

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO E RESFRIAMENTO USANDO MISTURA DE ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO E CO₂ SÓLIDO NO FRESAMENTO DA LIGA Ti-6Al-4V

Nelson Wilson Paschoalinoto

Instituto Mauá de Tecnologia. Escola de Engenharia Mauá (IMT). Pça Mauá 01 - Bairro Mauá - São Caetano do Sul - SP
nelson.paschoalinoto@maua.br

Jorge Antonio Giles Ferrer

Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica (SENAI-SP). Rua Santo André, 680 - Boa Vista São Caetano do Sul - SP
jorge.ferrer@sp.senai.br

Gilmar Ferreira Batalha

Universidade de São Paulo (USP). Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo - SP
gilmar.batalha@poli.usp.br

Gleicy de Lima Xavier Ribeiro

Instituto SENAI de Inovação em Manufatura Avançada e Microfabricação (SENAI-SP). Rua Bento Branco de Andrade Filho, 379 - Santo Amaro, São Paulo - SP
gleicy.ribeiro@sp.senai.br

Resumo: A proposta deste trabalho é apresentar uma abordagem de lubrificação e resfriamento utilizando uma mistura de Alcool Etílico Hidratado e CO₂ sólido no fresamento da liga Ti-6Al-4V. O titânio e suas ligas são utilizados em aplicações que requerem alta resistência mecânica e baixa densidade. Possuem ainda a capacidade de interação com sistemas biológicos propiciando menores taxas de rejeição, sendo usados em próteses ortopédicas e implantes. No entanto, estes materiais possuem baixa condutividade térmica, tornando difíceis os processos de remoção de cavaco. A liga Ti-6Al-4V se destaca em aplicações aeroespaciais e na indústria automotiva e por esse motivo muitas tratativas estão sendo estudadas para melhorar a eficiência da usinagem. Busca-se uma maior durabilidade dos insertos de corte com a minimização dos desgastes, promovendo um melhor acabamento superficial das peças usinadas. Uma das frentes de trabalho propostas por pesquisadores propõe mudanças nas condições de lubrificação e refrigeração. Neste estudo o CO₂ sólido foi misturado ao Alcool Etílico hidratado por meio de um dispositivo usado na técnica de mínima quantidade de lubrificação. Os ensaios de fresamento da liga Ti-6Al-4V seguiram um planejamento fatorial 2³ com dois pontos centrais e uma réplica. As variáveis v_c , f e a_p foram locadas como independentes e a rugosidade S_a como variável dependente do planejamento experimental. As forças de usinagem foram medidas por um dinamômetro de mesa e a micro dureza e a deformação microestrutural a partir da superfície fresada foi avaliada. Os desgastes dos insertos de corte foram medidos e análises de espectroscopia de raios X por dispersão de energia foram realizadas. A superfície resultante do processo de fresamento foi avaliada por meio de um microscópio eletrônico de varredura. Notou-se que o avanço e a profundidade de usinagem influenciaram as forças de usinagem e a rugosidade. Descamação do revestimento e adesão foram observados no inserto de corte. A abordagem proposta se mostrou uma alternativa técnica e economicamente viável para o fresamento deste tipo de liga muito utilizada atualmente.

Palavras-chave: Ti-6Al-4V; Fresamento; Alcool Etílico Hidratado, CO₂ sólido, MQL.

1. INTRODUÇÃO

O tema da sustentabilidade é fundamental para ser incorporado nos processos de usinagem. Os métodos tradicionais de refrigeração e lubrificação precisam ser revistos sob este olhar. Segundo Scholta (1993), quase 16% dos custos totais de fabricação correspondem ao fluido de corte e quando se trata da usinagem de materiais duros, este valor pode atingir de 20 a 30%. Shokrani et al. (2012) são pioneiros sobre usinagem sustentável. A maioria dos fluidos de corte são não biodegradáveis e contém diversos componentes, que podem causar riscos ambientais e inclusive de saúde. Além de bactérias perigosas podem crescer no fluido, é conhecido que o óleo mineral usado é cancerígeno e pode causar câncer de pele. Os aditivos clorados e sulfurizados também estão presentes nos fluidos de corte, sendo que as partículas vaporizadas de tais fluidos podem ser inaladas pelos trabalhadores e causar dano severo a saúde, além do odor desconfortável que eles desprendem.

Zhang et al. (2012) afirmaram que, a técnica de Quantidade Mínima de Lubrificação (MQL) responde favoravelmente as preocupações ambientais no setor de usinagem, porém a baixa capacidade de refrigeração do ar é uma limitação desta técnica. Um estudo foi executado usando a técnica MQCL (Mínimo Quantidade de Refrigeração e Lubrificação) na usinagem a seco, usando óleo vegetal biodegradável, nesse estudo foi obtido um aumento da vida útil da ferramenta em torno de 1,57 vezes. A técnica MQCL também possibilitou a geração de forças de corte mais baixas devido ao melhor resfriamento e lubrificação. Venugopal et al. (2007) estudaram o efeito do resfriamento criogênico sobre a evolução do desgaste de ferramentas de metal duro não revestidas ao usinar a liga de titânio Ti-6Al-4V. A importância deste estudo é relevante devido ao aumento do uso de ligas de titânio em várias aplicações tais como biomedicina, engenharia e outras áreas. Os resultados do estudo mostraram que os mecanismos do desgaste detectados foram significativamente reduzidos sob o efeito de resfriamento criogênico. Tunc et al. (2016) abordaram experimentalmente os efeitos da aplicação do MQL na superfície usinada no fresamento robótico de aço inoxidável austenítico AISI316L. A integridade da superfície foi avaliada em termos de tensão residual superficial e rugosidade da superfície mediante metalografia óptica, onde a influência dos ajustes da aplicação da técnica MQL sobre a vida útil da ferramenta também foram investigadas. Os resultados mostraram que a rugosidade da superfície não é afetada pelas ajustes na aplicação do MQL. Contudo, as tensões residuais da superfície podem ser diminuídas pelo fluxo de óleo MQL bem controlado. O fluxo de óleo afetou significativamente o estresse residual superficial, enquanto o fluxo de ar não teve efeito significativo. As condições da ferramenta, como o desgaste de flanco e a zona afetada pelo calor, são significativamente afetadas pelas configurações do sistema MQL. O parâmetro mais significativo foi o ciclo de trabalho, que controla o fluxo de óleo. Observou-se um número crescente de ciclos por minuto, o que aumenta a taxa de fluxo do óleo e diminui a largura da zona afetada da temperatura na superfície de saída da ferramenta de corte. Isto pode ser associado com o efeito da barreira térmica do filme engrossado do óleo, de modo que a transferência térmica na superfície de saída diminui e aumenta a quantidade de calor na peça de trabalho.

Krishnamurthy et al. (2017) propuseram a utilização de refrigeração criogênica e uma mistura de etanol com refrigeração úmida na usinagem de Ti-6Al-4V. Tinham como preceito reduzir o desgaste por difusão-adesão e reduzir a flutuação das forças de corte causadas pela formação do cavaco segmentado que, segundo os autores, leva a vibração e ao desgaste de flanco severo. O resfriamento criogênico reduziu em 25% as forças de corte quando comparado com a usinagem sem lubrificação. Essa redução foi atribuída pela diminuição da energia de fratura conseguida pelos cavacos frágeis e curtos durante a usinagem criogênica. A mistura de etanol com refrigeração por inundação propiciou uma redução de 65% nas forças de corte e eliminou o desgaste de ferramenta por adesão por meio da absorção de carbono da ferramenta de corte para grupos OH do etanol.

O objetivo deste trabalho foi estudar e utilizar a abordagem MQL com a interface de Álcool Etilíco Hidratado + CO₂ sólido no fresamento da liga Ti-6Al-4V e, mapear os esforços de usinagem para uma comparação futura com a usinagem sem lubrificação.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste estudo contemplou o fresamento e posterior medições das variáveis dependentes. Os ensaios de usinagem seguiram o planejamento fatorial completo de três fatores e dois níveis com a adição de dois pontos centrais. Para os ensaios utilizou-se o centro de usinagem ROMI D560.

Para a lubrificação e resfriamento com a mistura de Álcool Etilíco hidratado (98,8 INPM) com o CO₂ sólido utilizou-se um dispositivo MQL desenvolvido. O CO₂ sólido foi triturado e inserido no interior do dispositivo MQL e em um reservatório adicional com o intuito de se manter a temperatura. No êmbolo central do dispositivo MQL a pressão do ar comprimido foi estabelecida em 6 bar. A Figura 1a ilustra o CO₂ sólido triturado. A Figura 1b mostra a colocação do álcool etílico no reservatório e a Fig. 1c mostra visualização do dispositivo MQL montado no cabeçote da máquina.

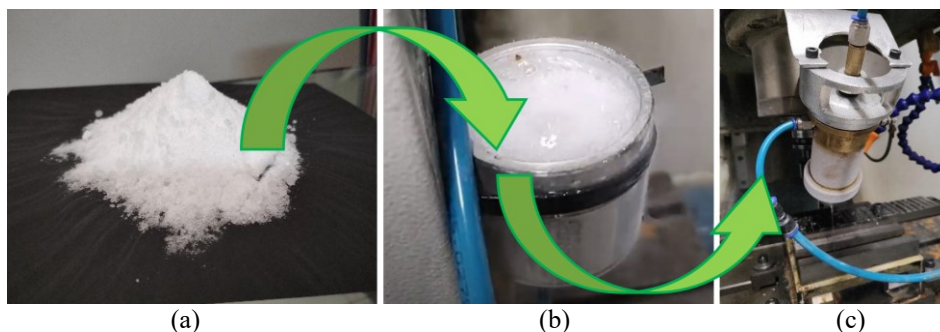


Figura 1. Abordagem MQL com Álcool Etilíco Hidratado e CO₂ sólido triturado. (a) CO₂ sólido triturado. (b) Colocação de álcool etílico no reservatório superior. (c) Visualização do dispositivo atuando (Dados dos autores, 2022)

Adotou-se o procedimento de utilizar uma pastilha sem desgaste para cada ensaio do planejamento fatorial. Um inserto de corte foi reservado com o intuito de desbastar o corpo de prova antes do início do planejamento propriamente dito.

Utilizou-se então dois suportes para isso. Um deles montado com uma pastilha só utilizada no desbaste e outro suporte instrumentado para fazer as medições das forças de usinagem. A Tabela 1 indica o planejamento fatorial usado na execução do experimento. Os dados de v_c , foram recomendados pelo fabricante dos insertos e o comprimento usinado por corpo de prova foi de 25mm. A réplica é representada pela letra R.

Tabela 1. Planejamento fatorial seguido para a usinagem (Dados do autores, 2022)

Testes	v_c (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
1	80	0,06	0,5
2	100	0,06	0,5
3	80	0,1	0,5
4	100	0,1	0,5
5	80	0,06	1,0
6	100	0,06	1,0
7	80	0,1	1,0
8	100	0,1	1,0
9	90	0,08	0,75
10 R	90	0,08	0,75
11 R	80	0,06	0,5
12 R	100	0,06	0,5
13 R	80	0,1	0,5
14 R	100	0,1	0,5
15 R	80	0,06	1,0
16 R	100	0,06	1,0
17 R	80	0,1	1,0
18 R	100	0,1	1,0
19 R	90	0,08	0,75
20 R	90	0,08	0,75

As configurações utilizadas para os ensaios de usinagem estão listadas:

I – Condições Fixas:

- Geometria do corpo de prova.
- Material do corpo de prova: liga Ti-6Al-4V Grau 5.
- Dureza do corpo de prova: 32,4 HRC.
- Geometria do inserto: utilizou-se um inserto de diâmetro 10mm do Tipo S. Sua nomenclatura é dada por: BDMT 11 03 02 ER-JS (CVD) - CA6535 (TiCN+Al₂O₃+TiN).

A Figura 2a e 2b ilustra a geometria do inserto de corte e a Fig.2c ilustra a montagem no inserto no suporte. A Tab. 2 mostra os valores dos parâmetros.

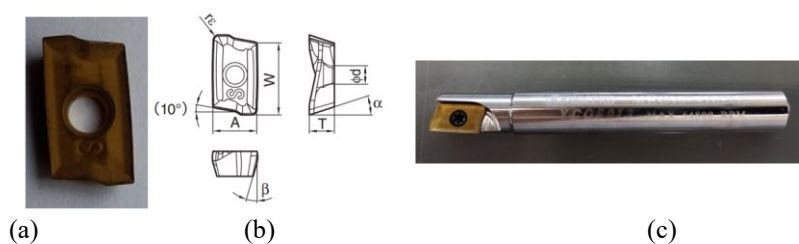


Figura 2. (a) Geometria do inserto. (b) Desenho do inserto. (c) Exemplo de montagem do inserto e suporte MEC10-S10-11 utilizado

((a e c) Dados dos autores. (b) KYOCERA Componentes industriais LTDA)

Tabela. 2. Informações do inserto de corte (KYOCERA, 2022)

Parâmetros	Valores
A	6,3 mm
T	3,0 mm
Ød	2,8 mm
W	11,0 mm
re	0,2 mm
α	18°
β	15°

II – Variáveis Independentes:

- a) Velocidade de corte (v_c): 80/ 90/ 100 m/min.
- b) Avanço (f): 0,06/ 0,08/ 0,10 mm/volta.
- c) Profundidade de usinagem (a_p): 0,5/ 0,75/ 1,0 mm.

III – Variáveis Dependentes:

- a) Rugosidade.
- b) Forças de usinagem: força na direção x, força na direção y, força na direção z e torque.

Para a usinagem foi utilizada 1 barra de titânio liga Ti-6Al-4V (Grau 5), com dimensões de 500 mm x 50 mm x 17mm, apresentando uma dureza média de 32,4 HRC. A Figura 3 mostra alguns testes já executados. A condição inicial do corpo de prova foi verificada. A composição química do material utilizado no presente trabalho está listada na Tab. 3.



Figura 3. (a) . Corpo de prova (Ti-6Al-4V) com ensaios executados.
(Dados do autor, 2022)

Tab. 3. Composição química do material utilizado neste trabalho (Viner Brasil Tecnologia Ltda, 2016)

Elemento	Ti	Al	V	Fe	H	N	O	C	Y
Percentual (%)	Bal	6,49-6,56	4,03-4,14	0,16-0,19	0,002-0,003	0,003-0,004	0,192-0,196	0,024-0,028	<0,001

2.1 Medições

Para obtenção dos dados de força utilizou-se um dinamômetro de mesa possibilitando medir as forças nas coordenadas x (F_x), y (F_y) e z (F_z) e o torque (M_z). Após a usinagem e o registro dos dados das forças, foram efetuadas medições de rugosidade, microdureza e desgaste dos insertos. O desgaste dos insertos de corte foi medido no decorrer dos ensaios. Para a aquisição dos sinais foi utilizado o módulo de aquisição de dados universais e amplificador de sinais Quantum MX840B. Com este equipamento e com o software de aquisição de dados “CATMAN” da mesma empresa, foi possível controlar e visualizar os dados medidos. Adotou-se por configuração uma frequência para aquisição dos dados de 100 kHz. A Figura 4a mostra o dinamômetro utilizado e a Fig. 4b mostra o módulo Quantum MX840B.

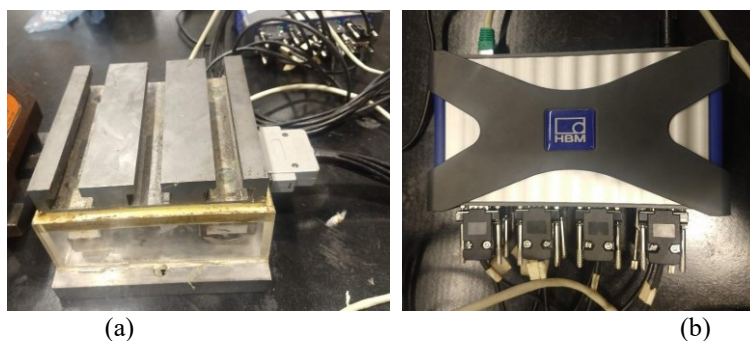


Figura 4. (a) Dinamômetro de mesa. (b) Condicionador de Sinais Quantum MX840B empresa HBM
(Dados dos autores, 2022).

Para as medições de rugosidade superficial utilizou-se o interferômetro de luz branca Talysurf CCI Lite da empresa Taylor Hobson com o software TalyMap Gold 6.2. As medições foram efetuadas com um *cut-off* de 0,8mm em uma área de 4,3 mm² na direção paralela ao fresamento. A tomada dos dados foi realizada no centro da barra.

Para a medida das durezas HRC do material bruto foi utilizado o durômetro Wizhard HR500 da Mitutoyo (Fig. 5a). Com o intuito de verificar possíveis mudanças microestruturais decorrentes da usinagem, escolheu-se avaliar a condição mais crítica de parâmetros de corte (Ensaio 8). As amostras foram submetidas às medições de micro dureza a partir da superfície com espaçamento de 0,1mm. O microdurômetro utilizado foi o HM-100 da empresa Mitutoyo. Mediu-se primeiramente a superfície no estado não usinado. A maior e menor medida encontrada foram utilizadas como intervalo de referência e a média foi extraída. Posteriormente mediu-se a micro dureza a partir da superfície espaçadas em 0,1 mm

até 1,5mm. A Figura 5b mostra o microdurômetro utilizado. Para a verificação da existência de desgaste nos corpos de prova após a usinagem contou-se com o microscópio S6D da empresa Leica (Fig. 5c) e de um microscópio eletrônico de varredura da empresa TESCAN (Fig. 5d). Para a análise do desgaste $VB_{\max}$ dos insertos de corte foram realizadas medições considerando o limite de 0,2mm. A norma ABNT NBR ISO 3685 foi utilizada como referência. Um inserto utilizado no ensaio mais crítico de cada estratégia, escolhido aleatoriamente foi observado no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os insertos observados possuem o mesmo tempo de vida e mesmas condições de corte. O microscópio eletrônico de varredura foi utilizado para visualizar os desgastes e para realizar comparações entre as estratégias de corte efetuadas. Análises por Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) foram realizadas para verificar a distribuição dos elementos químicos nos insertos de corte para cada abordagem utilizada na usinagem e também no inserto novo para fins de comparação.

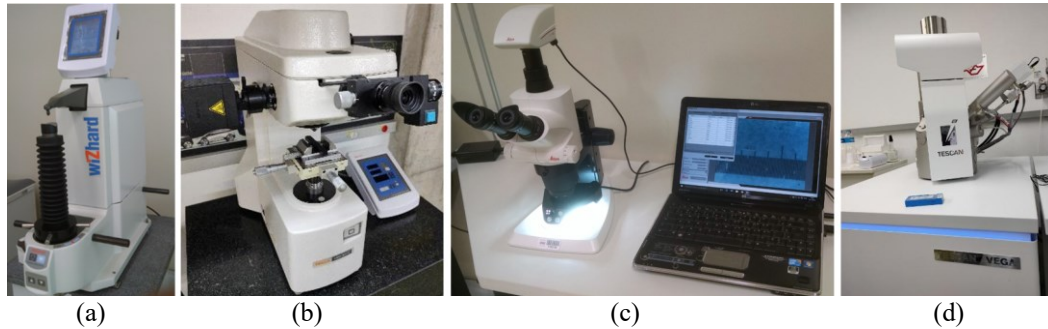


Figura 5. (a) Durômetro Wizhard HR500 – Mitutoyo. (b) Procedimento para medições de micro dureza (HV). (c) Microscópio S6D – Leica (calibração). (d) Microscópio eletrônico de varredura – TESCAN (Dados dos autores, 2022)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Planejamento fatorial

O resultado do planejamento experimental é mostrado na Tab. 4.

Tabela 4. Planejamento fatorial dos ensaios com a utilização de Álcool Etílico + CO₂ Sólido. (Dados dos autores, 2022)

Álcool + CO ₂	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_z (Nm)	S_a
1	80	0,06	0,5	52,79	205,20	66,24	0,26	0,23
2	100	0,06	0,5	60,42	232,50	87,73	0,30	0,21
3	80	0,1	0,5	80,40	314,25	119,35	0,40	0,24
4	100	0,1	0,5	67,59	319,50	112,03	0,34	0,24
5	80	0,06	1,0	107,93	358,50	152,09	0,54	0,26
6	100	0,06	1,0	138,32	461,25	178,29	0,69	0,24
7	80	0,1	1,0	147,58	457,80	185,78	0,74	0,29
8	100	0,1	1,0	123,62	405,60	176,14	0,62	0,33
9	90	0,08	0,75	108,05	345,00	149,52	0,54	0,25
10	90	0,08	0,75	111,24	348,15	153,28	0,56	0,29
11	80	0,06	0,5	74,78	107,4	79,98	0,37	0,25
12	100	0,06	0,5	54,62	91,8	74,33	0,27	0,22
13	80	0,1	0,5	134,84	152,4	121,54	0,67	0,31
14	100	0,1	0,5	90,94	153,9	73,66	0,45	0,32
15	80	0,06	1,0	77,04	233,7	89,25	0,39	0,27
16	100	0,06	1,0	108,88	304,2	124,18	0,54	0,33
17	80	0,1	1,0	119,9	381,3	154,6	0,60	0,50
18	100	0,1	1,0	136,42	457,5	176,23	0,68	0,46
19	90	0,08	0,75	102,84	287,7	116,02	0,51	0,29
20	90	0,08	0,75	111,74	315,3	129,36	0,56	0,35

Baseando-se nos gráficos de Pareto ilustrados na Fig. 6 observou-se que a profundidade de usinagem e o avanço influenciaram as forças de corte e o torque. O parâmetro de rugosidade também foi influenciado pelo avanço e pela profundidade de usinagem. Analisando as superfícies de respostas obtidas pelo planejamento fatorial do ensaio com álcool etílico hidratado e CO₂ ilustrada na Fig. 7 percebe-se que os valores mínimos de forças de usinagem e torque ocorrem com menores avanços e menores profundidades de corte. Os menores valores de S_a também ocorrem com menores avanços e profundidades de penetração. A Tabela 5 mostra as equações de predição pela metodologia DOE empregada.

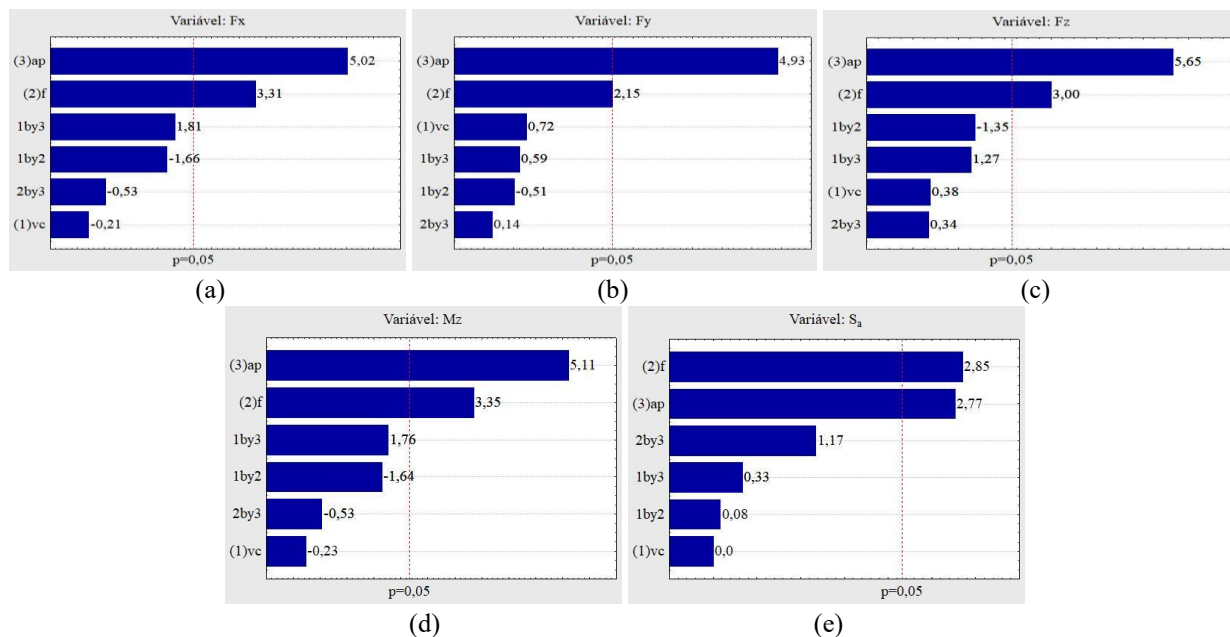


Figura 6. Gráficos de Pareto para a estratégia utilizando Álcool Etilico + CO₂ Sólido (a) F_x . (b) F_y . (c) F_z . (d) M_z . (e) S_a (Dados dos autores, 2022).

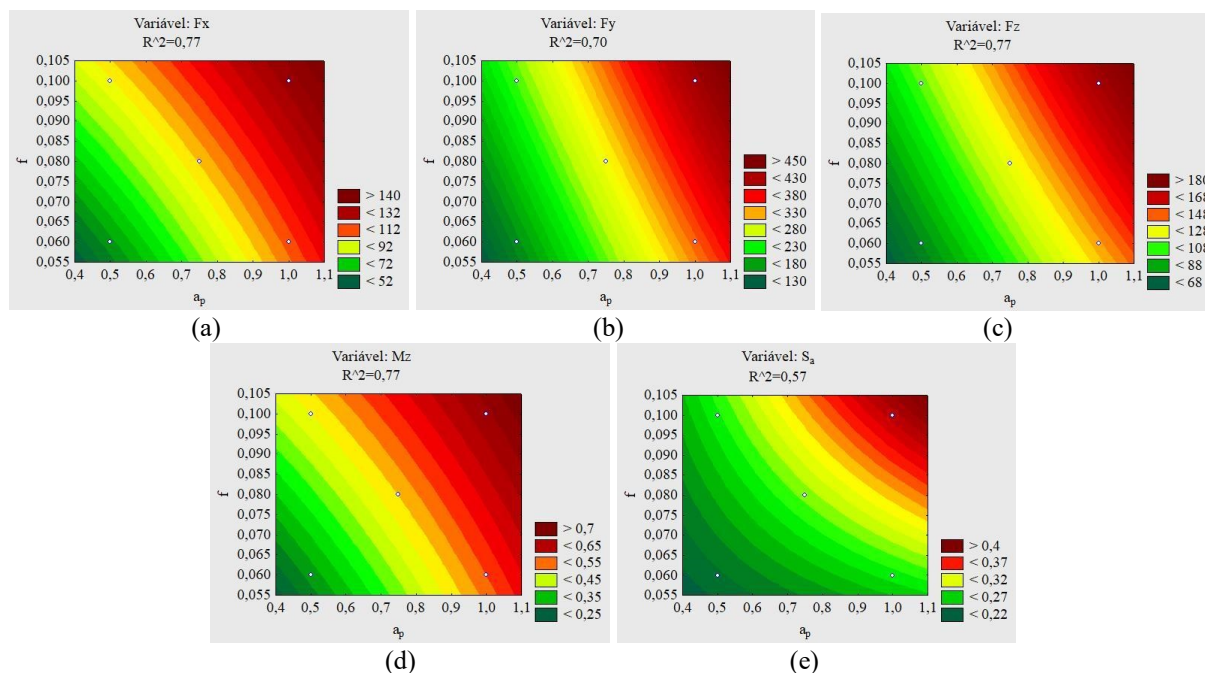


Figura 7. Superfícies de resposta para a estratégia utilizando Álcool Etilico + CO₂ Sólido. (a) F_x (a_p x f). (b) F_y (a_p x f). (c) F_z (a_p x f). (d) M_z (a_p x f). (e) S_a (a_p x f) (Dados dos autores, 2022)

Tab. 5. Funções estatísticas para a predição das variáveis dependentes – Função matemática.

Álcool + CO ₂	Função matemática
F_x	$= -194,35 + 1,77*vc + 2533,56*f - 23,06*vc*f + 0,34*a_p*vc + 111,5*a_p*f + 63,66$
F_y	$= -335,23 + 2,64*vc + 5423,44*f - 32,72*vc*f + 1,07*a_p*vc - 746,25*a_p*f + 208,35$
F_z	$= -137,07 + 1,02*vc + 1844,72*f - 10,83*vc*f + 0,009*a_p*vc - 142,87*a_p*f + 116,85$
M_z	$= -0,97 + 0,009*x + 12,5*f - 0,11*vc*f + 0,001*a_p*vc + 0,50*a_p*f + 0,34$
S_a	$= 0,39 - 0,002*vc - 1,06*f + 0,006*vc*f + 0,002*a_p*vc + 3,5*a_p*f - 0,22$

Fonte: Dados do Autor.

3.2 Superfície usinada

Na superfície usinada as marcas de avanço são nítidas. Marcas de avanço e adesão de cavacos foram observados. A Figura 8 mostra ampliações da superfície. Em todas as amostras deste estudo foram percebidos adesões de cavacos. A

adesão de cavacos ocorre porque o atrito da interface cavaco-ferramenta aumenta facilitando para os cavacos se soldarem à superfície usinada no ambiente alternado de aquecimento e resfriamento (AN et al., 2020).

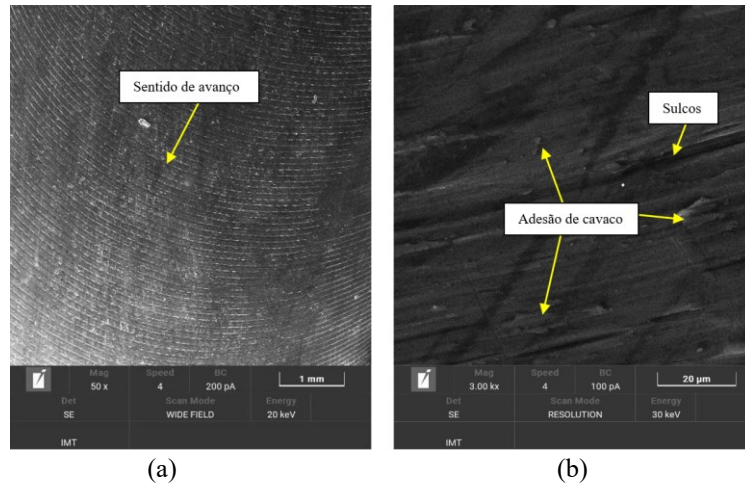


Figura 8. Superfície usinada. (a) Aumento de 50x. (b) Aumento de 3000x. (Dados dos autores, 2022)

A Figura 9a mostra uma das medições de deformação microestrutural a partir da superfície usinada. Tomou-se parâmetro a análise da superfície lateral paralela ao sentido de corte, representada por uma seta. A média de deformação para a estratégia sem o uso de lubrificante foi de $11,21 \pm 2,00 \mu\text{m}$. A Figura 9b mostra os resultados de medições de micro dureza a partir da superfície usinada. Nota-se a tendência de aumento de dureza com o aumento da distância da superfície usinada. A microestrutura induzida por usinagem, particularmente a espessura da camada deformada e refinamento de grãos, é de grande interesse para pesquisadores quando investigam integridade após a usinagem. Durante as operações de usinagem, os efeitos térmicos e mecânicos são as principais razões para qualquer transformação de fase observada e alterações microestruturais na superfície e subsuperfície dos materiais (SUN, 2020). Percebeu-se uma camada deformada visível a partir da superfície. As medições compreenderam uma varredura pela amostra e os resultados médios entre 10 medições são mostrados na Tab. 6. A maioria dos valores de microdureza se encontram distribuídos dentro do intervalo de micro dureza medidos antes da usinagem (295HV – 397HV). O valor médio das medições é de 355,4HV. Nota-se que com as medições efetuadas a cada 0,1 mm de distância a tendência de endurecimento ou diminuição de dureza são mínimas. Pode-se concluir que o efeito da estratégia de lubrificação/ resfriamento neste estudo não propiciaram mudanças de microdurezadureza significativas dentro do interval medido, embora apresentou-se uma tendência de amolecimento do material com o aumento da distância fresada a partir da superfície usinada.

Tabela 6. Estatística descritiva – Deformação subsuperficial (Dados dos autores).

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Álcool + CO ₂	11,21	8,49	15,13	2,00

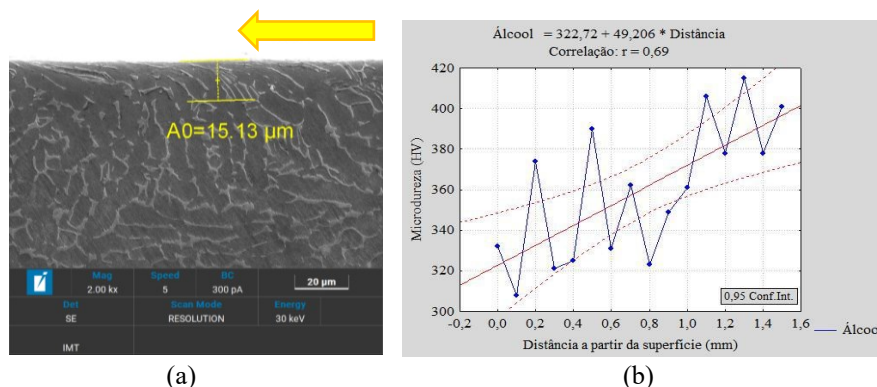


Figura 9. (a) Deformação na superfície usinada. (b) Medições de dureza (HV) (Dados dos autores, 2022)

3.3 Rugosidade

A Figura 10 mostra as superfícies isométricas e mapas de contorno dos testes com a utilização de álcool etílico hidratado + CO₂. O parâmetro S_{sk} , positivo indica a prevalência de picos. O parâmetro S_q aumentou em 48% para a condição mais crítica quando comparado com a condição menos crítica de corte. O parâmetro S_{ku} positivo indica que os

picos da superfície usinada são agudos. Para o parâmetro rugosidade, os principais fatores que a influenciam são o avanço, a velocidade de corte, a profundidade de usinagem, as vibrações das ferramentas de corte, condições do lubrificante e especificações da ferramenta (JAMES, ANNAMALAI, 2018). Neste estudo foi constatado que o avanço e profundidade de usinagem foram as variáveis que mais influenciaram a rugosidade. A Tabela 7 mostra os dados de rugosidade com os valores de ensaios menos e mais críticos. A Tabela 8 mostra a estatística descritiva para todos os dados de rugosidade levantados. Com relação ao parâmetro S_{sk} o estudo demonstrou que a prevalência de picos foi encontrada utilizando Álcool + CO₂.

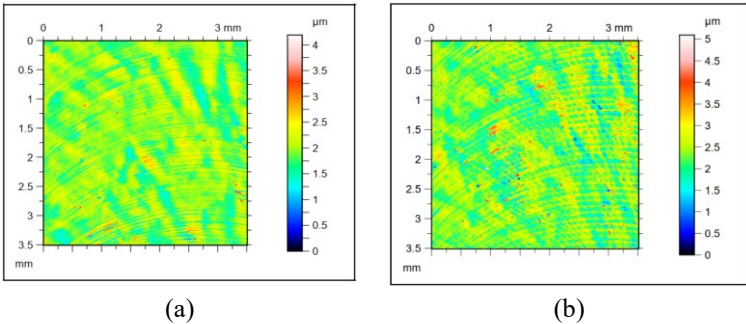


Figura 10. Topografia da superfície usinada - Estratégia utilizando álcool etílico hidratado. (a) $vc=80\text{m/min}$ / $ap=0,5\text{ mm}$ / $f = 0,06\text{mm/rev}$ ($S_q=0,29$; $S_{sk}=0,21$; $S_{ku}=4,38$). (b) $vc=100\text{m/min}$ / $ap=1,0\text{ mm}$ / $f = 0,1\text{ mm/rev}$ ($S_q=0,43$; $S_{sk}=0,30$; $S_{ku}=4,45$) (Dados dos autores, 2022)

Tabela 7. Estatística descritiva – parâmetros de rugosidade para a mínima e máxima condição de corte (Dados dos autores, 2022)

Álcool + CO ₂	vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	S _q (μm)	S _{sk} (μm)	S _{ku} (μm)	S _p (μm)	S _v (μm)	S _z (μm)	S _a (μm)
Ensaio 1	80	0,06	0,5	0,29	0,21	4,38	2,24	1,95	4,19	0,23
Ensaio 8	100	0,1	1,0	0,43	0,30	4,45	2,76	2,33	5,09	0,33

Tab. 8. Estatística descritiva – rugosidade S_a (Dados dos autores, 2022)

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
Álcool + CO ₂	0,29	0,21	0,50	0,07

3.4 Desgaste do inserto de corte

A utilização de Álcool Etilíco + CO₂ Sólido como lubrificante e refrigerante proporcionou a ocorrência de desgastes de flanco, abrasão e adesão. Nota-se também a remoção do material do inserto em alguns pontos (Fig. 11). A análise por EDS demonstrou a presença e distribuição dos elementos Alumínio, Titânio, Nitrogênio, Carbono e Vanádio visualizados na Fig.12. As ferramentas de fresamento são submetidas a condições severas de carga causando diferentes mecanismos de desgaste. Entre outros, o mecanismo dominante de desgaste da ferramenta depende da combinação do material da peça e do material da ferramenta, parâmetros de corte e o modo de operação (KALTENBRUNNER et al., 2022).

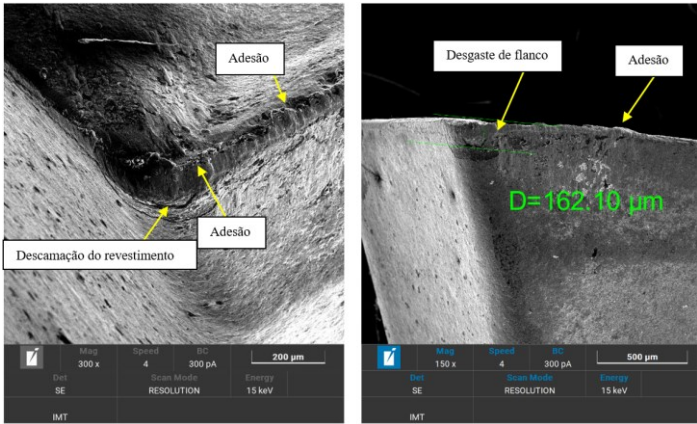


Figura 11. Avaliação de desgastes (Dados dos autores)

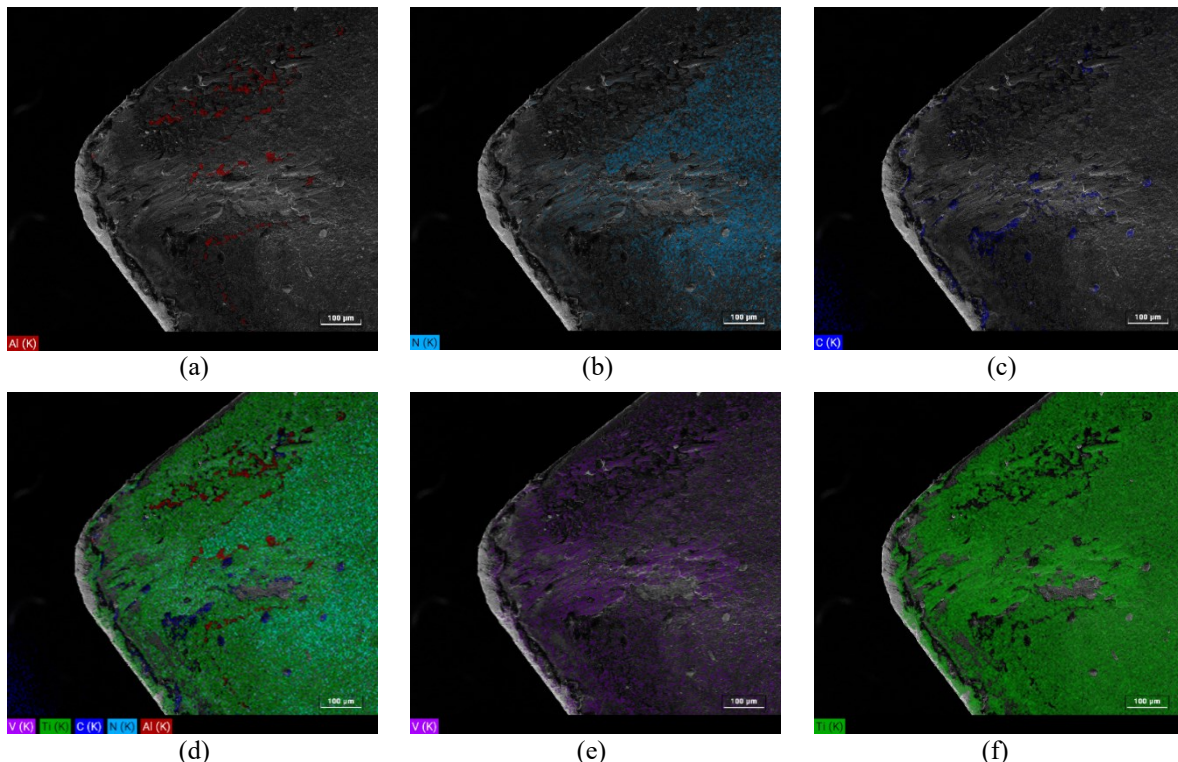


Figura 12. Análise de espectroscopia de raios X – Inserto de corte utilizado com álcool etílico hidratado e CO₂ sólido. (a) Distribuição de Alumínio (b) Distribuição de Nitrogênio. (c) Distribuição de Carbono (d) Elementos encontrados. (e) Distribuição de Vanádio. (f) Distribuição de Titânio. (Dados dos autores)

A utilização de Álcool Etílico + CO₂ Sólido como lubrificante e refrigerante proporcionou a ocorrência de desgastes de flanco, abrasão e adesão. A análise EDS permitiu verificar a disposição dos constituintes químicos após a usinagem.

Espera-se que a partir deste estudo inicial desta abordagem de resfriamento se consiga melhorias na qualidade superficial de peças usinadas de Ti-6Al-4V.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Mauá de Tecnologia e ao Instituto SENAI de Manufatura Avançada e Microfabricação pela utilização dos laboratórios.

5. REFERÊNCIAS

- An, Qinglong et al. Tool wear and machined surface characteristics in side milling Ti6Al4V under dry and supercritical CO₂ with MQL conditions. *Tribology International*, v. 151, p. 106511, 2020.
- Scholta, E. *Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1993; 42(1): 471 - 474.
- James, S. Johny; Annamalai, A. Raja. Machinability study of developed composite AA6061-ZrO₂ and analysis of influence of MQL. *Metals*, v. 8, n. 7, p. 472, 2018.
- Kaltenbrunner, T. et al. Differences in evolution of temperature, plastic deformation and wear in milling tools when up-milling and down-milling Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 77, p. 75-86, 2022.
- Shokrani, A; Dhokia, V; Newman, ST. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012; 57: 83–101.
- Sun, Ying. *The Influence of Cryogenic Machining on Surface Integrity and Functional Performance of Titanium Alloys for Biomedical and Aerospace Applications*. 2020.
- Tunc, L. T; Gu, Y; Burke, M. G. Effects of minimal quantity lubrication (MQL) on surface integrity in robotic milling of austenitic stainless steel. *Procedia CIRP*, 2016; 45, 215-218.
- Venugopal, KA; Paul, S; Chattopadhyay, AB. Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics (Guildford)*, 2007; 47(1):12–18.
- Viner Brasil Tecnologia. Titânio Grade 5. Disponível em: <http://www.vbttec.com.br/site/>. Acesso em 10/05/2018.
- Zhang, S; LI, JF; Wang, YW. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 2012; 32: 81–87.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

APPLICATION OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION AND COOLING TECHNIQUE USING A MIXTURE OF HYDRATED ETHYL ALCOHOL AND SOLID CO₂ IN THE MILLING OF Ti-6Al-4V ALLOY

Nelson Wilson Paschoalinoto

Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). Escola de Engenharia Mauá. Pça Mauá 01 - Bairro Mauá - São Caetano do Sul - SP
nelson.paschoalinoto@maua.br

Jorge Antonio Giles Ferrer

Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica (SENAI-SP). Rua Santo André, 680 - Boa Vista São Caetano do Sul - SP
jorge.ferrer@sp.senai.br

Gilmar Ferreira Batalha

Universidade de São Paulo (USP). Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo - SP
gilmar.batalha@poli.usp.br

Gleicy de Lima Xavier Ribeiro

Instituto SENAI de Inovação em Manufatura Avançada e Microfabricação (SENAI-SP). Rua Bento Branco de Andrade Filho, 379 - Santo Amaro, São Paulo - SP
gleicy.ribeiro@sp.senai.br

Abstract: This paper aims to present a lubrication and cooling approach using a mixture of Hydrated Ethyl Alcohol and solid CO₂ in the milling of Ti-6Al-4V alloy. Titanium and its alloys are used in applications that require high mechanical strength and low density. They also have the ability to interact with biological systems providing lower rates of rejection, used in orthopedic prostheses and implants. However, these materials have low thermal conductivity, making chip removal processes difficult. The Ti-6Al-4V alloy stands out in aerospace applications and in the automotive industry, and for this reason many applications are being studied to improve machining efficiency. The aim is to improve the durability of cutting inserts by minimizing wear, promoting a better surface finish of the machined parts. One line of work by researchers proposes changes in lubrication and cooling conditions. In this study solid CO₂ was mixed with hydrated ethyl alcohol by means of a device used in the minimum quantity lubrication technique. The Ti-6Al-4V alloy milling trials followed a 2³ factorial design with two center points and one replication. The variables v_c , f and a_p were located as independent and the S_a roughness as a dependent variable of the experimental planning. The machining forces were measured by a table dynamometer, and the microhardness and microstructural deformation from the milled surface were evaluated. The wear of the cutting inserts was measured, and energy dispersive X-ray spectroscopy analyses were performed. The surface resulting from the milling process was evaluated using a scanning electron microscope. It was noted that feed rate and depth of cut influenced the machining forces and roughness. Flaking of the coating and adhesion were observed on the cutting insert. The proposed approach proved to be a technically and economically feasible alternative for milling this type of widely used alloy.

Keywords: Ti-6Al-4V; Milling; Hydrated Ethyl Alcohol, Solid CO₂, MQL.

RESPONSIBILITY NOTICE

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