Textura na Remoção de Ti5553 por WEDM: água deionizada ou hidrocarboneto como meio dielétrico

Vinicius Silveira de Carvalho | vinicius.c2004@aluno.ifsc.edu.br¹

Cassiano Rodrigues Moura | cassiano.moura@ifsc.edu.br²

Cristiano da Silva | cristiano.silva@ifsc.edu.br²

Giovani Conrado Carlini | giovani.carlini@ifsc.edu.br²

IFSC Edital nº 03/2025/PROPI PIBITI

Trabalho de Pesquisa

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

A liga Ti5553 é um material de importância tecnológica no setor aeronáutico, porém apresenta dificuldades de usinagem. A usinagem por WEDM é normalmente empregada para materiais de baixa usinabilidade. O trabalho investiga a influência do meio dielétrico (água deionizada – H₂O e solução de hidrocarboneto a 8% – HC8%) na textura superficial da liga Ti5553 usinada por eletroerosão a fio. Foram aplicados cinco níveis de energia de descarga ($We = 0,30; 2,50; 6,30; 12,25$ e $16,40$ mJ). A textura foi avaliada pelos parâmetros tridimensionais Sa (rugosidade média aritmética) e Sdr (razão de área desenvolvida). Os resultados mostram que o aumento da We eleva Sa e Sdr para ambos os dielétricos. Contudo, a água deionizada produz superfícies mais rugosas e com maior desvio padrão, enquanto o HC8% proporciona maior estabilidade e menor rugosidade. Na maior energia (16,4 mJ), a H₂O resultou em Sa 42,55% maior e Sdr 72,22% maior em relação ao HC8%. Conclui-se que o hidrocarboneto é mais adequado para obter superfícies mais uniformes no WEDM do Ti5553.

Palavras-chave: usinagem; Ti5553; WEDM; dielétrico; textura da superfície.

Introdução

Componentes críticos do setor aeronáutico exigem materiais de alto desempenho, tecnológicos e confiáveis. Neste contexto, a liga de titânio Ti5553 é empregada em trens de pouso de modelos como o Airbus A380 e Boeing 787, pois caracteriza-se por possuir elevada resistência mecânica, à corrosão e à fadiga apesar de sua densidade. Tal liga apresenta expressivos desafios de usinagem, especialmente em métodos de usinagem por ferramentas de geometria definida (Wagner; Baili; Dessein, 2015).

A eletroerosão à fio (WEDM) se apresenta como uma alternativa tecnológica para a manufatura de materiais de difícil usinabilidade. Diferentemente dos processos

¹ Estudante de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau.

² Professor de Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau.

convencionais de usinagem, a remoção de material é térmica e ocorre por meio de descargas elétricas controladas em um meio dielétrico, sem contato e possibilitando a obtenção de geometrias complexas com elevada precisão.

De acordo com Gasperin *et al.* (2026), fatores como aumento da energia da descarga e alteração do meio dielétrico alteram a textura resultante da WEDM. A textura é composta por características mensuráveis em variados parâmetros de rugosidade de duas ou três dimensões, como por exemplo: rugosidade média aritmética (S_a) e a razão entre uma área planificada de referência e a área mensurada desenvolvida (S_{dr}).

Neste trabalho foram usinados corpos de prova de Ti5553 por WEDM. Utilizou-se 5 níveis de energia de descarga (W_e) e dois dielétricos, em específico, água deionizada (H_2O) e solução de hidrocarboneto à 8% (HC8%) para uma compreensão do comportamento dos parâmetros tridimensionais S_a e S_{dr} em diferentes condições de ensaio, objetivando contribuir cientificamente em dados para a caracterização de texturas resultantes.

Fundamentação teórica

A liga Ti5553 caracteriza-se como um material tecnológico com aplicações na área militar e aeronáutica, mais especificamente, em componentes críticos como trens de pouso, em razão de sua elevada relação resistência/densidade. A refinada composição química reflete na alta resistência à tração, baixa condutividade térmica e capacidade de retenção de propriedades mecânicas em elevadas temperaturas que contribuem para sua baixa usinabilidade, mesmo em comparação com a Ti64, liga de titânio mais empregada atualmente (Dos Santos *et al.*, 2025).

Decorrentes dessas propriedades, as ligas de titânio, como a Ti5553, impõem desgaste abrasivo acelerado em ferramentas de usinagem com geometria definida. Nesse contexto, processos não convencionais, em especial a eletroerosão à penetração e por fio, tornam-se alternativas viáveis. A energia térmica gerada por descargas elétricas sucessivas e controladas removem o material, eliminando o atrito e tribomecanismos na interface ferramenta-peça encontrados nos processos convencionais (Poroś, 2021).

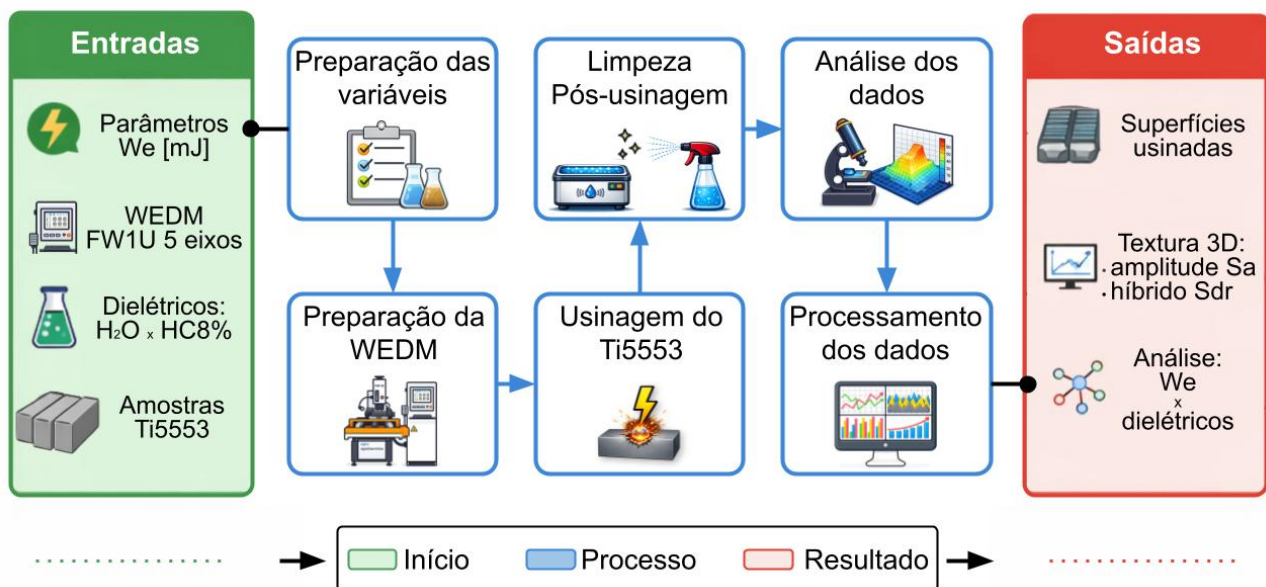
O melhor desempenho na remoção acontece em meio dielétrico líquido. Os dielétricos comumente utilizados no processo WEDM, conforme a literatura, são

hidrocarbonetos puros ou em emulsão e água deionizada. Gasperin *et al.* (2026) realizaram estudo comparativo entre diferentes dielétricos, hidrocarbonetos e água deionizada, na usinagem de metal duro por WEDM, observando maiores taxas de remoção de material com a utilização de hidrocarbonetos, contudo, reduzida rugosidade da superfície com água deionizada.

Procedimentos metodológicos

Inicialmente, definiram-se os parâmetros independentes de entrada do processo, seguidos da preparação e montagem do equipamento para a condução dos ensaios. Os testes compreenderam cinco níveis de $We = 0,30; 2,50; 6,30; 12,25$ e $16,40$ mJ, aplicadas em cinco regiões distintas da mesma amostra. Foram utilizados nos experimentos em três réplicas. Um diagrama simplificado da pesquisa caracteriza-se na Figura 1.

Figura 1 – Panorama da metodologia aplicada nos ensaios



Fonte: Autores (2026).

A máquina utilizada nos ensaios foi do modelo FW1U do fabricante GFMS, equipado com sistema de comando numérico de 5 eixos com bobina recíprocante. Utilizou-se fio de

molibdênio com diâmetro nominal de 0,20 mm, tensionado em aproximadamente 1000 N/mm² e velocidade de acionamento de 8 m/s.

Foram empregados como meios dielétricos: água deionizada e solução a 8% de hidrocarboneto em água deionizada, sendo apresentadas suas propriedades físicas na Tabela 1. A filtragem do dielétrico foi realizada de forma contínua no sistema por intermédio de filtro do tipo cartucho plissado de 5 µm.

Tabela 1 - Propriedades físicas do HC8% e da H₂O

Propriedade	H ₂ O	HC8%	Unidade
Viscosidade a 40°C	1,0×10 ⁻³	2,4×10 ⁻³	Pa s
Densidade a 20°C	1,00	1,15	g/cm ³
Condutividade elétrica	15,0	3,1	µS/cm
Capacidade térmica específica	4,2	1,9	J/g.K
Calor de evaporação	2260	210	J/g

Fonte: Adaptado de Gasperin *et al.* (2026).

Procedeu-se à preparação das amostras e à execução dos testes de remoção por WEDM. Foram produzidos seis corpos de prova partindo de um segmento de barra da liga Ti5553, tratado termicamente por precipitação a 815°C por 1,0 h e envelhecido a 610°C por 6,0 h, com suas principais propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2. Na sequência, são mostradas na Tabela 3, a composição química da liga Ti5553.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga Ti5553

Propriedade	Grandeza	Unidade
Limite de Escoamento (σ _{YT})	1.274,8	MPa
Resistência à Tração (σ _{UT})	1.363,8	MPa
Alongamento	12	%

Fonte: Adaptado de Dos Santos *et al.* (2025).

Tabela 3 – Composição química da liga Ti5553

Elemento (%p)	Al	Mo	V	Cr	Fe
Ti5553	5,53	4,99	4,98	2,96	0,36

Fonte: Adaptado de Dos Santos *et al.* (2025).

Após o processo de remoção, as amostras passaram por limpeza realizada com escovação manual das superfícies, seguida de lavagem e imersão em acetona. Na

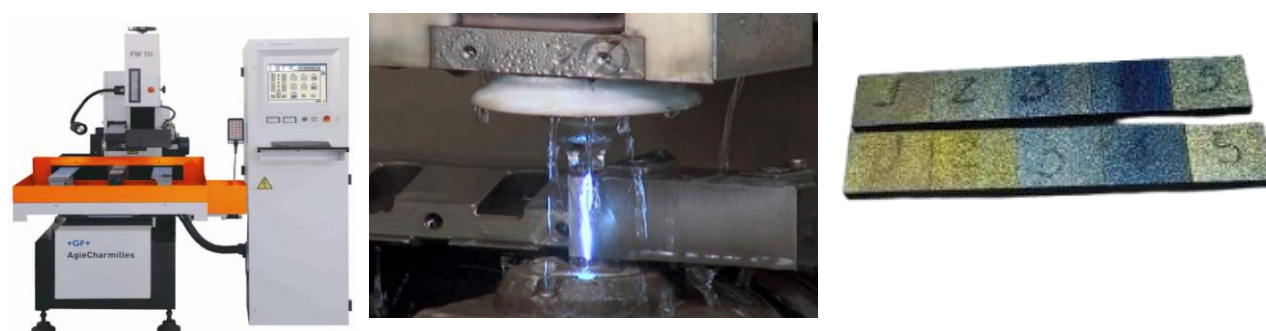
sequência, utilizou-se sistema ultrassônico com álcool isopropílico anidro como meio de limpeza profunda.

A análise da textura de superfície inicia-se com um exame da morfologia tridimensional da superfície utilizando a microscopia de variação de foco (Bruker Alicona® G5), cobrindo uma área de 5,0 mm × 5,0 mm com lente óptica de 20× de ampliação. Foi usado um filtro Gaussiano do padrão ISO 16610-71. Foram selecionadas uma resolução vertical de 50 nm e uma resolução lateral de 1,5 µm. Foi estabelecido um comprimento de amostragem de corte (λ_c) de 250 µm com um comprimento de perfil de 1,25 mm. Adicionalmente, o software Alicona MeasureSuite 5.3.1® foi usado para processar os dados dos parâmetros.

Resultados e discussões

A Figura 2 apresenta uma visão do equipamento, do processo e dos corpos de prova usinados. Nela, pode-se verificar cada região de alteração de cor da amostra (1-5), que corresponde à ordem crescente dos cinco níveis de energia.

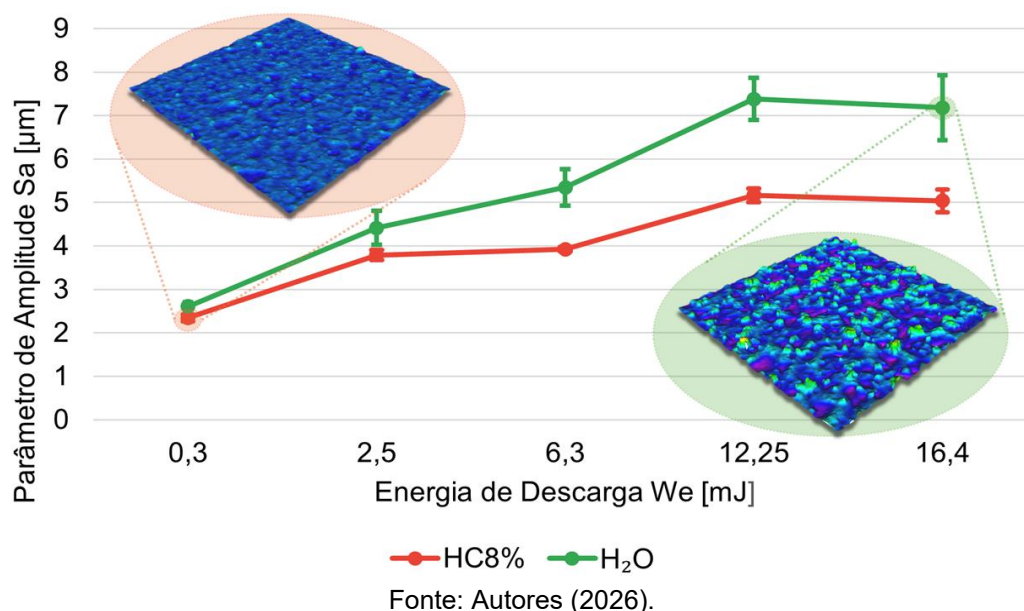
Figura 2 – Visão geral do equipamento e usinagem do Ti5553 com H₂O



Fonte: Autores (2026).

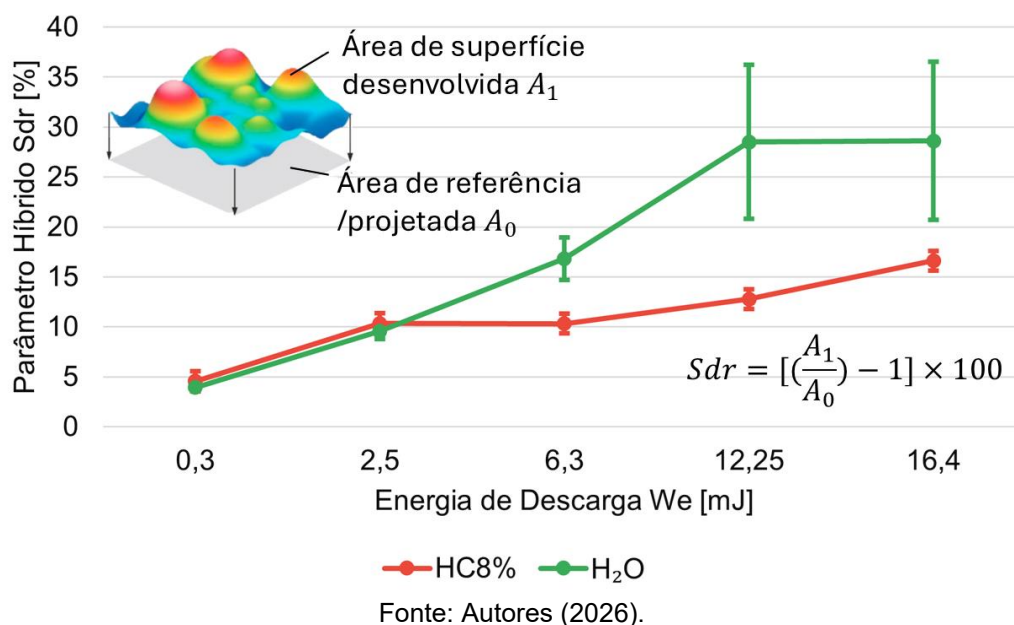
Para a análise dos resultados obtidos, foram inicialmente inseridas as médias e as variâncias dos principais parâmetros de textura Sa e Sdr, medidos nas regiões de mesmo nível energético para cada dielétrico estudado, e então, posteriormente, representadas em gráficos comparativos. Os resultados dos parâmetros são apresentados, respectivamente, na Figura 3 e na Figura 4.

Figura 3 – Comportamento do parâmetro de amplitude Sa na alteração da We e dielétrico



O gráfico da Figura 3 mostra uma reduzida alteração na textura medida para entre as descargas de 2,5 para 6,3 mJ, apenas em HC8%, e 12,25 para 16,4 mJ, em ambos os dielétricos.

Figura 4 – Comportamento do parâmetro híbrido Sdr na alteração da We e dielétrico



A Figura 4 mostra que para ambos os dielétricos, há uma tendência de aumento de Sdr com o incremento da We , indicando o aumento da área superficial produzida pelo processo. Torna-se evidente no dielétrico H_2O , que os valores e variações foram superiores aos obtidos com HC8%, destacando-se, a partir de 6,3 mJ.

Quando se compara o desempenho dos diferentes dielétricos com o aumento da We , a água deionizada apresenta valores médios mais elevados de rugosidade e um desvio padrão maior. Para a água deionizada, obteve-se Sa de 7,17 μm na maior We , enquanto, para HC8%, 5,04 μm . Os resultados do parâmetro Sdr foram expressivos na maior We , sendo: na H_2O de 28,61%, enquanto o HC8% foi 16,62%.

De acordo com Kunieda e Kitamura (2018), as áreas de descargas são mais concentradas no hidrocarboneto do que na água deionizada devido à sua viscosidade, mantendo os tamanhos do plasma gerado com gradiente energético maior e reduzindo as descargas anômalas, o que mantém a estabilidade na remoção do material. Isso corrobora os menores valores de Sa e Sdr para HC8%, pois as poças de fusão, mais largas e concentradas, acabam tornando-se de baixa profundidade e replicando maior uniformidade na superfície.

Considerações finais

Este estudo analisou a textura superficial obtida na usinagem por WEDM da liga Ti5553 utilizando dois diferentes dielétricos. As principais conclusões obtidas foram que, conforme o aumento da We , a H_2O promove como resultado uma superfície mais rugosa. Para $We = 16,4$ mJ, os valores de Sa e Sdr para H_2O foram, respectivamente, 42,55% e 72,22% maiores em relação aos resultados obtidos para HC8%. O HC8% obteve maior estabilidade durante os ensaios, apresentando um menor desvio padrão da média nas amostras usinadas, considerando ambos os parâmetros. Isso se torna mais evidente conforme o aumento de We . Quando observados os resultados de textura para um mesmo dielétrico em função de We , existem momentos em que o aumento da energia térmica não interfere nos parâmetros da textura da amostra, dentro dos parâmetros aqui testados.

Referência ao fomento recebido



O presente trabalho foi realizado com o apoio do Instituto Federal de Santa Catarina IFSC, por meio do Edital nº 03/2025/PROPPi PIBITI - PIJGW4318-2025.

Referências

DOS SANTOS, Rodrigo Gonçalves *et al.* Performance of cutting fluids with nanoparticles in the Ti5553 alloy turning process using high-speed cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 136, n. 10, p. 4623–4645, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-15126-5.

GASPERIN, V. *et al.* (2026). Performance of Different Dielectrics in Carbide Removal by WEDM. In: Beal, V.E., Ribeiro Junior, A.S. (eds) **Advances in Manufacturing Engineering Research: Lecture Notes in Mechanical Engineering**. Springer, Cham 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-09858-0_12

POROŚ, Dariusz. Comparative Analysis of Different WEDM Strategies Applied to Cut WC-Co Cemented Carbides. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 15, n. 4, p. 126–135, 2021. DOI: 10.12913/22998624/142561.

KUNIEDA, Masanori e KITAMURA, Tomoo. Observation of Difference of EDM Gap Phenomena in Water and Oil Using Transparent Electrode. **Procedia CIRP**, v. 68, n. April, p. 342–346, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.065.

WAGNER, Vincent; BAILI, Maher; DESSEIN, Gilles. The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5, p. 893-912, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6326-1>