

Figura 4.7. Esquema da montagem do protótipo experimental de Jato de Água Abrasivo na máquina EDM (alta pressão).

Tabela 4.5. Especificação da Bomba de Alta Pressão utilizada no sistema auxiliar.

Bomba de Alta Pressão	
Potência do Motor [Watts]	1100
Voltagem [Volts]	220
Pressão [bar]	100
Rotação do Motor [rpm]	3450
Vazão [litros/min]	42,9

4.3. Testes Preliminares

Nessa etapa, denominada de testes preliminares, foram realizados testes para que fossem definidos os parâmetros de usinagem que possibilitem a obtenção de resultados de fácil e clara análise e melhor repetibilidade possível. Esses testes serviram ainda para escolha de outros parâmetros, que poderiam ser utilizados durante o trabalho, caso fosse necessário e

exista possibilidade. Paralelamente, foi realizada coleta de dados sobre algumas características físicas e químicas dos fluidos dielétricos por meio de manuais e através do próprio fabricante.

Utilizou-se querosene, com fluido estático e a baixa pressão, SiC em pó com granulometrias de 200, 600, 1000 e 2000 mesh (Figura 4.8), volume de dielétrico de 36 litros, concentrações de 15 g/l, 30 g/l e 60 g/l (Figura 4.9). O SiC é o abrasivo mais utilizado na usinagem EDM com adição de pó por ter boas propriedades abrasivas e de dissolução na água além do baixo custo (FERNANDES, 1999). Ao final dessa fase adotou-se os parâmetros TRM e o DVR (Desgaste Volumétrico Relativo) a fim de comparação. O DVR é a razão entre volume de material removido da peça em relação ao volume removido da ferramenta. Para isso, foram levantados gráficos e tabelas, que depois de analisados, permitiram a adoção dos parâmetros otimizados, adotados nos testes definitivos.

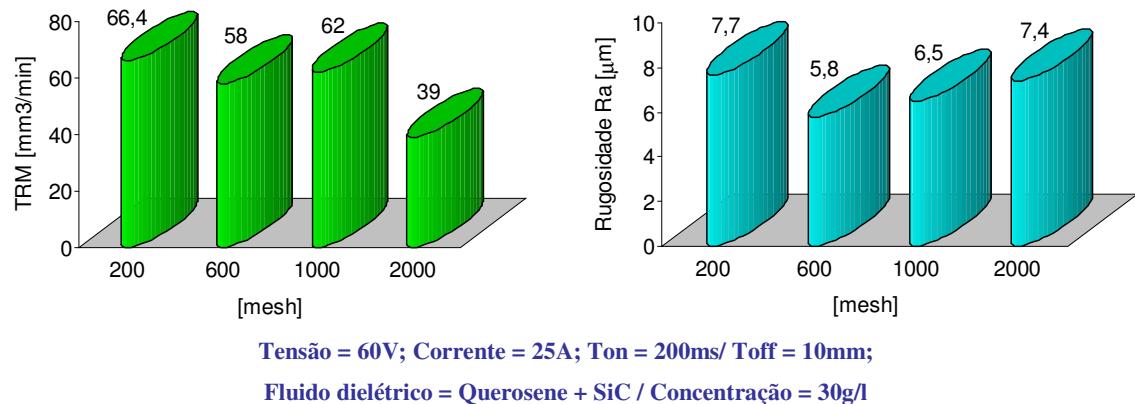


Figura 4.8. Teste preliminar para avaliação do efeito das granulometrias de SiC, adicionadas ao fluido dielétrico (querosene) na concentração de 30 g/l, em termos da TRM e Ra.

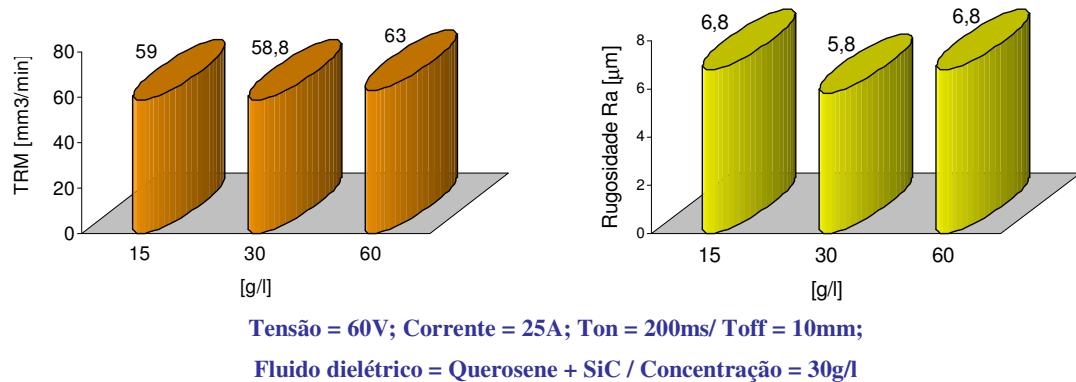


Figura 4.9. Teste preliminar para avaliação do efeito das concentrações, do fluido dielétrico (querosene com adição de SiC) em granulometria de 600 mesh, em termos de TRM e Ra.

Os parâmetros finais que permitiram obter bons resultados foram aplicados nos testes definitivos, onde se pode citar: concentração = 30g/l, granulometria = 600mesh (15 μm), vazão de baixa pressão de 76,92 ml/s e volume de dielétrico de 36 litros. A granulometria de 200mesh promoveu maiores TRMs (66,4 mm³/min), porém, a superfície gerada apresentou a maior rugosidade (7,7 μm).

Nos testes, o abrasivo (SiC), a granulometria e a concentração foram mantidos constantes para todos os fluidos testados, tanto com fluido estático quanto com jato a baixa pressão. Para os testes com jato de alta pressão, caso os resultados indiquem a necessidade de variação de alguns desses parâmetros (aqueles de maior relevância), novos testes poderão ser realizados.

4.4. Testes Definitivos

Utilizando os parâmetros definidos nas etapas anteriores, inicia-se a 3^a Etapa, referenciada como testes definitivos, os quais foram avaliados quanto à TRM, ao DVR (Desgaste Volumétrico Relativo), à rugosidade média aritmética (Ra), à espessura da camada refundida, ao comprimento e número médio de trincas e ao perfil de microdureza.

Os fluidos utilizados foram: Querosene Desodorizado, Óleo tipo Premium específico para eletroerosão (por questões comerciais, designado neste trabalho como ÓLEO A) e Água Deionizada, obtida por aparelho deionizador da marca Quimis, do Laboratório de Tribologia e Materiais. As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam as características típicas para os fluidos testados.

Tabela 4.6. Características Típicas do Fluido Querosene.

QUEROSENE	
Cor ASTM (D-1500)	L 1
Densidade @ 20°C (D-4052)	0,760
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-15
Viscosidade cSt @ 40°C (D-445)	1 mín. – 2 máx.
Constante Dielétrica @ 25°C (D-150)	2,5
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	40

Tabela 4.7. Características Típicas do Fluido Premium.

ÓLEO A	
Cor ASTM (D-1500)	L 0,5
Densidade @ 20°C (D-4052)	0,843
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	-12
Viscosidade cSt @ 40°C (D-445)	3,7
Constante Dielétrica @ 25°C (D-150)	2,0
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	130

Tabela 4.8. Características Típicas da Água Deionizada.

ÁGUA DEIONIZADA	
Cor ASTM (D-1500)	L 1
Densidade @ 20°C (D-4052)	0,998
Ponto de Fluidez, °C (D-97)	0
Viscosidade cSt @ 40°C (D-445)	0,956
Constante Dielétrica @ 25°C (D-150)	78,4
Ponto de Fulgor, °C (D-92)	-

Foi realizada junto aos fabricantes dos fluidos dielétricos e equipamentos de deionização uma pesquisa de mercado e levantado os preços com ICMS incluído e montada a Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Preços de mercado para os fluidos testados.

FLUIDO DIELÉTRICO	PREÇO DE MERCADO (US\$/litro)
QUEROSENE	0,60
ÓLEO A	1,96
ÁGUA DEIONIZADA	0,08

Os testes foram divididos em 3 grupos: Sem Jato, com Jato de Baixa Pressão (BP) e com Jato de Alta Pressão (AP). Cada teste foi realizado 6 vezes, com as mesmas condições (regime de desbaste, sem abrasivo e com abrasivo (SiC)), conforme programação apresentada nas Tabelas 4.10 a 4.12.

Tabela 4.10. Programação dos testes sem Jato (Fluido Estático).

	FLUIDO	JATO	ABRASIVO
TESTE 1.1	QUEROSENE	ESTÁTICO	-
TESTE 1.2	QUEROSENE	ESTÁTICO	SiC
TESTE 1.3	ÓLEO A	ESTÁTICO	-
TESTE 1.4	ÓLEO A	ESTÁTICO	SiC
TESTE 1.5	ÁGUA DEIONIZADA	ESTÁTICO	-
TESTE 1.6	ÁGUA DEIONIZADA	ESTÁTICO	SiC

Tabela 4.11. Programação dos testes com Jato de Baixa Pressão (BP).

	FLUIDO	JATO	ABRASIVO
TESTE 2.1	QUEROSENE	BP	-
TESTE 2.2	QUEROSENE	BP	SiC
TESTE 2.3	ÓLEO A	BP	-
TESTE 2.4	ÓLEO A	BP	SiC
TESTE 2.5	ÁGUA DEIONIZADA	BP	-
TESTE 2.6	ÁGUA DEIONIZADA	BP	SiC

Tabela 4.12. Programação dos testes com Jato de Alta Pressão (AP).

	FLUIDO	JATO	ABRASIVO
TESTE 3.1	QUEROSENE	AP	-
TESTE 3.2	QUEROSENE	AP	SiC
TESTE 3.3	ÓLEO A	AP	-
TESTE 3.4	ÓLEO A	AP	SiC
TESTE 3.5	ÁGUA DEIONIZADA	AP	-
TESTE 3.6	ÁGUA DEIONIZADA	AP	SiC

4.5. Avaliação dos Resultados

Conforme já mencionado, os resultados a serem avaliados são: TRM, DVR, espessura da camada refundida, número e comprimento médio de trincas, rugosidade média aritmética (R_a) e perfil de microtureza. Cada um desses resultados será medido conforme explicado a seguir.

◆ **Taxa de Remoção de Material (TRM):** A TRM é o volume de material removido da peça pelo tempo de usinagem, expressa em mm^3/min e calculada empregando-se a expressão 4.1:

$$\text{TRM} = V_p / \Delta t \quad (4.1)$$

Em que:

V_p = Volume de material removido da peça [mm^3];

Δt = Tempo de usinagem [min];

Portanto, faz-se necessário medir o volume de material removido da peça e o tempo da operação de um ensaio. O volume de material removido da peça é obtido pela expressão 4.2:

$$V_p = \Delta m_p / \rho_p \quad (4.2)$$

Em que:

Δm_p = Diferença entre a massa inicial e final do material da peça [g];

ρ_p = Massa específica do aço rápido ABNT M2 – 0,000768 [g/mm^3];

A diferença entre a massa inicial e final do material será quantificada através de balanças analíticas de precisão (resolução; 0,0001g).

◆ **Desgaste Volumétrico Relativo (DVR):** O DVR é definido como a relação entre o volume de material removido da ferramenta e o volume de material removido da peça, expressa adimensionalmente, conforme a expressão 4.3:

$$\text{DVR} = V_f / V_p \quad (4.3)$$

Em que:

V_f = volume de material removido da ferramenta [mm^3];

V_p = volume de material removido da peça [mm^3];

De forma análoga, faz-se necessário medir o volume de material removido da peça e o volume de material removido da ferramenta. O volume de material removido da peça é obtido segundo a expressão 4.2 apresentada anteriormente e o volume de material removido da ferramenta é obtido através da expressão 6:

$$V_f = \Delta m_f / \rho_f \quad (4.4)$$

Em que:

Δm_f = diferença entre a massa inicial e final da ferramenta [g];

ρ_f = massa específica do material da ferramenta – 0,0089 [g/mm³];

◆ **Integridade Superficial:** Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo DSM 960, para visualização da morfologia das superfícies usinadas. O interferômetro laser UB3D foi utilizado para cálculo das rugosidades S_a e confecção das topografias 3D.

◆ **Espessura da Camada Refundida:** As medições da espessura da camada refundida foram feitas por meio de microscopia ótica ao longo do perfil gerado pela usinagem. Para isso, foi usado um microscópio ótico Carl Zeiss Jena modelo Neophot 21, com sistema de medição interno à objetiva.

◆ **Microtrincas:** As medições do comprimento e número de microtrincas foram feitas por meio de microscopia ótica ao longo do perfil gerado pela usinagem. Para isso, foi usado um microscópio ótico Carl Zeiss Jena modelo Neophot 21.

◆ **Perfil de Microdureza:** Foi levantado um perfil de microdureza por camada (carga de 50g). Este perfil foi traçado por três pontos, cada ponto sendo a média aritmética de dez resultados, abrangendo a camada refundida uniforme, ZAC e material de base. Foi empregado um microdurômetro Wolpert.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Taxa de Remoção de Material (TRM)

Os resultados de TRM são apresentados na Tabela 5.1 e foram separados em duas figuras, ensaios sem abrasivo (Figura 5.1) e ensaios com abrasivo (Figura 5.2). Observa-se na Figura 5.1, que com a melhoria do sistema de lavagem, passando de fluido estático, para fluido a baixa pressão e finalmente para fluido a alta pressão, os valores de TRM crescem consideravelmente: 85% maior para o Óleo A, 40% maior para Querosene e 42% maior para a água deionizada. Com jato a alta pressão, a remoção das partículas erodidas é melhorada, o que aumenta a velocidade de usinagem. O aumento na pressão torna mais efetivo a ação da lavagem das micro-partículas fundidas e re-solidificadas (Benedict, 1987). No processo EDM convencional, esse aumento não é linear, há um ponto de saturação do fluido, a partir do qual, um aumento da concentração diminui a TRM.

Tabela 5.1. Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
TRM	Média	47,1	33,4	8,6	58,5	46,1	10,1	64,7	50,7	10,2
	D. Padrão	8,4	7,1	3,6	5,3	6,4	4,3	6,4	8,2	4,6
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
TRM	Média	44,2	31,0	12,3	68,5	55,9	19,4	119,6	138,1	82,7
	D. Padrão	12,8	12,0	4,1	25,9	19,7	4,9	23,4	30,5	8,5

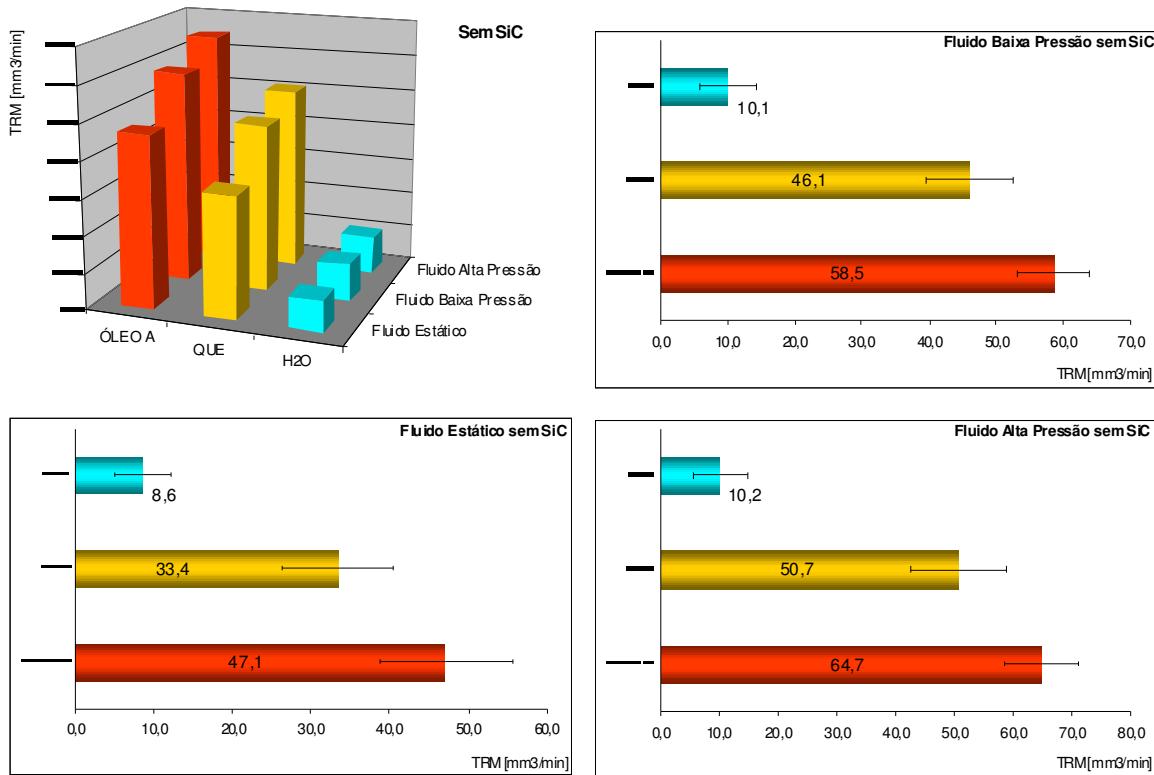


Figura 5.1. Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Os resultados para TRM dos ensaios com adição de abrasivo (SiC) são apresentados na Figura 5.2. Observa-se que os valores de TRM aumentaram com a adição do abrasivo, quando comparados os resultados nas mesmas condições, porém, sem adição de SiC. O aumento da TRM foi de 277% para o Óleo A, 467% para o Querosene e 800% para a água deionizada, comparando os resultados de jato a alta pressão com fluido estático. Fica evidente que, comparando os resultados de TRM sem a adição e com adição de SiC, houve ação erosiva das partículas abrasivas. A água deionizada demonstrou maior ganho percentual de desempenho, quando comparado com as TRMs dos demais fluidos. Porém, a velocidade de usinagem com água ainda é inferior àquela obtida com fluidos hidrocarbonetados.

Comparando os resultados de fluido estático, observou-se que a simples adição de abrasivo melhora os valores de TRM. Esse efeito é devido ao aumento da densidade do fluido dielétrico, o que ocasiona aumento da resistência do meio ao arco de plasma, mantendo assim as descargas menos dispersas e aumentando a potência efetivamente desprendida sobre a peça usinada (ZHAO et al, 2002). Independente do fluido utilizado, observou-se nos três casos

(Óleo A, Querosene e Água Deionizada) melhora na TRM. Porém, o fluido dielétrico ainda exerce influencia na velocidade de usinagem, ou seja, a adição de abrasivo melhora o processo, mas não torna os fluidos equiparados.

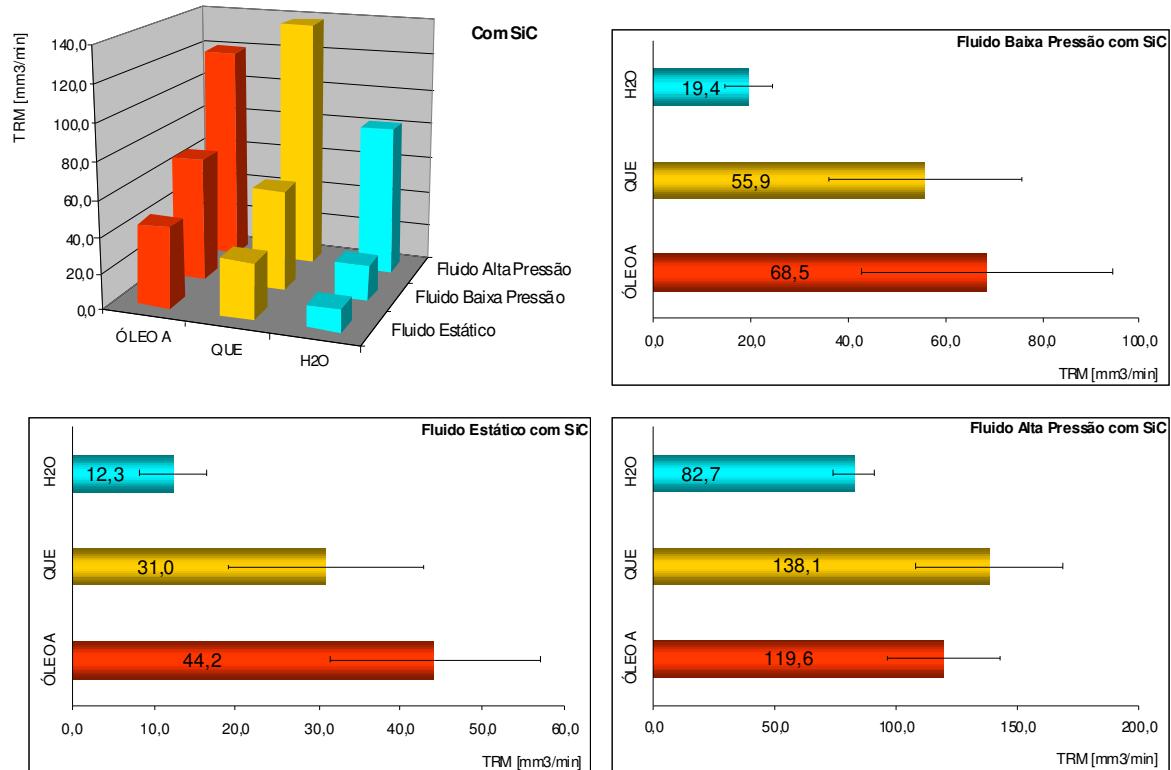


Figura 5.2: Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com fluido estático, jato de baixa e alta pressão (30g/l - 600 mesh).

A água e o querosene possuem maior fluidez, ou seja, têm menor viscosidade, o que é positivo na lavagem, pois possuem melhor capacidade de penetração em pequenas frestas. Por outro lado, sua menor densidade gera menor pressão no arco de plasma, diminuindo a capacidade térmica das descargas, o que leva à menores TRMs.

Em muitos processos híbridos, em adição à contribuição dos processos componentes, uma nova formulação pode ocorrer levando-se em consideração um termo de interação dos processos, **EDM** e **AWJM** – Usinagem por Jato de Água Abrasivo. A formulação para TRM Total é a seguinte:

$$TRM_{Total} = TRM_{EDM} + TRM_{AWJM} + TRM_{(EDM \rightarrow AWJM)} \quad (5.1)$$

A equação (5.1) ilustra o efeito sinergético na TRM nos processos híbridos. Para a aplicação dessa equação, faz-se necessário a determinação, experimentalmente, dos valores de TRM $_{(\text{EDM} \rightarrow \text{AWJM})}$, que é a TRM do processo **EDM** auxiliado por **AWJJM**. Faz-se então, o cálculo para a água deionizada:

$$\text{TRM}_{\text{Total}} = 80 \text{ mm}^3/\text{min};$$

$$\text{TRM}_{(\text{EDM})} = 11 \text{ mm}^3/\text{min};$$

$$\text{TRM}_{(\text{AWJM})} = 0$$

Portanto, o valor de $\text{TRM}_{(\text{EDM} \rightarrow \text{AWJM})} = 69 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Esse é o valor da TRM do processo EDM com o auxílio do processo AWJM. TRM Total é a Taxa de Remoção de Material do processo híbrido AEJDM. A TRM (AWJM) é praticamente zero porque a pressão de 100bar é insuficiente para erosão sem as descargas elétricas. Portanto, o processo híbrido provou ser muito mais eficaz que os processos EDM e AEDM em separado, com um rendimento 420% superior ao apresentado por esses processos.

As Figuras 5.3 a 5.5 apresentam os resultados de posição instantânea da ponta da ferramenta, no eixo Z (em milímetros e lido no mostrador de parâmetros no painel segundo a Figura 4.3 (b)), para a água deionizada, cujo desempenho de TRM foi o que sofreu maior influência com o jato abrasivo com adição de carboneto de silício (SiC). Essas figuras corroboram os resultados de TRM, em que o desempenho entre fluido estático e jato a baixa pressão não foi tão significativo. Porém, fica evidenciado a ação do processo AEDM (Usinagem por Descargas Elétricas com Adição de Abrasivo), em que as partículas abrasivas, ao modificarem a densidade do fluido dielétrico, aumentam a pressão no arco de plasma, melhorando a dispersão das descargas e aumentando a velocidade de usinagem. A Figura 5.5 permite visualização instantânea da sensível melhoria quando os processos constituintes (EDM e AWJM) somam-se e potencializam o processo híbrido.

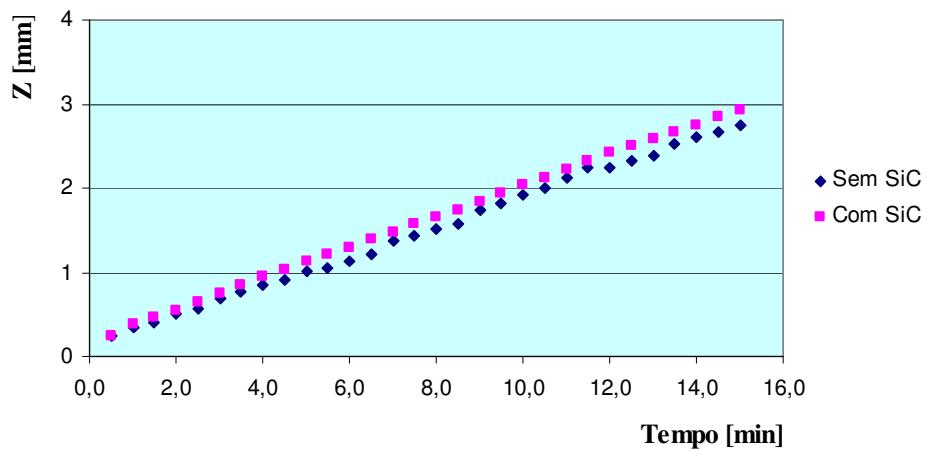


Figura 5.3. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com fluido estático, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

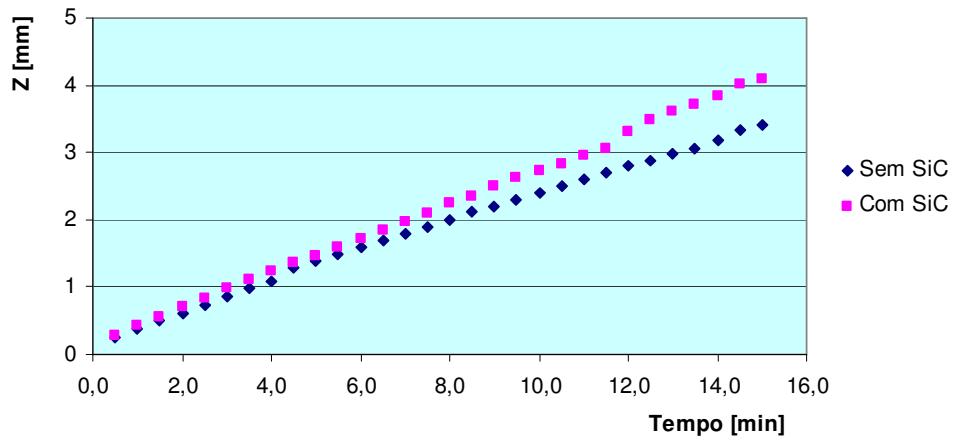


Figura 5.4. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a baixa pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

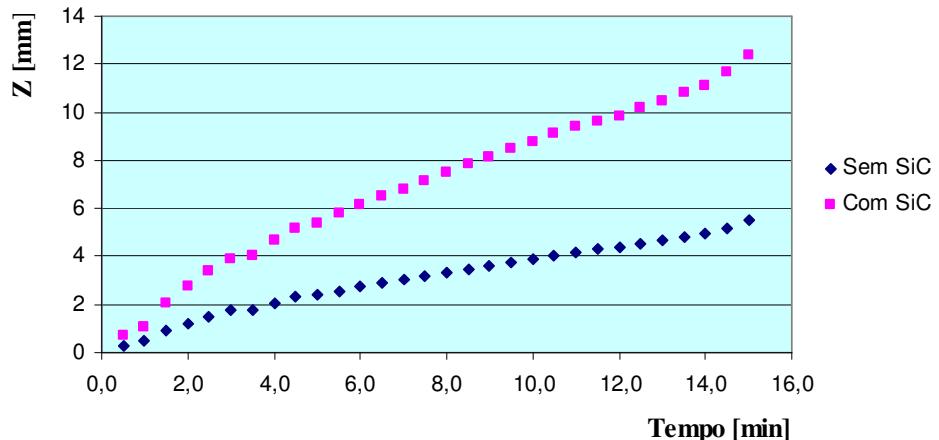


Figura 5.5. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a alta pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

5.2. Desgaste Volumétrico Relativo (DVR)

Os resultados de DVR encontram-se na Tabela 5.2 e nas Figuras 5.6 (sem abrasivo) e 5.7 (com abrasivo). A Figura 5.6 apresenta os resultados para Desgaste Volumétrico Relativo nas condições de Fluido Estático, Jatos de Baixa e Alta Pressão, sem adição de SiC. O Óleo A apresentou o melhor desempenho em relação aos demais fluidos, em especial em relação à Água deionizada. Porém, na condição de Jato a Alta Pressão, as diferenças de DVR não foram tão significativas, quando comparados com os resultados com Fluido Estático, em que os valores de DVR para o Óleo A e o Querosene foram muito menores. Isso significa que quanto maior a pressão do jato de dielétrico, maior o desgaste da ferramenta, mesmo em condições sem presença de abrasivo, como é o caso. Entretanto, observou-se que não houve considerável diferença de DVR quando a pressão passa de baixa para alta. Em todos os casos em que foi utilizada Água Deionizada, não houve considerável diferença de DVR entre as diferentes condições de aplicação do fluido.

Tabela 5.2. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
RD	Média	0,0893	0,0926	0,1563	0,1042	0,1087	0,1695	0,0154	0,0161	0,1163
	D. Padrão	0,0310	0,0620	0,0530	0,0200	0,0240	0,0650	0,0020	0,0021	0,0487
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
RD	Média	0,0990	0,0641	0,1538	0,0870	0,0431	0,1724	0,0175	0,0146	0,1282
	D. Padrão	0,0326	0,0247	0,0449	0,0198	0,0193	0,0445	0,0022	0,0035	0,0360

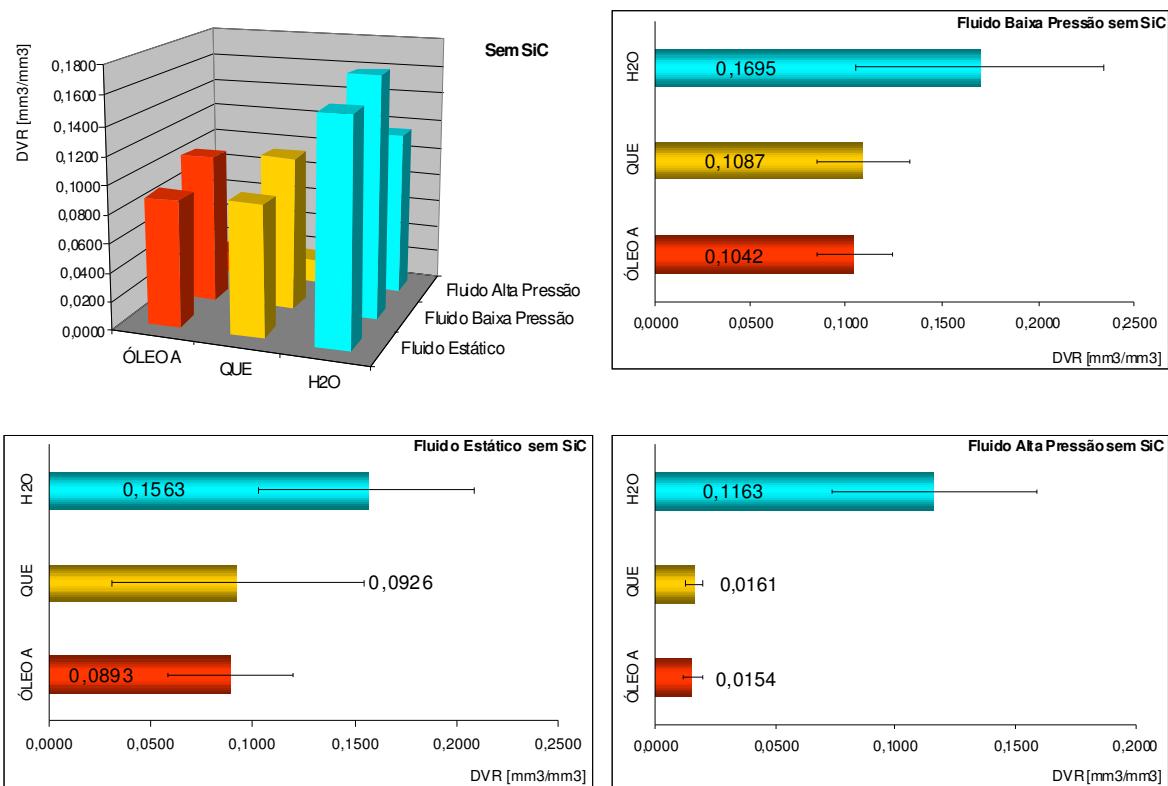


Figura 5.6. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Os resultados para a DVR com adição de abrasivo apresentam-se na Figura 5.7. Nota-se que não houve considerável diferença dos resultados comparando-os com os obtidos sem adição de SiC. A configuração do gráfico para fluido com abrasivo é parecida com a sem abrasivo. Portanto, a adição de abrasivo aumenta o desgaste da ferramenta, mas esse desgaste é compensado pelo aumento da TRM. Esse pode ser um problema quando se é necessária extrema acuracidade na peça usinada, pois um desgaste maior pode gerar problemas dimensionais.

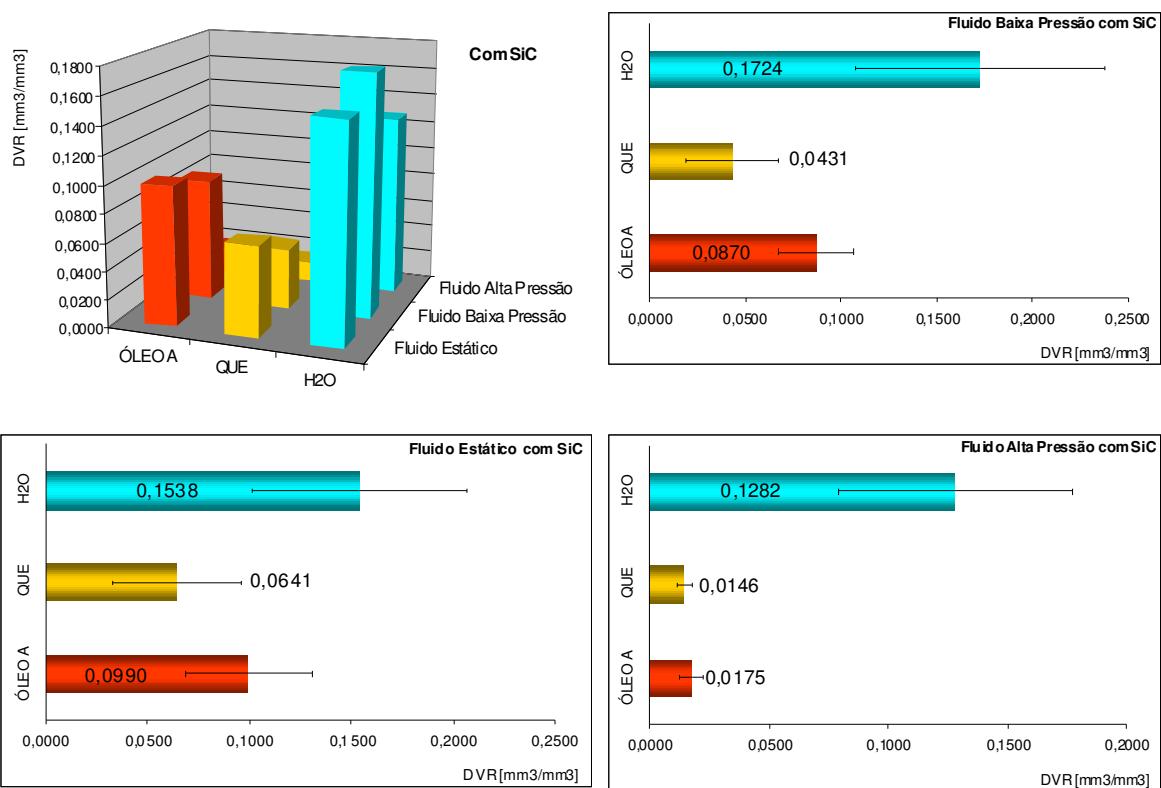


Figura 5.7. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

A Figura 5.8 apresenta fotografia das ferramentas utilizadas nos ensaios EDM (duas fotos diferentes das mesmas ferramentas), com água deionizada, com adição de abrasivo, com fluido estático (ferramenta com menor desgaste) e jato a alta pressão (ferramenta com maior desgaste). Observa-se a sensível diferença do desgaste das duas ferramentas. Esse desgaste acaba por ser compensado, quando observada a RD, pois as TRMs foram suficientemente elevadas com a melhoria do sistema de lavagem e pela ação híbrida EDM + AWJM e pela erosão mecânica causada pelo impacto das partículas de SiC.



Figura 5.8. Desgaste das ferramentas nos ensaios com água deionizada e com adição de abrasivo: (a) vista 1 e (b) vista 2.

5.3. Integridade Superficial

Foi realizada análise comparativa entre as superfícies usinadas. A Tabela 5.3 apresenta os resultados. Para fluido a alta pressão, sem SiC, não foi observado deposição de Si ou SiC. Já na condição fluido a alta pressão e SiC disperso, houve considerável deposição e Si na superfície usinada. O Querosene apresentou menor deposição (1,25%). Estes resultados mostram que, na situação em que foi utilizado o SiC, houve participação efetiva das partículas abrasivas no processo de remoção de matéria, ou seja, nas TRMs. Não foi possível detectar a deposição de C devido ao seu baixo número atômico.

Tabela 2.3. Análise EDS das superfícies usinadas com Fluido a Alta Pressão, com e sem SiC, quanto à deposição de Si (%).

Si (%)	ÓLEO A	QUE	H ₂ O
Sem SiC	-	-	-
Com SiC	1,36	1,25	1,69

A Figura 5.9 apresenta o resultado de rugosidade S_a para as amostras usinadas com os diversos fluidos e sem adição de carboneto de silício (SiC). Observa-se que o Óleo apresentou melhor resultado em todas as condições, quando comparados com os resultados

apresentados pelos demais fluidos, Querosene e Água Deionizada, sendo que esse último apresentou o pior desempenho em especial quando utilizado fluido estático. Conclui-se então que o aumento na pressão do sistema de lavagem da interface ferramenta-peça diminuiu a diferença de rugosidade das superfícies usinadas (WONG et al, 1995). Isso se deve ao fato de que o sistema de lavagem contribui não somente para elevação das TRMs mas também para melhoria do acabamento superficial da peça.

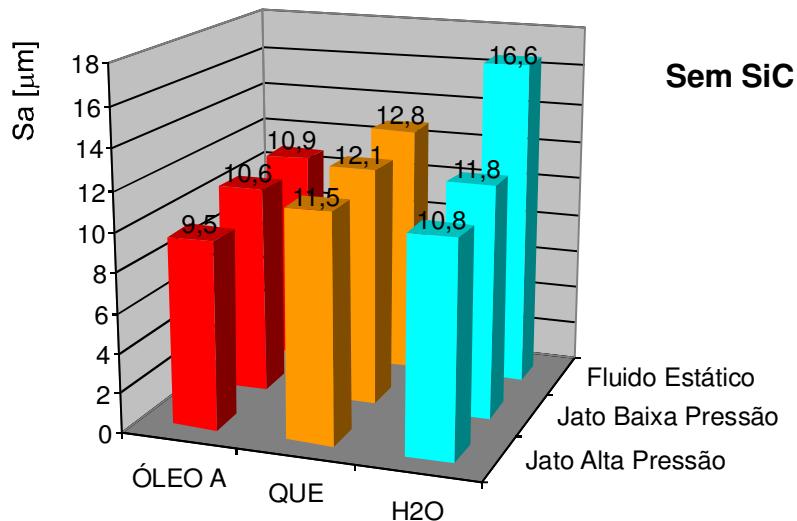


Figura 5.9. Rugosidade Sa para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Os resultados para rugosidades Sa das amostras usinadas com SiC encontram-se na Figura 5.10. Observa-se que houve, na condição em que a ação erosiva do abrasivo contribui para a remoção de material, sensível melhoria no acabamento superficial das amostras usinadas. Por exemplo, sem adição da SiC e com Jato a Alta Pressão, o valor de Sa com o Óleo A foi de 9,5 mm, enquanto que com o abrasivo, esse valor caiu para 4,91. Essa sensível diferença corrobora a expectativa de que o processo híbrido não seja apenas mais rápido, mas gerando superfícies de melhor qualidade.

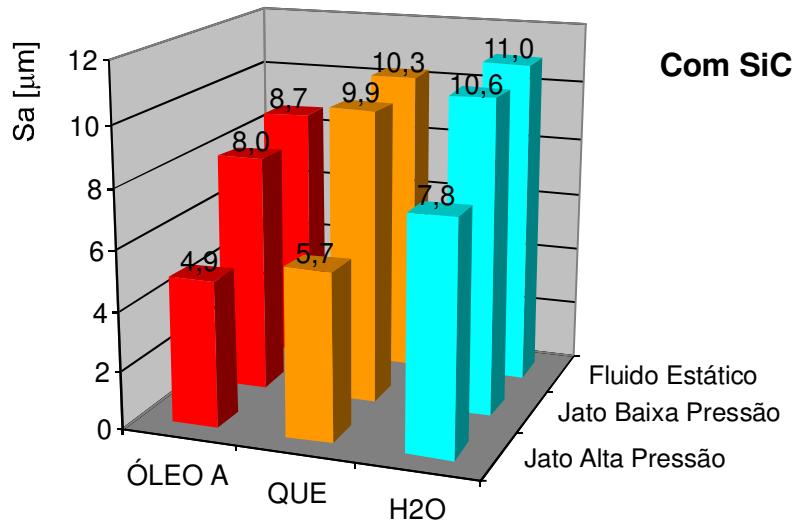


Figura 5.10. Rugosidade S_a para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

As Figuras 5.11 a 5.19 apresentam as topografias geradas por interferometria laser, das superfícies usinadas com fluido estático, jatos a baixa e alta pressão, comparando o efeito da adição de abrasivo, corroborando os valores de S_a encontrados. Observa-se que a adição de SiC melhora a qualidade superficial, com amplitude de picos e vales menores que as amostras que foram usinadas sem SiC, mesmo com fluido estático. Portanto, fica claro que o abrasivo age melhorando o mecanismo de usinagem, pela melhor distribuição das descargas elétricas (FERNANDES, 1999) e gerando energia de impacto na superfície, melhorando velocidade de usinagem e integridade superficial. O efeito erosivo não ocorre no material solidificado, pelo menos de forma significativa; mas ocorre de forma efetiva no material fundido, que por gravidade, depois da implosão (Figura 2.4), volta a se depositar na superfície já usinada, pela descarga elétrica posterior. As partículas abrasivas, a alta pressão, removem essa camada de material fundido, durante sua solidificação. Esse mecanismo potencializa o processo EDM, como uma espécie de catalisador mecânico.

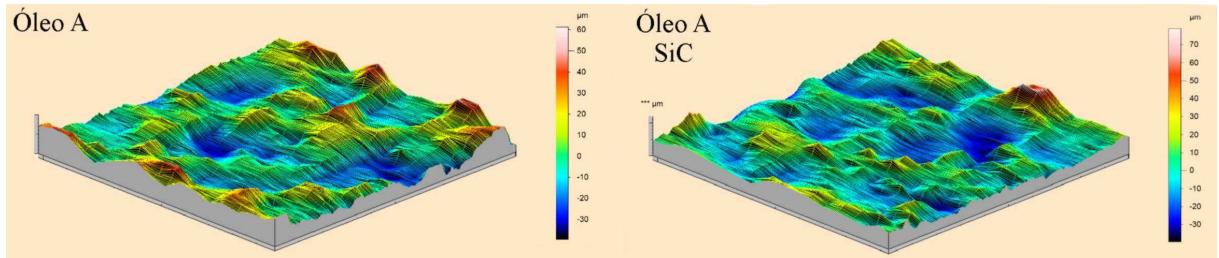


Figura 5.11. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm^2 e 1000×50 pontos).

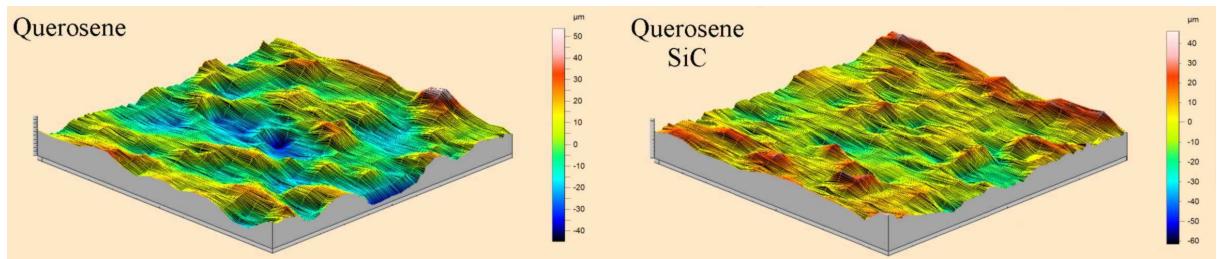


Figura 5.12. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm^2 e 1000×50 pontos).

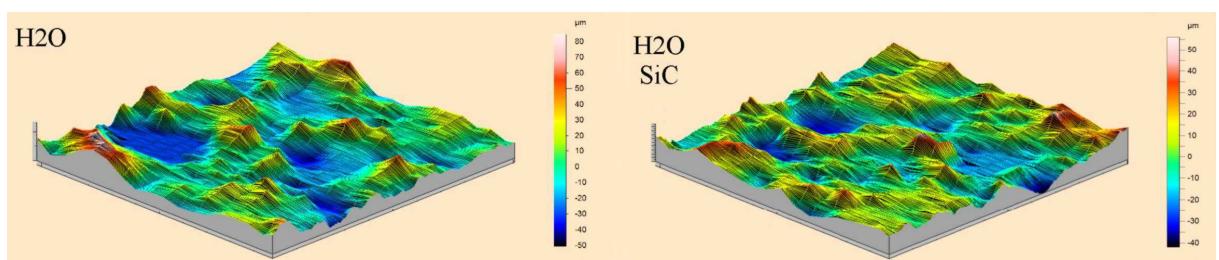


Figura 5.13. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm^2 e 1000×50 pontos).

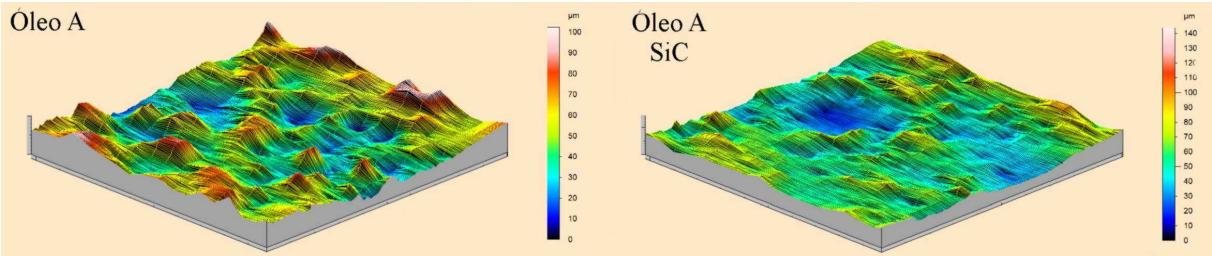


Figura 5.14. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

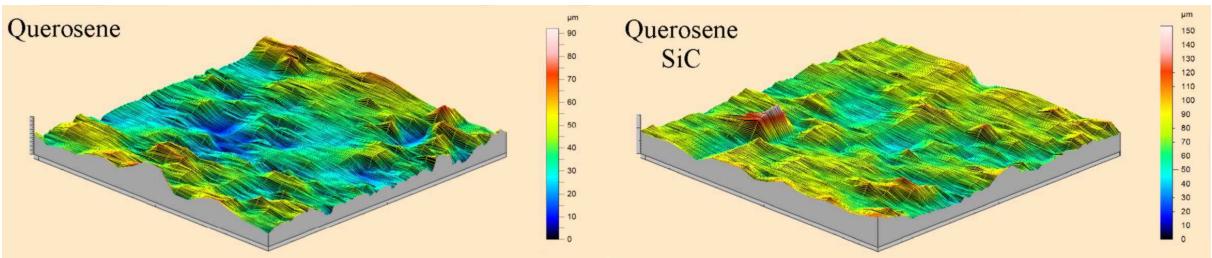


Figura 5.15. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

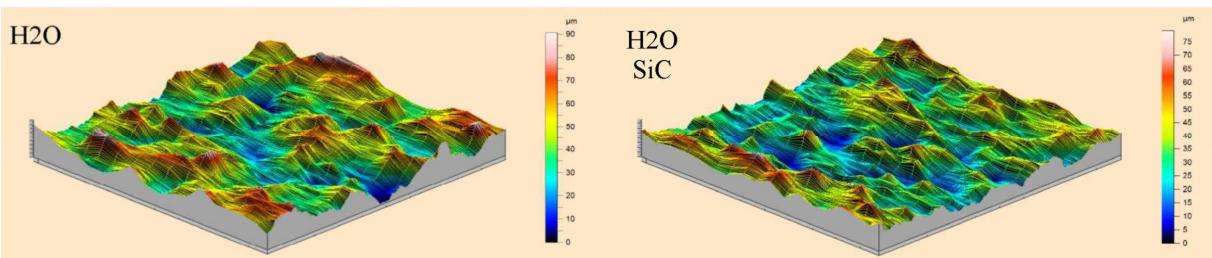


Figura 5.16. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

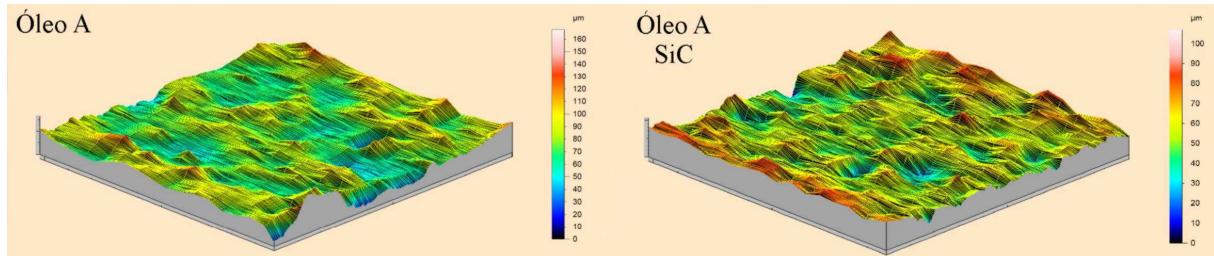


Figura 5.17. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

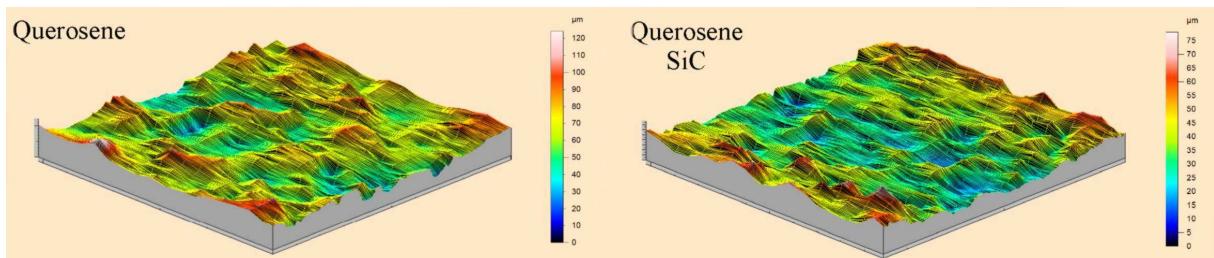


Figura 5.18. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

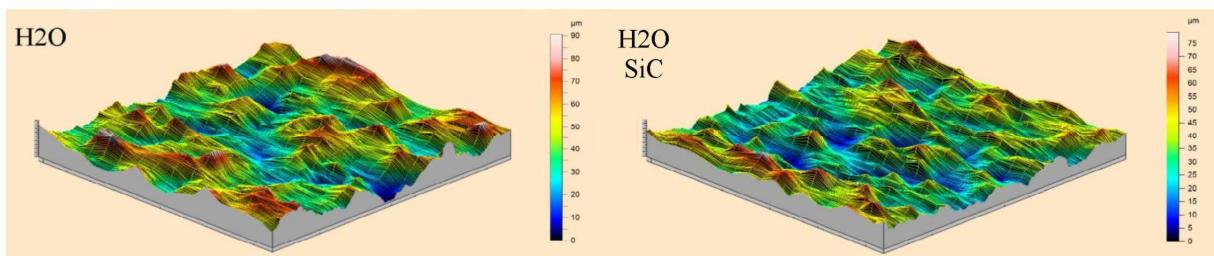


Figura 5.19. Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com jato a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de 1 mm² e 1000 x 50 pontos).

A morfologia das superfícies usinadas é apresentada nas Figuras 5.20 a 5.37. Morfologicamente, observam-se sensíveis diferenças entre as superfícies usinadas pelos diferentes óleos, corroborando o trabalho de Arantes, 2001, sobre a influência dos fluidos dielétricos na morfologia de superfícies do aço ABNT M2. O óleo A gerou uma superfície (camada refundida) com menos trincas e menos bolhas e crateras em relação às superfícies geradas pelo querosene ou pela água deionizada. Esta última mostrou morfologia de superfície inferior, com maior número de trincas, bolhas e crateras, em ambas as condições, com e sem SiC.

O efeito do SiC no fluido dielétrico foi observada em quase todas as figuras, o que corrobora o trabalho de Fernandes, 1999, que reportou a ação de partículas abrasivas como estabilizadores do processo EDM e capaz de melhorar a TRM, rugosidade, topografia e morfologia das superfícies. Em todos os casos, foi observado a “suavização” da superfície, diminuição do número de crateras e bolhas; tanto em condição de fluido estático quanto em alta pressão.

O efeito da pressão do fluido dielétrico pode ser observado em termos de morfologia de superfície. Quanto maior a pressão, melhor a morfologia apresentada pela superfície. O aumento da pressão melhora o sistema de lavagem no GAP, melhorando a remoção de metal refundido, diminuindo o feito de bolhas e crateras comuns na camada refundida em peças usinadas por EDM.

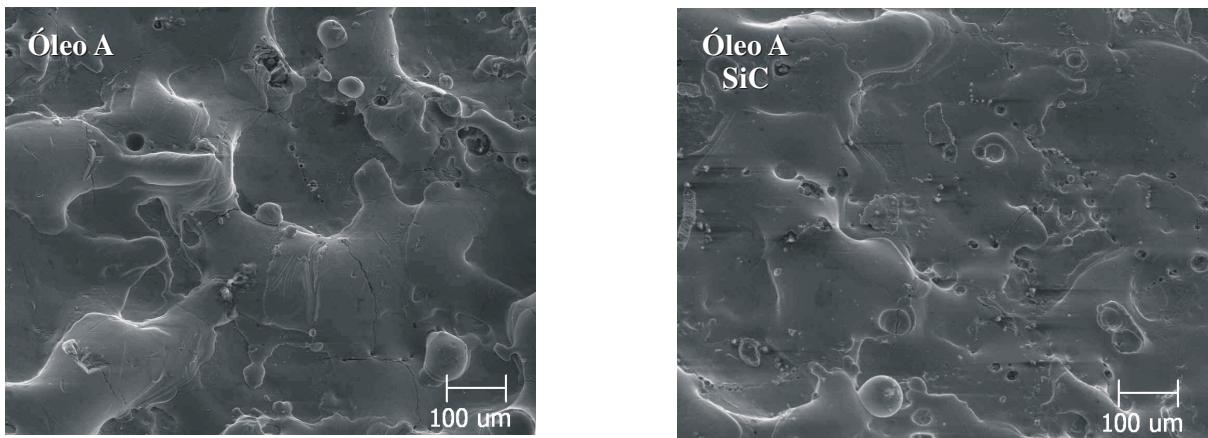


Figura 5.20. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

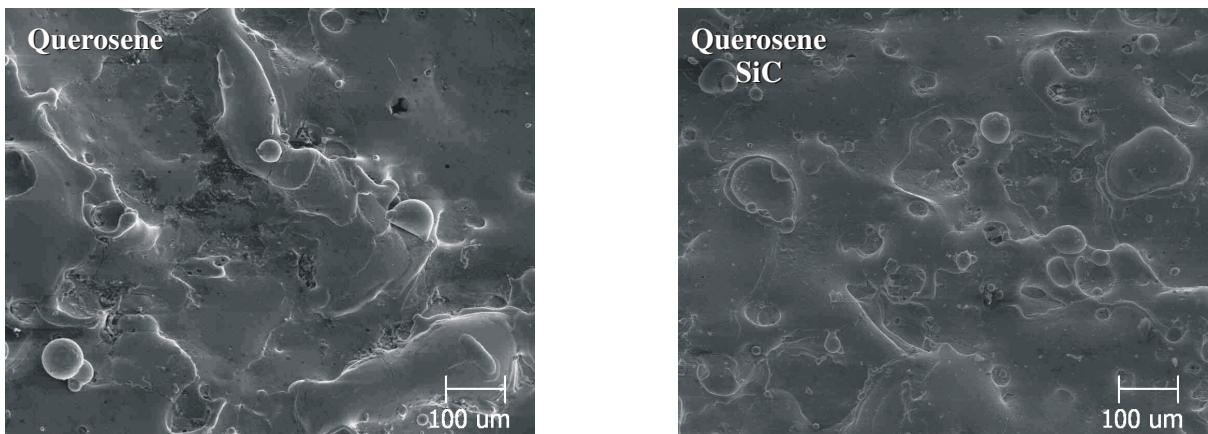


Figura 5.21. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

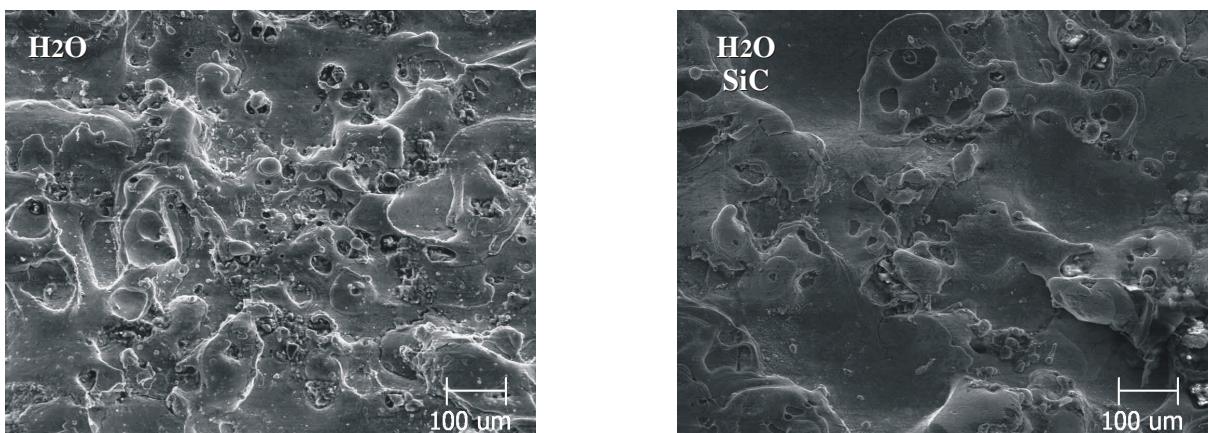


Figura 5.22. Topografias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

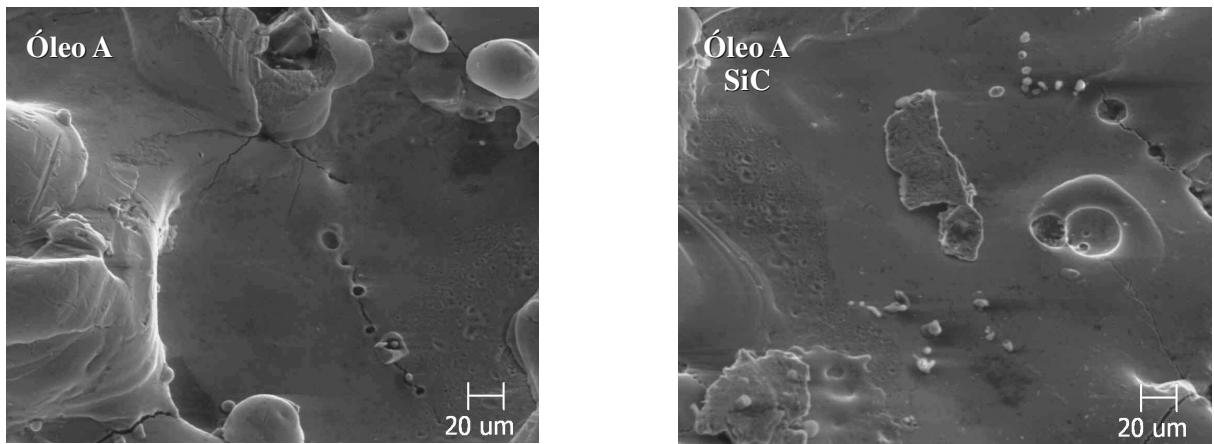


Figura 5.23. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

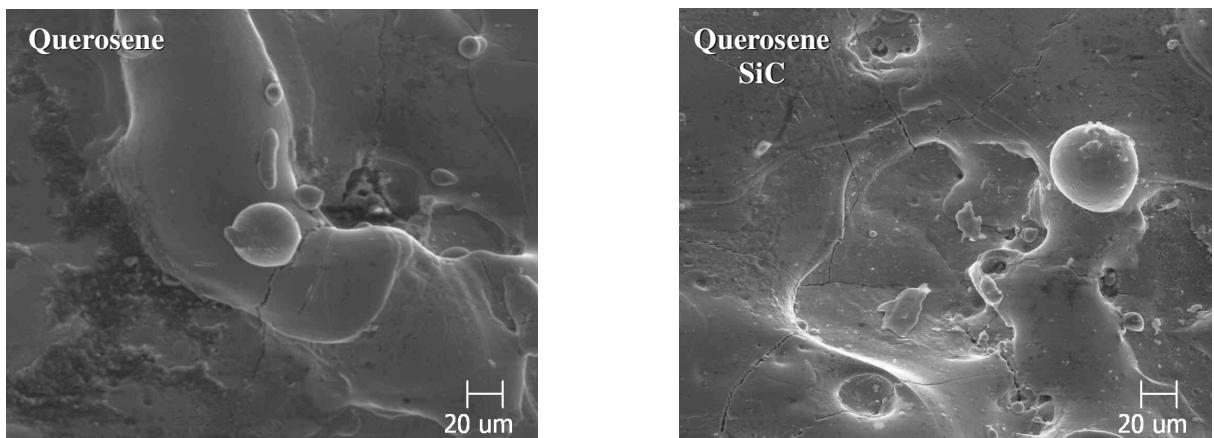


Figura 5.24. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

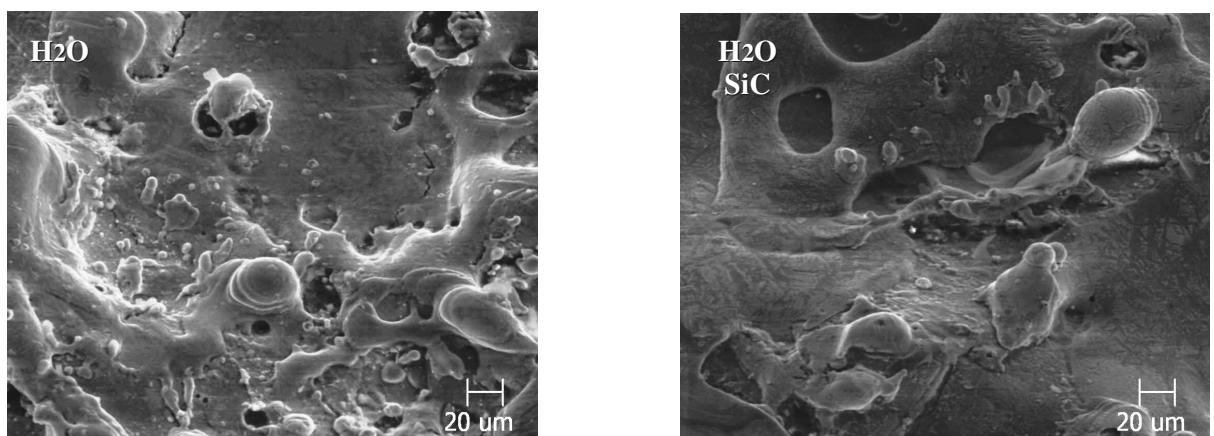


Figura 5.25. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido estático, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

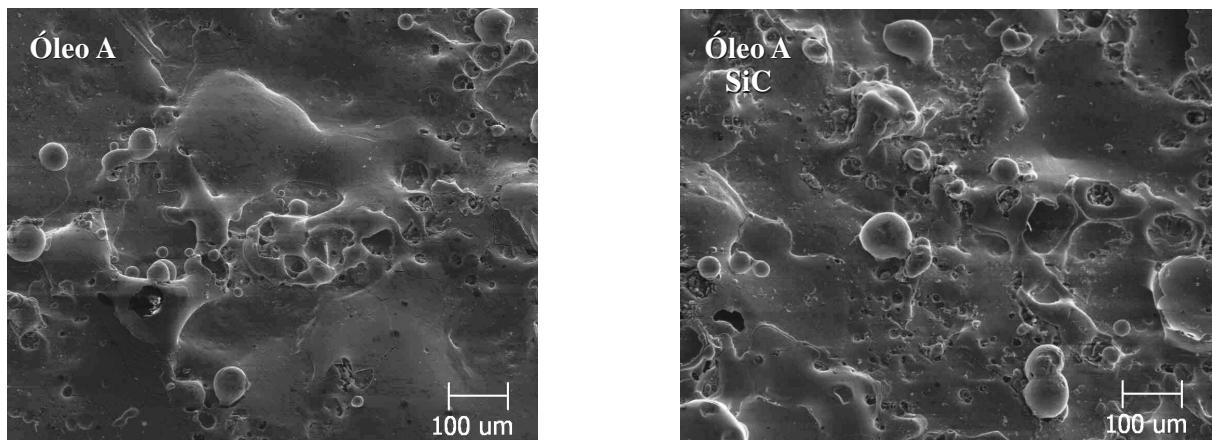


Figura 5.26. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

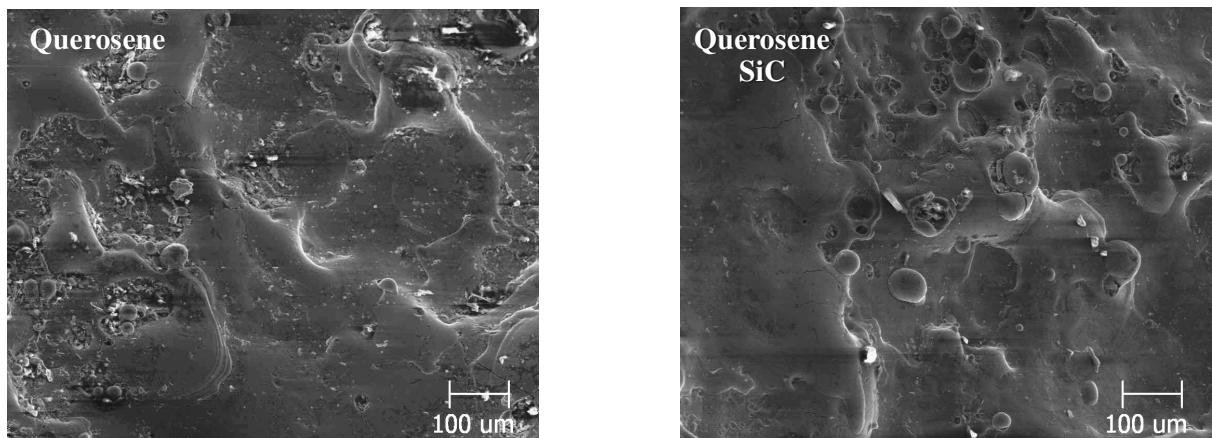


Figura 5.27. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

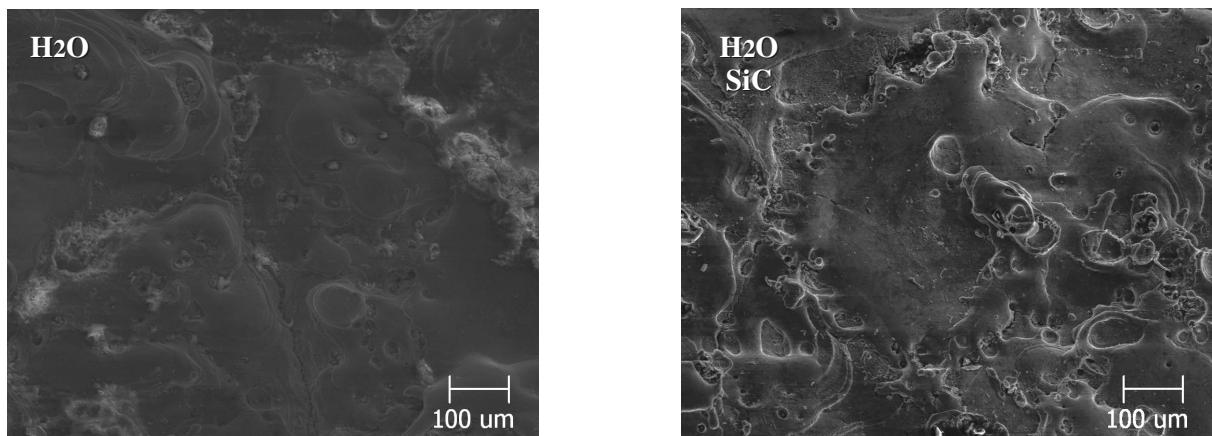


Figura 5.28. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

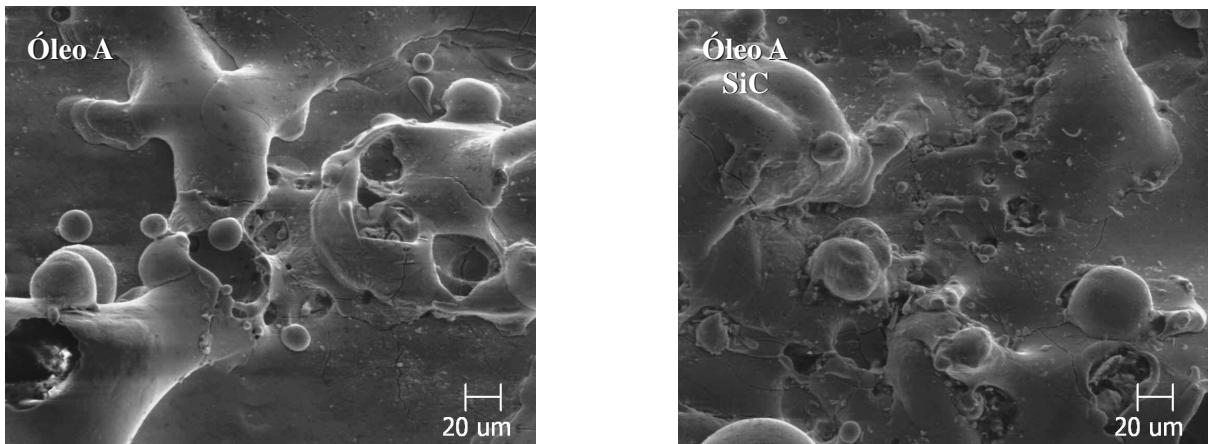


Figura 5.29. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

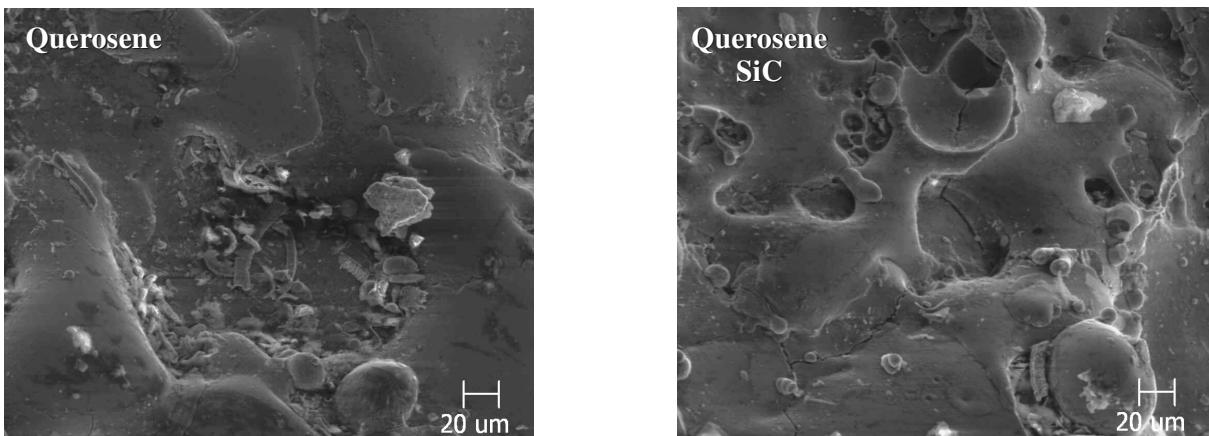


Figura 5.30. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a baixa pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

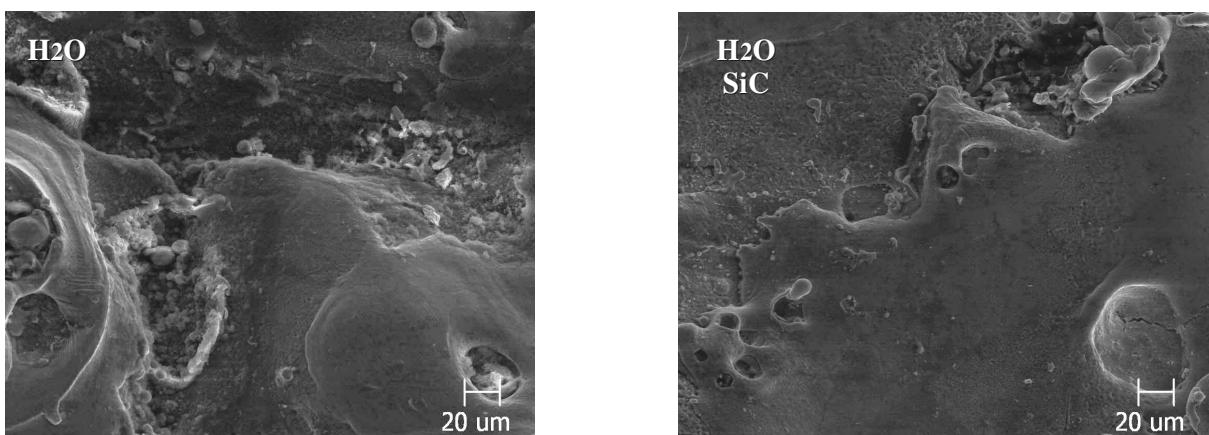


Figura 5.31. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido baixa pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

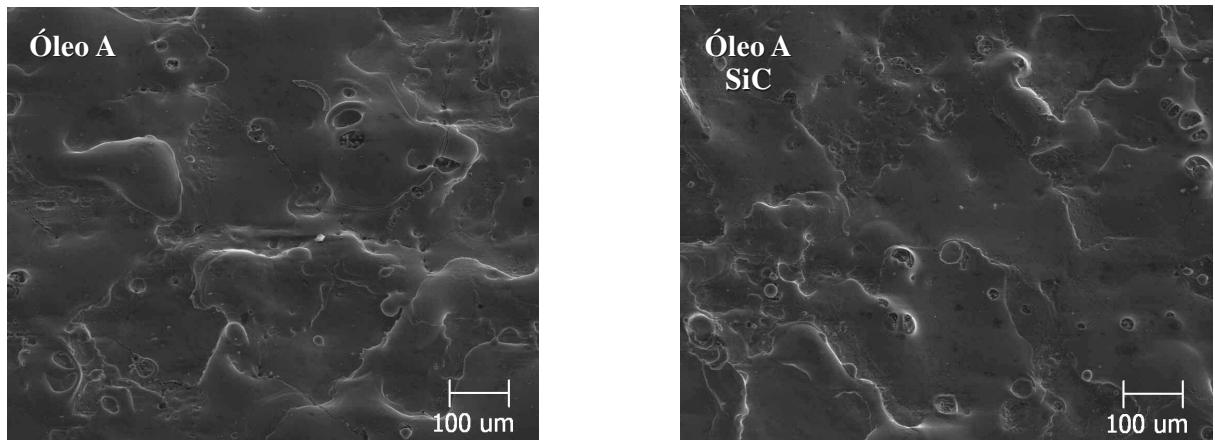


Figura 5.32. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

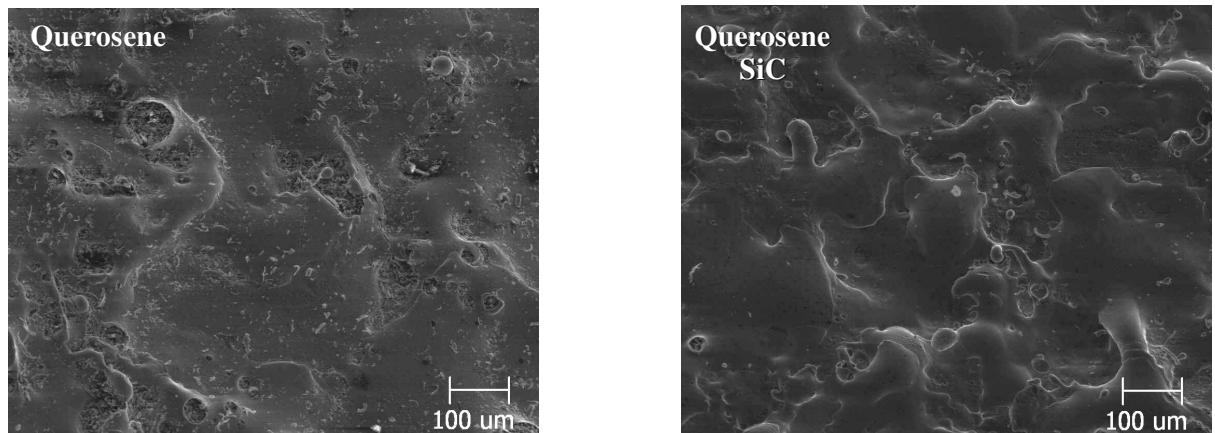


Figura 5.33. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

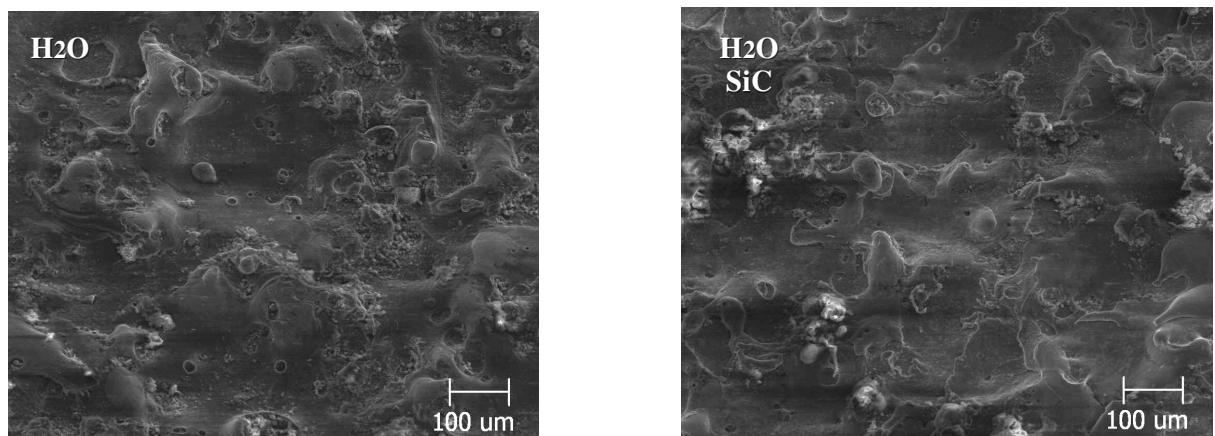


Figura 5.34. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 100x).

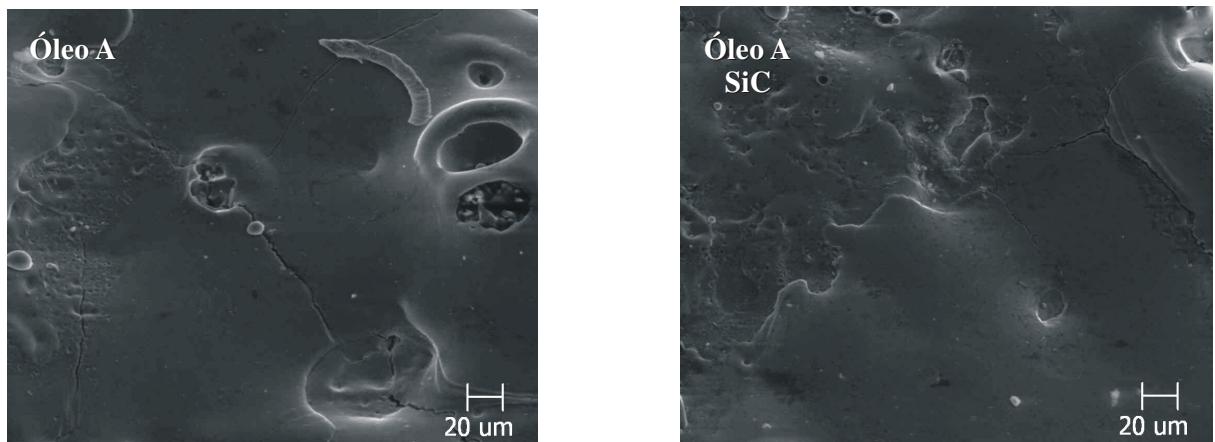


Figura 5.35. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

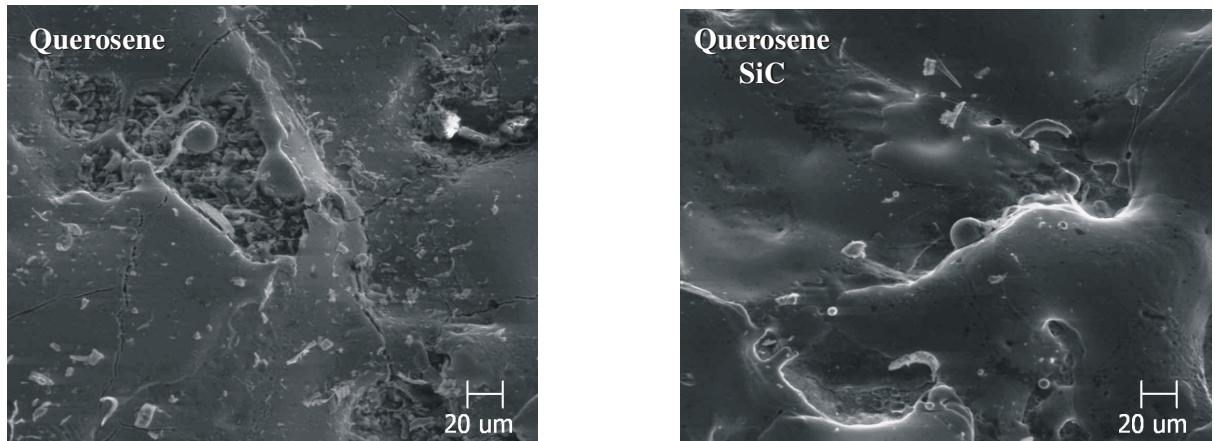


Figura 5.36. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

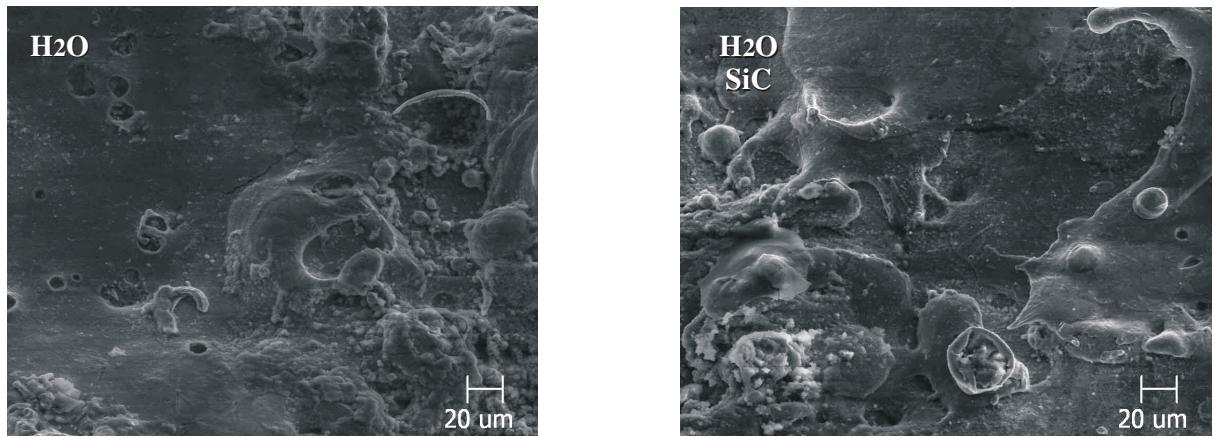


Figura 5.37. Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (aumento de 300x).

5.4. Espessura de Camada Refundida

A Tabela 5.3 e as Figuras 5.38 e 5.39 apresentam os resultados de espessura de camada refundida nas três condições de jato de dielétrico e adição ou não de SiC. Para a condição sem SiC (Figura 5.38), observou-se que a variação de pressão do jato não segue um comportamento constante. Em algumas condições, houve diminuição da espessura (no caso do querosene); já para óleo A e para a água deionizada, o comportamento não mostrou o mesmo padrão, aumentando o valor de espessura ao se passar de fluido estático para baixa pressão, e voltar a cair na condição de alta pressão.

Com adição de SiC, observou-se sensível influência da pressão do fluido dielétrico na espessura de camada refundida (Figura 5.39). Houve diminuição dos valores de espessura de camada refundida em todos os casos, ao se passar da condição de fluido estático para fluido a alta pressão. Entretanto, para o querosene e a água deionizada, à baixa pressão resultou nos maiores valores, o que pode indicar que o efeito de melhoria na lavagem do material refundido ocorre com eficiência em condições de maior pressão e com adição de carboneto de silício. A Figura 5.40 apresenta a grande diferença entre as camadas refundidas sem e com SiC (fluido a alta pressão e água deionizada). A influência do abrasivo disperso na água foi mais evidente que no caso do óleo A e do querosene.

Tabela 5.3. Espessura de Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa e alta pressão.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Esp. Camada Refundida	Média	16,3	21,0	16,7	21,4	21,4	28,7	22,3	13,0	20,5
	D. Padrão	11,8	15,0	8,7	10,4	13,1	9,3	10,0	2,5	11,2
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Esp. Camada Refundida	Média	19,3	19,0	14,6	12,7	23,2	20,3	8,4	9,7	9,6
	D. Padrão	11,9	11,3	9,6	10,2	13,6	12,9	2,1	3,8	4,8

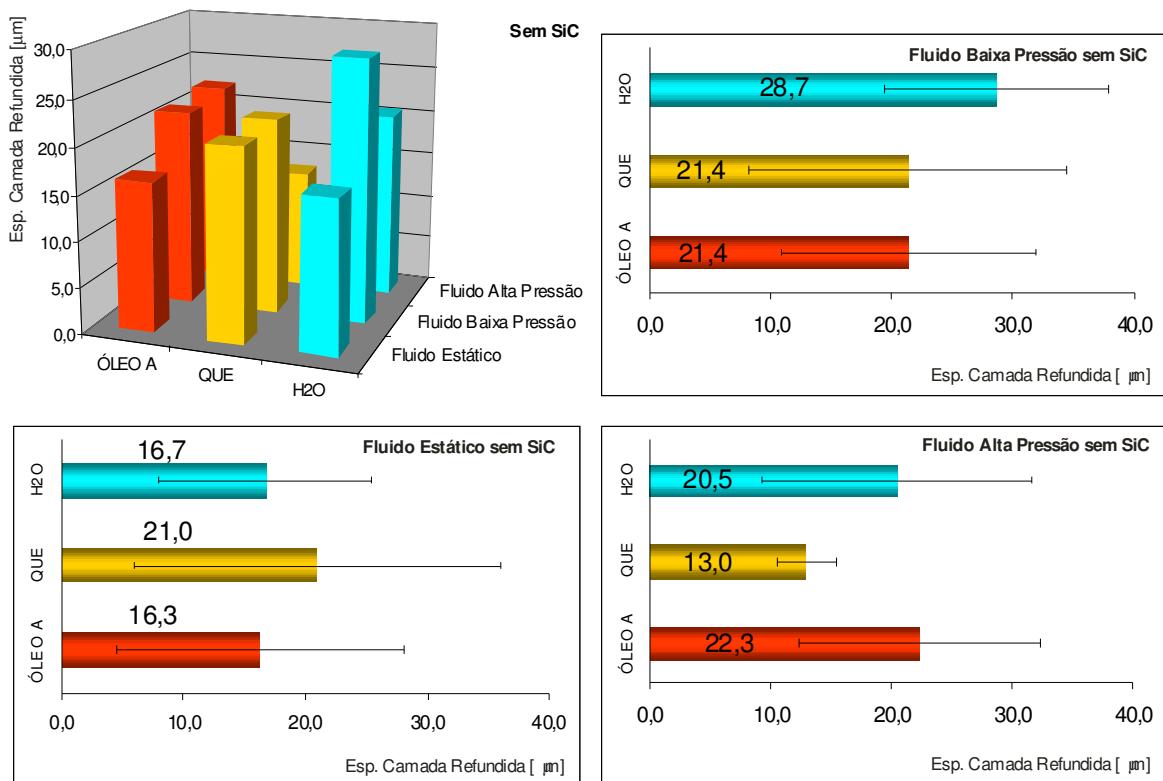


Figura 5.38. Espessura da Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato pressão e alta pressão.

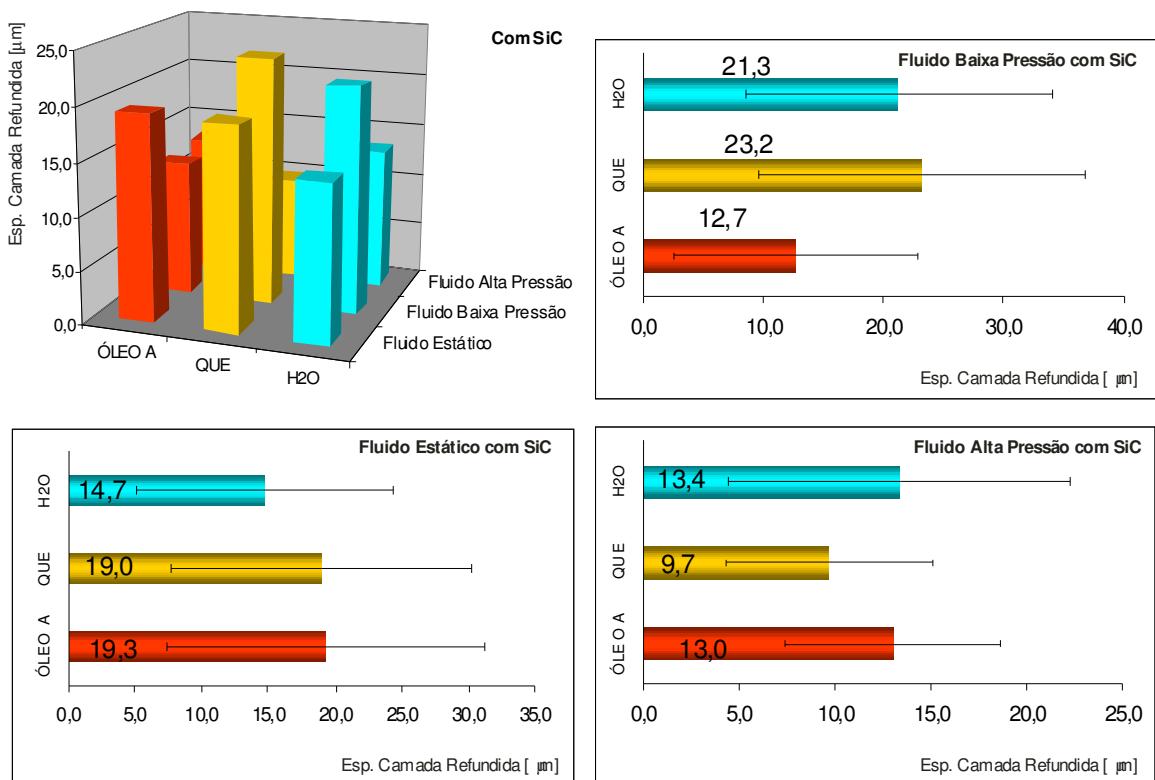


Figura 5.39. Espessura da Camada Refundida para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo (SiC), com fluido estático, baixa pressão e alta pressão.

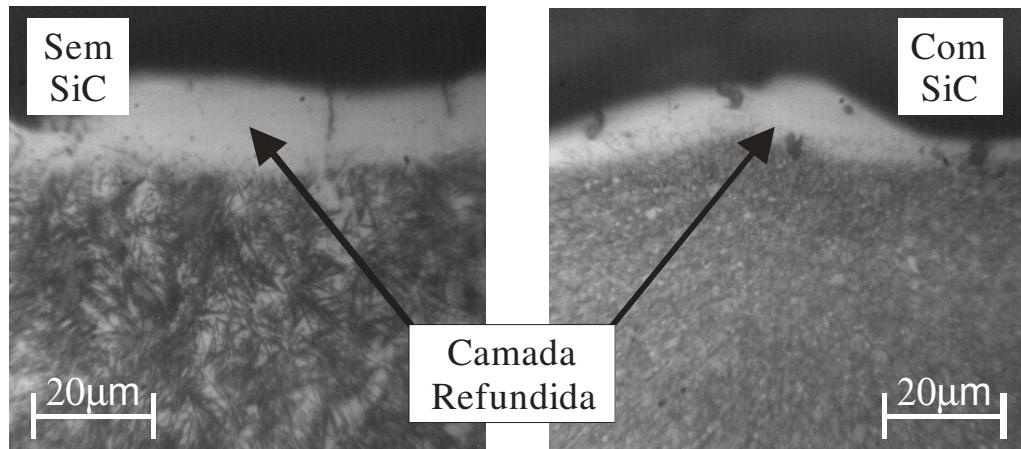


Figura 5.40. Camada Refundida para as amostras usinadas com Água Deionizada, sem e com abrasivo (SiC), com fluido a alta pressão.

5.4. Microtrincas

5.4.1. Número de Trincas

As Figuras 5.41 e 5.42 apresentam os resultados para número de trincas nas condições testadas. Variando o sistema de lavagem, mas sem adição de abrasivo (SiC), observou-se que houve aumento do número de trincas com o aumento da pressão do fluido dielétrico (Figura 5.41). Com fluido dielétrico (sem SiC), aparentemente as condições térmicas e de erosão, assim como de resfriamento da camada refundida, promovem aumento do número de trincas com o aumento da pressão. Porém, com a adição do SiC, houve diminuição significativa do número de trincas. Nessas condições de teste, a maior densidade do fluido causada com a adição de SiC, aliada à aparente melhoria das condições de resfriamento podem ter causado essa diminuição das trincas. O efeito da pressão do fluido dielétrico foi o contrário do esperado, havendo aumento do número de trincas com aumento da pressão.

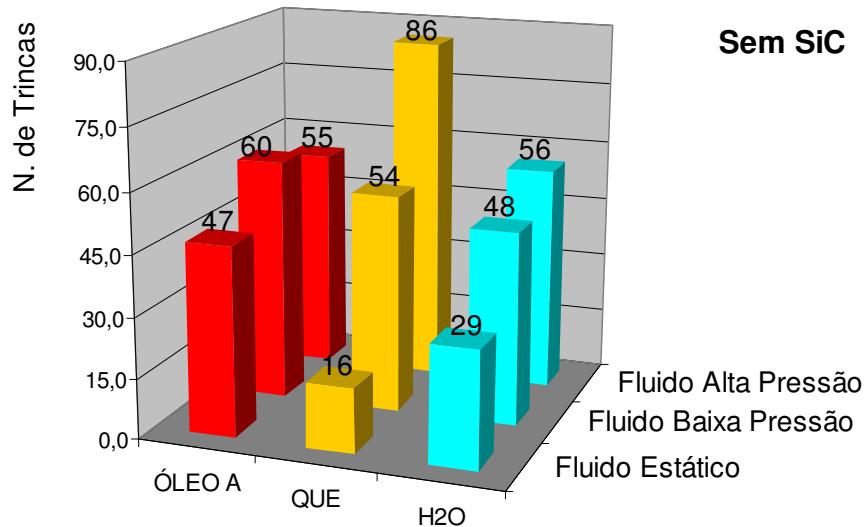


Figura 5.41. Número de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

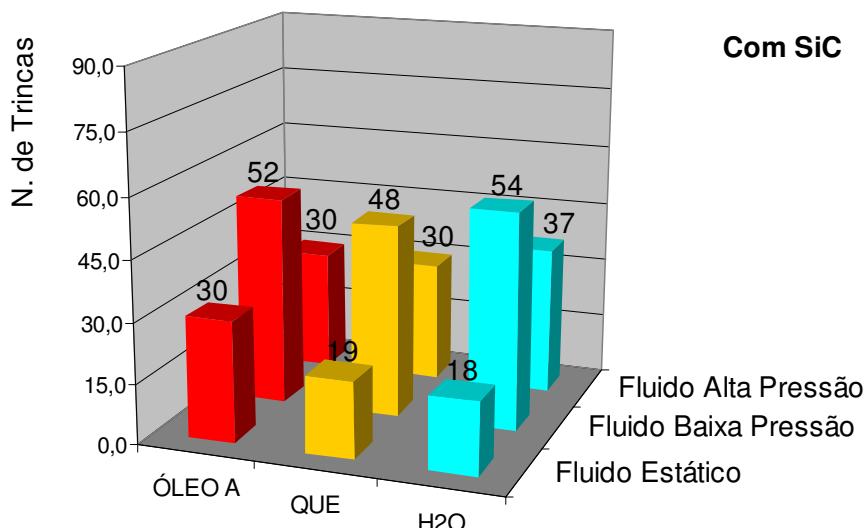


Figura 5.42. Número de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo (SiC), com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

5.4.2. Comprimento de Trincas

Os resultados para comprimento de trincas são apresentados na Tabela 5.4 e nas Figuras 5.43 e 5.44. Observou-se que a água deionizada gerou maior comprimento médio de trincas, independentemente da adição ou não de abrasivo. Não foi observado um padrão de comportamento quanto à pressão do jato.

Tabela 5.4. Comprimento de Trincas para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Comprimento de Trincas	Média	17,4	20,8	34,7	19,5	25,0	74,7	24,1	20,9	34,0
	D. Padrão	10,6	9,5	18,1	11,5	18,6	44,2	13,4	12,8	17,0
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Comprimento de Trincas	Média	20,1	18,5	36,8	14,4	21,2	47,9	12,6	14,0	24,0
	D. Padrão	11,3	9,0	19,4	8,3	10,4	16,3	5,0	10,0	10,0

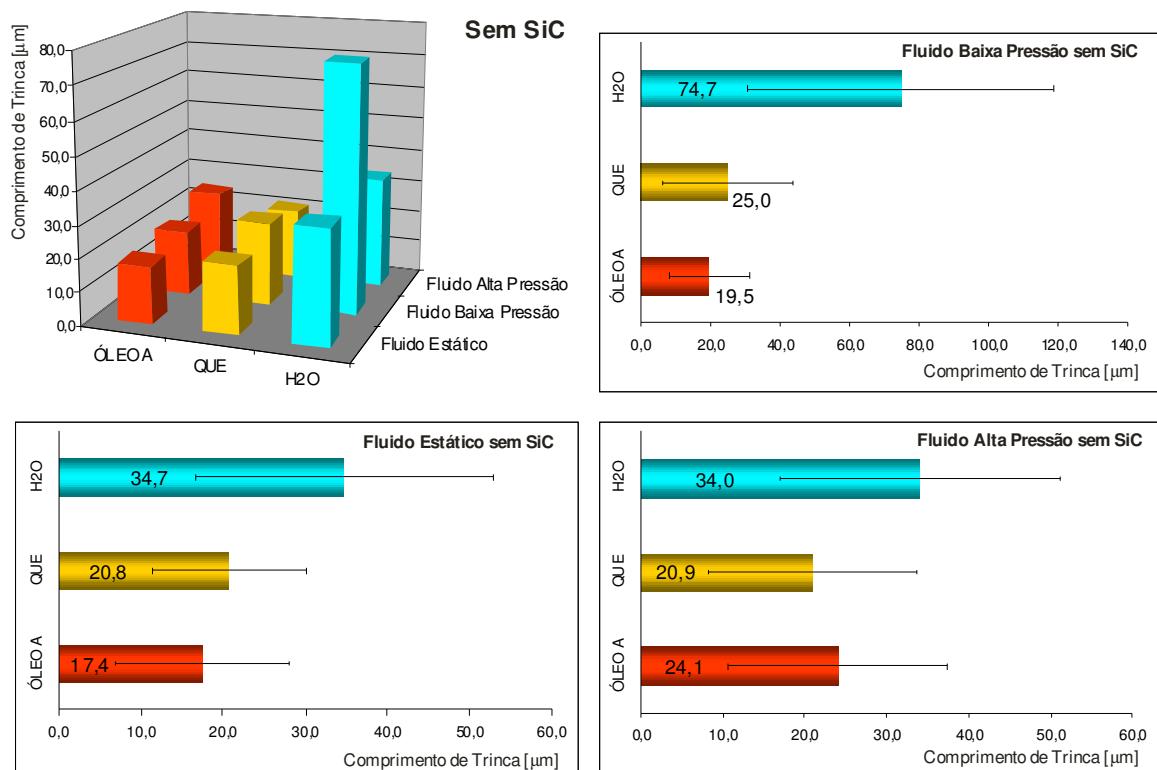


Figura 5.43. Comprimento Médio de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

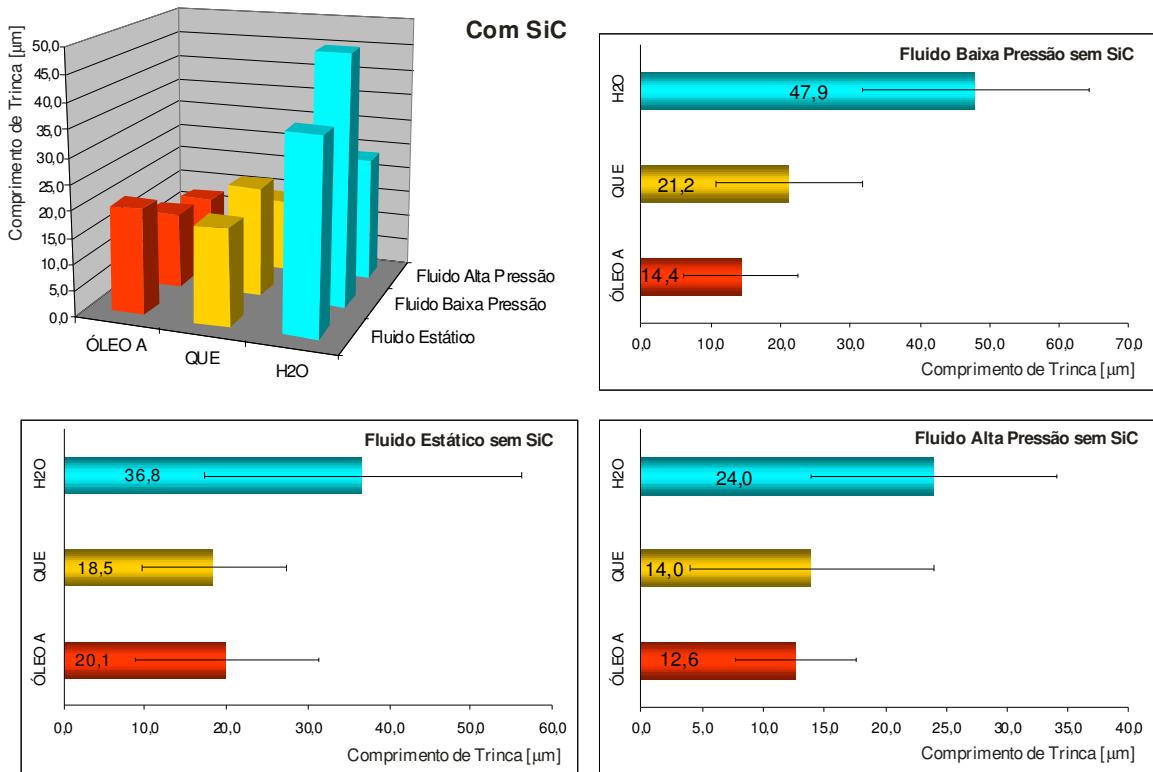


Figura 5.44. Comprimento Médio de Trincas das amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

5.4.2. Microdureza

Os resultados de microdureza da camada refundida, ZAC e metal de base são apresentados na Tabela 5.5. Observa-se que, de forma geral, utilizando-se o óleo A, com ou sem adição de carbeto de silício, os valores de microdureza foram maiores que no caso do querosene e água deionizada. O referido óleo apresenta características mais adequadas à eletroerosão em termos de microdureza, removendo calor com menor velocidade, gerando esfriamento mais lento da superfície usinada, mantendo assim maiores os valores de microdureza. A água deionizada apresentou os menores valores para microdureza, em média, principalmente na Camada Refundida. Isso porque a água promove o que é chamado de descarbonetação da superfície usinada, que é a remoção de átomos de carbono da estrutura do aço, diminuindo o valor de dureza. Esse efeito é indesejado, uma vez que altera significativamente as características do material usinado, especialmente na superfície.

É importante observar que não houve alterações significativas quanto à adição de SiC e quanto à variação do sistema de lavagem, de fluido estático, passando por fluido a baixa pressão, e finalmente por fluido a alta pressão. Fica caracterizado portanto que, em termos de microdureza do material, tanto da camada refundida, quanto da ZAC, o que realmente tem influência em seu resultado é o tipo de fluido dielétrico. Nos testes realizados, os melhores resultados foram para peças usinadas com o Óleo A (*premium*) e os piores resultados, peças usinadas com água deionizada. Quando a microdureza for fator decisivo na construção da peça, molde ou matriz, não se recomenda a utilização de soluções aquosas no processo AJEDM.

Tabela 5.5. Microdureza de Camada Refundida, Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e Material de Base, para testes realizados com Óleo A, Querosene e Água Deionizada.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Camada Refundida	Média	897,94	644,84	611,62	923,32	646,83	624,89	865,93	752,54	619,65
	D. Padrão	180,67	134,73	70,97	260,55	197,54	72,24	180,34	230,99	122,32
ZAC	Média	670,62	755,06	736,92	745,42	603,97	741,77	777,45	828,91	819,71
	D. Padrão	62,60	88,22	81,31	75,90	78,23	70,14	64,89	63,41	79,16
Material de Base	Média	860,28	852,29	848,92	844,38	797,31	722,43	890,63	1038,73	903,33
	D. Padrão	132,39	92,05	63,46	48,60	81,14	59,87	87,20	60,88	104,89
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
Camada Refundida	Média	792,76	825,76	711,26	908,39	1094,66	646,02	679,52	771,02	628,37
	D. Padrão	180,23	169,18	160,99	194,53	198,15	94,38	129,49	194,22	192,94
ZAC	Média	828,90	776,69	708,20	781,04	668,39	807,23	719,70	815,42	838,07
	D. Padrão	95,35	50,06	66,97	94,13	86,48	53,16	73,23	77,53	109,22
Material de Base	Média	904,04	920,34	739,92	1034,58	797,37	975,58	835,98	1007,51	861,90
	D. Padrão	102,62	103,64	82,57	113,73	79,30	74,17	79,29	71,21	47,79

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar a viabilidade, técnica e econômica, do processo AJEDM. Com base nos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- ◆ O sistema de lavagem tem fundamental importância no desempenho da usinagem EDM. Verificou-se que quanto maior a pressão do fluido dielétrico, maior a TRM e menores os valores de rugosidade, pois as partículas fundidas são evacuadas da interface ferramenta-peça com mais eficiência.
- ◆ A simples adição de abrasivo (SiC) melhora consideravelmente a TRM, o DVR e a rugosidade da peça usinada por EDM. Esses resultados corroboram a teoria de que a presença do abrasivo melhora a dispersão das descargas e modifica a densidade do fluido dielétrico, potencializando a energia térmica empregada na peça ao redistribuir melhor a energia entre a ferramenta.
- ◆ Os resultados com jato a alta pressão mostraram que o processo híbrido, associando a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) é viável, por apresentar TRMs até 8 vezes maior que o processo EDM sem sistema de lavagem. Concomitantemente ao processo EDM, a erosão abrasiva se faz presente e melhora o processo.
- ◆ Com fluido a alta pressão e sem abrasivo, não foi observado deposição de Si ou SiC. Já na condição fluido a alta pressão e SiC em dispersão, houve considerável deposição e Si na superfície usinada. O Querosene apresentou menor deposição (1,25%). Estes resultados mostram que, na situação em que foi utilizado o SiC, houve participação efetiva das partículas abrasivas no processo de remoção de material.

◆ A utilização da água deionizada como dielétrico é viável tecnicamente no processo híbrido proposto, uma vez que as velocidades de usinagem (TRM) tornaram-se compatíveis com as obtidas com hidrocarbonetos e EDM convencional, com a vantagem de menor custo, maior segurança ao operador e de ser ecologicamente viável. Entretanto, quando se deseja TRMs ainda maiores, o melhor fluido é o hidrocarboneto específico para eletroerosão.

◆ Os resultados experimentais mostraram que, para a pressão de 100 bar, ainda há a formação de camada refundida, embora menor que no processo EDM convencional. Teoricamente, com o aumento da pressão do fluido, pode-se esperar eliminação da camada refundida.

6.1. Recomendações para Trabalhos Futuros

Em função dos conhecimentos adquiridos com o desenvolvimento do Processo Híbrido de Usinagem de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM), é possível sugerir futuros trabalhos de investigação visando o refinamento do processo:

◆ Investigar o efeito da utilização de outros pós abrasivos tais como a Alumina (Al_2O_3), Carboneto de Boro (B_4C) e até Carboneto de Tungstênio (WC), testando diferentes granulometrias e concentrações. Abrasivos com características tribológicas e de dispersão em fluidos podem influenciar diferentemente no desempenho do processo AJEDM.

◆ Testar pressões mais elevadas do jato de dielétrico. Não se sabe qual o limite de pressão pode ser utilizado sem influenciar na estabilidade do arco de plasma responsável por grande parte da remoção de material no processo híbrido proposto. Pressões muito elevadas podem também provocar mudança na qualidade superficial da peça usinada. Teoricamente, existe uma pressão ideal em que a capacidade de remoção de material devido a ação erosiva do jato seja tal que não ocorra a formação da camada refundida.

◆ Investigar alternativas para melhorar o desempenho da água deionizada. Um caminho a seguir é estudar parâmetros de usinagem específicos e otimizados (T_{on} , T_{off} , concentração de abrasivo, pressão do jato, etc).

- ◆ Estudar outras formas de utilização do sistema de lavagem com alta pressão, tais como por jateamento lateral, injeção pela peça e sucção pela peça (Figura 2.14), com o objetivo de também viabilizar o processo com ferramentas maciças.
- ◆ Investigar mais a fundo o efeito dos abrasivos dispersos em fluidos dielétricos no desgaste da ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALLISON, SAM. **The Case for Additive Technology in EDM.** Editorial Staff of Modern Machine Shop, 2000. Disponível em: <www.mmsonline.com/articles>. Acessado em setembro de 2004.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**, 2002. 134 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

ARANTES, L. J. **Avaliação de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**, 2001. 74 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

ARANTES, L. J., RASLAN, A. A. **Case Study for Conventional and Vegetal Dielectric Fluids Influence on EDM Processes**, In: 38th CIRP'05 - International Seminar on Manufacturing Systems, 2005, Florianopolis.

ARANTES, L. J.; SILVA, E. M.; SILVA, M. B.; RASLAN, A. A. **O Hidrocarboneto é um Mal Necessário ou Pode ser Substituído?** Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, Ano XL, nº. 459, 2004, p. 34-44.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 3474: Líquidos Isolantes Elétricos – Determinação do Fator de Perdas Dielétricas e da Permissividade Relativa (Constante Dielétrica). Rio de Janeiro, 1991. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6869: Líquidos Isolantes Elétricos – Determinação da Rigidez Dielétrica (Eletrodos de Disco). Rio de Janeiro, 1989. 4 p.

BABU, M. K.; CHETTY, O. K. **A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining.** Wear 254, p. 763-773, 2003.

BAI, C.; KOO, C. **Effects of Kerosene or Distilled Water as Dielectric on Electrical Discharge Alloying of Superalloy Haynes 230 with Al-Mo Composite Electrode.** Surface and Coatings Technology 200, p. 4127-4135, 2006.

BAYER, A. M.; WALTON, L. R. **Wrought tool steels.** ASM Handbook Metals Park, vol 1, p. 757-779, 1990.

BENEDICT, G. F. **Nontraditional Manufacturing Processes**, New York, Marcel Dekker, pp.207-246, 1987.

BHATTACHARYYA, B.; DOLOI, B. N.; SORKHEL, S. K. **Experimental Investigations into Electrochemical Discharge Machining (ECDM) of Non-conductive Ceramic Materials.** Journal of Materials Processing Technology 95, p. 145-154, 1999.

BOMMELI, B. **Study of the Harmful Emanations Resulting from the Machining by electro-erosion.** Proceedings of the Seventh International Symposium on Electromachining (ISEM VII), P. 469-478, 1983.

BYRNE, G.; SCHOLTA, E. **Environmentally Clean Machining Process – A Strategic Approach.** Ann. CIRP 42, p. 471-474, 1993.

CHARMILLES TECHNOLOGIES S. A. EDM Applications - Charmilles Catalogue. Disponível em <<http://www.charmilles.com/>>. Acessado em: setembro de 2006.

CHEN, F. L; SIORES, E. **The Effect of Cutting Jet Variation on Striation Formation in Abrasive Water Jet Cutting.** Journal of Materials Processing Technology, p. 1479-1486, 2001.

CHEN, S. L; YAN, B. H.; HUANG, F. Y. **Influence of Kerosene and Distilled Water as Dielectric on the Electric Discharge Machining Characteristics of Ti-6Al-4V.** Journal of Materials Processing Technology, p. 107-111, 1999.

CHOW, HAN-MING; YAN, BIING-HWA; HUANG, FUANG-YUAN; HUNG, JUNG-CHERNG. **Study of Added Powder in Kerosene for the Micro-slit Machining of Titanium Alloy Using Electro-discharge Machining.** Journal of Materials Processing Technology, p. 95-103, 2000.

CRUZ, C., MALAQUIAS, E. S., FERNANDES, L. A. **Introdução à Usinagem Não Tradicional.** DEEME, UFU, Uberlândia-MG, 1999, p. 7-19.

DEWES, R., ASPINWALL, D., BURROWS, J., PAUL. M., EL-MENSHAWY, F. **High Speed Machining-Multi-Function/Hybrid Systems.** Proceedings of the Fourth International Conference on Industrial Tooling, Southampton, UK, 2001, pp. 91–100.

DÜNNEBACKE, G. **High Performance Electrical Discharge Machining Using a Water-Based Dielectric.** In: Proceedings of the 10th International Symposium for Electromachining (ISEM X), Magdeburg, Germany, 1992, pp. 170–182.

ERDEN, A.; TEMEL, D. **Investigation on the Use of Water as a Dielectric Liquid in Electric Discharge Machining.** Proceedings of the 22nd Machine Tool Design and Research Conference, Manchester, p. 437-440, 1981.

EVERTZ, S.; WOLFGANG, D.; EISENTRAEGER, A. **Electrical Discharge Machining: Occupational Hygienic Characterization Using Emission-bases Monitoring.** International Journal of Hygiene and Environmental Health, p. 423-434, 2006.

EVERTZ, S.; EISENTRAEGER, A.; DOTTI, W.; KLOCKE, F.; KARDEN, A.; ANTONOGLOU, G. **Environmental and Industrial Hygiene in Connection with Electrical Discharge Machining at High Discharge Energies.** Proceedings of the 13th International Symposium on Electromachining (ISEM XIII), vol. I, p. 193-210, 2001.

FERNANDES, A. L. **Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos Sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2**, 1999. 72 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

FINNIE, I. **Some Reflections on the Past and Future of Erosion**. Wear, pp. 1-10, 1995.

FIELD, M., KAHLES, J. F., KOSTER, W. P. **Surface Finish and Surface Integrity**. Metcut Research Associates Inc., Metals handbook – 9th Ed., Machining, Vol. 16, p. 19-36, 1989.

FULLER, J. E. 1989, **Electrical Discharge Machining**, *Metals Handbook*, 9^a Ed. Vol. 16, machining, p. 557-564.

FUJITA, T.; LIN, I. J. **Dielectric Fluid Preparation by Dispersing Ultrafine Barium Titanate Particles in Kerosene**. Powder Technology 68, p. 235-242, 1991.

FURATINI, K., SANETO, A., TAKEZAWA, H., MOHRI, N., MIYAKE, H. **Accretion of Titanium Carbide by Electrical Discharge Machining with Powder Suspended in Working Fluid**. Precision Engineering, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, V. 25, p. 138-144, 2001.

GUITRAL, E. BUD. **The EDM Handbook**. Hanser Gardner Publication, Cincinnati, 1997. 306 p.

GOH, C. L.; HO, S. F. **Contact Dermatitis from Dielectric Fluids in electrodischarge Machining**. Contact Dermatitis 28, p. 134-138, 1993.

HASHISH, M. **The Potential of an Ultrahigh Pressure Abrasive Waterjet Rock Drill**. Paper 32, 5th U. S. Water Jet Conference, Toronto, Canada, August, p. 321-332, 1989.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. **State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM).** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, p. 1287-1300, 2003.

HOYLE, G. **High Speed Steels.** London: Cuterworth & Co, 1988, 458 pp.

HUTCHINGS, I. M., WINTER, R. E., AND FIELD, J. E. **Solid Particle Erosion of Metals.** The Removal of Surface Material by Spherical Projectiles, Proceedings of the Royal Society, London, Vol. A348, pp. 379-392, 1976.

INTECH EDM. **A Guide to Understanding and Selecting EDM Dielectric Fluids.** Broadview, IL, 1996.

IVES, L. K., AND RUFF, A. W. Wear, Vol 46, 1978, pp. 149-162.

JESWANI, M. L. **Effect of the Addition of Graphite Powder to Kerosene Used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining.** Wear, Vol 70, p. 133-139, 1981.

JESWANI, M. L. **Electrical Discharge Machining in Distilled Water.** Wear, Vol 72, p. 81-88, 1981.

JILANI, S. T; PANKDY, P. C. **Experimental Investigations into the Performance of Water as Dielectric in EDM.** Int. J. Mach. Tool Des. Res. 24, p. 31-43, 1984.

JUNKAR, M.; JURISEVIC, B.; FAJDIGA, M.; GRAH, M. **Finite Element Analysis of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining.** International Journal of Impact Engineering, 32, p. 1095-1112, 2006.

KAMINSKI, P. C.; CAPUANO, M. N. **Usinagem de Micro-furos pelo Processo de Eletroerosão por Penetração.** Revista OESP Metal-Mecânica, Ano 4, nº. 25, OESP Mídia, São Paulo, p.p. 42-47, 1999.

KANSAL, H. K.; SINGH, S.; KUMAR, P. **Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining by Response Surface Methodology.** Journal of Materials Processing Technology 169, 427-436, 2005.

KARASAWA, T.; KUNIEDA, M. **EDM Capability with Poured Dielectric Fluids without a Tub.** Bull. Japan Soc. Precision Eng. 24, p. 217-218, 1990.

KLOCKE, F.; LUNG, D.; ANTONOGLOU, G.; THOMAIDIS, D. **The Effects of Powder Suspended Dielectrics on the Thermal Influenced Zone by Electrodischarge Machining with Small Discharge Energies.** Journal of Materials Processing Technology 149, p. 191-197, 2004.

KOKHANOVSAYA, T. S. **EDM Working Fluids.** Proceedings of the Seventh International Symposium on Electromachining (ISEM VII), p. 251-264, 1983.

KÖNIG & DAUW, D. F. **Estudo de um Sistema por Penetração em Meio Aquoso.** São Paulo, Revista Máquinas & Metais, Aranda Editora – Ano XXXIV, nº. 395, p. 20-27, 1998.

KÖNIG, W.; JÖRRES, L. **Aqueous Solutions of Organic Compounds as Dielectrics of EDM Sinking.** Ann. CIRP 36, p. 105-109, 1987.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; SPARRER, M. **EDM-sinking Using Water-based Dielectrics and Electropolishing - a New Manufacturing Sequence in Tool-making.** Proceedings of The 11th International Symposium on Electromachining (ISEM XI), Lausenne, Switzerland, p. 225-234, 1995.

KOZAK, JERZY; RAJURKAR, KAMLAKAR P. **Hybrid Machining Process Evaluation and Development.** University of Nebraska, Lincoln, U.S.A, 2001.

KOZAK, JERZY; OCZOS, KAZIMIERZ. **Selected Problems of Abrasive Hybrid Machining.** Journal of Materials Processing Technology, 2001.

KOSHY, P.; JAIN, V. K.; LAL, G. K. **Grinding of Cemented Carbide with Electrical Spark Assistance.** Journal of Materials Processing Technology 72, 61-68, 1997.

KRANZ, R., WENDL, F., WUPPER, K. **Influence of EDM Conditions on the Toughness of Tool Steels.** Thyssen Edelstahl Technische Berichte (1990) 100–105.

KRUTH, J., STEVENS, L., L. FROYEN, L., LAUWERS, B. **Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 44, Issue 1, 1995, Pages 169-172.

KURAFUJI, H.; SUDA, K. **Study on Electrical Discharge Machining.** Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol XXVIII, No 1, pg, 1-18, 1965.

KUTITA, T.; HATTORI, M. **A Study of EDM and ECM/ECM-lapping Complex Machining Technology.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, 2006.

LEÃO, F. N.; PASHBY, I. R. **A Review on the Use of Environmentally-friendly Dielectric Fluids in Electrical Discharge Machining.** Journal of Materials Processing Technology, p. 341-346, 2004.

LEE, H. T.; TAI, T. Y. **Relationship between EDM Parameters and Surface Crack Formation.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, p. 676-683, 2003.

LEE, S. H.; LI, X. P. **Study of the Machining Parameters on the Machining Characteristics in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, p. 344-358, 2001.

LEVY, G. N. **Environmentally Friendly and High Capacity Dielectric Regeneration for Wire EDM.** Ann. CIRP 42, p. 227-230, 1993.

LIMA, E. F. **Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 após Usinagem por Descargas Elétricas.** Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 1997, 97 p.

LIN, Y. C., YAN, B. H., HUANG, F. Y. **Surface modification of Al-Zn-Mg aluminum alloy using the combined process of EDM with USM.** Journal of Materials Processing Technology, Volume 115, Issue 3, 24 September 2001, Pages 359-366.

LONGRIDGE, C. C. **Hydraulic Mining.** Publ. Mining Journal, 1910.

MACGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining.** Chapman and Hall, London, 1989.

MAMALIS, A. G; VOSNIAKOS, G. C.; VAXEVANIDIS, N. M. **Journal of Mechanical Working Technology**, 15, Elsevier Science Publishers. Amsterdam Printed in the Netherlands, p. 335-347, 1987.

MASUZAWA, T. **Machining Characteristics of EDM using Water as Dielectric Fluid.** Proceedings of the 22nd Machining Tool Design and Research Conference. Manchester, p. 441-447, 1981.

MASUZAWA, T.; TANAKA, K.; NAKAMURA, Y. **Water-based dielectric Solution for EDM.** Ann. CIRP 32, p. 119-122, 1983.

MEDEIROS, J. T. N. **Aspectos Termodinâmicos do Processo de Usinagem por Eletroerosão**, VIII COBEM, S. J. Campos, SP, 1985.

MEDILYEGEDARA, T. K. K. R.; SILVA, A. K. M.; HARRISON, D. K.; MC GEOUGH, J. A. **An Intelligent Pulse Classification System for Electro-chemical Discharge Machining (ECDM) – A Preliminary Study.** Journal of Materials Processing Technology 149, p. 499-503, 2004.

MING, Y. Q., HE, L. Y. **Powder-suspension Dielectric Fluid for EDM.** Journal of Materials Processing Technology, Vol 52, p. 44-54, 1995.

MMS ONLINE. High-Precision Mold Shop Cuts EDM Machining Time By 40 Percent.

From the Editorial Staff of Modern Machine Shop. Disponível em: <www.mmsonline.com/articles>. Acesso em Janeiro de 2005.

MOHAN, B.; RAJUDURAI, A.; SATYANARAYANA, K. G. Effect of SiC and Rotation of Electrode on Electric Discharge Machining of Al-SiC Composite. Journal of Materials Processing Technology 124, p. 297-304, 2002.

MOHRI, N., SAITO, N., HIGASHI, M. A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Method., Toyota Technological Institute, Annals of the CIRP, Vol. 40, N° 1, p. 207-210, 1991.

MOUNTAIN, R. D. Ergodic Measures for the Simulation of Dielectric Properties of Water. Computer Physics Communications, 1991, p. 352-359.

MÜLLER, F.; MONAGHAN, J. Non-conventional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composite. Machine Tools and Manufacture, p. 1351-1366, 2000.

MUNOZ, A. A.; SHENG, P. An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Process. Process Technology 53, 736-758, 1995.

NARUMIYA, H.; MOHRI, N.; N. SAITO, N.; OOTAKE, H.; TSUNEKAWA, Y.; TAKAWASHI, T.; KOBAYASHI, K. EDM Powder Suspended Working Fluid. In: (1989), pp. 5-8.

OCZOS, K. E. Shaping of Technical Ceramics Materials. Publ. OWPRz, Rzeszow, 1996.

PAJAK, P. T.; SILVA, A. K. M.; HARRISON, D. K.; MCGEOUGH, J. A. Modeling the Aspects of Precision and Efficiency in Laser-assisted Jet Electrochemical Machining (LAJECM). Journal of Materials Processing Technology 149, p. 512-518, 2004.

PAJAK, P. T.; SILVA, A. K. M.; HARRISON, D. K.; MCGEOUGH, J. A. **Precision and Efficiency of Laser Assisted Jet Electrochemical Machining.** Precision Engineering, 2006.

PAUL, S.; HOOGSTRATE, A. M.; LUTTERVELT, C. A.; KALS, H. J. **Analytical and Experimental Modeling of the Abrasive Water Jet Cutting of Ductile Materials.** Journal of Materials Processing Technology, p. 189-199, 1998.

PAUL, S.; HOOGSTRATE, A. M.; LUTTERVELT, C. A.; KALS, H. J. **Energy Partitioning in Elasto-plastic Impact by Sharp Abrasive Particles in the Abrasive Water Jet Machining of Brittle Materials.** Journal of Materials Processing Technology, p. 200-205, 1998.

PREECE, C. M. **Erosion – A Treatise on Materials Science and Technology.** Academic Press, 1979, 450 p.

PUERTAS, I.; LUIS, C. J.; VILLA, G. **Spacing Roughness Parameters Study on the EDM of Silicon Carbide.** Journal of Materials Processing Technology 164, p. 1590-1596, 2005.

QU, J.; SHIH, A. J.; SCATTERGOOD, R. O.; LUO, J. **Abrasive Micro-blasting to Improve Surface Integrity of Electrical Discharge Machined WC-Co Composite.** Journal of Materials Processing Technology 166, p. 440-448, 2005.

RAJURKAR, K. P.; ZHU, D.; MCGEOUGH, J. A.; KOZAK, J.; DE SILVA, A. **New Developments in electro-Chemical Machining.** Annals of the CIRP, vol. 48/2, p. 569-579, 1999.

RAMACHANDRAN, N.; RAMAKRISHNAN, N. **A Review of Abrasive Jet Machining.** Journal of Materials Processing Technology, pp. 21-31, 1993.

RAMOS, C. A. D; CRUZ, C. **Estudo do Desempenho do Processo de Retificação Eletroquímica na Usinagem do Aço Rápido ABNT M2**, Uberlândia, UFU, IV POSMEC (Anais), p. 207-212, 2000.

RAMULU, M. **Dynamic Photoelastic Investigation on the Mechanics of Waterjet and Abrasive Waterjet Machining**. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 19, 43-65, 1993.

RAN, X. C.; LUI, F.; CAO, H. J. **A Decision Making Framework Model of Cutting Fluid Selection for Green Manufacturing and a Case Study**. Process Technology 129, p. 474-474, 2002.

ROBERTS, G. A.; CARY, R. A. **Tool Steels**. Metals Park, ASM, 4 ed., p. 627-772, 1980.

RODRIGUES, J. R. P. **Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas do Aço-rápido ABNT M2**, 1999. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

SCHUMACHER, B. M. **After 60 Years of EDM the Discharge Process Remains Still Disputed**. Journal of Materials Processing Technology 149, p. 376-381, 2004.

SHEU, DONG-YEA. **Multi-spherical Probe Machining by EDM Combining WEDG Technology with One-pulse Electro-discharge**. Journal of Materials Processing Technology 149, p. 597-603, 2004.

SIMON, A. T. **VIII Inventário Máquinas e Metais de Máquinas-Ferramentas**. Revista Máquinas e Metais, n° 479, p. 32-51, 2005.

SUMMERS, A. DAVID. **Waterjetting Technology**. Chapman and Hall, 1995, 882 p.

THOE, T. B., ASPINWALL, D. K., KILLEY, N. **Combined Ultrasonic and Electrical Discharge Machining of Ceramic Coated Nickel Alloy.** Journal of Materials Processing Technology, p. 323-328, 1999.

THOE, T. B., ASPINWALL, D. K., WISE, M. L. H., OXLEY, I. A. **Polycrystalline Diamond Edge Quality and Surface Integrity Following Electrical Discharge Grinding.** Journal of Materials Processing Technology, Volume 56, Issues 1-4, January 1996, Pages 773-785.

TUERSLEY, I. P.; JAWAID, A.; PASHBY, I. R. **Review: Various Methods of Machining Advanced Ceramic Materials.** Journal of Materials Processing Technology, 1993.

VENKATESH, V. C.; GOH, T. N.; WONG, K. N.; LIM, M. J. **An Empirical Study of Parameters in Abrasive Jet Machining.** Tools Manufacturers, Vol. 24, 1989.

YAN, B. H.; TSAI, H. C.; HUANG, F. Y. **The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solution in Water on Modifying the Surface of Titanium.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, p. 194-200, 2005.

YANG, C. T.; SONG, S. L.; YAN, B. H.; HUANG, F. Y. **Improving Machining Performance of Wire Electrochemical Discharge Machining by Adding SiC Abrasive to Electrolyte.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, 2006.

YEO, S. H.; TAN, H. C. **Assessment of Waste Streams in Electric-discharge Machining for Environmental Impact Analysis.** Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf. 212, p. 393-401, 1998.

YIH-FONG, T.; FU-GHEN, C. **Investigation into some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-suspension Dielectric Oil.** Journal of Materials Processing Technology 170, p. 385-391, 2005.

WAKUDA, M.; YAMAUCHI, Y.; KANZAKI, S. **Material Response to Particle during Abrasive Jet Machining of Alumina Ceramics.** Journal of Materials Processing Technology, p. 177-183, 2003.

WANG, KESHENG; GELGELE, HIRPA; WANG, YI; YUAN, QINGFENG; FANG, MINGLUNG. **A Hybrid Intelligent Method for Modeling the EDM Process.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, p. 995-999, 2003.

WANG, Z. Y.; RAJURKAR, K. P.; FAN, J.; LEI, S.; SHIN, Y. C.; PETRESCU, G. **Hybrid Machining of Inconel 718.** Journal of Materials Processing Technology 43, p. 1391-1396, 2003.

WANSHENG, Z.; YONGHUI, H.; LIMING, G.; JUNCHUN, L. **A Measuring and Evaluating System of the Utilization Ration of Electrical Energy in EDM.** Proceedings of the 11th International Symposium on Electromachining (ISEM XI), Lausanne, Switzerland, p. 253-259, 1995.

WANSHENG, Z.; ZHENLONG, WANG; SHICHUN, D.; GUANXIN, C.; HONGYU, W. **Ultrasonic and Electric Discharge Machining to Deep and Small Hole on Titanium Alloy.** Journal of Materials Processing Technology. p. 101-106, 2002.

WELLER, E. J. **Nontraditional Manufacturing Processes.** Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, p. 162-201, 1984.

WILSON, R. **Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels.** London, McGraw-Hill, p. 163-181, 1975.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; LEE, L. C. **Effects of Flushing on Electro-Discharge Machining Surfaces.** Journal of Materials Processing Technology, Vol 48, p. 299-305, 1995.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; RAHUMAN, I.; TEE, W. M. **Near-mirror-finish Phenomenon in EDM Using Powder-mixed Dielectric.** Journal of Materials Processing Technology, Vol 79, p. 30-40, 1998.

WÜTHRICH, R.; FASCIO, V. **Machining of Non-conducting Materials Using Electrochemical Discharge Phenomenon – An Overview.** International Journal of Machine, Tools and Manufacture 45, p. 1095-1108, 2005.

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, Vol 129, p. 30-33, 2002.