

AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO POR WEDM COM FIO DE MOLIBDÊNIO NO INCONEL 718 ALTERANDO O MEIO DIELÉTRICO

Giovani Conrado Carlini^{1,3}

Cristiano da Silva

¹Instituto Federal de Santa Catarina-IFSC, Rua dos Imigrantes, 445, 89.254-430, Jaraguá do Sul, SC, Brasil.
giovani.carlini@ifsc.edu.br

Walter Lindolfo Weingaertner

²Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Campus Universitário Trindade, 88.010-970, Florianópolis, SC, Brasil

Ricardo Diego Torres

Fred Lacerda Amorim

³Pontifícia Universidade Católica do Paraná-PUCPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM, Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, 80.215-901, Curitiba, PR, Brasil.
fred.amorim@pucpr.br

Resumo. A superliga Inconel 718 possui um alto rendimento mecânico em comparação aos aços, oferecendo maior resistência a corrosão e capacidade de operar em temperaturas elevadas. No entanto, apresenta baixa usinabilidade por processos convencionais em virtude de sua complexa microestrutura. O processo de remoção torna-se potencializado realizando a usinagem por meio do efeito térmico proveniente de sucessivas descargas elétricas, sem mecanismos tribológicos. Na literatura não são encontradas pesquisas relacionadas ao processo de remoção por eletroerosão (WEDM) com fio de molibdênio no Inconel 718 e seu rendimento em diferentes dielétricos. Desta forma, o objetivo deste trabalho compreende em avaliar os efeitos da variação de energia de descarga na água deionizada e no hidrocarboneto como dielétricos. Foram utilizados cinco níveis de duração de descarga e intervalo entre pulsos para os dois dielétricos, mantendo as demais variáveis do gerador constantes. Os experimentos mostraram que o aumento da energia da descarga contribui para uma maior taxa de remoção de material. O dielétrico com hidrocarboneto representou a maior taxa de remoção de material e velocidade de avanço do fio. A textura da superfície apresentou uma redução na rugosidade com a menor densidade de energia e um comportamento de melhor estabilidade no hidrocarboneto em relação a água deionizada.

Palavras-chave: WEDM. Inconel 718. Meio dielétrico. Rendimento tecnológico. Textura da superfície.

1. INTRODUÇÃO

As superligas à base de níquel foram desenvolvidas em meados dos anos 1940 possuindo finalidade na utilização em componentes expostos a ambientes mecanicamente críticos, inicialmente pela manutenção de suas propriedades mecânicas e químicas quando submetidos em temperaturas elevadas, na ordem de 700°C. Atualmente, são amplamente usados na indústria química, petroquímica, nuclear, de energia e aeroespacial, utilizando-se em componentes de motores a reação, em navios de processamento petroquímico, turbinas para energia térmica e tubos trocadores de calor (Parida and Maity, 2018).

Entre as superligas à base de níquel, o Inconel 718 é um dos materiais mais utilizados por seu baixo custo de fabricação em relação as outras superligas. Sua condutividade térmica é baixa e possui alta taxa de endurecimento por deformação durante a operação de cisalhamento, tais fenômenos ocorrem por sua complexa microestrutura de matriz austenítica de base níquel em solução sólida supersaturada e posterior tratamento térmico de precipitação por envelhecimento artificial. Neste contexto, a capacidade de usinagem com ferramentas convencionais é reduzida. Normalmente, um método de usinagem não convencional como a remoção por descargas elétricas torna-se um processo potencializado na fabricação de componentes com Inconel 718 (Sharma, Prakash Misra, and Singhal, 2019).

A remoção por eletroerosão a fio, do inglês *wire electrical discharge machining* (WEDM), conforme relatado por Ho, *et al.* (2004), é um processo de usinagem não convencional amplamente utilizado, capaz de processar formas geométricas bidimensionais e tridimensionais complexas em quaisquer materiais condutores elétricos indiferente de suas características metalúrgicas e que apresentam grande dificuldade para manufatura por processos de usinagem convencionais. O fio ferramenta segue uma trajetória programada e remove o material por intermédio de uma sequência controlada de pulsos de descargas elétricas e intervalos entre estes pulsos, classificando-se como processo de usinagem

por remoção térmica. Onde ocorre inicialmente, de acordo com Mendes *et al.* (2014) a ignição e formação do canal de plasma, passando pela fusão e evaporação de uma pequena porção de material e encerrando o ciclo na ejeção do material fundido e limpeza da fenda de trabalho pelo dielétrico.

O processo apresenta vantagens tecnológicas e produtivas amplas, não ocorrendo mecanismos de ordem tribológica e deformações mecânicas provenientes de interação de ferramentas de corte durante a fabricação. Desta forma, as principais variáveis de entrada no processo são: corrente de descarga $\bar{i}_e$ (A), tensão média da descarga $\bar{u}_e$ (V) e a duração da descarga t_e (μ s). O produto entre estas variáveis resulta na energia de descarga W_e (J), conforme a Eq. 1 apresentada em Klocke e König (2007). De acordo com Reolon, *et al.* (2019), o parâmetro de tempo de intervalo entre pulsos sucessivos t_0 (μ s) possui influência significativa nos resultados de rendimento tecnológico para o processo, contribuindo para o aumento ou diminuição da taxa de descargas elétricas por segundo. Nesta direção, a duração do pulso de tensão t_i representa a soma do tempo de ignição da descarga com a t_e . Desta forma, a redução do tempo de intervalo reflete no aumento do avanço do fio V_f , pois, o período do ciclo de pulso t_p (μ s) torna-se reduzido conforme mostra a Eq. 2, aumentando a frequência das descargas elétricas.

$$W_e \approx \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \quad (1)$$

$$t_p = t_i + t_0 \quad (2)$$

Um componente comum a todos os sistemas de remoção por descarga elétrica é o meio dielétrico, normalmente aplicado no estado líquido. As funções do dielétrico são descritas por Klocke e König (2007), de forma a permitir a ionização do meio dielétrico; a formação do canal de descarga, concentrando a densidade de energia; a limpeza de subprodutos da remoção na fenda de trabalho; o arrefecimento e estabilização da temperatura da região da descarga elétrica e promover o isolamento elétrico do fio eletrodo da peça de trabalho.

Os principais meios dielétricos encontrados na literatura para WEDM são os hidrocarbonetos aplicados de maneira integral ou em emulsão (Carlini *et al.*, 2018) e água deionizada, podendo ser realizada a desmineralização por destilação ou por meio do processo de deionização com filtragem somada a exposição em resina mista (catiônica e aniônica). Niamat *et al.* (2017) desenvolveram um experimento comparando o meio hidrocarboneto em relação à água deionizada. Atingiram maiores valores de desgaste no eletrodo e maior taxa de remoção de material no meio hidrocarboneto integral e a rugosidade se apresentou em maior grandeza quando o dielétrico utilizado foi água deionizada.

Estudos realizados por Kunieda e Kitamura (2018) verificaram a diferença na taxa de remoção de material em descargas elétricas consecutivas foi significativa quando a frequência de descargas era alta entre os dois meios. A observação direta da distribuição das descargas mostra que as descargas possuem maior probabilidade de ocorrer concentradas no hidrocarboneto do que na água quando o intervalo entre pulsos é curto, porém, a viscosidade da água é menor, resultando no menor tempo para realização da limpeza da fenda de trabalho, além, da eficiência no resfriamento.

Desta forma, este trabalho avalia o desempenho da remoção por WEDM do Inconel 718. Investiga-se a aplicação dois meios dielétricos comumente utilizados, um meio composto por hidrocarboneto em emulsão e outro meio utilizando água deionizada, comparando-os em cinco níveis de duração de descarga e cinco níveis de tempo de intervalo entre os pulsos sucessivos e seus respectivos efeitos em termos de rendimento tecnológico, quantificando a taxa de remoção de material V_w , a velocidade de avanço do fio V_f e a textura da superfície da camada limite ressolidificada.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos na usinagem por descargas elétricas WEDM no Inconel 718 foram realizadas usando variáveis independentes de entrada constantes no processo, somadas a 3 parâmetros variáveis. Entre as variáveis fixas, foram selecionados a corrente de descarga de 7A, que representa as condições de desbaste para intermediárias do processo, além disso, a tensão em aberto u_i foi -70V (polaridade: catodo no fio) e velocidade do alimentação do fio W_s de 8m/min. Os ensaios foram desenhados para avaliar adequadamente os efeitos dos parâmetros elétricos independentes de entrada em relação a avaliação do seu desempenho no rendimento tecnológico em dois meios dielétricos diferentes: água deionizada e hidrocarboneto em emulsão de 8% Homy® Erosolv. A representação da estrutura metodológica apresenta-se na Fig. 1.

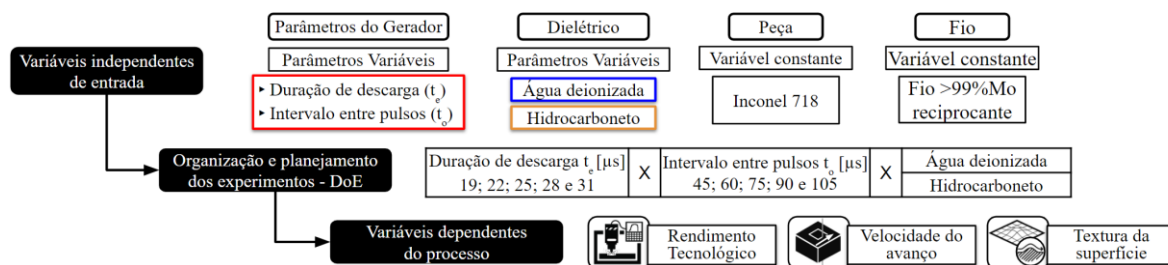


Figura 1. Representação esquemática do planejamento do experimento.

Os parâmetros variáveis usados nos experimentos foram a duração da descarga t_e , o tempo de intervalo entre os pulsos de descarga t_0 , e a alteração dos meios dielétricos nas condições propostas comparando-as. Como características de usinagem dependentes de saída, foram quantificadas a taxa de remoção de material V_w , a velocidade de avanço do fio V_f e o comportamento da textura das superfícies do Inconel 718 com uma representação tridimensional qualitativa e quantitativa em termos de rugosidade média da superfície S_a .

Os ensaios foram conduzidos em uma máquina +GF+ AgieCharmilles® FW1U CNC de 5 eixos com sistema de reaproveitamento do fio por intermédio de bobina reciprocante. O gerador foi programado para efetuar pulsos estáticos isoenergéticos, ou seja, controlam a duração de descarga e o tempo de intervalo entre pulsos. O fio utilizado possui diâmetro de 0,18mm tensionado na ordem de 1200N/mm² e não utiliza revestimento. Como composição química, a principal característica de construção do fio apresenta-se na pureza acima de 99% em peso de molibdênio.

Em relação as características das amostras de Inconel 718, sua composição química em peso pode ser verificada de acordo com a Tab. 1. Sobre a construção geométrica das amostras, foram usinados retângulos nas dimensões de 15x5x5mm, totalizando um perímetro de corte de 40mm. Não houve imersão no dielétrico, a aplicação ocorreu por pressão direcionada. Para cada condição de usinagem proposta, foram realizadas duas réplicas. O controle do tempo para cada operação se fez pelo software e interface disponível no equipamento.

Tabela 1. Composição química em peso do Inconel 718. Adaptado de (Baldin *et al.*, 2020).

Inconel 718 - Composição Química (% em peso)					
Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti
50-55	17-21	Balanco	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15
Al	Si	Mn	Cu	C	P
0,2-0,8	0,35 (máx.)	0,35 (máx.)	0,35 (máx.)	0,08 (máx.)	0,015 (máx.)

O desenvolvimento da pesquisa apresenta três estágios para coleta das respostas. O primeiro e segundo estágios estão relacionados ao desempenho tecnológico do processo, desta forma, torna-se possível compreender quais grandezas das variáveis se destacam em termos produtivos considerando a alteração do meio dielétrico. O terceiro estágio é uma análise do comportamento na textura da superfície observando os resultados dos dois primeiros estágios.

2.1. Primeiro estágio: quantificar a taxa de remoção de material V_w

A taxa de remoção de material é quantificada pela razão de um determinado volume de material removido em função do tempo. Nesta condição a variação da duração da descarga t_e é fator determinante na energia de descarga W_e , desta forma, quanto maior a t_e maior será a energia no sistema. Em detrimento do processo, fatores como a frequência mal dimensionada das descargas e descargas anômalas por contaminação excessiva na fenda de trabalho podem reduzir a taxa de remoção, como exemplo, presença de curto-circuito proveniente da deficiência de limpeza reproduzida pelo dielétrico.

Desta forma, avaliar o comportamento da grandeza elétrica na ordem de diferentes durações fornecidas pelo gerador de pulsos, somados as condições de manutenção fornecidas do meio dielétrico, tratando-se de suas características físicas e térmicas diferenciadas, são fatores que necessitam de maior compreensão para o dimensionamento correto do processo. As propriedades físicas e térmicas dos dielétricos são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Propriedades físicas e térmicas do hidrocarboneto e da água deionizada. Adaptado de Carlini *et al.* (2019); Klocke (2009); Kunieda e Kitamura (2018); Reolon *et al.* (2019).

Propriedade	Água	Hidrocarboneto	Unidade
Viscosidade a 40°C	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	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
Condutividade térmica	0,60	0,13	W/m.K
Calor de evaporação	2260	210	J/g

2.2. Segundo estágio: avaliar a velocidade de avanço V_f

Para avaliar a velocidade de avanço do fio V_f , dado em mm/min, foi dimensionado um perímetro de 60mm em cada amostra com 5mm de espessura, bem como, foi computado o tempo para realizar cada percurso. A V_f torna-se uma resultante das combinações dos parâmetros elétricos do gerador, da espessura da peça de trabalho e da efetiva aplicação do meio dielétrico. No ensaio realizado, por se tratar de um equipamento que possui o fio reciprocante, as alimentações superior e inferior necessitam possuir a mesma eficiência, desta forma, a pressão de aplicação do dielétrico foi selecionada na ordem de 0,25MPa.

2.3. Terceiro estágio: analisar a textura da superfície

No terceiro estágio são analisadas as texturas da superfície das amostras para o rendimento tecnológico do processo em 3 níveis de resposta. Neste sentido, foram selecionados os parâmetros de maior taxa de remoção de material V_w , os valores com as menores velocidades de avanço do foi V_f , por último, foi selecionada a condição média entre as variáveis t_c e t_0 do gerador de pulsos elétricos.

A análise topográfica das texturas nas superfícies das amostras foi realizada por um microscópio confocal Leica DCM 3D®, utilizando uma área de 1,0x2,5mm. O parâmetro de varredura na resolução vertical no confocal foi de 200µm utilizando uma lente objetiva de 10x. Para medir a rugosidade média da superfície S_a (µm) de cada amostra foi utilizado o software LeicaScan®, de acordo com as normas ISO 4287:2002 e ISO 25178-2:2012. A medição de rugosidade 3D difere de medição bidimensional avaliando a rugosidade em uma determinada superfície, fornecendo dados de distribuição e regularidade comparativamente ao longo de toda a área selecionada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta pesquisa tem como objetivo propiciar diretrizes para compreender a usinagem por WEDM usando fio de molibdênio no Inconel 718, utilizando comparativamente como dielétrico a água deionizada e o hidrocarboneto. Para atingir esse objetivo, os experimentos foram realizados em três etapas, adaptando parâmetros das variáveis de entrada apresentados por Reolon *et al.* (2019) em relação as variáveis disponíveis no equipamento. A primeira etapa trata do rendimento do processo em termos de taxa de remoção do material, a segunda etapa complementa o entendimento do processo, analisando a influência do tempo de intervalo no aumento da duração da descarga para cada meio dielétrico, assim, combinando a avaliação produtiva juntamente à primeira etapa. Por fim, a última etapa diz respeito à análise tridimensional da textura da superfície e efeitos resultantes das variações de energia de descarga na água deionizada e no hidrocarboneto utilizados.

3.1. Taxa de remoção de material - V_w

A taxa de remoção de material no processo de remoção é determinada não só pela remoção por descarga reproduzida por cada pulso de descarga, mas também pela estabilidade de usinagem. No processo, leva-se alguns microssegundos para o canal de plasma formado pela alta temperatura seja extinto (Kunieda *et al.*, 2005). Portanto, quando o intervalo de descarga é menor, a próxima descarga pode ocorrer próximo da descarga anterior, aproveitando o gradiente de temperatura no ponto de descarga, além, do dielétrico possuir menor tempo para promover a limpeza da fenda de trabalho.

De acordo com Amorim (2005), durante a usinagem por descargas elétricas ocorre certa contaminação da fenda de trabalho causada pelas partículas eletroerodidas e também por subprodutos da desintegração do dielétrico. Esses resíduos podem produzir efeitos positivos ou negativos sobre o rendimento do processo em termos da taxa de remoção de material, do desgaste dos eletrodos e acabamento da superfície, dentre outros aspectos.

Uma vez que a energia de descarga $W_e \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J], induzida na fenda de trabalho é o principal fator responsável pelo desempenho do processo de remoção na WEDM (Reolon *et al.*, 2019), foram quantificadas as taxa de remoção de material em mm³/min, mostradas na Fig. 2, em função da densidade de energia aplicada informada na Tab. 3.

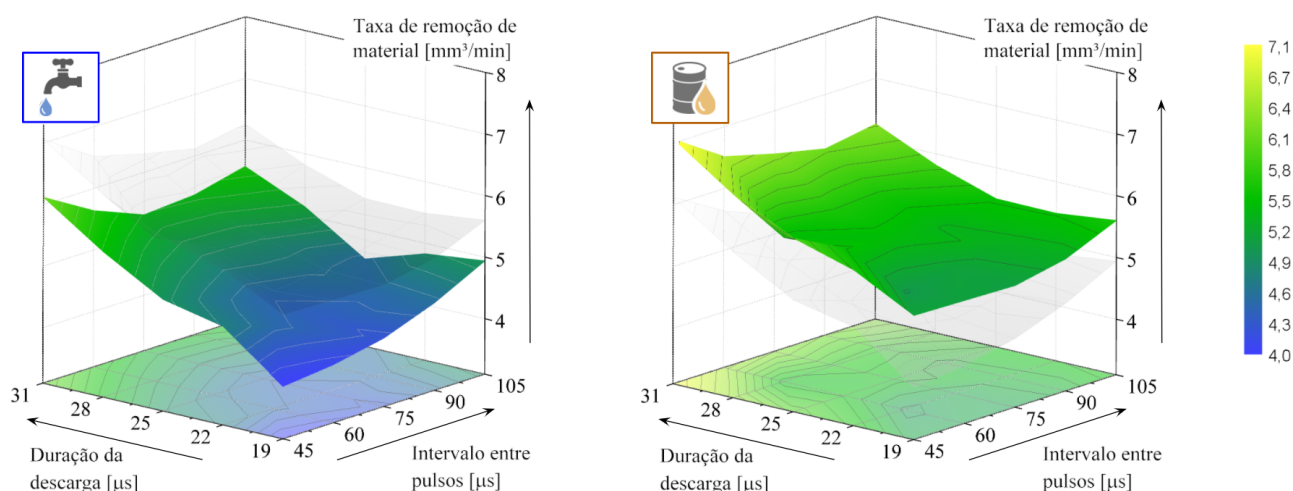


Figura 2. Comportamento da taxa de remoção de material na WEDM do Inconel 718 utilizando meio dielétrico água deionizada (esquerda) e utilizando hidrocarboneto (direita).

Tabela 3. Resultados da taxa de remoção de material para três condições de energia de descarga W_e .

Condição gerador	t_e [μ s]	t_o [μ s]	W_e [J]	Água [mm^3/min]	Hidrocarboneto [mm^3/min]
V_w maior	31	45	$15,19 \times 10^{-3}$	6,12	7,06
V_w intermediária	25	75	$12,25 \times 10^{-3}$	4,43	5,40
V_w menor	19	45/75	$9,31 \times 10^{-3}$	4,04	5,07

Observando os comportamentos mostrado na Fig. 2, podemos verificar a maior taxa de remoção de material na condição com meio dielétrico em hidrocarboneto com a duração de descarga t_e de 31 μ s e com intervalo entre pulsos de t_o de 45 μ s, foi quantificada em 7,06 mm^3/min . A diferença representa um total de 15,4% no aumento do rendimento produtivo para a mesma energia de descarga W_e aplicada de $15,19 \times 10^{-3}$ J. Na condição intermediária das variáveis aplicadas, o maior desempenho também foi obtido no hidrocarboneto, com 21,8% de aumento em W_e de $12,25 \times 10^{-3}$ J.

Para a menor taxa de remoção de material, ambos os meios apresentaram menores desempenhos com t_e de 19 μ s, contudo o comportamento no hidrocarboneto apresentou seu menor parâmetro no intervalo entre pulsos t_o de 75 μ s, para a condição com água deionizada a menor taxa foi quantificada no intervalo entre pulsos t_o de 45 μ s, contudo a taxa se estabeleceu na energia de descarga W_e de $9,31 \times 10^{-3}$ J.

Para o dielétrico com água deionizada, na menor duração de descarga t_e 19 μ s, o aumento do intervalo entre pulsos apresentou uma tendência de melhora na remoção, dessa forma, o comportamento corrobora com resultados apresentados por Kunieda e Kitamura (2018). Na condição com hidrocarboneto, ou autores apontam que para a inflexão apresentada, pode ser caracterizado pela combinação entre a menor viscosidade do meio e sua respectiva propagação das bolhas resultantes da evaporação e dissociação do meio dielétrico ionizado. Segundo o estudo, as bolhas possuem seu maior diâmetro nesta faixa de duração ($t_o \approx 75 \mu$ s) dificultando a ignição da próxima descarga elétrica.

3.2. Avaliação da velocidade de avanço - V_f

Na continuidade da observação dos fenômenos do processo da WEDM nos dois meios dielétricos utilizados, a avaliação do parâmetro da velocidade de avanço do fio V_f considera a relação do tempo de ciclo t_p , observado na Eq. 2, desta forma, a característica do volume de descargas no tempo ou a frequência das descargas é avaliada. Esta frequência torna-se uma solução de compromisso não apenas em função do tempo, mas, entre as variáveis de entrada gerais, ou seja, uma baixa duração de descargas faz com que o processo seja subutilizado ao passo que se a descarga for contínua não permite a correta sucessão dos fenômenos inerentes ao processo de remoção descritos em Klocke e König (2007).

Observando a Figura 3 são evidenciados os comportamentos da velocidade de avanço no fio para cada condição, bem como, são apresentadas na Tab. 4 os comparativos na tratando-se das mesmas condições analisadas no primeiro estágio.

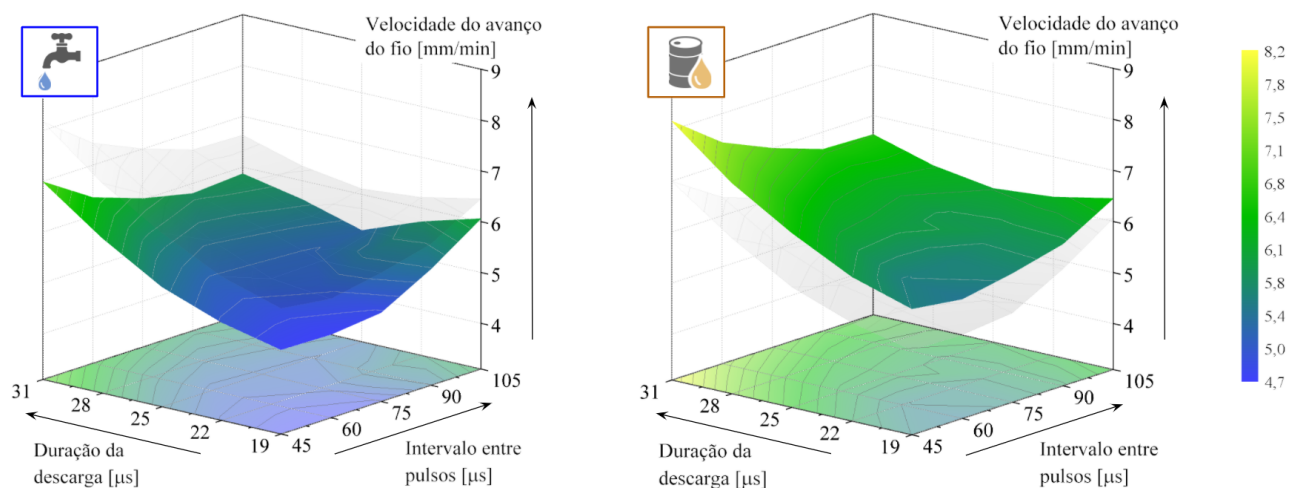


Figura 3. Comportamento da velocidade de avanço no fio para a WEDM do Inconel 718 utilizando meio dielétrico água deionizada (esquerda) e utilizando hidrocarboneto (direita).

Tabela 4. Resultados da velocidade de avanço do fio para três condições de energia de descarga W_e .

Velocidade do avanço	t_e [μ s]	t_o [μ s]	Água [mm/min]	Hidrocarboneto [mm/min]
V_f maior	31	45	6,99	8,17
V_f intermediária	25	75	5,46	5,98
V_f menor	19	45/60	4,76	5,44

Pode ser verificado na Fig. 3 um padrão no comportamento da velocidade de avanço do fio na WEDM do Inconel 718. Para as condições com a duração de descarga menor são mais bem sucedidas as operações com um intervalo entre pulsos maiores. De modo oposto, as maiores velocidades de avanço V_f , foram reproduzidas quando a duração de descarga foi maior e o intervalo entre pulsos menor. O meio hidrocarboneto manteve sua condição produtiva maior em relação a água deionizada, sendo, para a condição de maior V_f uma diferença de 16,8%, seguida pela intermediária apresentando uma total de 9,5% e durante a menor V_f totalizando 14,2% superior no hidrocarboneto. Pode-se verificar que este efeito apresenta uma tendência não linear.

Entre os fatores que contribuem para estes resultados, são encontrados em Kunieda *et al.* (2005) que o aumento da densidade de energia representa maior rendimento do processo. A diminuição do t_0 mantendo t_c elevada representou um maior ciclo de descargas produtivas pelo menor tempo intervalo entre elas. Fica constatada a relação de compromisso entre as frequências das descargas, uma vez que, para densidades de energia menores o fio possui um maior avanço no aumento do intervalo entre pulsos. Kunieda e Kitamura (2018) descrevem que o meio dielétrico com hidrocarboneto apresentou uma maior número cumulativo de descargas em relação a água deionizada, considerando a mesma frequência.

3.3. Textura da superfície

As características da textura de superfície no processo de remoção são resultantes dos parâmetros variáveis e das condições do meio, quanto mais material fundido é ejetado a cada pulso de descarga, as crateras se tornam mais profundas e a rugosidade da superfície usinada é aumentada, dessa forma, quando a duração da descarga é aumentada, a intensidade dos picos e das protuberância geradas pelas descargas elétricas são maiores. Analisando a Fig. 4, faz-se possível evidenciar de forma qualitativa a morfologia das texturas e realizar a comparação métrica da influência na alteração do meio dielétrico, apresentada quantitativamente na Tab. 5.

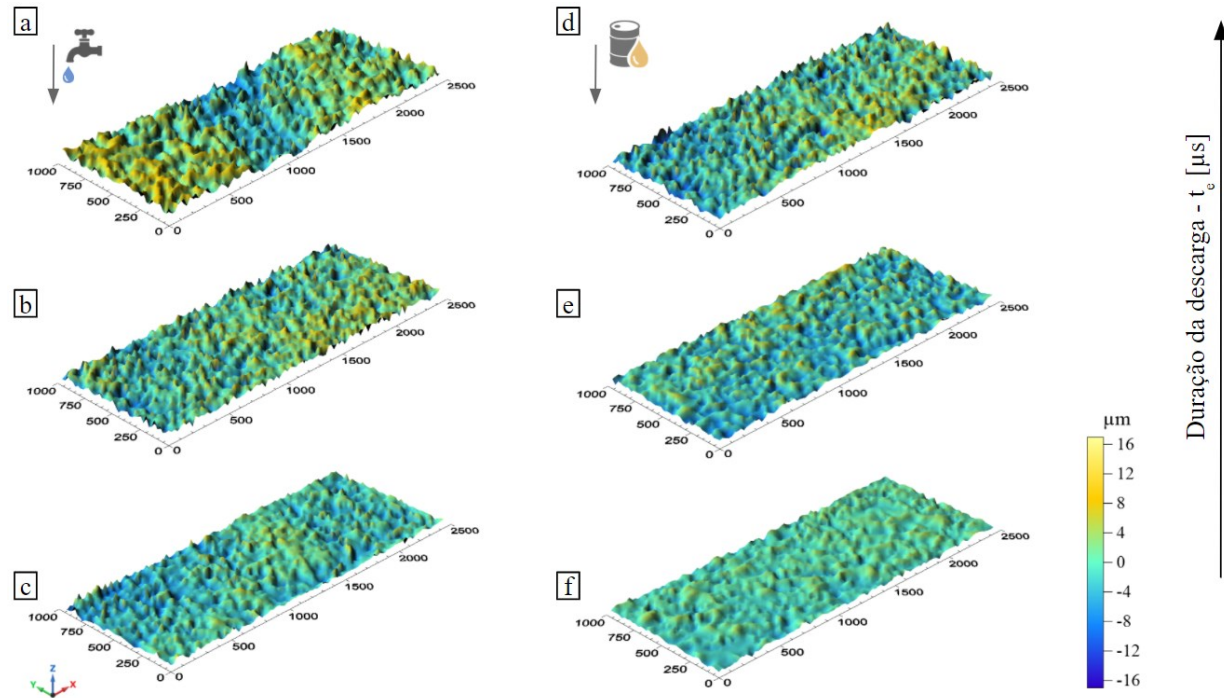


Figura 4. Textura da superfície utilizando meio dielétrico água deionizada (esquerda) e utilizando hidrocarboneto (direita). Em (a) e (d): t_c 31 μ s e t_0 45 μ s; em (b) e (e): t_c 25 μ s e t_0 75 μ s e em (c) e (f): t_c 19 μ s e t_0 45/75 μ s.

Tabela 5. Resultados da rugosidade da superfície média para três condições de duração de descarga t_c .

Superfície média - Sa	t_c [μ s]	t_0 [μ s]	W_e [J]	Água [μ m]	Hidrocarboneto [μ m]
V_w maior	31	45	$15,19 \times 10^{-3}$	8,188	5,901
V_w intermediária	25	75	$12,25 \times 10^{-3}$	6,017	4,385
V_w menor	19	45/75	$9,31 \times 10^{-3}$	4,629	3,112

Realizando uma análise qualitativa da Fig. 4, fica demonstrada que as condições para a mesma densidade de energia e mesma duração de descarga apresentam menor rugosidade na superfície média para as operações que utilizaram o meio dielétrico em hidrocarboneto. A rugosidade diminui a partir da menor duração de descarga e consequentemente da

densidade de energia, conforme relata Davim (2010). A maior energia contribui para um plasma denso, intensificando o efeito Joule, aumentando a profundidade das protuberâncias e formando a acentuação dos picos originados pela camada ressolidificada não ejetada da periferia da descarga.

Entre as funções do meio dielétrico, deve sustentar este canal plasma formado durante a descarga, dessa forma, o hidrocarboneto apresentou melhor desempenho. De acordo com Kunieda e Kitamura (2018) os locais de sustentação do canal de plasma não são determinados aleatoriamente. Mesmo quando a usinagem é estável, os locais de descarga não foram-se perfeitamente dispersos ao longo do comprimento do corte, a próxima descarga ocorre provavelmente na periferia da bolha gerada pela implosão da descarga anterior (Kitamura, Kunieda, and Abe, 2015). Assim, quando o intervalo entre pulsos é menor, mas suficientemente longo para extinguir o plasma gerado pela descarga anterior, contribuindo para o hidrocarboneto apresentar melhores condições no rendimento do processo. Tal condição pode ser esclarecida pelas características físicas da viscosidade, menores condutividade elétrica e capacidade térmica específica resultando no efeito positivo no rendimento do processo e textura.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou as influências do rendimento tecnológico do processo e textura da superfície na remoção do Inconel 718 por WEDM com fio de molibdênio, utilizando como meio dielétrico a água deionizada e hidrocarboneto em emulsão de 8%. O processo WEDM com fio de molibdênio apresenta raras referências e o comportamento tecnológico não são totalmente conhecidos até hoje. A variação dos meios dielétricos e a aplicação no Inconel 718 com fio de molibdênio proposta é inédita. A partir dos resultados, podem-se tirar as seguintes conclusões: (i) a alteração do meio dielétrico influenciou no rendimento tecnológico do trabalho aqui estudados; (ii) a taxa de remoção do material V_w apresentou aumento quando a duração da descarga foi maior, logo, a energia de descarga foi aumentada. Com o maior desempenho em todas as variáveis utilizando o hidrocarboneto como dielétrico; (iii) a velocidade de avanço do fio V_f apresentou uma tendência de rendimento quando a duração de descarga t_c é menor e o intervalo entre pulsos t_0 é maior, invertendo-se proporcionalmente a partir da condição média t_c de 25 μ s; (iv) a maior velocidade de avanço foi encontrada com maior duração de descarga t_c de 31 μ s no menor intervalo entre pulsos t_0 45 μ s, representando uma taxa de 16,8% superior no hidrocarboneto; (v) o aumento da duração da descarga contribui para o aumento da rugosidade média na superfície. À medida que ocorre uma maior duração de t_c , ocorre o incremento do desvio dimensional. As características físicas dos dielétricos contribuem para uma métrica quantitativa na textura da superfície, com destaque para as menores rugosidades no hidrocarboneto em relação a água deionizada para as mesmas condições de energia de descarga elétrica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Pesquisa em Usinagem - LAUS da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR pelo fornecimento do material para a fabricação das amostras. Ao Laboratório de Máquinas Operatrizes do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Câmpus Jaraguá do Sul/RAU pela disponibilidade do equipamento WEDM e respectivos insumos e à Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC pelo Laboratório de Óptica - LabOpt.

6. REFERÊNCIAS

- Amorim, F. L., and Weingaertner, W. L. 2005. "The Influence of Generator Actuation Mode and Process Parameters on the Performance of Finish EDM of a Tool Steel." *Journal of Materials Processing Technology* 166(3):411–16. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.026.
- Baldin, V., Baldin, C. R. B., Machado, A. R., and Amorim, F. L. 2020. "Machining of Inconel 718 with a Defined Geometry Tool or by Electrical Discharge Machining." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42(5):1–14. DOI: 10.1007/s40430-020-02358-7.
- Carlini, G. C., Amorim, F. L., and Weingaertner, W. L. 2019. "Influence of Different Grades of CuW Electrodes When Die Sinking ED-Machining of Cemented Carbide." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-019-03982-x.
- Carlini, G. C., Xavier, F. A., Weingaertner, W. L., Di Maiocchi, H., e Fodi, E. 2018. "Análise de Parâmetros Na Remoção de Metal Duro Utilizando WEDM." *Anais Do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. DOI: 10.26678/ABCM.CONEM2018.CON18-1266.
- Davim, J. P. 2010. *Surface Integrity in Machining*. edited by J. Paulo Davim. London: Springer London.
- Ho, K. H., Newman, S. T., Rahimifard, S., and Allen, R. D. 2004. "State of the Art in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44(12–13):1247–59. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.017.
- Kitamura, T., Kunieda, M., and Abe, K. 2015. "Observation of Relationship between Bubbles and Discharge Locations in EDM Using Transparent Electrodes." *Precision Engineering* 40:26–32. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.09.009.
- Klocke, F. 2009. *Manufacturing Processes 2*. Berlin: Grinding, Honing, Lapping. Springer Berlin Heidelberg.

- Klocke, F., and König, W. 2007. *Fertigungsverfahren* 3. edited by 5. Berlin: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung. Springer Berlin Heidelberg.
- Kunieda, M., and Kitamura, T. 2018. "Observation of Difference of EDM Gap Phenomena in Water and Oil Using Transparent Electrode." *Procedia CIRP* 68(April):342–46. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.065.
- Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., and Schumacher, B. M. 2005. "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process." *CIRP Annals* 54(2):64–87. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60020-1.
- Mendes, L. A., Amorim, F. L., and Weingaertner, W. L. 2014. "Automated System for the Measurement of Spark Current and Electric Voltage in Wire EDM Performance." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 37(1):123–31. DOI: 10.1007/s40430-014-0171-x.
- Niamat, M., Sarfraz, S., Aziz, H., Jahanzaib, M., Shehab, E., Ahmad, W., and Hussain, S. 2017. "Effect of Different Dielectrics on Material Removal Rate, Electrode Wear Rate and Microstructures in EDM." *Procedia CIRP* 60:2–7. DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.023.
- Parida, A. K., and Maity, K. 2018. "Comparison the Machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in Hot Turning Operation." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 21(3):364–70. DOI: 10.1016/j.jestech.2018.03.018.
- Reolon, L. W., Laurindo, C. A. H., Torres, R. D., and Amorim, F. L. 2019. "WEDM Performance and Surface Integrity of Inconel Alloy IN718 with Coated and Uncoated Wires." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 100(5–8):1981–91. DOI: 10.1007/s00170-018-2828-6.
- Sharma, V., Prakash Misra, J., and Singhal, P. 2019. "Multi-Optimization of Process Parameters for Inconel 718 While Die-Sink EDM Using Multi-Criterion Decision Making Methods." *Journal of Physics: Conference Series* 1240(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1240/1/012166.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Evaluation of WEDM Removal with Molybdenum Wire in Inconel 718 Altering the Dielectric Liquid

Giovani Conrado Carlini ^{1,3}

Cristiano da Silva

¹Instituto Federal de Santa Catarina-IFSC, Rua dos Imigrantes, 445, 89.254-430, Jaraguá do Sul, SC, Brasil.
giovani.carlini@ifsc.edu.br

Walter Lindolfo Weingaertner

²Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Campus Universitário Trindade, 88.010-970, Florianópolis, SC, Brasil

Ricardo Diego Torres

Fred Lacerda Amorim

³Pontifícia Universidade Católica do Paraná-PUCPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM, Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, 80.215-901, Curitiba, PR, Brasil.
fred.amorim@pucpr.br

Abstract. The Inconel 718 superalloy has high mechanical performance compared to steel, offering more excellent resistance to corrosion and the ability to operate at high temperatures. However, it has low machinability by conventional processes due to its complex microstructure. The removal process is enhanced by machining through the thermal effect from successive electrical discharges without tribological mechanisms. In the literature, there are no studies related to the process of removal by WEDM with molybdenum wire in Inconel 718 and its performance in different dielectrics. Thus, this work aims to evaluate the effects of discharge energy variation in deionized water and hydrocarbon as dielectrics. Five discharge duration and the interval between pulses were used for the two dielectrics, keeping the other generator variables constant. The experiments showed that the increase in the discharge energy contributes to a higher material removal rate. The hydrocarbon dielectric represented the highest material removal rate and advanced speed. The surface texture showed a reduction in roughness with the lowest energy density and better hydrocarbon stability to deionized water.

Keywords: WEDM. Inconel 718. Dielectric liquid. Process technological performance. Surface texture.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.