

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

EFEITO DA APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO REFRIGERADO POR CRIOGENIA NA
RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE GERADA PELO TORNEAMENTO DE POLIETILENO DE
ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

por

Dirceu Adair Bueno Junior

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

Porto Alegre, maio de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Bueno Junior, Dirceu Adair
EFEITO DA APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO REFRIGERADO
POR CRIOGENIA NA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE GERADA PELO
TORNEAMENTO DE POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO
MOLECULAR / Dirceu Adair Bueno Junior. -- 2022.
13 f.
Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Criogenia. 2. Rugosidade Média. 3. Torneamento.
4. UHMWPE. I. João de Souza, André, orient. II.
Titulo.

Dirceu Adair Bueno Junior

EFEITO DA APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO REFRIGERADO POR CRIOGENIA NA
RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE GERADA PELO TORNEAMENTO DE POLIETILENO DE
ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

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

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof^ª. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Automação em Usinagem, pela infraestrutura e ao Técnico do Laboratório, Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio prestado na execução dos experimentos e pelos ensinamentos.

Ao Instituto de Física, pela infraestrutura e apoio na construção do trocador de calor.

Ao Setor de Criogenia, pela infraestrutura e pelo fornecimento de nitrogênio líquido e *dewar* para os testes.

À Sandvik Coromant, em especial, ao Sr. Gustavo Diestel May, pela doação das ferramentas de corte.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), corpo técnico e docente, por proporcionar um ensino sólido e de qualidade, mesmo diante dos desafios e dificuldades da educação pública brasileira.

Aos meus pais, Dirceu e Maria Eugênia, pelo incentivo ao longo de toda a minha jornada, nunca medindo esforços para me proporcionar condições para buscar conhecimento, e pela nossa união nos momentos mais complicados que vivenciamos.

À minha esposa Liziani, pelo amor, carinho, amizade, paciência, pelas risadas, por ser meu porto seguro e estar comigo durante todos os momentos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

EFEITO DA APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO REFRIGERADO POR CRIOGENIA NA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE GERADA PELO TORNEAMENTO DE POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

Bueno Junior, Dirceu Adair
dirceu.bueno@ufrgs.br

Resumo. O torneamento é um processo de usinagem amplamente aplicado na obtenção de peças de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), termoplástico de engenharia com excelentes propriedades (estabilidade química, auto lubrificação, resistência ao impacto e resistência ao desgaste abrasivo) e notável aplicação em artroplastia. O uso de arrefecimento busca o aumento da produtividade e estabilidade na usinagem de polímeros. Assim, propôs-se investigar o efeito da aplicação de ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice (VCA) e por criogenia (CCA) no acabamento da superfície obtida pelo torneamento externo do UHMWPE em comparação ao corte a seco (DRY). Para tal, variou-se os parâmetros de usinagem (velocidade de corte “ v_c ”, profundidade de corte “ a_p ”, avanço “ f ” e condição de arrefecimento) em três níveis distintos cada seguindo o projeto de experimentos Box-Behnken. A análise de variância demonstrou que “ f ” e “ a_p ” são os fatores significativos sobre a rugosidade média (R_a), com maior contribuição de “ f ”. No entanto, a otimização foi inconclusiva para as condições de arrefecimento VCA e CCA, pois provavelmente houve influência da maior “ a_p ” empregada. Nos testes realizados, a menor rugosidade ($R_a = 1,39 \pm 0,09 \mu\text{m}$) foi obtida com $v_c = 800 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/volta}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$ utilizando VCA.

Palavras-chave: torneamento de UHMWPE, refrigeração por criogenia, ar comprimido refrigerado, rugosidade média,

Effect of cryogenically cooled compressed air application on surface roughness generated by turning ultra-high molecular weight polyethylene

Abstract. Turning is a machining process widely applied to obtain ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) parts, engineering thermoplastic with excellent properties (chemical stability, self-lubrication, impact resistance and abrasive wear resistance) and remarkable application in arthroplasty. The use of cooling seeks to increase productivity and stability in polymer machining. Thus, it was proposed to investigate the effect of the application of vortex (VCA) and cryogenic (CCA) cooled compressed air on the surface finish obtained by external turning of UHMWPE compared to dry cutting (DRY). To this end, the machining parameters (cutting speed “ v_c ”, depth of cut “ a_p ”, feed rate “ f ” and cooling condition) were varied at three different levels, each following the Box-Behnken experimental design. The analysis of variance showed that “ f ” and “ a_p ” are the significant factors on the average roughness (R_a), with the greatest contribution of “ f ”. However, the optimization was inconclusive for the VCA and CCA cooling conditions because there was probably an influence of the highest “ a_p ” utilized. In the tests performed, the lowest roughness ($R_a = 1.39 \pm 0.09 \mu\text{m}$) was obtained with $v_c = 800 \text{ m/min}$, $f = 0.1 \text{ mm/rev}$, $a_p = 1.5 \text{ mm}$ applying VCA.

Keywords: UHMWPE turning, cryogenic cooling, compressed air cooled, average roughness

NOMENCLATURA

Símbolos

v_c	Velocidade de corte	[m/min]
a_p	Profundidade de corte	[mm]
f	Avanço	[mm/volta]
ca	Condição de arrefecimento	---
R_a	Rugosidade média	[μm]
r_e	Raio de ponta da ferramenta	[mm]
T_g	Temperatura de transição vítrea	[$^{\circ}\text{C}$]

Abreviaturas e acrônimos

UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular (<i>ultra-high molecular weight polyethylene</i>)
DRY	Usinagem (ou corte) a seco
CCA	Ar comprimido refrigerado por criogenia
VCA	Ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice
LN ₂	Nitrogênio líquido
BBD	Box-Behnken Design
ADF	Função de distribuição de amplitudes (<i>amplitude distribution function</i>)
AFC	Curva de Abbot-Firestone (<i>Abbot-Firestone curve</i>)
ANOVA	Análise de variância

1 INTRODUÇÃO

O UHMWPE é um termoplástico que possui excelente inércia química, resistência à abrasão e ao impacto, bem como auto lubrificação. Destaca-se em aplicações que exigem resistência ao desgaste e elevada estabilidade química, principalmente em próteses ortopédicas de juntas parciais ou totais, em especial por sua biocompatibilidade [PATIL et al., 2020]. Devido à sua alta viscosidade, não flui como polietilenos de densidade mais baixa quando aquecido acima da temperatura de amolecimento, fazendo com que processos de injeção e sopro sejam inviáveis, sendo extrusão por pistão e compressão aplicados para produtos semiacabados e usinagem para peças prontas [KURTZ, 2004].

A usinagem está dentre um dos processos de fabricação mais presentes na indústria, e a qualidade superficial de materiais poliméricos usinados está intimamente relacionada com os parâmetros de processo empregados, como velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f) [GUPTA e KUMAR, 2013]. Na usinagem de polímeros, alguns aspectos devem ser levados em conta, como a expansão térmica superior à dos metais, alta elasticidade e baixas temperaturas de amolecimento e fusão [ENDRES, 2021]. É importante o estudo do acabamento gerado na superfície usinada, cujo objetivo deste processo é o de se obter uma superfície técnica que apresente textura e integridade apropriados a fim de garantir confiabilidade, segurança e longa vida ao componente fabricado [MESQUITA, 1992]. O acabamento do UHMWPE gerado durante a usinagem pode impactar de maneira considerável a resistência ao desgaste, isto é, a redução desta é indesejável, sobretudo em aplicações protéticas [CARLOS, 2014; POPA et al., 2014].

Além do comprometimento em se obter uma superfície técnica com as propriedades e textura desejadas, há de se considerar a questão ambiental com o uso de técnicas de lubrificação ambientalmente amigáveis para atender as normas de poluição cada vez mais rigorosas [HAMRAN et al., 2020]. Portanto, sobressaem-se como opções ao corte a seco (DRY), a técnica VCA, através da qual um tubo de vórtice gera baixas temperaturas devido ao movimento do ar em seu interior, e CCA, na qual se tem a refrigeração através de gás frio proveniente da

evaporação de liquefeito ou com uso de trocador de calor [BERTOLINI et al., 2021; DACAS e COSTA, 2020; MACIEL et al., 2010].

Bertolini et al. (2021) avaliaram comparativamente o torneamento de UHMWPE a seco (DRY) e com o uso de nitrogênio líquido (LN₂), e constataram que o uso de criogenia resultou em menores valores de rugosidade, independentemente dos parâmetros de cortes escolhidos. Os resultados de Aldwell et al. (2015) no torneamento de UHMWPE mostraram melhorias no acabamento superficial com o resfriamento da peça em imersão de LN₂ prévia à usinagem, mas não em uma escala que supere a escolha de parâmetros de corte não otimizados. Maciel et al. (2010), durante testes de torneamento externo nos materiais poliméricos POM (polioximetileno), Nylon 6 (poliamida) e PP (polipropileno), compararam as aplicações VCA, DRY e com fluido de corte em abundância (WET), sem ganhos em rugosidade superficial, mas demonstrando que a técnica é uma adequada opção ambientalmente amigável para o processo.

Destarte, o objetivo deste estudo é investigar os efeitos dos fatores controláveis de entrada (parâmetros de corte e condições de arrefecimento) sobre a rugosidade por meio do projeto de experimentos Box-Behnken (BBD), com o intento de determinar a melhor combinação de parâmetros de corte que minimizem a textura da superfície torneada do UHMWPE.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

Os polímeros são macromoléculas qualificadas conforme seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. São compostos por unidades químicas (meros) repetidas regularmente ao longo de extensas cadeias químicas constituídas principalmente de carbono e hidrogênio, responsáveis por seus elevados pesos moleculares. Os polímeros podem ser naturais (e.g. seda e celulose) ou sintéticos (e.g. polietileno e polipropileno) [MANO e MENDES, 1999].

O UHMWPE é um polímero obtido pelo processo de suspensão em catalisador Ziegler, que permite a obtenção de compostos com peso molecular de 2 a 8×10^6 g/mol, cerca de dez vezes maior que os polietilenos de alto peso molecular [BRASKEM, 2018]. Devido à sua alta viscosidade em estado fundido, não pode ser empregado em métodos convencionais de injeção, sopro e extrusão comumente aplicados em polímeros em geral, necessitando de processos de usinagem para obtenção de peças prontas [WANG e LI, 1999]. O UHMWPE é fornecido em pó, conformado em placas e tarugos via termo prensagem e extrusão e posteriormente usinado para sua forma final [WIEBECK e HARADA, 2005]. Possui excelente resistência à abrasão, baixo coeficiente de atrito e propriedades mecânicas superiores aos demais polietilenos. Apresenta bom potencial para substituir materiais metálicos em algumas aplicações, e amplamente utilizado em próteses de joelho-junta e quadril [RASTOGI et al., 1998]. Conta também com elevada resistência química e é compatível com aplicações em ambientes corrosivos a temperaturas moderadas [a temperatura de transição vítrea (T_g) varia entre 100 e 125 °C], não sendo atacado pela maioria dos solventes, exceto hidrocarbonetos e materiais altamente oxidantes, como ácido nítrico [BRASKEM, 2018]. Ademais, o UHMWPE mantém sua resistência ao impacto e inércia química mesmo em baixas temperaturas. Este polietileno é utilizado há mais de 50 anos em aplicações biomédicas [CARLOS, 2014], devido à sua estabilidade química, biocompatibilidade, resistência mecânica e tribológica, mas também encontra aplicações em outros ramos da engenharia. É utilizado na indústria de mineração e transporte, como revestimento de caminhões basculantes e tapumes de navios, bem como em tubulações de gás e esgoto [KURTZ, 2004].

2.2 Métodos de Arrefecimento em Usinagem

Operações de usinagem geram elevados esforços, tanto na interface entre o cavaco e a ferramenta, quanto entre a ferramenta e a peça, resultando em altas temperaturas nessas regiões,

que podem afetar de forma negativa a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Uma das abordagens mais comuns é a de se empregar um meio lubrificante (e.g. fluido de corte), com vistas a reduzir a temperatura na região de corte, diminuir o atrito nas interfaces da ferramenta e facilitar a expulsão do cavaco [DINIZ et al., 2014].

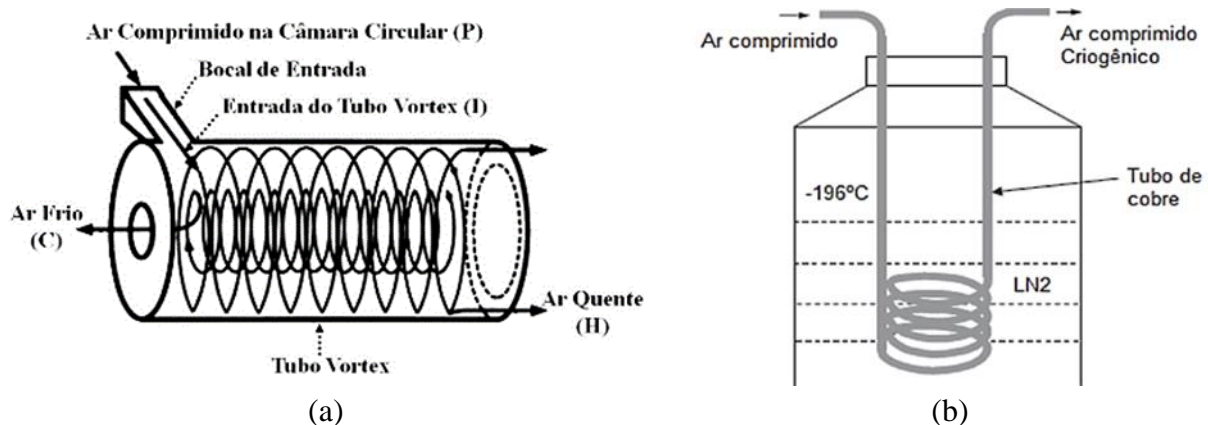
Apesar dos benefícios de se usar fluido de corte em abundância para se atender requisitos de acabamento em peças usinadas, o seu descarte ao fim do ciclo gera diversos problemas ambientais, econômicos e sanitários, o que faz necessário o uso de técnicas alternativas que visem reduzi-lo e até mesmo eliminá-lo [HAMRAN et al., 2020].

O corte a seco (DRY) tem como vantagem a eliminação completa do fluido de corte do processo de usinagem, trazendo benefícios ambientais para o descarte, de saúde para o operador e financeiro pela economia nesse insumo, tanto na aquisição quanto no tratamento de rejeitos. Em contrapartida, a falta de fluido de corte resulta em temperaturas de usinagem elevadas, e pela alta condutividade térmica de certos materiais, podem ocorrer deformações e erros dimensionais nos componentes usinados. As elevadas temperaturas exigem ainda utilização de ferramentas modernas e materiais mais estáveis nessas condições [SREEJITH e NGOI, 2000].

A usinagem VCA utiliza o princípio do tubo de vórtice, no qual o ar comprimido entra em uma câmara circular se expandindo e acelerando com a força centrífuga, pressionado contra as paredes do tubo. Nas proximidades da parede, sob influência de altíssimos gradientes de velocidade, o ar é aquecido por fricção, e sua expansão em na direção radial ao centro do tubo forma ar frio. O fluxo deste ar frio na descarga do tubo gera uma linha de ar resfriado em forma de hélice com temperatura inferior à da admissão do tubo. A Figura 1a detalha o funcionamento deste dispositivo [MACIEL et al., 2010].

A técnica de usinagem com refrigeração criogênica utiliza comumente LN₂ armazenado em um vaso isolado à vácuo (*dewar*) com dois métodos de aplicação distintos. Um dos métodos é a partir da aplicação de um jato de LN₂ diretamente na interface de usinagem, extraíndo calor com a evaporação e expansão do nitrogênio para a forma gasosa. Esta técnica oferece ganhos para $v_c < 100$ m/min, sendo que em níveis superiores de v_c não há penetração adequada do fluido na interface ferramenta-peça [SUN et al., 2010]. A segunda abordagem busca tirar vantagem da baixa temperatura do LN₂ e das altas pressões do ar comprimido, melhorando a penetração e a redução da temperatura na região de corte. Esta técnica faz o uso de um trocador de calor imerso no LN₂ que retira calor do fluxo de ar comprimido dentro da serpentina através das paredes super-resfriadas da mesma [DACAS e COSTA, 2020]. A Figura 1b traz o esquema do funcionamento de um trocador de calor para ar comprimido e LN₂.

Figura 1 – (a) Princípio de funcionamento do tubo de vórtice; (b) Esquema de um trocador de calor ar/LN₂

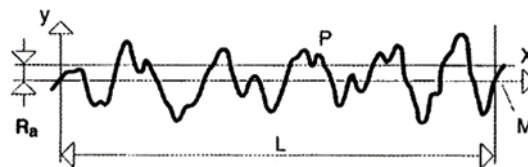


Fonte: (a) Adaptado de Maciel et al. (2010); (b) Dacas e Costa (2020).

2.3 Avaliação da Rugosidade

A rugosidade é um parâmetro aritmético comumente utilizada como variável de controle de qualidade de processos de usinagem, e engloba irregularidades finas, erros geométricos e ações inerentes à operação de corte (aresta postiça, marcas de avanço, desgaste da ferramenta etc.) [MACHADO et al., 2015]. Dentre os parâmetros de amplitude, a rugosidade média (R_a) é um parâmetro frequentemente utilizado para uma avaliação quantitativa da textura da superfície, e é definida pela NBR ISO 4287 (2002) como a média aritmética dos valores absolutos das amplitudes e, sendo um valor médio, é estável e não recebe influência de valores ocasionais. A Figura 2 representa de maneira esquemática a rugosidade média (R_a). Outrossim, R_a pode ser estimada para um valor teórico com base no avanço (f) e no raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), através da Equação (1) [MACHADO et al., 2015]

Figura 2 – Representação da rugosidade média (R_a) de uma superfície P com comprimento de avaliação L.



Fonte: Kopač e Bahor (1999).

$$R_a \text{ [}\mu\text{m]} = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,075 \cdot \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (1)$$

No entanto, parâmetros estatísticos de rugosidade possuem melhor embasamento científico que parâmetros aritméticos e podem caracterizar melhor superfícies usinadas. Pode-se citar a função de distribuição de amplitudes (ADF) com seus parâmetros de assimetria e curtose. O primeiro (*skewness*) caracteriza o desvio ou afastamento da simetria de um perfil de rugosidade, e o segundo (*kurtosis*) descreve o grau de achatamento de uma curva entre mais aguda (ou leptocúrtica) e mais achatada (ou platicúrtica). De maneira alternativa pode-se representar o perfil de rugosidade como uma função de probabilidade cumulativa que indica o quanto abaixo ou acima de uma referência estará o perfil, denominada curva de Abbot-Firestone (AFC). Essa função fornece informações importantes sobre o contato real e capacidade de carga de uma superfície, onde sua curvatura superior representa os picos, a linha central a rugosidade próxima a referência e a parte inferior os vales do perfil [SÓRIA, 2016]. Neste trabalho as curvas ADF e AFC foram geradas com uso do algoritmo proposto por Tavares (2005).

2.4 Projeto de Experimentos de Box-Behnken

O Box-Behnken Design (BBD) é um método controlado e sistemático de coleta e análise de grande quantidade de dados com vistas a oferecer um entendimento melhor dos fatores investigados, suas interações e influências em um processo. Possui uso amplo e bem definido em aplicações nos diversos processos de fabricação [CHANG et al., 2015]. No BBD, os experimentos são divididos em três níveis (baixo, médio e alto), trazendo a vantagem de um reduzido número de execuções se comparado com métodos fatoriais completos, diminuindo de 64 para 27 amostras, variando 4 fatores diferentes. Apresenta como vantagem também o fato de os fatores não serem utilizados simultaneamente em níveis altos e baixos, evitando-se testes em condições limite. O ponto central é replicado visando avaliar a repetitividade do experimento [MONTGOMERY, 2013; FERREIRA et al., 2007].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e Equipamentos

O procedimento experimental compôs-se da execução do torneamento longitudinal externo do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) no torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 3a), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). Na experimentação utilizou-se o inserto de metal-duro sem revestimento Sandvik VCGX 160404-AL H10 com geometria positiva e $r_e = 0,4$ mm (Fig. 3b) montado no porta-ferramentas Black Tools modelo SVJBL-2020-K16 com ângulo de posição de $\chi_r = 93^\circ$.

Figura 3 – (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) Inserto Sandvik VCGX



(a)



(b)

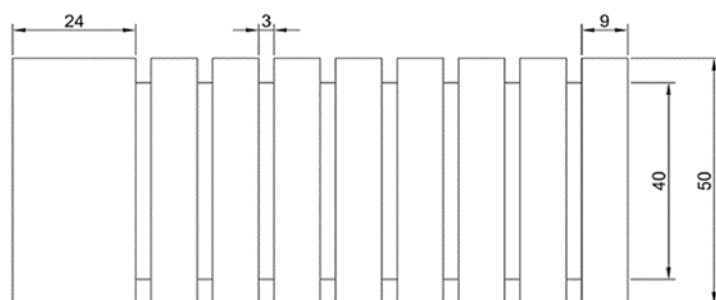
Fonte: (a) Pereira (2016); (b) Sandvik (2012).

Os experimentos foram conduzidos a partir de quatro barras cilíndricas de UHMWPE com 50 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento usinadas em oito amostras de 9 mm de comprimento separadas em 3 mm com vistas a facilitar o movimento de entrada e saída do inserto e evitar distorções nas medidas de rugosidade superficial (Fig. 4a). O número de seções foi definido com base na quantidade de combinações necessária para a execução do planejamento experimental BBD, 27 amostras para os testes, com cinco amostras adicionais para ensaios de validação (Fig. 4b).

Figura 4 – Detalhe do corpo de prova dos experimentos propostos: (a) dimensões em mm; (b) foto antes dos testes.



(a)

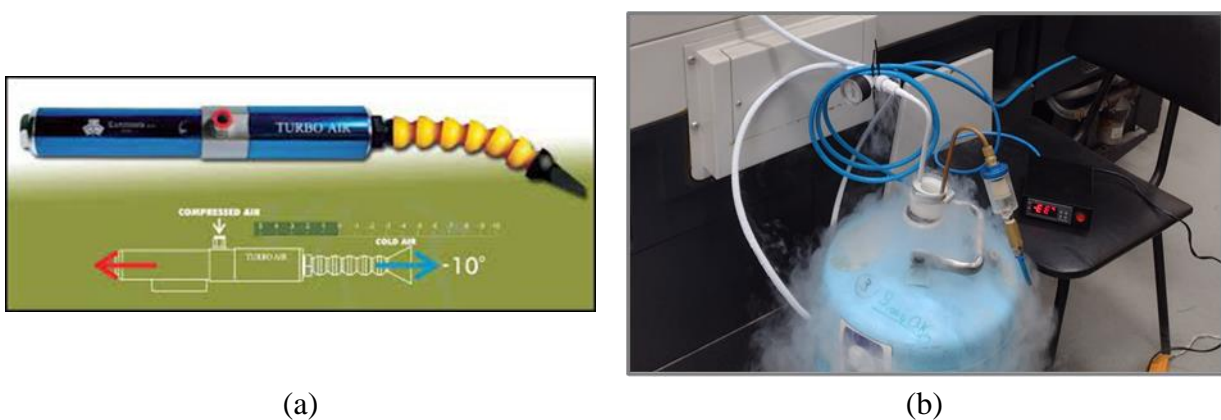


(b)

Fonte: Autor (2022).

Diferentemente da abordagem DRY, que dispensa totalmente o fluido de corte, as estratégias VCA e CCA requerem aparato adicional. Para a aplicação do VCA foi usado um tubo de vórtice Eurotools modelo Turbo Air FTA-12-MC (Fig. 5a). Para resfriar o ar comprimido nos testes conduzidos com a abordagem CCA, optou-se pela construção de um trocador de calor composto de uma serpentina de cobre, por onde circula o fluxo de ar, imersa em nitrogênio líquido (LN₂) à -192 °C, acondicionado em um vaso *dewar* de 13 litros (Fig. 5b). O trocador de calor conta com um filtro instalado em sua admissão para evitar que umidade e impurezas congelem nas baixas temperaturas e interrompam o fluxo, e possui um manômetro para medir a pressão na saída. Conta adicionalmente com um sensor de temperatura na saída para controle da temperatura do ar comprimido, composto por um sensor tipo K operado por uma controladora STC-1000 com faixa de operação de -50 °C a 100 °C.

Figura 5 – Sistemas de arrefecimento utilizados no trabalho: (a) tubo vórtice Eurotools FTA-12-MC; (b) trocador de calor para estratégia CCA.



Fonte: (a) <http://www.arapa.es/turboair.html>; (b) Autor (2022)

Para a obtenção das rugosidades das seções usinadas, foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P com resolução de 0,01 μm (Fig. 6). Conforme recomendado pela NBR ISO 4288 (2008), foram utilizados o comprimento de avaliação de 4 mm e comprimento de amostragem 0,8 mm para valores de rugosidade na faixa de $0,1 \leq R_a < 2,0 \mu\text{m}$. Além do rugosímetro, utilizou-se também o software SurfTest SJ Tools que auxiliou na geração do perfil de rugosidade da superfície de cada amostra. Para cada amostra foram realizadas três medidas de rugosidade defasadas em 120°.

Figura 6 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P



Fonte: <https://www.seginstrumentos.com.br/locacao/locacao-de-rugosimetro-mitutoyo-modelo-sj-201>

3.2 Procedimento Experimental

Os avanços e profundidades de corte foram escolhidos conforme os limites estabelecidos pelo fabricante do inserto. A profundidade de corte (a_p) permitida varia de 0,5 a 5,0 mm, enquanto o avanço (f) de 0,1 a 0,3 mm/volta [SANDVIK, 2012]. Ainda segundo o fabricante, o inserto trabalha com velocidades de 250 a 2500 m/min. Como este trabalho propôs-se a testar a usinagem de um polímero, as velocidades de corte envolvidas tendem a ser elevadas. Assim, fixou-se a profundidade de corte máxima em 2,5 mm. A partir da situação com $a_p = 2,5$ mm (e diâmetro de 45 mm pela limitação do corpo de prova) e a rotação máxima do torno CNC em 6000 rpm, tem-se a velocidade de corte máxima permitida é 850 m/min. Deste modo, limitou-se a velocidade de corte (v_c) em 800 m/min. Assim, variou-se v_c , f e a_p dentre três níveis distintos para cada parâmetro (Tab. 1), seguindo o modelo do Box-Behnken Design (BBD), num total de 27 amostras em quatro corpos de prova. As amostras foram geradas de maneira aleatória para criar um experimento de superfície de resposta (RSM) usando o software Minitab® 20.4.

Tabela 1 – Parâmetros escolhidos em três níveis para o BBD

Fatores controláveis	Níveis		
	Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (+1)
v_c [m/min]	400	600	800
f [mm/volta]	0,1	0,2	0,3
a_p [mm]	0,5	1,5	2,5
ca	CCA	VCA	DRY

Fonte: Autor (2022)

Posteriormente a usinagem das amostras, os valores otimizados dos parâmetros variados foram definidos conforme análise estatística do BBD e a relevância de cada um determinada com a análise de variância (ANOVA), visando o menor valor de R_a , com uso do software Minitab® 20.4. Para a análise, se considerou o índice de confiança de 95%.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentadas e discutidas as análises das rugosidades e dos cavacos gerados em função das variáveis de entrada (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e condição de arrefecimento), além dos resultados dos ensaios de validação com base no modelo de otimização proposto.

4.1 Acabamento da Superfície Usinada

A Tabela 2 apresenta os resultados de rugosidade média (R_a) nas condições de arrefecimento DRY, VCA e CCA. A temperatura na saída do tubo de vórtice durante a usinagem com abordagem VCA foi de 9 °C e na CCA a temperatura na descarga do trocador foi de -28 °C. A temperatura ambiente registrada foi de 21,7 °C.

De acordo com a Tabela 2, os menores valores foram obtidos na amostra 22 ($R_a = 2,07 \pm 0,36 \mu\text{m}$) para DRY, amostra 2 ($R_a = 1,61 \pm 0,05 \mu\text{m}$) para CCA e amostra 24 ($R_a = 1,39 \pm 0,09 \mu\text{m}$) para VCA. Observa-se ainda na tabela que as amostras 7*, 16* e 25* apresentaram pouca variabilidade, mostrando uma boa repetitividade do experimento. Segundo Machado et al. (2015), os valores reais tabelados tendem a ser superiores aos teóricos, pois estão acrescidos de diversos fatores não controláveis intrínsecos ao processo.

Tabela 2 – Matriz experimental com os resultados de rugosidade média.

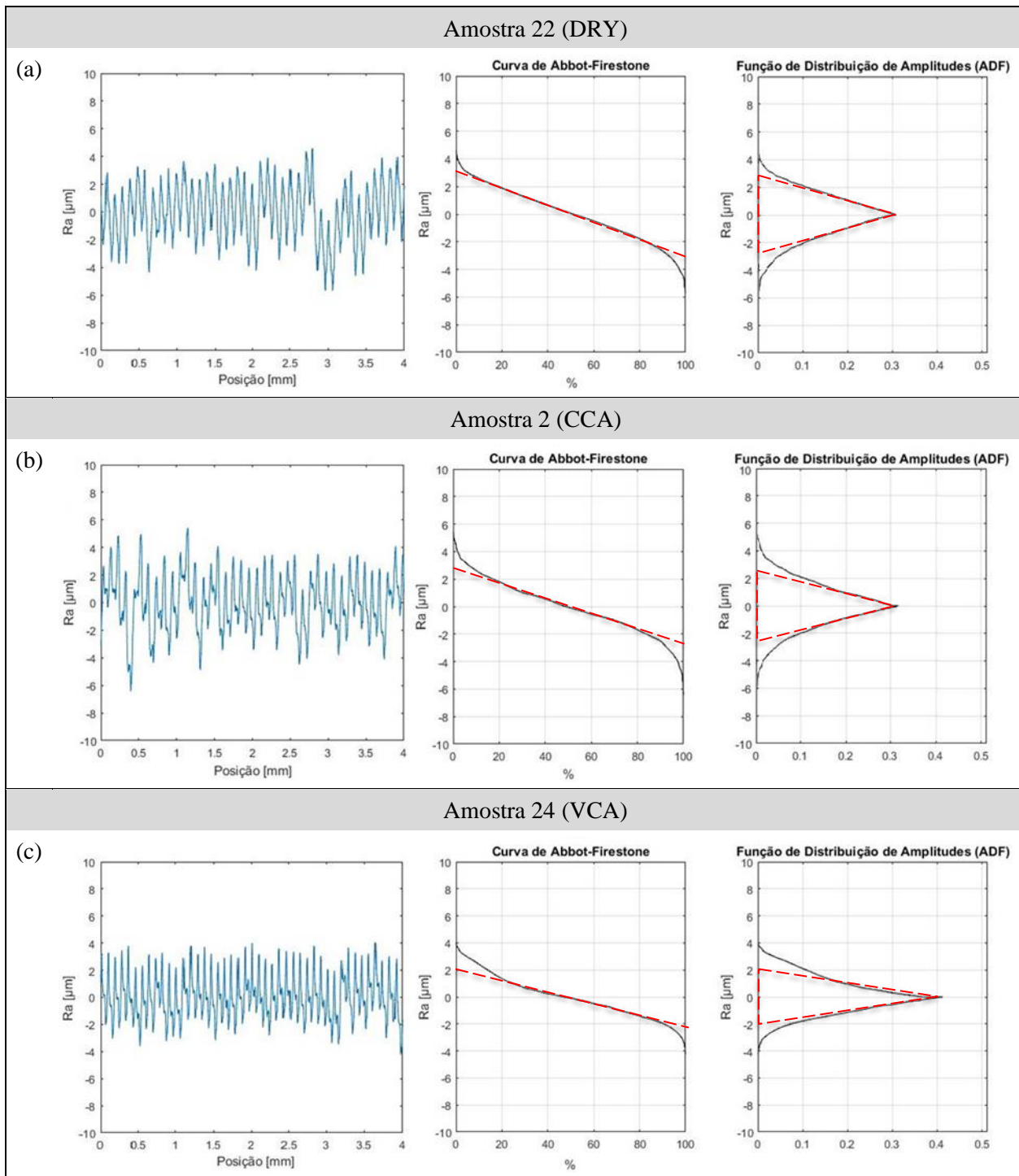
Amostra	v_c [m/min]	f [mm/rev]	a_p [mm]	ca	R_a [μm]	R_a teórico [μm]
1	600	0,2	0,5	DRY	$5,85 \pm 0,11$	3,21
2	600	0,1	1,5	CCA	$1,61 \pm 0,05$	0,80
3	400	0,2	2,5	VCA	$6,38 \pm 0,57$	3,21
4	800	0,2	1,5	DRY	$6,40 \pm 0,05$	3,21
5	600	0,3	2,5	VCA	$13,09 \pm 0,08$	7,22
6	600	0,1	0,5	VCA	$1,62 \pm 0,19$	0,80
7*	600	0,2	1,5	VCA	$6,44 \pm 0,08$	3,21
8	400	0,2	1,5	DRY	$6,45 \pm 0,04$	3,21
9	600	0,3	1,5	CCA	$13,14 \pm 0,20$	7,22
10	400	0,2	1,5	CCA	$6,70 \pm 0,22$	3,21
11	600	0,2	2,5	DRY	$6,97 \pm 0,12$	3,21
12	800	0,2	0,5	VCA	$6,32 \pm 0,09$	3,21
13	800	0,2	1,5	CCA	$6,11 \pm 0,04$	3,21
14	600	0,3	0,5	VCA	$11,27 \pm 0,22$	7,22
15	600	0,2	0,5	CCA	$5,72 \pm 0,07$	3,21
16*	600	0,2	1,5	VCA	$6,70 \pm 0,04$	3,21
17	400	0,2	0,5	VCA	$5,63 \pm 0,03$	3,21
18	600	0,1	2,5	VCA	$2,02 \pm 0,07$	0,80
19	600	0,2	2,5	CCA	$6,52 \pm 0,04$	3,21
20	600	0,3	1,5	DRY	$12,82 \pm 0,03$	7,22
21	800	0,3	1,5	VCA	$12,53 \pm 0,11$	7,22
22	600	0,1	1,5	DRY	$2,07 \pm 0,36$	0,80
23	800	0,2	2,5	VCA	$6,56 \pm 0,04$	3,21
24	800	0,1	1,5	VCA	$1,39 \pm 0,09$	0,80
25*	600	0,2	1,5	VCA	$6,57 \pm 0,06$	3,21
26	400	0,1	1,5	VCA	$1,72 \pm 0,05$	0,80
27	400	0,3	1,5	VCA	$12,93 \pm 0,13$	7,22

* Passes de repetição do ponto central visando verificar a variabilidade experimental

Fonte: Autor (2022)

Os respectivos perfis de rugosidade e curvas AFC e ADF são vistos na Figura 7. Percebe-se nas três situações que as menores rugosidades foram obtidas com o menor avanço aplicado ($f = 0,1$ mm/volta), e que as distâncias entre os picos e vales correspondem ao valor do mesmo. As amostras 22 (Fig. 7a) e 2 (Fig. 7b) mostraram comportamento semelhante, com inclinações das AFC mais elevadas que na amostra 24 (Fig. 7c) e com maior dispersão na curva ADF, causados pela presença de picos e vales irregulares no perfil, com presença maior de vales na amostra 22 ressaltada pela sua curva ADF mais achatada (platicúrtica). A amostra 24 apresenta uma AFC com menor inclinação devido ao perfil de rugosidade mais estável e menos disperso, corroborado pela ADF mais estreita e simétrica com a média (leptocúrtica), indicando vales e picos de dimensões próximas, o que pode ter proporcionado o menor valor de R_a .

Figura 7 – Perfis de rugosidade e curvas AFC e ADF das amostras: (a) 22; (b) 2; (b) 24.



Fonte: Autor (2022)

Foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com auxílio do software Minitab® 20.4 para identificar os parâmetros de maior influência sobre os resultados de rugosidade, aplicada com intervalo de confiança de 95% (valor-p $\leq 0,05$). A Tabela 3 resume os resultados obtidos. Segundo a ANOVA, os efeitos linear e quadrático do avanço (f e $f \times f$), o efeito linear de a_p e a combinação $f \times a_p$ foram significativas, enquanto que o efeito quadrático de a_p foi “parcialmente significativo” (intervalo de confiança de 94,2%) sobre a rugosidade média. A maior contribuição foi a do avanço (97,43%), seguida pela profundidade de corte (1,40%). Os demais fatores (v_c e ca) e suas respectivas combinações não foram significativos sobre a variável resposta analisada.

Tabela 3 – Resultados obtidos na ANOVA

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	364,092	26,007	265,67	0,000
Linear	4	358,147	89,537	914,67	0,000
Vc	1	0,021	0,021	0,21	0,653
f	1	355,885	355,885	3635,58	0,000
Ap	1	2,193	2,193	22,40	0,000
CA	1	0,048	0,048	0,49	0,497
Quadrado	4	5,124	1,281	13,09	0,000
Vc*Vc	1	0,101	0,101	1,03	0,330
f*f	1	2,990	2,990	30,54	0,000
Ap*Ap	1	0,429	0,429	4,39	0,058
CA*CA	1	0,002	0,002	0,02	0,899
Interação com 2 Fatores	6	0,821	0,137	1,40	0,292
Vc*f	1	0,001	0,001	0,01	0,913
Vc*Ap	1	0,065	0,065	0,66	0,431
Vc*CA	1	0,073	0,073	0,74	0,405
f*Ap	1	0,504	0,504	5,15	0,042
f*CA	1	0,152	0,152	1,55	0,236
Ap*CA	1	0,026	0,026	0,26	0,618
Erro	12	1,175	0,098		
Falta de ajuste	10	1,141	0,114	6,75	0,136
Erro puro	2	0,034	0,017	*	*
Total	26	365,267			

Fonte: Autor (2022)

Salles e Gonçalves (2003) concluíram que o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade média. Citam ainda que vários autores relacionam a usinabilidade de materiais poliméricos à velocidade de corte, pois a temperatura supostamente tem grande influência no acabamento da superfície usinada. No entanto, os autores constataram que a influência da velocidade de corte sobre R_a no torneamento do UHMWPE foi insignificante. Maciel et al. (2010), em testes com polímeros, dentre eles o UHMWPE, constataram que não há contribuição significativa de ca na rugosidade.

Utilizando os recursos do Minitab® 20.4, construiu-se os gráficos de contorno (Fig. 8) para o nível central de cada um dos parâmetros avaliados no BBD. Nota-se nas Figuras 8a, 8d e 8e que há a redução da rugosidade média (R_a) com a diminuição de f , e pouca influência do efeito combinado com outros parâmetros. As Figuras 8b, 8c e 8f sugerem baixa influência da variação de v_c e ca e seus efeitos conjugados sobre R_a . Contudo, as Figuras 8b e 8f sugerem uma redução da rugosidade com a diminuição de a_p .

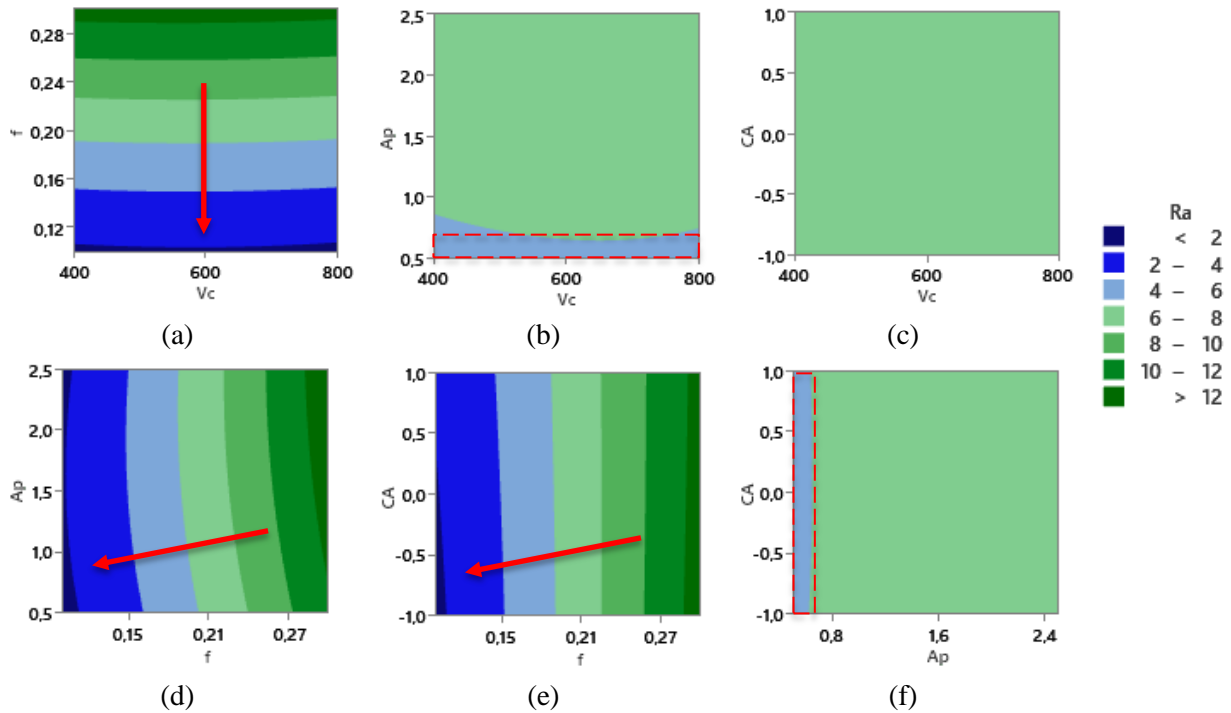
A Figura 9 apresenta os gráficos dos efeitos principais. A partir dos níveis avaliados no BBD e do comportamento apresentado na ANOVA pode-se otimizar os fatores que minimizam a rugosidade média (R_a). Os níveis dos parâmetros de corte que minimizam R_a obtidos com o software Minitab® 20.4 são: $v_c = 800$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 2,5$ mm e $ca = -1$ (CCA). Tais níveis são pouco usuais (a_p e v_c elevadas) e não são encontrados em otimizações na literatura, o que motivou a realização de testes de validação.

4.2 Comportamento do Cavaco

Durante a experimentação, verificou-se que não houve emaranhamento do cavaco em nenhum dos passes realizados com a condição CCA. Por outro lado, todos os passes tiveram cavaco emaranhado no corpo de prova na condição DRY (Fig. 10). Uma possível explicação é que a temperatura na zona de corte no passe 4 (DRY) pode ter ultrapassado a T_g do UHMWPE e os cavacos entraram em regime visco-plástico [SALLES e GONÇALVES, 2003]. O torneamento na

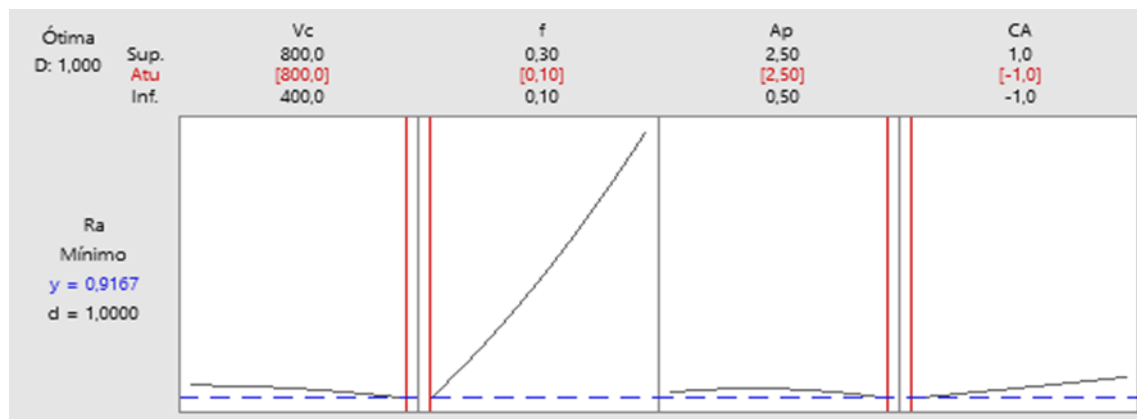
condição VCA não gerou cavaco emaranhado na peça, mas sim na placa do CNC, somente nas combinações com $a_p \leq 1,5$ mm. Todos os cavacos produzidos foram contínuos do tipo fita e não apresentaram variações significativas em aspecto e formato.

Figura 8 – Gráficos de contorno para a rugosidade média.



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 – Gráficos dos efeitos principais e parâmetros de usinagem.



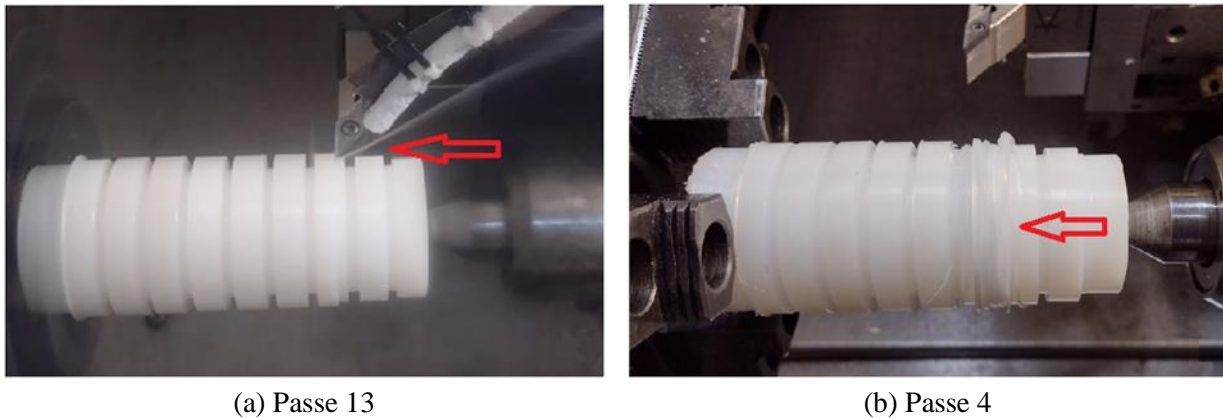
Fonte: Autor (2022)

4.3 Testes de Validação

Ao fim dos experimentos, buscando corroborar os resultados obtidos da otimização com BBD ($v_c = 800$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 2,5$ mm), realizaram-se três passes de validação com os parâmetros otimizados nas amostras não utilizadas dos corpos de prova para cada condição de arrefecimento. Os resultados estão resumidos na Tabela 4. Como se observa, as rugosidades obtidas não foram as menores que as melhores obtidas na experimentação. Além disso, nos testes

de validação, não se obteve o fenômeno de afastamento do cavaco da superfície observados nos testes de coleta de dados com as condições de arrefecimento CCA e VCA.

Figura 10 – Detalhe do comportamento do cavaco na usinagem: (a) CCA; (b) DRY.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 4 – Resultados dos testes de validação (R_a teórico = 0,8 μm).

Amostras	ca	R_a [μm]
28 – 29 – 30	CCA	$1,99 \pm 0,07$
31 – 32 – 33	VCA	$1,97 \pm 0,03$
34 – 35 – 36	DRY	$1,88 \pm 0,10$

Fonte: Autor (2022)

Debra e Bryan (1984) citam que o incremento na velocidade de corte gera calor que aumenta a temperatura na zona do corte, acrescentando também a mobilidade das moléculas de longo alcance do material, reduzindo assim o limite de resistência à tração ou o esforço de tensão cisalhante. Song et al. (1999) observaram que o aumento da profundidade de corte na usinagem do UHMWPE contribuiu para o aumento da rugosidade média (R_a). Assim, Schneider et al. (2008) concluíram que as condições ideais de usinagem que permitem os melhores acabamentos superficiais devem se basear nas propriedades dos polímeros (T_g e mobilidade molecular). Os autores citam ainda que para minimizar a rugosidade da superfície usinada, os parâmetros de usinagem devem ser relacionados de modo que não ocorra deformação viscosa.

5 CONCLUSÕES

A ANOVA mostrou que, independentemente da condição de arrefecimento, o avanço por volta (f) e a profundidade de corte (a_p), são os fatores significativos sobre a rugosidade da superfície obtida pelo torneamento do UHMWPE para um intervalo de confiança igual ou superior a 95%. Conforme esperado, a maior contribuição é do avanço (97,4%). Por outro lado, as contribuições da velocidade de corte (v_c) e da condição de arrefecimento (ca) não foram significativas.

A combinação de parâmetros sugerida pelo modelo de estimação para minimizar a rugosidade média (R_a) ($v_c = 800$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta e $a_p = 2,5$ mm) gerou resultados inconclusivos. Entretanto, os resultados dos gráficos de contorno sugeriam que uma menor profundidade de corte poderia gerar melhores resultados. Exemplo disso é o melhor acabamento obtido com $v_c = 800$ m/min, $f = 0,1$ mm/volta, $a_p = 1,5$ mm utilizando VCA.

A aplicação de CCA com temperatura abaixo de $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ não demonstrou contribuição significativa no acabamento obtido nas condições avaliadas (a menor rugosidade dos testes foi obtida com temperatura na descarga de $9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ainda assim, as menores rugosidades foram obtidas com a combinação de menor avanço por volta (f) e uso de arrefecimento, o que pode indicar que a melhora na rugosidade superficial pode advir do afastamento do cavaco da superfície causado pelo fluxo de ar comprimido. A condição CCA pode ter sido benéfica por ter impedido que os cavacos entrassem no regime visco-plástico. O afastamento do cavaco não foi observado nos testes de validação nas condições CCA e VCA, apresentando ao invés disso um enrolamento severo na superfície, possivelmente pela maior a_p aplicada, gerando um cavaco mais largo com maior resistência ao fluxo de ar.

Em trabalhos futuros, essa otimização pode ser realizada com uso de fluxo de ar sem refrigeração a fim de comprovar ganhos com o afastamento do cavaco da superfície sem uso de ar resfriado e menores profundidades de corte.

6 REFERÊNCIAS

BRASKEM. **Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)**. São Paulo: Catálogo UTEC, 2018.

CARLOS, A. S. S. T. **Polietilenos de Ultra Elevado Peso Molecular (UHMWPE) para Aplicações Biomédicas**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Química, IST-UL, Lisboa, Portugal, 2014.

CHANG, B. P. et al. Optimization on wear performance of UHMWPE composites using response surface methodology. **Tribology International**, v. 88, p. 252-262, 2015.

DACAS, F. P.; COSTA, R. Avaliação da refrigeração de corte criogênica na usinagem CNC do aço inoxidável martensítico AISI 420. **Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 35-47, 2020.

DEBRA, D.B.; BRYAN, J. Design of laminar flow restrictors for damping pneumatic vibration isolators. **CIRP Annals**, v. 33, n. 1, p. 351-356, 1984.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

FERREIRA, S. L. C. et al. Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems. **Journal of Chromatography A**, v. 1158, n. 1-2, p. 2-14, 2007.

HAMRAN, N. N. N. et al. A review on recent development of minimum quantity lubrication for sustainable machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, A. 122165, 2020.

KOPAČ, J.; BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 92-93, p. 381-387, 1999.

KURTZ, S. M. **The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2004.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MACIEL, D.; LAURO, C. H.; BRANDÃO, L. C. Usinagem de materiais poliméricos utilizando sistema de refrigeração com ar gelado. **Anais do VI CONEM**, Campina Grande, PB, 18 a 21 ago., 2010.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 1999.

MONTGOMERY, D. C. **Analysis of Experiments**. Hoboken: Wiley, 2013.

NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: método do perfil-Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

NBR ISO 4288. **Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: Método do perfil-Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

PEREIRA, G. R. **Investigação Sobre o Torneamento de Acabamento da Liga de Alumínio 6262E-T6 Utilizando Diferentes Métodos de Aplicação de Lubrificante**. Monografia (Graduação) em Engenharia Mecânica, DEMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS. 2016.

RASTOGI, S.; KURELEC, L.; LEMSTRA, P. J. Chain mobility in polymer systems: On the borderline between solid and melt. 2. Crystal size influence in phase transition and sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene via the mobile hexagonal phase. **Macromolecules**, v. 31, n. 15, p. 5022-5031, 1998.

SALLES, J.L.C; GONÇALVES, M.T.T. Effects of machining parameters on surface quality of the ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE). **Revista Matéria**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2003.

SANDVIK. **Catálogo de ferramentas para torneamento**. São Paulo, 2012.

SCHNEIDER, E. L. et al. Análise dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de polímeros. **UNOPAR Científica – Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 7, p. 25-30, 2008.

SONG, J. et al. Effects of machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding. **Wear**, v. 225-229, p. 716-723, 1999.

SÓRIA, B. S. **Estudo do Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 Utilizando Transformada de Wavelet**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS, 2016.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1-3, p. 287-291, 2000.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 11, p. 933-942, 2010.

TAVARES, S. M. O. **Analysis of Surface Roughness and Models of Mechanical Contacts**. Master Thesis, Facolta di Ingegneria, Università di Pisa, Italy, 2005.

WANG, Y. Q.; LI, J. Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene. **Materials Science and Engineering: A**, v. 266, n. 1-2, p. 155-160, 1999.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia - Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Artliber, 2005.