

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO  
COM PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO NA USINAGEM DE AÇOS DAC MAGIC®

por

Daniel Kichler Martins

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Martins, Daniel Kichler

ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO COM PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO NA USINAGEM DE AÇOS DAC MAGIC® / Daniel Kichler Martins.

-- 2021.

20 f.

Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. PM-EDM. 2. Pó de grafite. 3. Taxa de remoção de material. 4. Taxa de desgaste de eletrodo. 5. Acabamento superficial. I. João de Souza, André, orient. II. Título.

Daniel Kichler Martins

ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROEROSÃO  
COM PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO NA USINAGEM DE AÇOS DAC MAGIC®

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA  
DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre, 29 de novembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

**ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE  
ELETROEROSÃO COM PÓ EM SUSPENSÃO NO DIELÉTRICO  
NA USINAGEM DE AÇOS DAC MAGIC®**

**Daniel Kichler Martins**  
danikichler@gmail.com

**Resumo.** Embora a usinagem por eletroerosão por penetração seja um dos processos de usinagem não-convencionais mais conhecidos atualmente, sua baixa taxa de remoção de material ainda a faz ser vista, muitas vezes, como um “mal necessário” pela indústria. Dentre as muitas abordagens comumente testadas a fim de otimizar seu desempenho, a mistura de certos pós ao dielétrico vem apresentando resultados genuinamente promissores. Assim, este estudo se propõe a analisar os efeitos da aplicação de pó de grafite em suspensão ao dielétrico no processo de usinagem por eletroerosão (PM-EDM) de aços DAC MAGIC® em comparação ao processo convencional (sem a aplicação de pó ao dielétrico). Foram avaliados diferentes parâmetros de desempenho tais como taxa de remoção de material, taxa de desgaste de eletrodo e acabamento superficial em experimentações com diferentes condições de corte para cada processo. Os experimentos revelaram aumentos próximos de 7% na taxa de remoção de material e reduções de aproximadamente 20% na rugosidade final da superfície em operações de acabamento. Esses resultados, caso sejam replicáveis, sugerem ser possível a obtenção de peças acabadas apenas com a utilização de estratégias de semiacabamento.

**Palavras-chave:** PM-EDM, Pó de grafite, Taxa de remoção de material, Taxa de desgaste de eletrodo, Acabamento superficial.

**Study on the effects of the application of powder-mixed dielectric on the electrical discharge machining process of DAC MAGIC® steel**

**Abstract.** Even though die-sinking electrical discharge machining is one of the most well-known non-conventional machining processes currently, its low material removal rate still makes it be seen as a “necessary evil” by the industry. Among many approaches commonly tested to optimize its performance, mixing certain powders to the dielectric has shown promising results. Thus, this study aims to analyze the effects of the graphite powder-mixed dielectric to the electrical discharge machining process (PM-EDM) on DAC MAGIC® steel compared to the conventional process (powder-free dielectric). Distinct performance parameters, such as material removal rate, tool wear rate, and surface finish, were evaluated in experiments under different cutting conditions for each process. The experiments showed an increase of approximately 7% on the material removal rate and an approximately 20% decrease in surface roughness on finishing operations. These results, if replicable, suggest the possibility of obtaining finished workpieces with only the use of semi-finishing strategies.

**Keywords:** PM-EDM, Graphite powder, Material removal rate, Tool-wear rate, Surface finish.

## NOMENCLATURA

EDM	Usinagem por eletroerosão ( <i>electrical discharge machining</i> )	
PM	Mistura de pó ao dielétrico ( <i>powder-mixed dielectric</i> )	
PM-EDM	Usinagem por eletroerosão com pó em suspensão no dielétrico	
CP	Corpo de prova	
GAP	Distância mínima entre o eletrodo e a peça para que haja a criação do arco elétrico	
TRM	Taxa de remoção de material	[mm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> ]
TDE	Taxa de desgaste do eletrodo	[mm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> ]
Ra	Rugosidade média	[μm]
Rz	Rugosidade média parcial	[μm]

## 1. INTRODUÇÃO

A constante busca pela vantagem competitiva compeliu empresas de todo o mundo a buscar maneiras de tornar seus produtos únicos e mais baratos em relação aos de seus concorrentes. Para a fabricação de peças fundidas, a possibilidade de injetar componentes de geometrias complexas se mostra uma alternativa muito atrativa do ponto de vista financeiro, ao eliminar a necessidade de processos de fabricação posteriores. Para tornar isso possível, muitas indústrias passaram a buscar tecnologias novas que fossem capazes de realizar aquilo que nenhum outro processo convencional era capaz até o momento. Dentre tantos processos não-convencionais, a usinagem por eletroerosão (EDM), desenvolvida e aplicada em escala industrial na antiga União Soviética pelo casal de pesquisadores russos Lazarenko (Natalie I. e Boris R.) em 1943 durante a Segunda Guerra Mundial (MARASHI *et al.*, 2016) se destacou, por não só conseguir usar materiais metálicos condutores de qualquer dureza, mas também por possibilitar a obtenção de geometrias complexas (SINGH e SINGH, 2015).

A usinagem por eletroerosão consiste em uma série de descargas elétricas repetidas entre uma ferramenta chamada eletrodo e a peça na presença de fluido dielétrico (BHATTACHARYA *et al.*, 2012). Embora um processo extremamente lento e impreciso em sua concepção, seu potencial único de aplicação foi o grande fator que impulsionou a realização de pesquisas e estudos que o tornaram atualmente um dos principais processos de usinagem adotados pela indústria (SCHUMACHER, 2004).

Em 1980, Erden e Bilgin (1981) observaram potenciais melhorias no desempenho da EDM ao misturar certos pós ao dielétrico, um processo posteriormente intitulado usinagem por eletroerosão com pó em suspensão no dielétrico (PM-EDM). Desde então, diversos estudos vêm analisando tanto a influência de diferentes pós em diferentes concentrações nos parâmetros de saída da EDM (SINGH e SINGH, 2015), como também a taxa de remoção de material, a taxa de desgaste do eletrodo e o acabamento superficial da peça.

Apesar de todos os benefícios observados até o momento (MARASHI *et al.*, 2016; JOSHI e JOSHI, 2019), a PM-EDM ainda não é vista como um processo economicamente atrativo para a aplicação industrial. Os dados até agora obtidos, embora não escassos, ainda não trazem um claro consenso a respeito de seu real comportamento. Além disso, a dificuldade em evitar a precipitação do pó, em manter uma concentração constante circulando no dielétrico e ao mesmo tempo filtrar todo o cavaco usinado da peça são fatores que dificultam sua aplicação.

O objetivo deste estudo é, portanto, analisar comparativamente os efeitos da aplicação ou não de pó de grafite em suspensão ao dielétrico no desempenho do processo de usinagem por eletroerosão em operações de desbaste pesado, desbaste, semiacabamento, e acabamento de aços DAC MAGIC<sup>®</sup> utilizados na fabricação de moldes de fundição por injeção de produtos da STIHL

Ferramentas Motorizadas Ltda. tais como cilindros de motores de combustão interna, volantes de inércia e carcaças de polímero.

### 1.1. PM-EDM

Conforme já observado pelos múltiplos estudos realizados sobre a PM-EDM nas últimas décadas, a introdução de pó ao dielétrico pode provocar diferentes efeitos – tanto positivos quanto negativos – à usinagem por eletroerosão. O material do pó, seu tamanho de grão, sua concentração no dielétrico, a eficiência do sistema de circulação e diversos outros parâmetros de entrada da máquina, tanto controláveis quanto não-controláveis, terão influência no impacto que a PM-EDM terá na performance do processo. Assim, para encontrar uma condição na qual sua aplicação possa ser ao mesmo tempo benéfica e economicamente viável ao processo produtivo, é preciso primeiro entender o princípio de funcionamento deste processo.

Após a primeira descarga elétrica ao início do processo, as descargas subsequentes ocorrem em regiões nas quais há presença de partículas, que formarão uma ponte entre o eletrodo e a peça. A mistura de partículas ao dielétrico, portanto, não altera o mecanismo básico pelo qual o processo ocorre, mas sim proporciona um meio mais propício para a propagação das descargas, através da redução da resistividade dielétrica e, conseqüentemente, do aumento do *GAP* (distância entre o eletrodo e a peça em que a voltagem aplicada é capaz de ionizar o dielétrico e, assim, permitir a criação do arco elétrico). O maior *GAP* reduzirá o fluxo de calor, o que reduzirá a remoção de calor por descarga, melhorando o acabamento superficial da peça (RATHI e MANE, 2014; SCHUMACHER, 2004). A redução da resistividade dielétrica, porém, ao ampliar a frequência pela qual descargas elétricas ocorrem, aumenta a taxa de remoção de material, que sobrepõe a redução causada pelo aumento do *GAP* (MARASHI *et al.*, 2016; SINGH e SINGH, 2015). O mesmo pode ser observado na taxa de desgaste do eletrodo, que mostra um comportamento diretamente proporcional a variações na taxa de remoção de material (SULAKHE *et al.*, 2018).

### 1.2. Abordagem do Estudo

Diferentemente da abordagem mais comumente utilizada pelos artigos científicos feitos até o momento sobre o assunto, na qual é feita uma comparação entre EDM e PM-EDM de experimentos onde apenas um parâmetro de entrada varia, este estudo busca avaliar os impactos da aplicação de pó em suspensão a processos de usinagem por eletroerosão por penetração cujos parâmetros de entrada foram previamente definidos pela própria empresa fabricante da máquina a fim de proporcionar a melhor condição de corte por eletroerosão possível para um dado acabamento superficial desejado. Os resultados, então, deverão indicar se é válida a substituição da EDM pela PM-EDM enquanto se mantêm idênticos os parâmetros de entrada otimizados para processos de usinagem por eletroerosão por penetração convencional (sem a utilização de pó em suspensão).

As condições de corte foram selecionadas considerando o acabamento superficial esperado. Com combinações de parâmetros cuja rugosidade média lateral esperada varia de 4,56 a 10,7  $\mu\text{m}$  e cuja rugosidade média frontal esperada varia de 5,7 a 13,0  $\mu\text{m}$ , além de poder comparar os efeitos da aplicação do pó ao dielétrico em relação ao processo convencional, espera-se também observar se a PM-EDM traz resultados diferentes em operações de desbaste em relação a operações de acabamento. Tendo em vista que a aplicação de EDM se dá pela necessidade de usinar regiões com difícil acesso de ferramentas convencionais e em peças com geometria complexa, mais comumente usinadas pela área frontal do eletrodo, é especialmente importante avaliar este parâmetro de rugosidade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em uma máquina de eletroerosão por penetração AgieCharmilles CNC Actspark SP3, apresentada na Fig. 1, foram realizados dois experimentos de EDM submersa de mesma duração. Cada experimento consistiu de quatro operações de usinagem utilizando os quatro programas padrão disponibilizados pela fabricante da máquina e apresentados na Tab. 1. Os experimentos visaram comparar os efeitos do dielétrico livre de impurezas na eletroerosão ao dielétrico com adição de pó de grafite. O dielétrico utilizado nos testes foi um desengraxante alcalino base solvente SOLVO CLEAN 100M fornecido pela Quaker Houghton.

Figura 1 – Máquina de usinagem por eletroerosão AgieCharmilles CNC Actspark SP3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 – Valores de referência extraídos do manual de instruções da máquina de eletroerosão contendo os programas padrão que serão utilizados nos testes.

No.	Fp (cm <sup>2</sup> )	Safe 2 GAP (mm)	2 GAP (mm)	Veloc. Speed (mm <sup>3</sup> /min)	Des. Wear (%)	Ra Lat (μm)	Ra Fr (μm)	Pol	CC	HI	PI	PG	PW	Comp	Sens. Gain	Limite	
																PG	Comp
334	12	0.600	0,320	320	0,20	10,7	13,0	+	0	0	14	12	15	65	15	8	52
354	8	0.510	0,300	330	0,60	8,40	10,5	+	0	0	14	12	14	65	15	8	52
331	4	0.227	0,340	90	0,30	5,60	7,00	+	0	0	11	12	14	70	12	6	52
330	3	0.210	0,270	62	0,50	4,56	5,70	+	0	0	10	12	13	70	12	5	52

334: Grafite fino – aço (desbaste); 354: Grafite fino – aço (desbaste pesado); 331: Grafite fino – aço (semiacabamento); 330: Grafite fino – aço (acabamento).

Fonte: Manual da máquina AgieCharmilles CNC Actspark SP3.

### 2.1. Caracterização e Preparação dos Eletrodos e dos Corpos de Prova

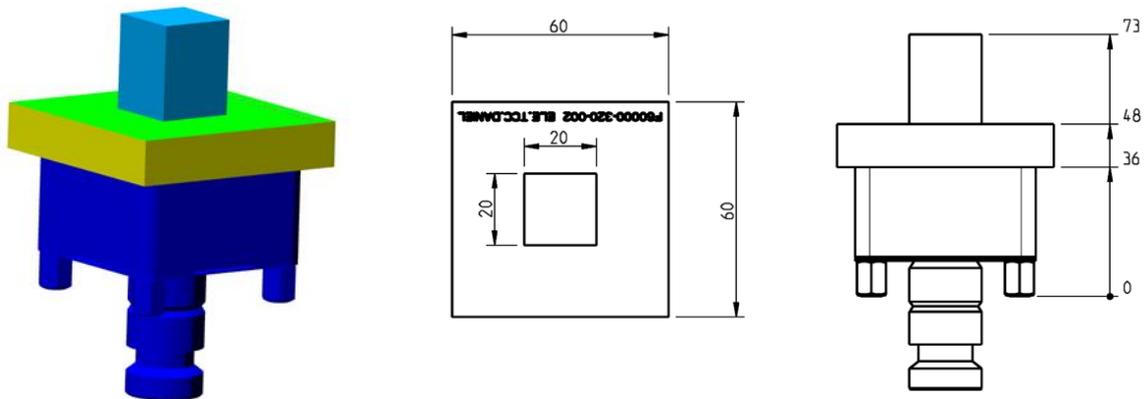
Os eletrodos foram fabricados a partir de grafite PFE-5 fornecido pela empresa GES – Grafites Especiais Comercio de Produtos de Carbono Ltda.; um material que, por apresentar alta densidade e finos grãos, é recomendado principalmente para operações de acabamento. Suas características são apresentadas na Tab. 2 Para a experimentação, oito eletrodos de 60 x 60 x 37 mm (Fig. 2) foram construídos a partir de blocos de grafite. A sua área de queima foi de 20 x 20 mm, podendo penetrar até 27 mm de profundidade.

Tabela 2 – Especificações do grafite fornecido pela empresa GES

Grafites	Densidade	Tamanho da partícula	Resistividade elétrica	Resistência à flexão	Resistência à compressão	Dureza	Porosidade
	g/cm <sup>3</sup>	μm	μΩm	MPa	MPa	Shore C	%
PFE-5	1,83	7	15	57	108	58	13

Fonte: Grafites Especiais Comercio de Produtos de Carbono Ltda.

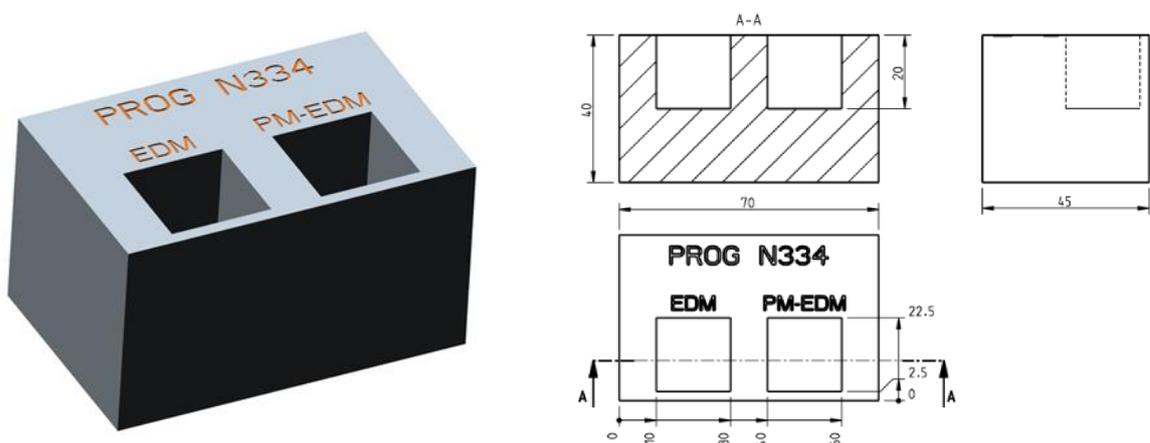
Figura 2 – Geometria dos eletrodos-ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram compostos de aço DAC MAGIC<sup>®</sup> fornecidos pela empresa Hitachi High-Tech Steel do Brasil Ltda., tratados termicamente com dureza de 47 HRC. Este aço é desenvolvido especialmente para aplicações em moldes de fundição por injeção por sua excelente resistência a temperaturas elevadas, a trincas térmicas e a fragilização por corrosão sob tensão. Assim, foram preparados quatro CPs com dimensões de 70 x 45 x 40 mm. A Figura 3 mostra um esboço da geometria de um CP após a experimentação.

Figura 3 – Esboço dos corpos de prova em sua fase final.



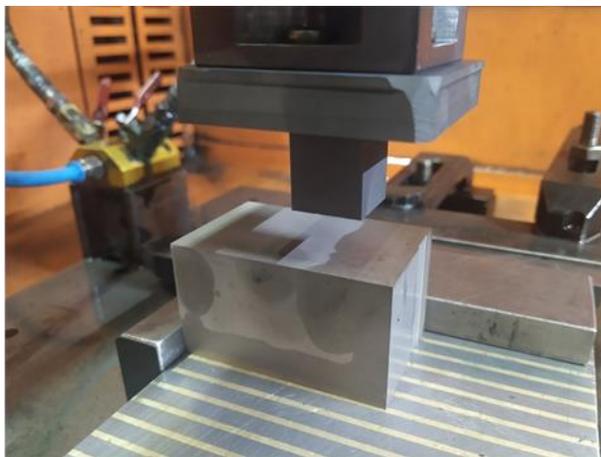
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.2. Experimentação

Primeiramente, foram realizadas as quatro operações de usinagem de EDM convencional (desbaste pesado, desbaste, semiacabamento e acabamento). Para evitar a possibilidade de os testes de desbaste consumirem todo o corpo de prova antes do fim de uma duração pré-determinada, a

duração dos experimentos foi definida ao longo do experimento inicial. Os CPs tiveram sua massa medida e, então, foram feitos os preparos para a segunda bateria experimental. A Figura 4 mostra o *setup* utilizado para a realização dos experimentos.

Figura 4 – *Setup* utilizado para realização dos experimentos, no qual a posição dos CPs é garantida pelo esquadro, e sua fixação, pela base magnética.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na PM-EDM, as descargas elétricas são assistidas pela presença de pós específicos misturados ao dielétrico, que se alinham entre o eletrodo e a peça, e servem como uma ponte para a passagem da energia elétrica ao reduzir a resistividade dielétrica (MARASHI *et al.*, 2016). Assim, a fim de manter constante a densidade de pó misturada ao dielétrico nos experimentos de PM-EDM, foram necessários alguns ajustes na parte estrutural da máquina. A AgieCharmilles CNC Actspark SP3, como qualquer outra máquina de eletroerosão, possui filtros responsáveis pela remoção de quaisquer impurezas presentes no dielétrico, seja originado do desgaste do eletrodo ou do desgaste da peça. No entanto, uma vez que a presença de certas impurezas no dielétrico é desejada, fez-se necessário encontrar uma alternativa para a remoção apenas das partículas indesejadas. Sabendo-se que, diferentemente do cavaco removido do CP, o pó de grafite misturado ao dielétrico (idêntico ao material do eletrodo) é não-magnético, optou-se por remover o filtro da máquina e instalar ímãs próximos à zona de queima, que deverão atrair as impurezas metálicas e possibilitar o fluxo do pó de grafite pelo sistema de circulação, mantendo-o em constante agitação e minimizando a precipitação desse pó.

Feitas as alterações, 4,0 g/l de pó de grafite PFE-5 foram misturados ao dielétrico utilizando o sistema de circulação da máquina assistido por agitação manual, e deu-se início à segunda experimentação, novamente, com a mesma duração utilizada na primeira. Essa concentração foi escolhida, pois alguns estudos científicos já indicaram resultados significativos na melhora da performance do processo de eletroerosão ao utilizar concentrações dessa magnitude (JESWANI *et al.*, 1981; WONG *et al.*, 1998). Após o fim da segunda bateria experimental, a fim de evaporar todo o líquido absorvido ao longo do processo, os oito eletrodos foram aquecidos em fornos e, juntamente com os CPs usinados, tiveram a sua massa medida.

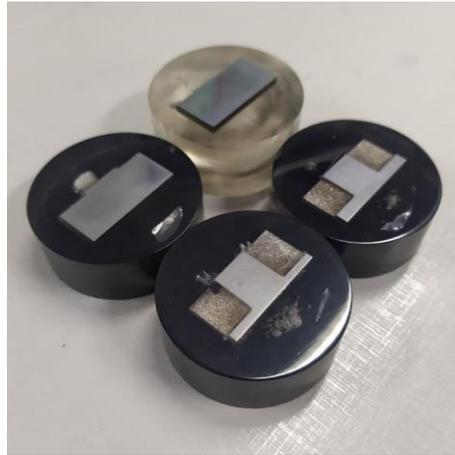
### 2.3. Avaliações de Textura e Integridade

Ao fim dos testes, os corpos de prova foram cortados de maneira a tornar visível a seção transversal e permitir a medição dos parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ) e média parcial ( $R_z$ ), tanto frontal como lateral das faces usinadas dos CPs com um rugosímetro MarSurf M 300 C. Sabendo-se que no processo de eletroerosão por penetração ocorre a deposição de grafite na região de queima dos corpos de prova, e que esse grafite depositado nos vales da superfície das peças tem

como consequência uma redução artificial da rugosidade medida, é necessária a realização de uma operação de polimento. Para isso, os corpos de prova foram polidos manualmente com pontas montadas de borracha abrasiva a fim de reduzir seu impacto na rugosidade das peças.

Por fim, os CPs foram enviados ao Laboratório de Materiais da STIHL para terem sua seção transversal analisada com um microscópio vertical Leica DM4000 M LED (ampliação até 1000x), avaliando diferenças na espessura da camada branca e na formação de microtrincas. A Figura 5 exibe os corpos de prova cortados, embutidos e polidos.

Figura 5 – Corpos de prova para análise da integridade por microscopia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.4. Análise Comparativa dos Dados

Com todos os dados necessários, foi possível comparar os parâmetros de desempenho da EDM convencional com a PM-EDM. A diferença entre as taxas de remoção de material, obtidas pela Eq. (1), permitirá avaliar seu impacto na produtividade.

$$TRM \left( \frac{mm^3}{min} \right) = \frac{(Massa\ inicial\ do\ CP - Massa\ final\ do\ CP) \times 1000}{Densidade \left( \frac{g}{cm^3} \right) \times Duração\ do\ experimento} \quad (1)$$

A diferença entre as taxas de desgaste do eletrodo, obtidas pela Eq. (2), possibilitará aferir seu impacto no consumo de eletrodos.

$$TDE \left( \frac{mm^3}{min} \right) = \frac{(Massa\ inicial\ do\ eletrodo - Massa\ final\ do\ eletrodo) \times 1000}{Densidade \left( \frac{g}{cm^3} \right) \times Duração\ do\ experimento} \quad (2)$$

A diferença entre os acabamentos, medidos através do rugosímetro (textura) e avaliados por microscopia (integridade), permitiu estimar o impacto do PM na qualidade final da peça.

Por fim, o *GAP* real, obtido pela Eq. (3), foi comparado ao *GAP* teórico apresentado em cada programa padrão. Essa variação (caso exista) fornecerá informações relevantes para análise dos impactos da PM-EDM. A medição do *GAP* foi feita em uma máquina de medição por coordenadas tipo portal ZEISS CONTURA (Fig. 6).

$$GAP (mm) = \frac{Largura\ da\ cavidade\ da\ peça - Largura\ da\ região\ usinada\ do\ eletrodo}{2} \quad (3)$$

Figura 6 – Medição do *GAP* da região de queima dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

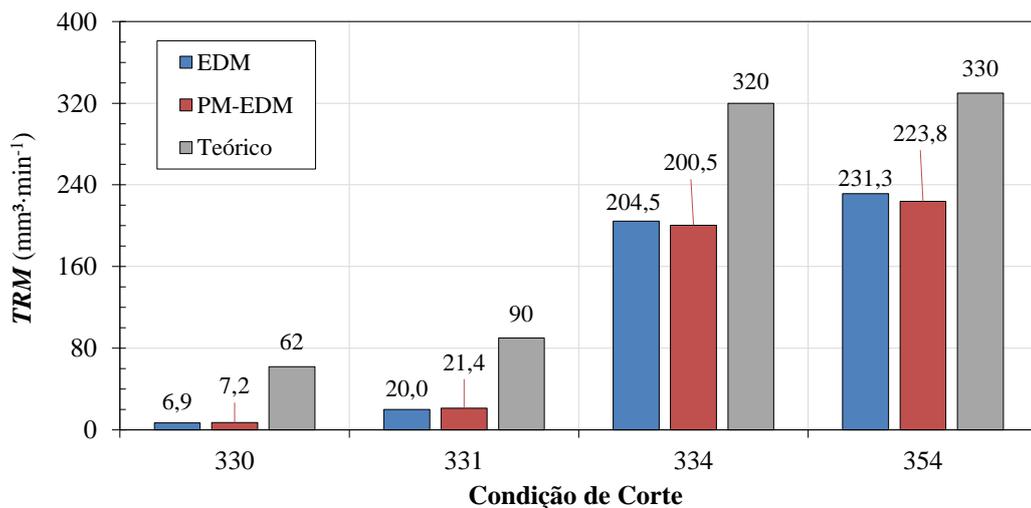
### 3. RESULTADOS

Devido à natureza ainda imprevisível dos efeitos da PM-EDM, os resultados serão apresentados separadamente, de acordo com o parâmetro de desempenho avaliado.

#### 3.1. Taxa de Remoção de Material

As Figuras 7 e 8 exibem, respectivamente, o impacto da introdução de pó de grafite em suspensão ao processo de usinagem por eletroerosão na taxa de remoção de material (*TRM*) em termos absolutos (calculados a partir da Eq. 1) e em termos percentuais.

Figura 7 – Comparação entre os valores absolutos de *TRM* obtidos pela PM-EDM, pela EDM e os valores esperados para as diferentes condições de corte.

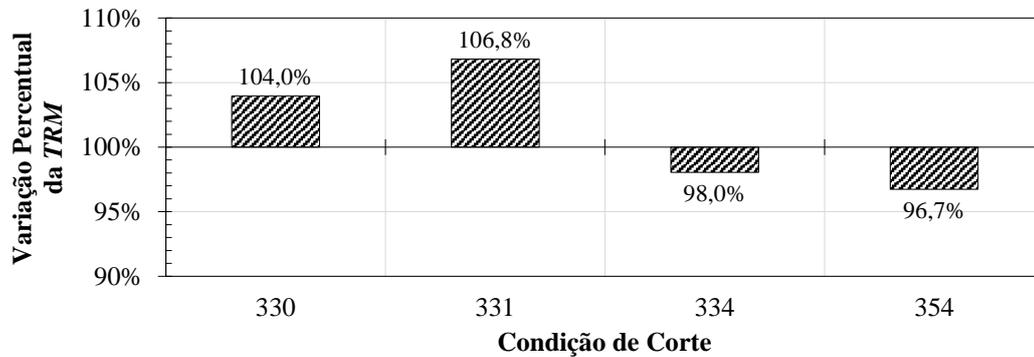


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se nas condições de desbaste (334) e desbaste pesado (354) em PM-EDM uma redução na *TRM* em relação à EDM de 2,0% e 3,3%, respectivamente, ao passo que nas condições de semiacabamento (331) e de acabamento (330) houve aumento de 6,8% e 4,0%, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com o que pode ser encontrado na literatura, visto que os poucos

estudos com foco na aplicação da PM-EDM em operações de desbaste com pó de grafite mostraram também reduções na *TRM* (ZHAO, 2002). Em sua grande maioria, os estudos realizados até o momento focaram na avaliação da PM-EDM em operações de acabamento, tendo em vista seu potencial na melhoria da qualidade superficial da peça.

Figura 8 – Relação entre a *TRM* obtida pela PM-EDM e pela EDM, respectivamente, para as diferentes condições de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos corpos de prova em que foram aplicadas as condições de desbaste, observou-se deposição de consideráveis quantidades de pó de grafite e de resíduos metálicos à cavidade usinada. Sabendo que essa deposição é um problema recorrente nessa operação e que a máquina na qual os experimentos foram realizados não dispõe de funções que auxiliem na remoção de detritos e resíduos presentes na região de erosão como máquinas mais modernas têm, e que a introdução de pó de grafite ao dielétrico deve amplificar este efeito, entende-se que esta seja a principal causa da redução na *TRM* observada. Além disso, pelo fato de os programas de desbaste contarem com valores de “UP” baixos (configuração que regula a distância que o eletrodo recuará após cada descarga elétrica a fim de acelerar a velocidade do processo ao reduzir o tempo entre cada descarga e ao dificultar a lavagem de partículas que auxiliarão na formação de descargas subsequentes), é possível que a mistura de pó ao dielétrico não introduza à operação de desbaste uma mudança significativa nas condições já mencionadas que impactam positivamente na *TRM*.

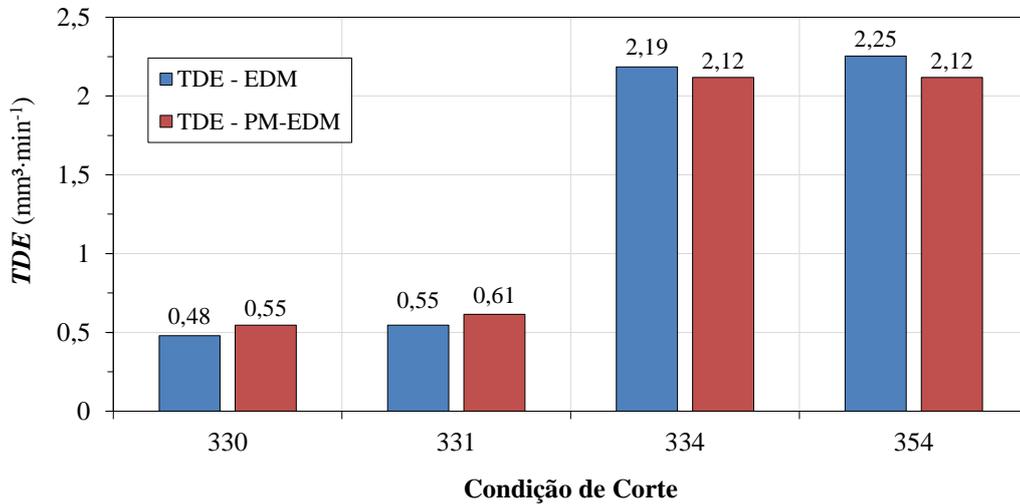
Para as condições de acabamento, é atribuído o aumento na *TRM* aos efeitos resultantes da aplicação de pó ao dielétrico já detalhados nos capítulos anteriores. Diferentemente das condições de desbaste, as condições de acabamento contam com valores de “UP” mais altos para facilitar a lavagem de partículas que poderiam se depositar na superfície erodida do corpo de prova e prejudicar a formação de arcos elétricos. Aliado a esse fator, a baixa *TRM* (característica comum a processos de acabamento) introduzirá quantidade desprezíveis de partículas à região onde ocorre a usinagem por eletroerosão. A mistura de pó ao dielétrico, portanto, deverá criar um meio mais propício para o aumento da frequência e da energia das descargas elétricas.

### 3.2. Taxa de Desgaste do Eletrodo

As Figuras 9 e 10 exibem, respectivamente, o impacto da introdução de pó de grafite em suspensão ao processo de usinagem por eletroerosão na taxa de desgaste do eletrodo (*TDE*) em termos absolutos (calculados pela Eq. 2) e em termos percentuais. Notou-se nas condições de desbaste (334) e desbaste pesado (354) em PM-EDM uma redução na *TDE* em relação à EDM de 3,1% e 6,1%, respectivamente, ao passo que nas condições de acabamento (330) e de semiacabamento (331) houve aumento de 14,3% e 12,5%, respectivamente. Devido à curta duração dos experimentos, o desgaste dos eletrodos não foi suficientemente grande para permitir uma avaliação precisa da *TDE* através da pesagem em balanças de precisão de resolução de 0,01 g.

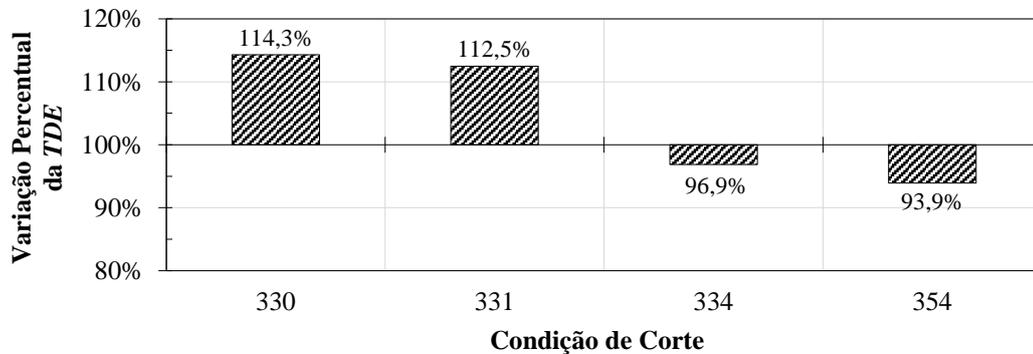
Embora os dados tenham mostrado um comportamento que está em acordo com a literatura, onde foi observado que há uma relação de proporcionalidade direta entre a *TDE* e a *TRM*, é possível que a taxa de desgaste real dos experimentos – especialmente os de acabamento – seja muito diferente do calculado.

Figura 9 – Comparação entre os valores absolutos de *TDE* obtidos pela PM-EDM, pela EDM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Relação entre a *TDE* obtida pela PM-EDM e pela EDM, respectivamente, para as diferentes condições de corte.

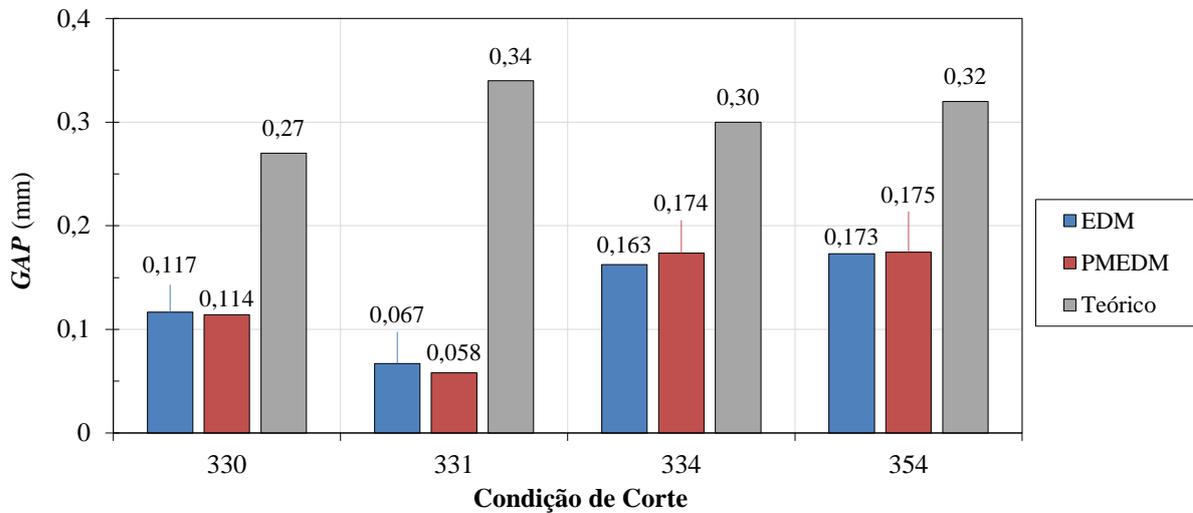


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3. GAP

A Figura 11 exibe o *GAP* real determinado pela Eq. (3) para os processos EDM e PM-EDM e os teóricos (esperados) em cada condição de corte. A medição do *GAP* real mostrou um comportamento oposto ao registrado por Zhang *et al.* (2012). Nas condições de desbaste e de desbaste pesado (334 e 354) nas quais houve redução da *TRM*, as medições realizadas sugerem que houve um aumento no *GAP*. No entanto, sabendo que ao longo do processo de desbaste houve deposição de grafite na região de queima em decorrência do desgaste do eletrodo e, na PM-EDM, também da precipitação do pó de grafite misturado ao dielétrico, é provável que o *GAP* real tenha, de fato, diminuído, caso as descargas elétricas tenham ocorrido entre o eletrodo e essa camada de grafite depositada.

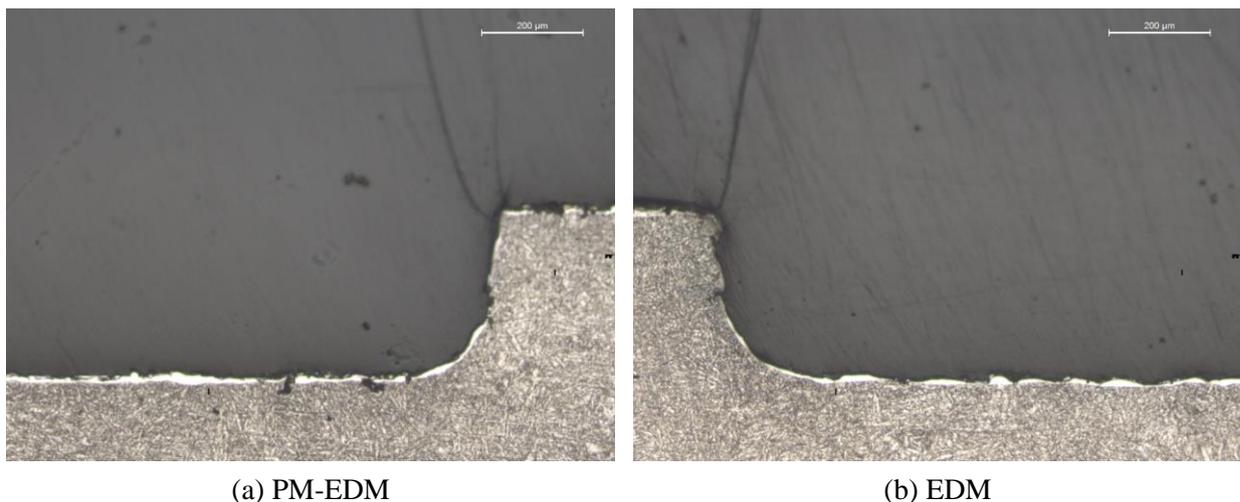
Figura 11 – Comparação entre os *GAP* obtidos pela PM-EDM, pela EDM e os valores esperados para as diferentes condições de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas condições de acabamento e de semiacabamento (330 e 331), nas quais houve aumento da *TRM*, foi observada a redução do *GAP*. As imagens feitas com o microscópio (Fig. 12) revelam uma não-perpendicularidade entre a face frontal e a face lateral da região de queima dos corpos de prova. A não-perpendicularidade observada no corpo de prova após a operação de acabamento (condição 330) indica que a duração dos experimentos pode não ter sido suficiente para formar uma parede cuja largura é representativa do *GAP* real do experimento. Além disso, pelo fato de as paredes serem inclinadas, a medição da largura da cavidade usinada pelo processo de usinagem por eletroerosão se torna muito mais imprecisa.

Figura 12 – Seção transversal do corpo de prova na condição 330. Nota-se a não-perpendicularidade entre as faces frontal e lateral da região de queima.



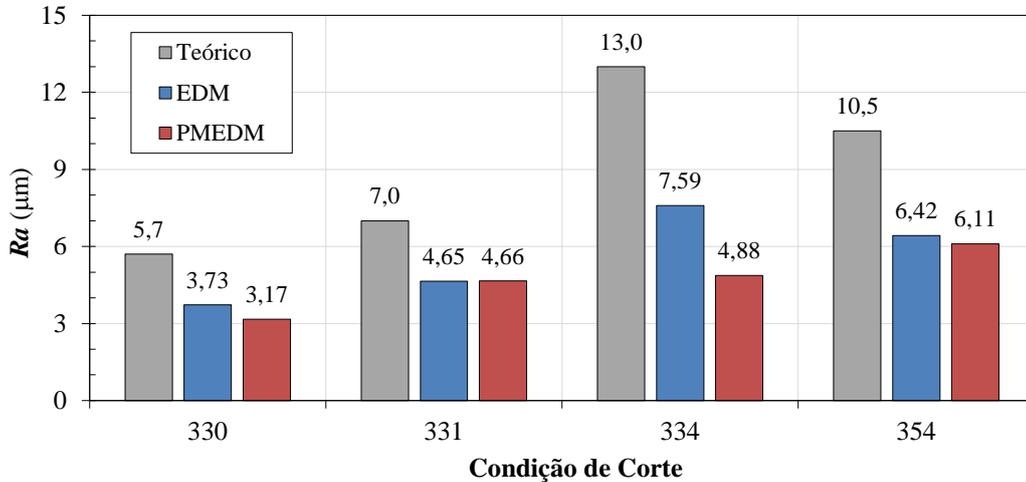
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4. Textura da Superfície Usinada

Uma comparação entre as rugosidades média (*Ra*) e média parcial (*Rz*) das regiões frontal e lateral das áreas de queima dos corpos de prova utilizados pode ser vista nas Figuras 13 a 16.

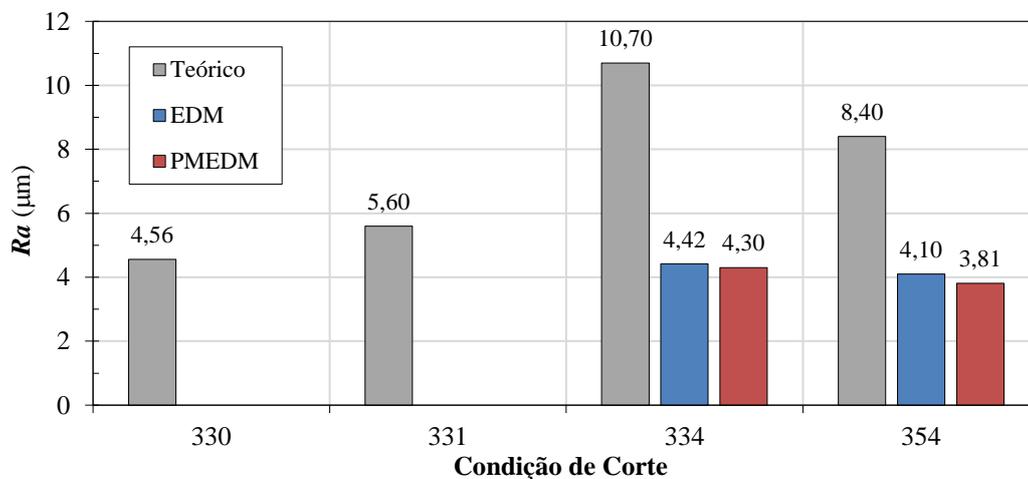
Devido ao baixo volume de material removido ao longo dos experimentos de acabamento, não foi possível medir a rugosidade lateral dos corpos de prova usinados nas condições 330 e 331.

Figura 13 –  $Ra$  frontal da região de queima dos corpos de prova usinados e os valores esperados para as diferentes condições de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 –  $Ra$  lateral da região de queima dos corpos de prova usinados e os valores esperados para as diferentes condições de corte.



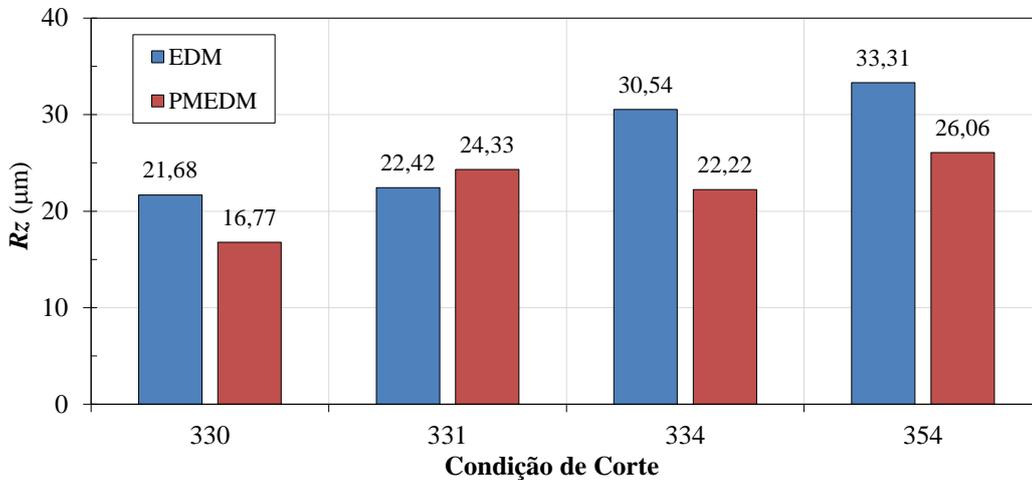
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como para a taxa de remoção de material, foi observada grande diferença entre os valores de rugosidade  $Ra$  medidos e os indicados no manual. Por serem numericamente inferiores aos valores teóricos em ambos os casos, os dados sugerem que as condições operacionais da máquina estão resultando em parâmetros de saída equivalentes aos de uma condição mais refinada do que aquela proposta pelo manual.

Nota-se que, em 9 das 12 comparações realizadas, houve redução na rugosidade ao misturar o pó de grafite ao dielétrico. Embora a rugosidade não seja comumente a prioridade de uma operação de desbaste, é importante observar que a operação de desbaste (condição 334) em PM-EDM formou uma superfície de rugosidade pouco superior àquela obtida pela operação de semiacabamento (condição 331), ao mesmo tempo em que atingiu uma taxa de remoção de material cerca de 10 vezes maior. Isso pode tornar possível uma eventual substituição do processo EDM de desbaste seguido de acabamento por um no qual é necessária a aplicação de apenas uma

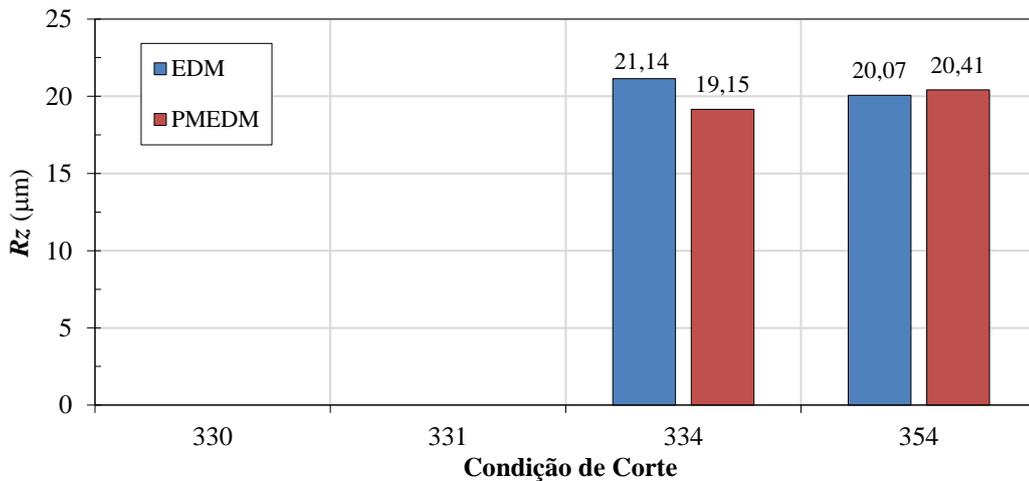
condição em PM-EDM, aumentando significativamente a velocidade do processo e reduzindo o número de *setups*, ao eliminar a necessidade de substituição de um eletrodo de desbaste por um eletrodo de acabamento.

Figura 15 –  $R_z$  frontal da região de queima dos corpos de prova usinados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 –  $R_z$  lateral da região de queima dos corpos de prova usinados.



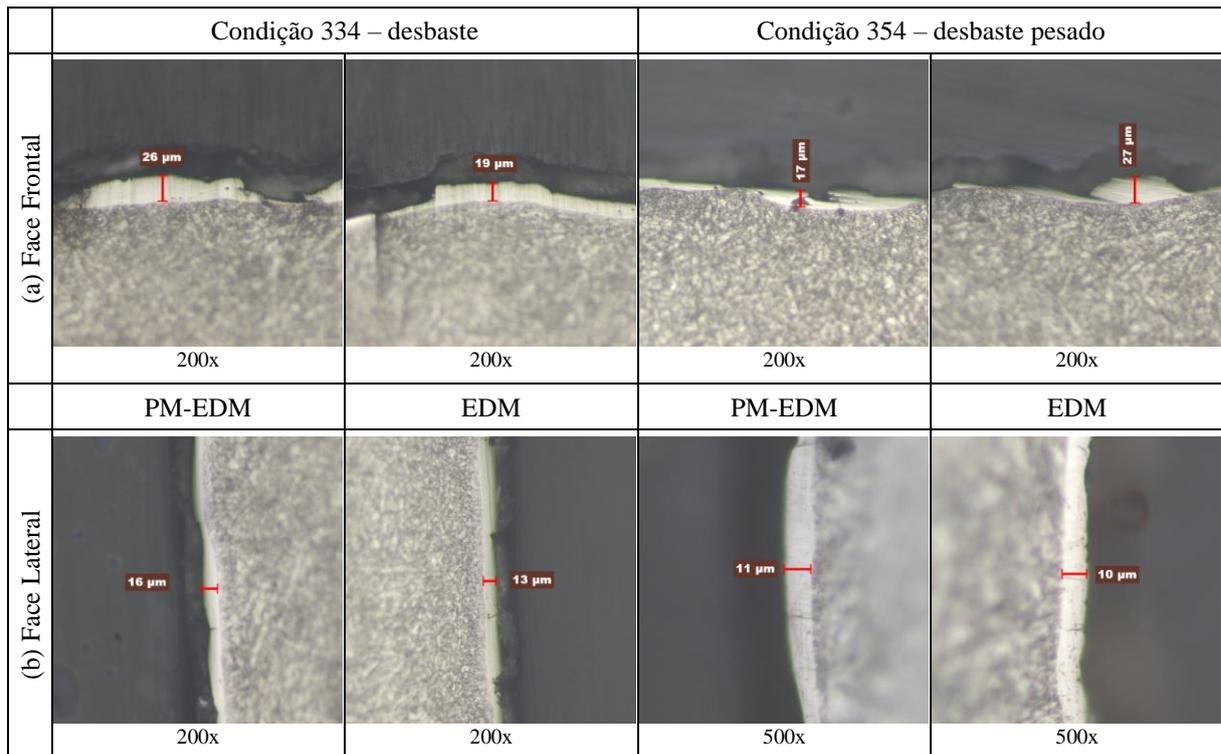
Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale salientar que as medições de rugosidade revelam que  $R_z$  é, em média, 4,92 vezes maior que  $R_a$  para os experimentos de EDM, e 4,86 vezes maior que  $R_a$  para os experimentos de PM-EDM. Embora uma pequena redução tenha sido observada, esta não foi suficiente para afirmar com segurança que tal redução foi resultado da aplicação do pó de grafite ao dielétrico, e não por fatores externos, como as próprias flutuações inerentes ao processo, ou à preparação da peça. É importante, para a qualidade do acabamento superficial, não só que a rugosidade  $R_a$  seja a menor possível, mas também que a razão entre  $R_z$  e  $R_a$  não seja significativamente superior a 5. Desta forma, será possível garantir que a superfície possua um perfil uniforme e livre de picos elevados e/ou vales profundos que possam comprometer a qualidade do componente.

### 3.5. Integridade da Superfície Usinada

Nas operações de desbaste e desbaste pesado (condições 334 e 354), ambas faces frontais apresentaram camadas brancas muito finas, com espessuras inferiores a 5  $\mu\text{m}$ , e eventuais acúmulos com espessuras entre 15  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$  (Fig. 17a). As faces laterais, por sua vez, mostram camadas razoavelmente uniformes, com espessuras entre 10  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$  (Fig. 17b).

Figura 17 – Seção transversal dos corpos de prova nas condições de desbaste e desbaste pesado: face frontal e face lateral da região de queima.

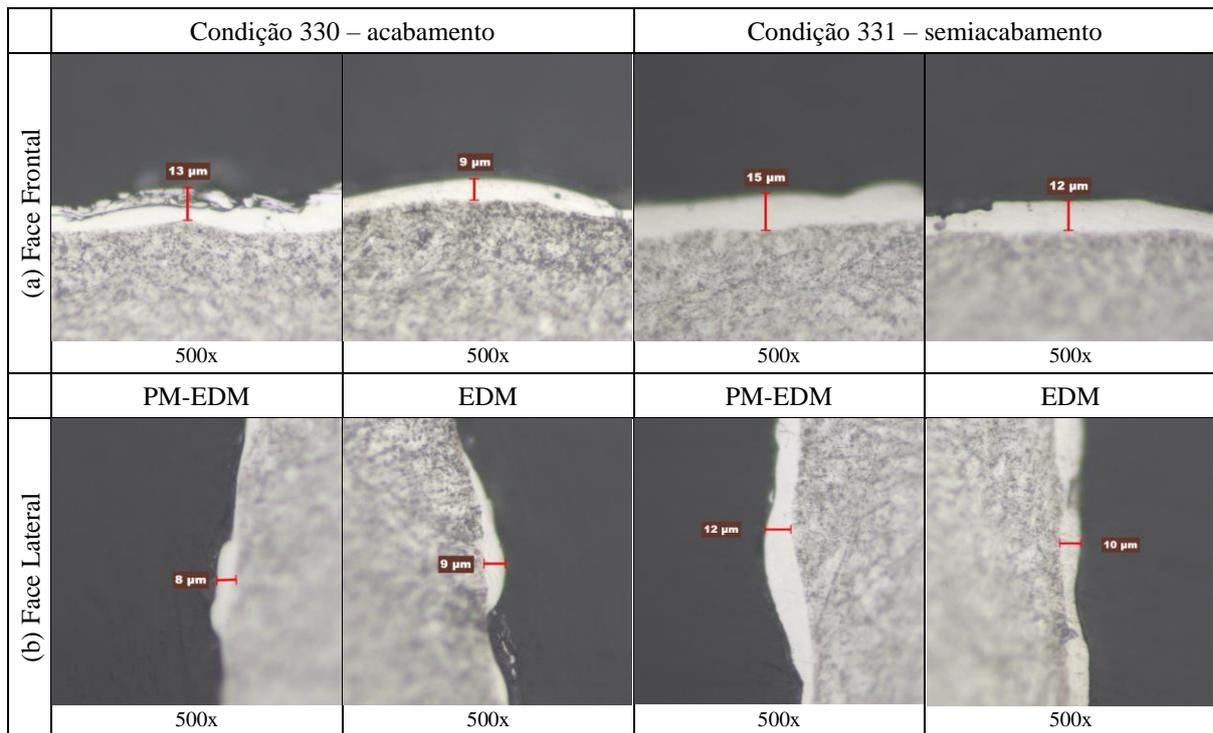


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as operações de acabamento (condições 330 e 331), as faces frontais, exibidas na Fig. 18a apresentaram camadas uniformes de, aproximadamente, 10  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$  de espessura. As faces laterais geradas pelas mesmas condições (330 e 331) apresentaram camadas mais heterogêneas, nas quais sua espessura intercala entre regiões mais finas, com espessuras próximas a 5  $\mu\text{m}$ , e regiões entre, aproximadamente, 8  $\mu\text{m}$  e 13  $\mu\text{m}$  (Fig. 18b). Entretanto, na cavidade onde a PM-EDM foi aplicada utilizando a condição 330, formações semelhantes a “microtrincas” surgiram ao longo de toda superfície da camada branca, indicadas por meio de setas em vermelho na Fig. 19. Não se descarta a possibilidade de que essas “microtrincas” sejam, na verdade, resultado da deposição do grafite na superfície da região frontal de queima. No entanto, é possível que esta formação seja originada de impactos acidentais no manuseio da amostra analisada ou de uso excessivo de força durante sua preparação e polimento para microscopia.

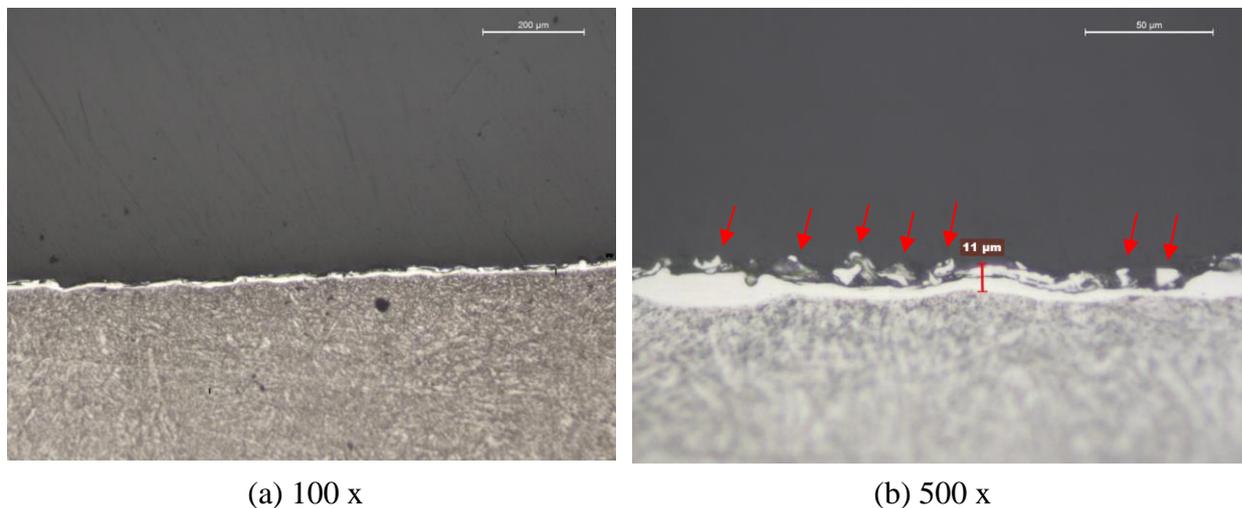
Portanto, com exceção das formações semelhantes a “microtrincas” na camada branca das cavidades usinadas utilizando a condição 330, não foram encontradas diferenças significativas na integridade da superfície entre as cavidades usinadas pela EDM e pela PM-EDM, seja na formação da camada branca, no surgimento de microtrincas reais, ou na deposição de grafite na superfície da região de queima.

Figura 18 – Seção transversal dos corpos de prova nas condições de acabamento e semiacabamento: face frontal e face lateral da região de queima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Seção transversal do corpo de prova na condição 330: face frontal da região de queima da PM-EDM com ampliação de 100x e 500x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4. CONCLUSÕES

A taxa de remoção de material apresentou resultados coerentes com a literatura. A redução na *TRM* nas operações de desbaste, em decorrência do acúmulo de impurezas na região de queima, reforça a importância de um sistema de lavagem robusto para operações com alta taxa de remoção de material. Para operações de acabamento, as impurezas trouxeram efeitos positivos à taxa de remoção de material ao reduzir a resistividade dielétrica da região de queima. De forma análoga à

*TRM*, a *TDE* aumentou em operações de acabamento, e reduziu em operações de desbaste. Visto que estes parâmetros são influenciados, essencialmente, pela quantidade de energia descarregada, é razoável que estes dois parâmetros se comportem da mesma maneira.

A relação entre a *TRM* e a *TDE* resultante dos experimentos, porém, não foi positiva para a PM-EDM. Embora haja grande incerteza sobre os resultados obtidos para a *TDE*, os dados mostram que a taxa de desgaste do eletrodo aumenta de forma mais expressiva do que o aumento da taxa de remoção de material da peça.

As medições para o *GAP* mostraram um comportamento inverso ao registrado na literatura. Nas operações de desbaste, onde ocorreu a redução da *TRM*, observou-se o aumento do *GAP*; ao passo que nas operações de acabamento, onde houve o aumento da *TRM*, constatou-se a redução do *GAP*. Porém, devido à ausência de uma interface na máquina para verificação dos parâmetros de saída, como o *GAP*, como modelos mais modernos possuem, o método manual utilizado para medição apresentou grande incerteza pelos motivos anteriormente mencionados.

A melhoria na textura da superfície usinada é o parâmetro no qual a literatura mais obteve consenso dentre os diversos efeitos da aplicação da PM-EDM, e este estudo não foi exceção. Ao apresentar resultados positivos, tanto na redução da rugosidade *Ra* quanto em *Rz*, a aplicação de pó ao dielétrico mostrou grande potencial como uma alternativa para obtenção de peças com excelente acabamento superficial. Em relação à integridade da superfície, no entanto, nenhuma alteração significativa pôde ser observada nas propriedades da superfície, como na formação de camada branca, no surgimento de microtrincas ou na deposição de pó de grafite.

Embora a melhoria na taxa de remoção de material das operações de acabamento e semiacabamento em PM-EDM não tenha sido tão expressiva quanto aquelas observadas no estudo de Long et al. (2016), o seu verdadeiro potencial se mostrou na possibilidade de obter texturas semelhantes ao substituir operações de acabamento pelo EDM convencional (sem a mistura de pó ao dielétrico) pela aplicação da PM-EDM em operações de semiacabamento, que possuem taxas de remoção de material significativamente maiores.

A baixa taxa de remoção de material no processo de usinagem por eletroerosão é uma característica que até hoje dificulta sua aplicação e até mesmo o seu estudo. Embora os dados apresentados neste relatório tenham indicado resultados positivos para a PM-EDM, a duração relativamente curta dos experimentos e o reduzido número de testes realizados trazem incertezas sobre a validade das conclusões obtidas.

#### **4.1. Dificuldades Encontradas e Sugestões para Trabalhos Futuros**

Sabendo que há grandes diferenças entre os processos de usinagem por eletroerosão de desbaste e os de acabamento, e que os impactos da PM-EDM também diferem significativamente entre estes dois processos, conforme constatado neste e em outros estudos, sugere-se para trabalhos futuros reduzir a faixa de valores de rugosidade esperada para a escolha das condições de corte. Ao focar em um tipo específico de operação, seja de desbaste ou de acabamento, espera-se reduzir o número de variáveis que impactam na maneira como a PM-EDM afeta os experimentos, facilitando assim a análise e a comparação de seus efeitos. Sugere-se também avaliar o impacto no desempenho do processo provocado por diferentes concentrações de pó de grafite no dielétrico, visto que os resultados registrados na literatura são ainda muito escassos, e a comparação dos resultados obtidos entre esses estudos ser dificultada pelo emprego de metodologias muito distintas.

A fim de possibilitar a análise da rugosidade de ambas as faces, até mesmo em experimentos de curta duração, é recomendável que a área de queima dos eletrodos seja projetada com base no instrumento de medição de rugosidade disponível, sendo suficientes as dimensões que permitam o acesso da ponteira do instrumento tanto em sua face lateral quanto frontal. Além disso, para facilitar a medição de rugosidade da face frontal, é importante que o eletrodo seja posicionado em

uma das extremidades da face do corpo de prova que será usinado, eliminando assim uma fase de corte desnecessária e que poderá impactar na análise por microscopia da integridade da superfície.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda. por disponibilizar seus recursos para a realização dos experimentos e a empresa iMER pelo fornecimento dos corpos de prova utilizados. Agradece também a seus pais, Sandra Helena Martins, Ernani Kiesslich Martins, a seu irmão, Alexandre Kichler Martins, e a sua namorada Andrya Baptista Blazina pelo apoio dado durante a realização do trabalho, e os colegas de trabalho Silvio Cesar de Oliveira e Danilo Fabiano da Silveira por todo o apoio técnico oferecido durante o planejamento e a execução dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- BHATTACHARYA, A. *et al.* Optimal parameter settings for rough and finish machining of die steels in powder-mixed EDM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 61, n. 5-8, p. 537-548, 2012.
- ERDEN, A.; BILGIN, S. Role of Impurities in Electric Discharge Machining. In: **Proceedings of the International Machine Tool Design and Research Conference**, Macmillan, London, 1981, p. 345-350.
- JESWANI, M. L. Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining, **Wear**, v. 70, n. 2, p. 133-139, 1981.
- JOSHI, A. Y.; JOSHI, A. Y. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining. **Heliyon**, v. 5, n. 12, e02963, 2019.
- MARASHI, H. *et al.* State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications. **Precision Engineering**, v. 46, p. 11-33, 2016.
- RATHI, M. G.; MANE, D. V. Study on effect of powder mixed dielectric in EDM of Inconel 718. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 4, n. 11, p. 1-7, 2014.
- SCHUMACHER, B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, n. 1-3, p. 376-381, 2004.
- SINGH, A.; SINGH, R. Effect of Powder Mixed Electric Discharge Machining (PMEDM) on Various Materials with Different Powders: A Review. **IJIRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v. 2, n. 3, p. 164-169, 2015.
- WONG, Y. S., *et al.* Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, n. 1-3, p. 30-40, 1998.
- ZHAO, W. S.; MENG, Q. G., & WANG, Z. L. The application of research on powder mixed EDM in rough machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, n. 1-3, p. 30-33, 2002.
- SULAKHE, V. *et al.* Influence of powder-mixed dielectric on MRR and TWR in EDM process. In: **Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Mechanical and Materials Science Engineering: Innovation and Research**, Maharashtra, India, 2018.
- ZHANG, Y., *et al.* A Review of the Current Understanding and Technology of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM). In: **Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**, Chengdu, China, 2012.
- LONG, B. T. *et al.* Optimization of PMEDM process parameter for maximizing material removal rate by Taguchi's method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 5-8, p. 1929-1939, 2016.