

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE BLOCOS DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO USINADOS POR UMA FRESADORA CNC DESTINADA A
CONFECÇÃO DE PRANCHAS DE SURFE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

HENRIQUE GRINBERG MIELKE

RIO GRANDE, RS

2022

HENRIQUE GRINBERG MIELKE

**AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE BLOCOS DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO USINADOS POR UMA FRESADORA CNC DESTINADA A
CONFEÇÃO DE PRANCHAS DE SURFE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral

RIO GRANDE, RS

2022

Ficha Catalográfica

M631a Mielke, Henrique Grinberg.

Avaliação do acabamento superficial de blocos de poliestireno expandido usinados por uma fresadora CNC destinada a confecção de pranchas de surfe / Henrique Grinberg Mielke. – 2022.

81 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

1. Usinagem 2. Fresadora CNC 3. EPS 4. Pranchas de surfe
5. Parâmetros de rugosidade I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do
II. Título.

CDU 621.7

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **7/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos trinta e um dias do mês de março de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando Henrique Grinberg Mielke, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE BLOCOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO USINADOS POR UMA FRESADORA CNC DESTINADA A CONFECÇÃO DE PRANCHAS DE SURFE**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Henara Lillian Costa Murray e Franco Dani Rico Amado, sob a presidência do Professor Fábio Augusto Dornelles do Amaral. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
2. Henara Lillian Costa Murray: Aprovado
3. Franco Dani Rico Amado: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 905.700.220-53
 Documento assinado digitalmente
FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 31/03/2022 14:01:45-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>
2. _____
CPF: 847.358.106-20
 Documento assinado digitalmente
Henara Lillian Costa Murray
Data: 31/03/2022 17:03:41-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>
3. _____
CPF: 740.896.170-49


Henrique Grinberg Mielke: 

“Somos todos iguais perante uma onda”

Laird Hamilton

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Marcelo e Stella, por sempre terem me apoiado e orientado dando todo o suporte para o meu crescimento. A todos da minha família, que acreditaram em mim e estiveram ao meu lado durante esta jornada.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o professor Dr. Fabio Augusto Dornelles do Amaral, pela oportunidade, dedicação e constante compreensão durante a realização do estudo. A professora Dra. Henara Lillian Costa Murray pela ajuda e assistência nas análises das amostras.

Aos professores, coordenação e secretaria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e pelos ensinamentos.

Aos técnicos do laboratório de usinagem, do Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) e do Centro Integrado de Análises (CIA) pela atenção e pela ajuda nas análises realizadas.

Aos amigos Thalles de Oliveira, Vinícius Teixeira, Lucas Bravo, Caio dal Coletto, Eduardo Vivan e Emílio Louzada, entre outros, pela parceria e que sempre me apoiaram nesta jornada.

Por último, não menos importante, um reconhecimento especial a Thayguara Borges, proprietário da empresa IOS Shaper Service, pela troca de experiências, por disponibilizar a fábrica para a execução dos experimentos e permitir realizar esse estudo com um tema de bastante interesse pessoal que é o universo do surfe.

RESUMO

Durante muitos anos as pranchas de surfe eram confeccionadas manualmente tornando-se peças únicas, mas com inúmeros riscos físicos e ergonômicos para a saúde do operador (*shaper*). Atualmente, com os avanços tecnológicos, as pranchas de surfe têm sido confeccionadas utilizando-se fresadoras CNC, as quais permitem um maior rendimento e replicabilidade na produção, além de diminuir os riscos para a saúde do operador. No entanto, apesar de que grande parte das pranchas de surfe atuais serem confeccionadas industrialmente, ainda há pouca informação científica a respeito da qualidade do acabamento superficial de blocos de poliestireno expandido (EPS) usinados com fresadoras CNC. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o acabamento superficial de blocos EPS usinados por uma máquina fresadora CNC destinada a confecção de pranchas de surfe. Para tal, quatro blocos de EPS de marcas e densidades diferentes foram caracterizados, usinados e foi avaliada a qualidade do acabamento superficial. A cristalinidade e a perda de massa em diferentes temperaturas foram analisadas por difração de raio-x e análise termogravimétrica, respectivamente. A fresadora CNC utilizada neste estudo contém uma ferramenta do tipo disco diamantado, sendo empregadas duas taxas de avanço: (a) 10 m/min para a parte superior (*deck*) e (b) 5 m/min para a parte inferior (*bottom*). A morfologia das amostras usinadas foi avaliada através de um microscópio eletrônico de varredura. Um microscópio confocal de varredura a laser foi utilizado para avaliar a topografia e os parâmetros de rugosidade. As características estruturais dos blocos de EPS analisados demonstram que o material usinado é facilmente moldável, não ocasionando danos na ferramenta, que exijam a sua manutenção ou reposição periódica. O uso do microscópio confocal demonstrou ser eficiente para a avaliação da qualidade do acabamento superficial de blocos de EPS usinados com fresadora CNC para a confecção de pranchas de surfe. Os blocos de maior densidade apresentaram um acabamento superficial melhor quando usinados com a taxa de avanço de 5 m/min, ao passo que o bloco de menor densidade apresentou um acabamento superficial melhor quando usinado com a taxa de avanço de 10 m/min.

Palavras-chave: Usinagem; Fresadora CNC; EPS; Pranchas de surfe; Parâmetros de rugosidade.

ABSTRACT

For many years, surfboards were made manually, becoming unique pieces, but with numerous physical and ergonomic risks for the health of the operator (shaper). Currently, with technological advances, surfboards have been made using CNC milling machines, which allows greater performance and replicability during production, in addition to reducing the risks to the health of the operator. However, despite the fact that most of the current surfboards are manufactured industrially, there is still low scientific information about the quality of the surface finish of expanded polystyrene (EPS) blanks machined by CNC milling machines. The present work aimed to evaluate the surface finish of EPS blanks machined by a CNC milling machine intended for making surfboards. For this, four EPS blanks of different brands and densities were characterized, machined and the quality of the surface finish was evaluated. Crystallinity and mass loss at different temperatures were analyzed by x-ray diffraction and thermogravimetric analysis, respectively. The CNC milling machine used in this study contains a diamond disc tool, using two feed rates: (a) 10 m/min for the deck and (b) 5 m/min for the bottom. The morphology of the machined samples was evaluated using a scanning electron microscope. A confocal laser scanning microscope was used to evaluate the topography and roughness parameters. The structural characteristics of the EPS blanks analyzed demonstrate that the machined material is easily moldable, not causing damage to the tool, which requires its maintenance or periodic replacement. The use of the confocal microscope proved to be efficient for the evaluation of the quality of the surface finish of EPS blanks machined with a CNC milling machine for the manufacture of surfboards. The higher density blanks had a better surface finish when machined at the feed rate of 5 m/min, while the lower density blank had a better surface finish when machined at the feed rate of 10 m/min.

Keywords: Machining; CNC milling; EPS; Surfboards; Roughness parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fresadora CNC operando com ferramenta do tipo disco	22
Figura 2 Diferentes modelos de disco diamantado	23
Figura 3 Diferentes modelos de ferramenta cilíndrica	23
Figura 4 Material descartado na fábrica	30
Figura 5 (A) marcação do dimensionamento de uma prancha em um bloco de EPS; (B) prancha em seu formato final	31
Figura 6 Blocos de EPS utilizados neste estudo	33
Figura 7 Ferramenta utilizada.....	34
Figura 8 Máquina CNC destinada a confecção de pranchas de surfe	35
Figura 9 Display do software Mach3 vinculado a máquina CNC.....	36
Figura 10 Alinhamento a laser.....	37
Figura 11 Sistema de fixação e suporte	38
Figura 12 Projeto da prancha no software Shape3D.....	39
Figura 13 Ferramenta utilizada como guia para extração das amostras	40
Figura 14 Exemplo de uma amostra recoberta com ouro utilizada na análise de MEV e Confocal.....	40
Figura 15 Fluxograma metodológico	41
Figura 16 Gráfico da Difração de Raio-X dos blocos	44
Figura 17 Curvas termogravimétricas dos blocos	45
Figura 18 Pranchas usinadas a partir dos blocos de EPS obtidos	46
Figura 19 Gráfico dos tempos de usinagem para cada bloco	47
Figura 20 MEV para bloco #1, TA ₁₀ (A e B) e TA ₅ (C e D)	49
Figura 21 Reconstrução topográfica do bloco #1, TA ₁₀ (A 2D e B 3D) e TA ₅ (C 2D e D 3D).....	50
Figura 22 MEV para bloco #2, TA ₁₀ (A e B) e TA ₅ (C e D)	51
Figura 23 Reconstrução topográfica do bloco #2, TA ₁₀ (A 2D e B 3D) e TA ₅ (C 2D e D 3D).....	52
Figura 24 MEV para bloco #3, TA ₁₀ (A e B) e TA ₅ (C e D)	53
Figura 25 Reconstrução topográfica do bloco #3, TA ₁₀ (A 2D e B 3D) e TA ₅ (C 2D e D 3D).....	54
Figura 26 MEV para bloco #4, TA ₁₀ (A e B) e TA ₅ (C e D)	55

Figura 27 Reconstrução topográfica do bloco #4, TA ₁₀ (A 2D e B 3D) e TA ₅ (C 2D e D 3D).....	56
Figura 28 Parâmetros de altura S _a e S _q	58
Figura 29 Parâmetros de extremidade S _p , S _v e S _z	60
Figura 30 Parâmetro híbrido S _{dq}	61
Figura 31 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #1, TA ₁₀ (A) e TA ₅ (B)	62
Figura 32 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #2, TA ₁₀ (A) e TA ₅ (B)	63
Figura 33 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #3, TA ₁₀ (A) e TA ₅ (B)	64
Figura 34 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #4, TA ₁₀ (A) e TA ₅ (B)	64
Figura 35 Espaço morfológico S _{sk} versus S _{ku} para as amostras ensaiadas.....	65
Figura 36 Cavaco gerado na usinagem dos blocos de EPS	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros de superfície em área	26
Tabela 2 Identificação dos blocos	32
Tabela 3 Dimensões da prancha.....	47
Tabela 4 Parâmetros de altura S_a e S_q	58
Tabela 5 Parâmetros de extremidade S_p , S_v e S_z	59
Tabela 6 Parâmetro híbrido S_{dq}	61
Tabela 7 Estimativa de resíduos gerados por cada bloco	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CEME-SUL	Centro de Microscopia Eletrônica do Sul
CIA	Centro Integrado de Análises
CNC	Comando Numérico Computacional
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DRX	Difração de Raio-X
EPS	Poliestireno Expandido (do inglês, <i>Expanded Polystyrene</i>)
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NR	Normas Regulamentadoras
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
TDI	Tolueno Diisocianato
TGA	Análise Termogravimétrica (do inglês, <i>Thermogravimetric Analysis</i>)
USD	Dólar americano (do inglês, <i>United States Dollar</i>)
XPS	Poliestireno Extrudado (do inglês, <i>Extruded Polystyrene</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

°	<i>Graus</i>
°C	<i>Graus Celsius</i>
μm	<i>Micrometros</i>
Å	<i>Angstrom</i>
cm	<i>Centímetros</i>
ft	<i>Pés (do inglês, feet)</i>
h	<i>Horas</i>
Hz	<i>Hertz</i>
in	<i>Polegadas (do inglês, inches)</i>
kg	<i>Quilograma</i>
kV	<i>Quilovolts</i>
L	<i>Litros</i>
m	<i>Metros</i>
mA	<i>Miliampere</i>
mg	<i>Miligrama</i>
min	<i>Minuto</i>
mL	<i>Mililitros</i>
mm	<i>Milímetro</i>
rpm	<i>Rotações por minuto</i>
s	<i>Segundo</i>
S _a	<i>Média aritmética das alturas da superfície [μm]</i>
S _{dq}	<i>Média quadrática da inclinação da superfície</i>
S _{ku}	<i>Distribuição da altura (Kurtosis)</i>
S _p	<i>Altura máxima de pico da superfície [μm]</i>
S _q	<i>Média quadrática das alturas da superfície [μm]</i>
S _{sk}	<i>Assimetria da superfície (Skewness)</i>
S _v	<i>Profundidade máxima de vale da superfície [μm]</i>
S _z	<i>Amplitude máxima da superfície [μm]</i>
TA ₁₀	<i>Taxa de avanço 10 m/min</i>
TA ₅	<i>Taxa de avanço 5 m/min</i>
W	<i>Watts</i>

θ

Ângulo de refração

λ

Comprimento de ondas dos raios-X

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Processos de Usinagem	18
2.2. Fresagem em Polímeros	19
2.3. Poliestireno Expandido (EPS)	20
2.4. Usinagem de Pranchas de Surfe	21
2.5. Desgaste da Ferramenta.....	24
2.6. Parâmetros de rugosidade	25
2.7. Cuidados com a Saúde	28
2.8. Impactos ambientais	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1. Materiais.....	32
3.1.1. Blocos de poliestireno expandido (EPS).....	32
3.1.2. Ferramenta	33
3.1.3. Máquina CNC destinada a confecção de pranchas de surfe	34
3.1.3.1. Alinhamento dos blocos	36
3.1.3.2. Fixação do bloco na máquina.....	37
3.2. Metodologia.....	38
3.2.1. Difração de Raio-X (DRX)	42
3.2.2. Análise Termogravimétrica (TGA)	42
3.2.3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	42
3.2.4. Microscópio Confocal	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Difração de Raio-X (DRX)	44
4.2. Análise Termogravimétrica (TGA).....	45
4.3. Usinagem dos blocos de EPS.....	46
4.4. Morfologia e Topografia dos blocos	48
4.5. Parâmetros de acabamento superficial	57
4.6. Geração de resíduos.....	67
5. CONCLUSÕES	69
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70

7. REFERÊNCIAS	71
7.1. Referências Nominais	71
7.2. Referências por Estrato.....	76
7.3. Referências por Qualis.....	76
7.4. Referências por Data dos Artigos	77
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	79

1. INTRODUÇÃO

A produção por processos manuais vem sendo cada vez mais substituída por processos automatizados. Isso porque, atualmente, a tecnologia está mais acessível para a maioria dos fabricantes. Na indústria de confecção de pranchas de surfe não é diferente, ao passo que a automatização aumenta a velocidade de produção e garante a replicabilidade do produto final. Os primeiros modelos de pranchas de surfe eram confeccionados de palha, rafia ou madeira. Porém, em contato com a água este material se torna altamente degradável e umedecido, aumentando seu peso, e diminuindo consideravelmente a performance do surfista. Com o avanço da ciência dos materiais e a busca por materiais resistentes e leves, a partir dos anos 1950, pranchas feitas em blocos de poliuretano (PU) e revestidas com resina e fibra de vidro marcaram uma nova era no esporte (ALMEIDA et al., 2012) ^[1].

Atualmente existe uma enorme variedade formas e comprimentos de pranchas de surfe, os quais variam de acordo com a categoria na qual o surfista se enquadra (iniciante, intermediário, avançado e profissional). Embora os termos empregados para descrever as formas de pranchas sejam difundidos mundialmente, não há um consenso sobre a divisão por comprimento. Por exemplo, segundo Lida (2020) ^[2] os principais formatos de pranchas são *fish* (comprimento entre 5' – 6'6"), *shortboards* (comprimento entre 5' – 7'), *funboards* (comprimento entre 6,5' – 9'), *gun* (comprimento entre 7' – 11,5') e *longboards* (a partir de 9'). De acordo com as informações do site SURFERTODAY (2022) ^[3] os principais formatos de prancha de surfe são *fish* (comprimento entre 5'10" – 8'0"), *shortboards* (comprimento entre 6'0" – 7'4"), *funboards* (comprimento entre 7'0" – 7'8"), *longboards* (comprimento entre 9'0" – 10'0") e *stand-up paddleboard* (10'0" – 12'0"). Embora todos esses formatos possam ser utilizados pelas diferentes categorias de surfistas, as *shortboards* são as mais populares entre surfistas intermediários, avançados e profissionais.

Como evidenciado por Oliveira (2019) ^[4], estima-se que o número de praticantes de surfe no mundo varie de 23 a 35 milhões de pessoas. O Brasil representa uma parcela de cerca de 3 milhões de pessoas. Em termos financeiros, o mercado mundial da indústria do surfe movimenta cerca de USD 22 bilhões por ano, sendo USD 4 bilhões no Brasil.

Os profissionais responsáveis pela confecção das pranchas de surfe são conhecidos como *shapers*. Durante muito tempo, pelo fato de ser um trabalho manual e altamente detalhado em relação às medidas, as pranchas tornavam-se peças únicas, suscetíveis a imprecisão e exigiam um tempo demasiadamente longo para a sua confecção. Com os avanços tecnológicos em várias áreas do conhecimento, hoje em dia existem softwares exclusivos para modelagem 3D de pranchas de surfe e máquinas que operam por Comando Numérico Computadorizado (CNC), permitindo a reprodução do modelo digital com precisão e rapidez.

Minguez et al. (2007) ^[5] realizaram uma pesquisa sobre os diferentes programas de design de pranchas de surfe existentes. Foram avaliados seis softwares específicos para a modelagem de pranchas, sendo três europeus (D.A.T. Designer XP, Shape 3D e KM Shape), um brasileiro (Surfcad), um australiano (APS 3000) e outro havaiano (KKL Professional Designer 2004). Normalmente estes programas específicos estão relacionados com fresadoras CNC para usinar o modelo previamente desenhado. Segundo os autores, dentre os programas analisados, o mais completo e vantajoso é o Shape 3D (www.shape3d.com), uma vez que a compatibilidade com outros programas e outras máquinas CNC estão asseguradas devido aos formatos de exportação.

Em vista disso, visando melhorar a produtividade na fabricação de pranchas, máquinas CNC do tipo fresadora estão sendo cada vez mais utilizadas na indústria do surfe. Atualmente existem inúmeros fabricantes, no Brasil e no mundo, que utilizam essas máquinas para a usinagem de pranchas de surfe. Assim como para os programas de design, também existem diferentes modelos, nacionais e internacionais, de fresadoras CNC destinadas à confecção de pranchas de surfe.

A fabricação de pranchas é composta de quatro etapas, são elas: dimensionamento, modelagem, laminação e polimento. No dimensionamento são especificadas as medidas da prancha, como o comprimento e o volume. Na modelagem, o bloco é usinado até atingir as dimensões definidas. Na laminação, o bloco usinado é revestido com resina e fibra de vidro, ganhando impermeabilidade e resistência. Por fim, um polimento é realizado para dar acabamento e remover qualquer imperfeição resultante da etapa anterior (SIEDERSBERGER, 2015) ^[6].

Atualmente muitos estudos têm sido reportados na literatura sobre aspectos relacionados ao desenvolvimento tecnológico de pranchas de surfe, envolvendo pesquisas com novos processos de produção (HOLLAND, 2016) [7], dinâmica estrutural (OGGIANO e PANHUIS, 2020) [8], hidrodinâmica (FALK et al., 2019; FALK et al., 2020; SHORMANN et al., 2020) [9][10][11] e laminação (MICHELENA et al., 2016) [12]. No entanto, poucos estudos têm sido reportados na literatura sobre os materiais empregados nos blocos, os parâmetros de usinagem e a utilização de máquinas fresadoras CNC destinadas a confecção de pranchas de surfe.

O presente trabalho baseia-se na etapa de modelagem dos blocos de poliestireno expandido (EPS) utilizando uma máquina CNC. O estudo partiu da necessidade de aperfeiçoar o conhecimento sobre as diferentes variações de densidade de blocos de EPS empregados na fabricação de pranchas de surfe e os efeitos da variação da taxa de avanço no produto usinado.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar o acabamento superficial de blocos de EPS usinados por uma ferramenta do tipo disco diamantado utilizando uma fresadora CNC destinada a fabricação de pranchas de surfe.

1.2. Objetivos Específicos

- i. Realizar o fresamento CNC em blocos de EPS para confecção de pranchas de surfe, examinando a vida útil da ferramenta e a influência dos parâmetros de corte no seu desgaste;
- ii. Avaliar o uso do Microscópio Confocal para a determinação da topografia dos materiais utilizados;
- iii. Analisar a influência dos parâmetros de corte utilizados no acabamento superficial dos diferentes tipos de amostras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processos de Usinagem

Dentre os processos de fabricação mecânica destaca-se a usinagem de materiais, uma vez que através dela, são confeccionados peças e elementos mecânicos com diferentes formatos, dimensões e acabamentos (MEDEIROS, 2021) [13]. De acordo com Kim et al. (2018) [14] os principais processos de usinagem são fresamento, torneamento, retificação, furação, alesagem, usinagem a laser, jato de água abrasivo, EDM (*Electric Discharge Machining*) e ECM (*Electrochemical Machining*), sendo que os mais estudados são o fresamento e o torneamento. Destaca-se que, devido a importância da usinagem de materiais no processo de fabricação mecânica, constantes melhoramentos nas máquinas operatrizes e nas ferramentas de corte surgem da necessidade de aumentar os índices de produtividade, tal como a qualidade dimensional e superficial das peças usinadas (MEDEIROS, 2021) [13].

A automatização do processo via CNC permite um controle maior sobre os parâmetros de corte, conseqüentemente, obtendo um produto com dimensões mais precisas e um acabamento de melhor qualidade. Conforme relatado por Silva (2011) [15], os parâmetros de usinagem são grandezas numéricas adaptadas ao tipo de operação a ser executada, possuindo valores definidos para o deslocamento da ferramenta, ao material consumido e o material da ferramenta.

Existem diversos estudos na literatura em relação ao processo de fresamento com diferentes materiais, como ligas metálicas (BUJ-CORRAL et al., 2012; SANTOS, 2016; KAR et al., 2020) [16][17][18], materiais à base de madeira (WEI et al., 2018; İŞLEYEN e KARAMANOĞLU, 2019) [19][20], materiais compósitos (JAAFAR et al., 2019; MEDEIROS, 2021) [21][13] e polímeros (SCHNEIDER et al., 2008; SILVA, 2011; HAFNER et al., 2016; SILVA et al., 2016; NACE et al., 2019) [22][15][23][24][25].

De acordo com Schineider et al. (2008) [22] no processo de usinagem é gerado calor pelo atrito da ferramenta com o material usinado e pela deformação dos cavacos, influenciando na qualidade do acabamento superficial. Dependendo do material, o calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e a peça pode ser dissipado de diferentes

formas. No caso da usinagem de polímeros, que apresentam uma baixa condutividade térmica em comparação com a dos metais, por exemplo, a maior parte do calor deve ser dissipada pela ferramenta. Desta forma, para obter uma boa qualidade superficial em polímeros, deve-se selecionar os parâmetros de usinagem de modo que a temperatura de corte não ultrapasse a temperatura de transição vítrea (T_g) e que os cavacos não entrem no regime visco-plástico. Hafner et al. (2016) ^[23] salienta que a qualidade da superfície usinada de um polímero depende das suas características estruturais e dos parâmetros de usinagem.

2.2. Fresagem em Polímeros

Conforme relatado por Medeiros (2021) ^[13], a fresagem é um processo de usinagem no qual a ferramenta de desbaste pode movimentar-se tangencialmente sobre a peça fixa ou a mesa de suporte pode realizar movimentos transladados com a ferramenta fixa. Independentemente de a ferramenta ou a mesa de suporte estarem fixas ou se movimentarem, tanto a velocidade de avanço como a velocidade de corte da ferramenta podem influenciar no acabamento da superfície do material usinado. Por exemplo, Schineider et al. (2008) ^[22] investigaram a influência da velocidade de avanço e da velocidade de corte da ferramenta na temperatura e no acabamento superficial dos polímeros termoplásticos poliamida e PU usinados com uma máquina fresadora CNC. Estes autores mostraram que a maior velocidade de corte da ferramenta provoca um aumento na temperatura da zona de corte, a qual foi mais acentuada para as menores velocidades de avanço. Desta forma, para minimizar a rugosidade superficial de polímeros no fresamento, os parâmetros de usinagem devem estar relacionados de forma que não ocorra deformação viscosa.

Silva (2011) ^[15] estudou a influência da velocidade de corte e da velocidade de avanço para espumas de PU com diferentes densidades utilizando uma fresadora CNC. Para este material, as espumas com menor densidade demonstraram maior dificuldade de serem usinadas, apresentando pior acabamento superficial, inclusive destruindo a integridade ao empregar uma taxa de avanço de 4 m/min. Por outro lado, as espumas de maior densidade apresentaram ótimo acabamento ao empregar uma taxa de avanço de 2 m/min.

Hafner et. al. (2016) ^[23] investigaram a qualidade da rugosidade superficial variando parâmetros do processo de fresagem CNC em espumas de PU com diferentes densidades. Segundo os autores, os fatores que influenciam nas propriedades da superfície final são a rugosidade superficial, como resultado dos parâmetros de fresagem, e a rugosidade superficial primária, como resultado da propriedade do material fresado. Também constataram que a densidade é diretamente proporcional às forças de corte, afetando a qualidade do acabamento superficial.

Silva et al. (2016) ^[24] avaliaram a qualidade de acabamento final variando parâmetros de corte no fresamento do polímero poliacetil em um centro de usinagem CNC. Em decorrência dos resultados obtidos, estes autores comprovaram que o aumento da rotação da ferramenta, e conseqüentemente, o aumento da velocidade de corte, provoca uma diminuição da rugosidade superficial, assim como a velocidade de avanço promove o aumento da rugosidade superficial.

2.3. Poliestireno Expandido (EPS)

O poliestireno (PS) é obtido a partir da polimerização do monômero estireno e pela introdução de pequenas quantidades de agente de expansão, como o pentano. As pérolas que foram formadas por meio da polimerização são submetidas a vapor ou ar quente para obter EPS com a densidade necessária. Nesta reação, as pérolas se expandem em até 50 vezes o seu tamanho inicial formando grânulos de 2 a 5 mm de diâmetro claramente visíveis no produto final. Depois de expandidas, essas pérolas fundem-se e moldam-se de diversas formas resultando em uma estrutura que apresenta em seu volume até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno (SIMPSON et al., 2020; TURNER, 2020; UTTARAVALLI et al., 2020) ^{[26][27][28]}. O poliestireno extrudado (XPS) é formado quando cristais de PS, aditivos e agentes de expansão são extrudados em alta temperatura e posteriormente moldados em uma matriz. Em razão disso as células compactadas não possuem lacunas ou vazios entre elas, resultando em uma estrutura fechada com uma superfície mais lisa e uma maior densidade do que o EPS (TURNER, 2020) ^[27].

A produção de EPS aumentou consideravelmente nas últimas duas décadas devido à versatilidade de sua aplicação, como no isolamento doméstico e de eletrodomésticos, embalagens de proteção e de alimentos, peças automotivas e concreto leve (como agregado) (TURNER, 2020; UTTARAVALLI et al., 2020) [27][28]. Conforme relatado por Cunha (2018) [29], o EPS é classificado como um polímero termoplástico rígido, não tóxico, inerte, com boa estabilidade dimensional e baixo custo de produção.

2.4. Usinagem de Pranchas de Surfe

As pranchas de surfe modernas são confeccionadas a partir de blocos (*blanks*) de diferentes materiais. Por mais de 40 anos, o material mais utilizado na produção de pranchas eram os blocos feitos de espuma de PU. Contudo, restrições ambientais e de segurança foram impostas ao uso de um produto químico tóxico, chamado Tolueno Diisocianato (TDI), empregado na produção de blocos de PU. Mesmo assim, blocos de PU são comercializados e utilizados na fabricação de pranchas até hoje. Outros materiais empregados na confecção de pranchas são o EPS e o XPS, os quais possuem uma durabilidade maior do que as de PU. O XPS, por sua vez, é muito mais denso do que o EPS proporcionando um bloco mais firme e uma melhor relação resistência/peso, porém é mais difícil de trabalhar e realizar pequenos reparos e consertos (GIBSON e WARREN, 2017) [30].

Oggiano e Panhuis (2020) [8] compararam a rigidez torcional e o comportamento dinâmico entre dois modelos de pranchas de surfe de tamanho e geometria idênticas, porém fabricadas a partir de blocos de PU e EPS. De acordo com os autores, a prancha com núcleo em EPS resultou em uma menor rigidez torcional, um maior amortecimento e uma menor frequência de flexão do que a de núcleo em PU.

O uso de máquinas fresadoras CNC tem sido cada vez mais comum na indústria de fabricação de pranchas de surfe (Figura 1) e existem no mercado vários modelos e fabricantes (por exemplo, KOLTY ENGENHARIA, 2021; KOSBLANKS, S/D) [31][32]. Embora um *shaper* com experiência consiga moldar aproximadamente

uma prancha por dia (informação verbal)¹, estes equipamentos podem ser capazes de usinar 3 pranchas em uma hora, adotando como base uma jornada diária de trabalho de 8 horas, é possível produzir 24 pranchas em um dia (KOSBLANKS, S/D) [32].



Figura 1 Fresadora CNC operando com ferramenta do tipo disco

Fonte: KOSBLANKS (S/D) [32]

A Figura 2 mostra exemplos de ferramenta do tipo disco diamantado, os quais podem se diferenciar em tamanho (diâmetro), cavidades, dentes e área revestida com grão abrasivo.

¹ Informação obtida pelo autor durante um curso de fabricação manual de pranchas de surfe.



Figura 2 Diferentes modelos de disco diamantado

Fonte: KOSBLANKS (S/D) [32]

Milioli (2018) [33] propôs um conceito de uma ferramenta de corte a quente para substituir a ferramenta do tipo disco. Seu estudo é fundamentado no pretexto de que o disco abrasivo gera uma superfície irregular, produz ruídos durante a usinagem e um cavaco com acúmulo de energia estática, dificultando a limpeza do ambiente.

A Figura 3 apresenta alguns modelos de ferramentas cilíndricas revestidas com carboneto de tungstênio. Estas peças se distinguem em comprimento, diâmetro e formato da extremidade.



Figura 3 Diferentes modelos de ferramenta cilíndrica

Fonte: SHAPERS MANUFACTURES CO (2022) [34]

Ainda são poucos os estudos realizados com o objetivo de analisar o processo de usinagem em pranchas de surfe por meio do fresamento CNC. Gesser et. al. (2007) [35] utilizaram na usinagem de um bloco de PU por fresamento CNC, uma ferramenta cilíndrica com ponta esférica de 31 mm de diâmetro, com o propósito de fabricar uma prancha de surfe. Para a fresagem da espuma empregou-se uma velocidade de avanço de 20,8 m/min e uma velocidade de avanço menor de 10 m/min no desbaste da longarina central, totalizando um tempo total de usinagem de 11 minutos.

2.5. Desgaste da Ferramenta

O desgaste da ferramenta pode ser descrito como a remoção do material sólido da superfície da mesma em decorrência do movimento de deslizamento sobre a superfície de contato da peça de trabalho. Conforme destacado por Sun et al. (2020) [36], a fim de melhorar as condições de usinagem dos materiais e aumentar a produtividade, ferramentas de corte com alta dureza e resistência ao desgaste, como discos de desbaste diamantados, foram desenvolvidos. Estas ferramentas aumentam significativamente a taxa de remoção de material e devido ao tamanho dos grãos abrasivos que se projetam da matriz de ancoragem, melhoram a dissipação de calor. Ainda segundo esses autores, as ferramentas diamantadas são comumente utilizadas na usinagem de materiais não metálicos, mas não são adequados para usinagem de materiais ferrosos, uma vez que o carbono tem forte afinidade com o ferro e promove o desgaste químico.

Segundo Santos e Sales (2007) [37], pode-se distinguir o desgaste de uma ferramenta em três formas: de cratera, de flanco e de entalhe. O desgaste de cratera, geralmente, está associado às elevadas temperaturas geradas na interação cavaco-ferramenta e pode não ocorrer em alguns processos, principalmente quando são empregadas ferramentas de metal duro recobertas. Em relação ao desgaste de entalhe ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento, sendo uma forma de desgaste e não propriamente um mecanismo. Por fim, o desgaste de flanco é, geralmente, o principal limitante da vida das ferramentas de corte. Este processo decorre do

aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, sendo incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

Em pesquisas relacionadas à confecção de pranchas de surfe o desgaste da ferramenta é um tema pouco abordado, visto que, a interação metal-polímero com uma ferramenta de elevada dureza (diamante ou carboneto de tungstênio) proporciona uma vida útil extremamente alta sem causar avarias a ferramenta.

2.6. Parâmetros de rugosidade

Como destacado por Crawford et al. (2012) ^[38], a topografia aparente depende da escala utilizada, seja qual for a superfície examinada. Por exemplo, ao utilizar uma pequena escala de magnificação, a topografia é descrita em termos de “ondulação da superfície”. Por outro lado, empregando uma técnica de alta resolução, a topografia seria referida como “rugosidade da superfície”. A notação convencional para os parâmetros de rugosidade do perfil é a letra R, seguido por um subscrito identificador, ao passo que os parâmetros de superfície são representados pela letra S. Além disso, para comparar e caracterizar devidamente a rugosidade em qualquer escala, os componentes topográficos necessitam ser resumidos a um ou mais parâmetros quantificáveis.

Pawlus et al. (2021) ^[39] destacam que existem muitos parâmetros de área no padrão ISO 25178-2 ^[40]. Contudo, não há necessidade de se analisar todos eles, já que alguns deles descrevem propriedades semelhantes e as informações podem ser redundantes. Isto posto, uma análise da correlação entre os parâmetros proporciona uma escolha adequada. Normalmente, são utilizados apenas os parâmetros de amplitude, mas estes por outro lado não fornecem uma caracterização completa da superfície.

Qi et al. (2015) ^[41] apresentou um estudo da correlação entre parâmetros a fim de encontrar os parâmetros mais adequados para uma caracterização. Os parâmetros de altura que descrevem as propriedades de amplitude de uma superfície estão divididos em três subgrupos: parâmetros de altura média (S_a e S_q), parâmetros de extremidades (S_z , S_p e S_v) e parâmetros estatísticos (S_{sk} e S_{ku}). Ademais, o parâmetro

híbrido S_{dq} apresenta uma combinação dos parâmetros de altura e espaciais, representando a inclinação média das asperidades. A Tabela 1 a seguir exibe mais informações sobre estes parâmetros, onde A é a área definida; x e y são os comprimentos em direções perpendiculares e z a altura da superfície (PAWLUS et al., 2021) [39].

Tabela 1 Parâmetros de superfície em área

Parâmetro	Definição	Fórmula
S_a	Média aritmética das alturas	$S_a = \frac{1}{A} \iint_A z(x, y) dx dy$
S_q	Média quadrática das alturas	$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$
S_p	Altura máxima de pico	$S_p = \max(z(x, y))$
S_v	Profundidade máxima de vale	$S_v = \min(z(x, y)) $
S_z	Amplitude máxima	$S_z = S_p + S_v$
S_{sk}	Assimetria da superfície (Skewness)	$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left(\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right)$
S_{ku}	Distribuição da altura (Kurtosis)	$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left(\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right)$
S_{dq}	Média quadrática da inclinação da superfície	$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$

Fonte: Adaptado de Pawlus et al. (2021) [39]

Os parâmetros de altura média S_a e S_q são reportados na literatura como sendo os principais parâmetros utilizados para se avaliar a rugosidade de uma superfície (EREIFEJ et al., 2013; PAWLUS et al., 2021) [42][39]. De acordo com Pawlus et al. (2021) [39] o parâmetro S_a é o mais utilizado em pesquisas no campo da tribologia com finalidade de aplicação industrial e está incluído no padrão ISO 25178-2 [40], embora esses autores indiquem o uso do parâmetro S_q em estudos de deformação e modelagem de superfícies. Crawford et al. (2012) [38] indica o uso de S_q , pelo fato de que seria mais interessante utilizar o desvio padrão do que a média aritmética da

altura. Diferentes processos de usinagem afetam os valores de S_a e de S_q , como por exemplo o uso de sinterização a laser em ligas de metais (GOCKEL et al., 2019; CHARLES et al., 2019) [43][44], ou processo de lixamento em madeira (LUO et al., 2020) [45].

Os valores de S_a e S_q variam em função do material e do processo de usinagem. No entanto, quanto maiores forem os valores desses parâmetros, maior é a rugosidade da superfície analisada. Por exemplo, Silva et al. (2019) [46] utilizou do parâmetro S_a para avaliar a rugosidade superficial da liga AISI 4340 no processo de retificação. Buj-Corral et al. (2012) [16] também utilizou o mesmo parâmetro S_a para analisar a qualidade superficial de uma liga de aço no processo de fresagem com uma ferramenta de ponta esférica.

De acordo com Pawlus et al. (2021) [39], os parâmetros de extremidade S_p e S_v indicam as alturas máximas de picos e vales, respectivamente, enquanto S_z corresponde ao somatório de S_p e S_v . Ou seja, S_z corresponde a amplitude máxima dos picos e vales. De acordo com Griffiths (2001) apud Campos (2016) [47] a utilização desses parâmetros ainda apresenta problemas de comparação dos dados obtidos em diferentes estudos, visto que existem diferentes definições que podem ocasionar diferentes resultados.

Segundo Farias (2009) [48], o parâmetro S_{sk} (*Skewness*) é definido como a assimetria dos desvios da superfície sobre o plano médio. Ou seja, o parâmetro S_{sk} descreve efetivamente o formato da distribuição das alturas da topografia. Para uma superfície com distribuição simétrica (distribuição Gaussiana), o valor do parâmetro S_{sk} é igual a zero. Para uma distribuição assimétrica, seu valor pode ser negativo ou positivo, indicando a presença de mais vales ou mais picos, respectivamente.

Conforme descrição feita por Liang et al. (2019) [49] o parâmetro S_{ku} (*Kurtosis*) fornece informações sobre a distribuição dos picos acima e abaixo da linha média, quantificando o grau de achatamento ou de afinamento da distribuição topográfica. Uma superfície com uma distribuição perfeitamente aleatória possui valor de S_{ku} igual a três, enquanto superfícies irregulares (*bumpy*) e superfícies pontiagudas (*spiky*) possuem valor de S_{ku} menor e maior do que três, respectivamente.

Os parâmetros S_{ku} e S_{sk} são normalmente utilizados em conjunto na literatura para caracterizar o aspecto de distribuição da altura de uma superfície (KUNDRAK et al., 2008; FARIAS 2009; SILVA et al., 2019; PAWLUS et al., 2021) ^{[50][48][46][39]}.

Conforme descrito por Pawlus et al. (2021) ^[39] o parâmetro híbrido S_{dq} representa a média quadrática da inclinação da superfície. Este parâmetro combina informações de amplitude e distribuição de picos e vales, podendo ser utilizado para avaliar a anisotropia da superfície. À medida que o valor do parâmetro S_{dq} aumenta, indica uma superfície mais acentuadamente inclinada. Uma alta inclinação da superfície corresponde a alta capacidade da superfície para deformação plástica.

De acordo com Borysenko et al. (2021) ^[51], os parâmetros de altura média e de extremidade contêm informações sobre a amplitude, mas não sobre a forma da rugosidade da superfície. Assim, para caracterizar a forma da rugosidade da superfície, é utilizada a curva de Abbott-Firestone. Uma superfície com uma boa relação de apoio deve ter a maior quantidade de material próximo a linha média do perfil de rugosidade. De acordo com Pawlus et al. (2020) ^[52] a curva de razão de área de material (*areal material ratio curve*) apresenta a distribuição cumulativa das ordenadas, sendo que o eixo horizontal indica a relação de apoio e o eixo vertical apresenta a amplitude máxima da superfície.

2.7. Cuidados com a Saúde

As espumas utilizadas nos blocos de pranchas de surfe contêm compostos de polímeros reativos finos que provocam irritação no corpo e, em alguns casos, a exposição a longo prazo pode levar a complicações na saúde. O bloco ao ser usinado, seja de modo manual ou automatizado, libera pequenas partículas de poliuretano ou espumas de poliestireno no ar circundante que, se inaladas, podem se alojar nas vias respiratórias causando doenças respiratórias ou inflamação das vias aéreas (GIBSON e WARREN, 2017) ^[30].

Stival (2018) ^[53] conduziu uma pesquisa qualitativa e quantitativa dos riscos físicos e ergonômicos decorrentes da fabricação de pranchas de surfe. Para isso, foram analisados dois locais da mesma fábrica, uma sala para confecção manual e

uma sala com máquina CNC. Dentre os riscos físicos foram avaliados ruídos, calor e iluminação. Este autor constatou que a análise de calor do ambiente deve-se encontrar dentro do padrão aceitável da NR-15. Seguindo, os locais devem apresentar níveis de ruído dentro do aceitável pela NR-15. Ainda, para uma iluminação adequada é necessário um enquadramento mínimo de 300 lux conforme a NBR8995-1. Por fim, descreve a atividade do shapers na máquina CNC como “caracterizado pelo trabalho em pé com uma leve inclinação do tronco, os braços e antebraços flexionados, postura estática repetitiva e uma carga moderada aplicável a tarefa (STIVAL, 2018) [53]”.

Gibson e Warren (2017) [30] entrevistaram 36 pessoas diretamente envolvidas na confecção de pranchas na Austrália, Havaí e Califórnia por mais de meia década e constataram que a asma e problemas respiratórios eram comuns entre os entrevistados, considerando o resultado da exposição frequente a fumos liberados por resinas, catalisadores e acetonas.

2.8. Impactos ambientais

Em uma fábrica de pranchas de surfe de pequeno porte, Grijó e Prim (2015) [54] realizaram uma análise quanto a geração de resíduos envolvidos no processo de confecção de pranchas. Estabeleceram como um referencial médio que para uma prancha produzida manualmente são gerados cerca de 7 kg de material descartado. Os rejeitos provenientes da confecção de pranchas são tóxicos, perfurocortantes, possuem baixa densidade e ocupam um grande volume em lixões ou aterros.

Segundo informações apresentadas por Grijó e Prim (2015) [54], cerca de 46% do bloco original é descartado durante o processo de usinagem. Esta variação depende do tamanho do bloco a ser usinado e do projeto da prancha. A seguir, na Figura 4, é apresentado o pátio da fábrica onde foram realizados os experimentos no presente estudo. Vale destacar que a fábrica direciona este material descartado para a reciclagem.



Figura 4 Material descartado na fábrica

Fonte: O Autor

Na Figura 5 pode-se visualizar a marcação do dimensionamento de uma prancha em um bloco de EPS (Figura 5A), e em seguida, a prancha em seu formato final evidenciando os resíduos gerados pela produção (Figura 5B).

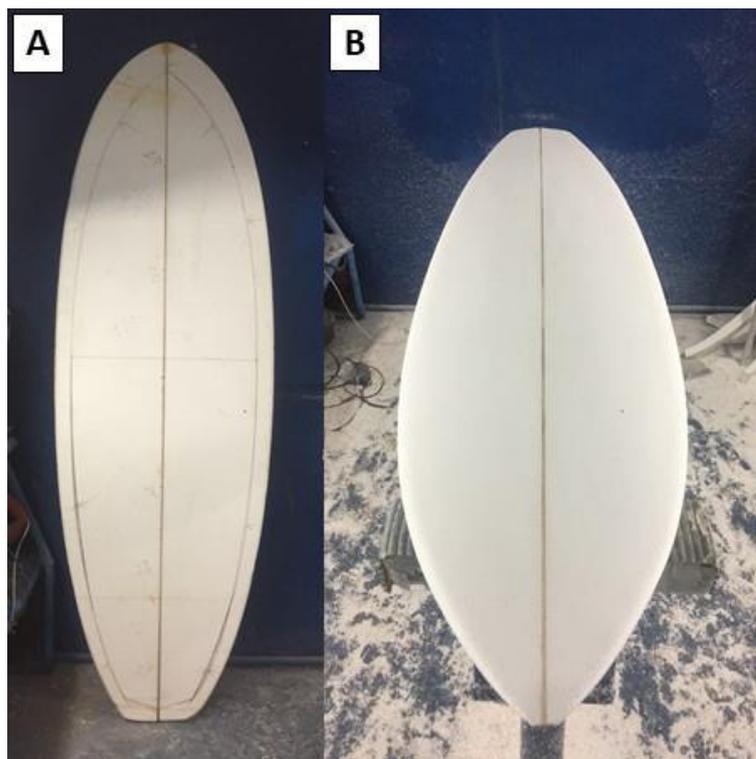


Figura 5 (A) marcação do dimensionamento de uma prancha em um bloco de EPS; (B) prancha em seu formato final

Fonte: O Autor

Os polímeros podem ser descartados em aterros, incinerados ou reciclados, sendo reciclagem a melhor alternativa. O poliuretano é um material inflamável e sua queima produz uma chama tóxica, assim, a incineração não é uma opção adequada (VARTIAINEN, 2018) [55]. O PU e EPS são materiais recicláveis, entretanto os procedimentos são complexos e demandam uma logística reversa eficiente, o que dificulta a implementação da reciclagem destes materiais (GRIJÓ e PRIM, 2015) [54].

Turner (2020) [27] aborda os impactos de resíduos de PS, na forma de EPS ou XPS, no ambiente marinho. Em virtude das propriedades do material os resíduos são prontamente gerados, dispersos e fragmentados no ambiente. No oceano, os detritos são sujeitos ao transporte pelo vento e fragmentação via degradação fotolítica. A ingestão de EPS e XPS já foi documentada em uma variedade de animais marinhos, principalmente aqueles que se alimentam na superfície do mar ou utilizam o material como habitat. Devido à dificuldade de se recuperar os resíduos de PS constituintes do lixo marinho, os meios para reduzir sua presença e impacto ambiental dependerão da modificação das práticas atuais de armazenando e descarte, e desenvolvimento de alternativas mais duráveis e sustentáveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados, a metodologia empregada na pesquisa e a descrição dos parâmetros de usinagem.

3.1. Materiais

Os blocos foram obtidos e usinados na fábrica IOS Shaper Service, localizada na cidade de Ilhéus, Bahia, Brasil. Trata-se de uma pequena fábrica, no qual o próprio proprietário é o operador da máquina CNC. Em média a fábrica produz em torno de 50 a 60 pranchas por mês. Após a usinagem dos blocos, os processos de laminação e polimento são realizados por *shapers* locais.

3.1.1. Blocos de poliestireno expandido (EPS)

Para o presente estudo foram adquiridos quatro blocos de EPS de marcas diferentes, expostos na Figura 6. Dentre as densidades disponíveis no mercado, foram selecionados três blocos com densidade nominal de 32 kg/m³ e um bloco de densidade nominal de 26 kg/m³, como mostra a Tabela 2. As dimensões do bloco são expressas em comprimento, largura e espessura.

Tabela 2 Identificação dos blocos

Marca	Identificação	Dimensões do bloco (cm)	Dimensões do bloco (ft/in)	Densidade (kg/m ³)
A	#1	195,6 x 58,4 x 8,41	6'5" x 23" x 3 5/16"	32
B	#2	203,2 x 58,4 x 8,73	6'8" x 23" x 3 7/16"	32
C	#3	193,0 x 53,3 x 7,62	6'4" x 21" x 3"	32
D	#4	193,0 x 53,3 x 7,78	6'4" x 21" x 3 1/16"	26

Fonte: Elaborado pelo Autor



Figura 6 Blocos de EPS utilizados neste estudo

Fonte: O Autor

3.1.2. Ferramenta

A Figura 7 exibe a ferramenta do tipo disco diamantado empregada nas usinagens para o presente trabalho. O disco possui um diâmetro de 25,4 cm (10 in) e é revestido por partículas de diamante. Esta ferramenta apresenta vantagens como um acabamento de corte mais limpo e preciso, maior eficiência, produtividade aprimorada, além de possuir uma vida útil duradoura (SHAPERS MANUFACTURES CO.,2022) [34].

A geometria circular da ferramenta, aliada ao corte perpendicular, permite que a ferramenta percorra toda a extensão da prancha incluindo as bordas (*rails*), tornando este o grande diferencial em relação à ferramenta do tipo cilíndrica.



Figura 7 Ferramenta utilizada

Fonte: O Autor

3.1.3. Máquina CNC destinada a confecção de pranchas de surfe

Os blocos de EPS foram usinados em uma máquina fresadora CNC projetada para a confecção de pranchas de surfe da marca Kosblanks, apresentada na Figura 8. Esta máquina é equipada com uma fresadora de alta frequência da marca Tecmaf, modelo AFT 01832, potência nominal de 2900 W, frequência nominal de 300 Hz, operando a 8600 rpm e um disco diamantado de 10 polegadas.

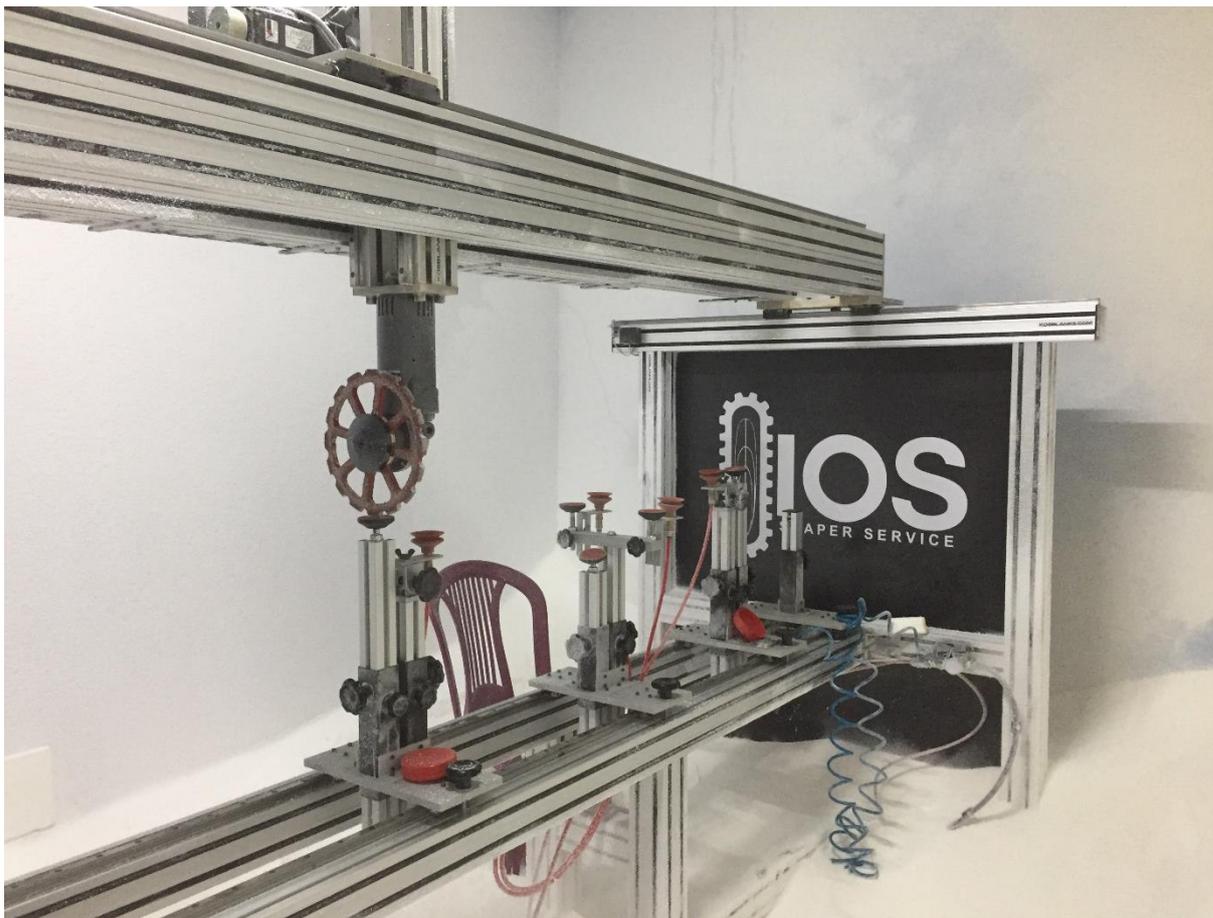


Figura 8 Máquina CNC destinada a confecção de pranchas de surfe

Fonte: O Autor

O aplicativo Shape 3D possui um algoritmo de trajetórias de corte que calcula a malha multifacetada de aproximação para o arquivo de usinagem. O arquivo contendo os comandos CNC em código G é exportado para o software Mach3 vinculado a máquina CNC, seu display está ilustrado na Figura 9.

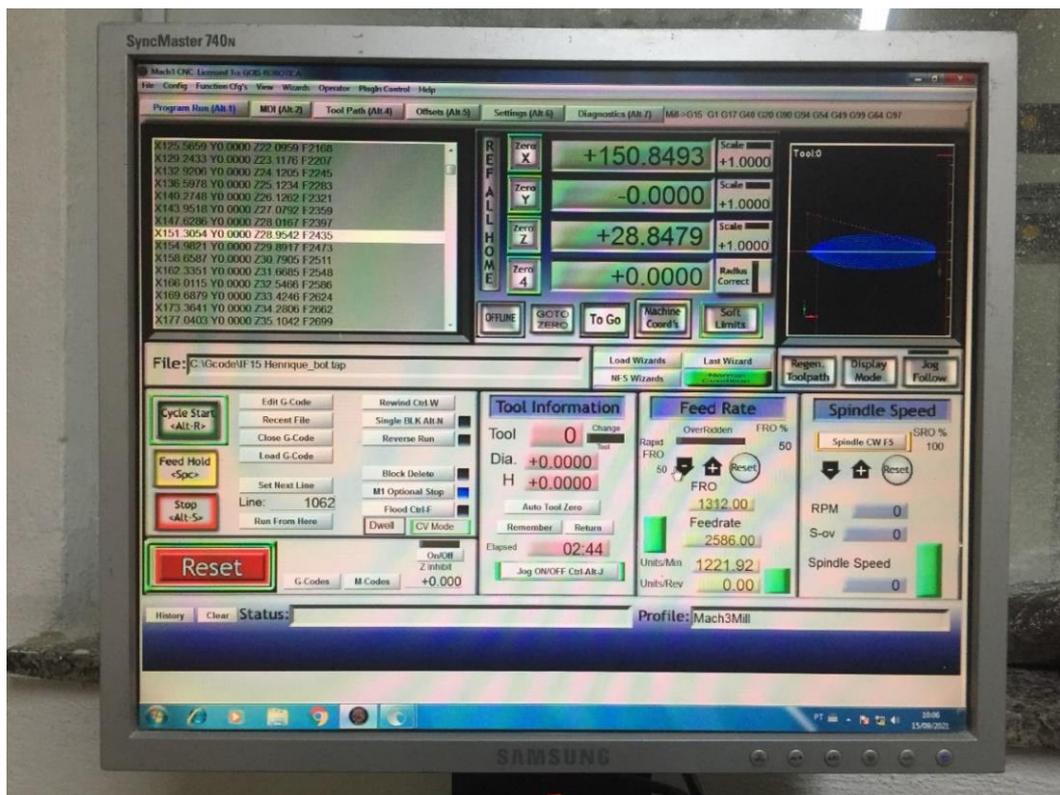


Figura 9 Display do software Mach3 vinculado a máquina CNC

Fonte: O Autor

3.1.3.1. Alinhamento dos blocos

A máquina conta com um sistema de alinhamento longitudinal a laser, como mostra a Figura 10. O alinhamento é feito manualmente pelo operador, no qual deve posicionar o bloco de forma que o feixe de laser se encontre perfeitamente ajustado sobre a longarina na face que será usinada. Após o bloco estar devidamente alinhado, prossegue-se para a etapa de fixação.



Figura 10 Alinhamento a laser

Fonte: O Autor

3.1.3.2. Fixação do bloco na máquina

A máquina conta com quatro conjuntos de apoios e ventosas para a fixação do bloco. No caso de *shortboards*, a fixação por ventosas, Figura 11, ocorre apenas nas extremidades, enquanto todos os apoios são utilizados. Devido à natureza porosa do material que impede uma sucção firme, várias camadas de fita crepe são adicionadas na área de contato das ventosas para garantir uma sucção consistente.

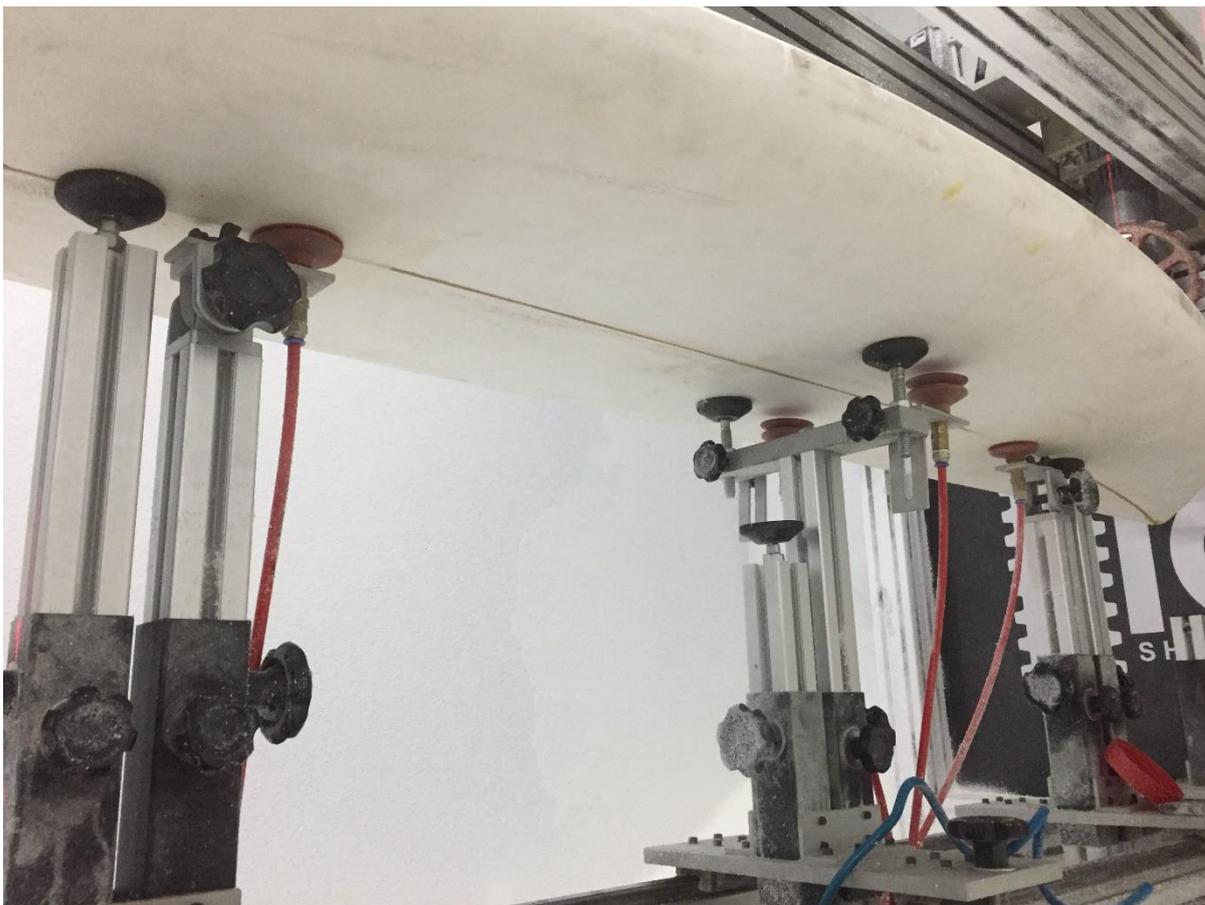


Figura 11 Sistema de fixação e suporte

Fonte: O Autor

3.2. Metodologia

O projeto de dimensionamento da prancha a ser usinada foi elaborado no software Shape3D pelo autor (Figura 12). Após a aquisição, os blocos foram usinados na fábrica IOS Shaper Service com uma máquina CNC destinada a confecção de pranchas de surfe marca Kosblanks. Todos os blocos foram usinados de forma a terem dimensões finais idênticas.

A distância entre apoios é calculada pelo software Shape 3D, assim como a trajetória de corte em código G. Ainda no programa, é feito o ajuste do projeto da prancha dentro das dimensões do bloco.

Em uma sala auxiliar, os blocos são preparados para a fixação na máquina. Pela face contrária a ser usinada, são coladas camadas de fita crepe nas posições das ventosas para assegurar uma sucção íntegra. Em seguida, posiciona-se o bloco

sobre os apoios e é realizado o alinhamento pela face a ser usinada. Com o bloco devidamente alinhado e fixado, procede-se para a etapa de usinagem.

A primeira face a ser usinada é a parte inferior da prancha (*bottom*), a seguir, o processo de alinhamento e fixação é repetido e prossegue-se para a usinagem da parte superior (*deck*). Dado que o bloco deve possuir dimensões maiores do que o de projeto, o excedente é serrado. Desta porção sobressalente de cada bloco, foram obtidas as amostras para as análises de Difração de Raio-X (DRX) e Análise Termogravimétrica (TGA). Para o DRX, cortou-se um fragmento de 10 x 10 mm. Para o TGA, uma porção do material foi moída até alcançar uma quantidade de 20 mg.

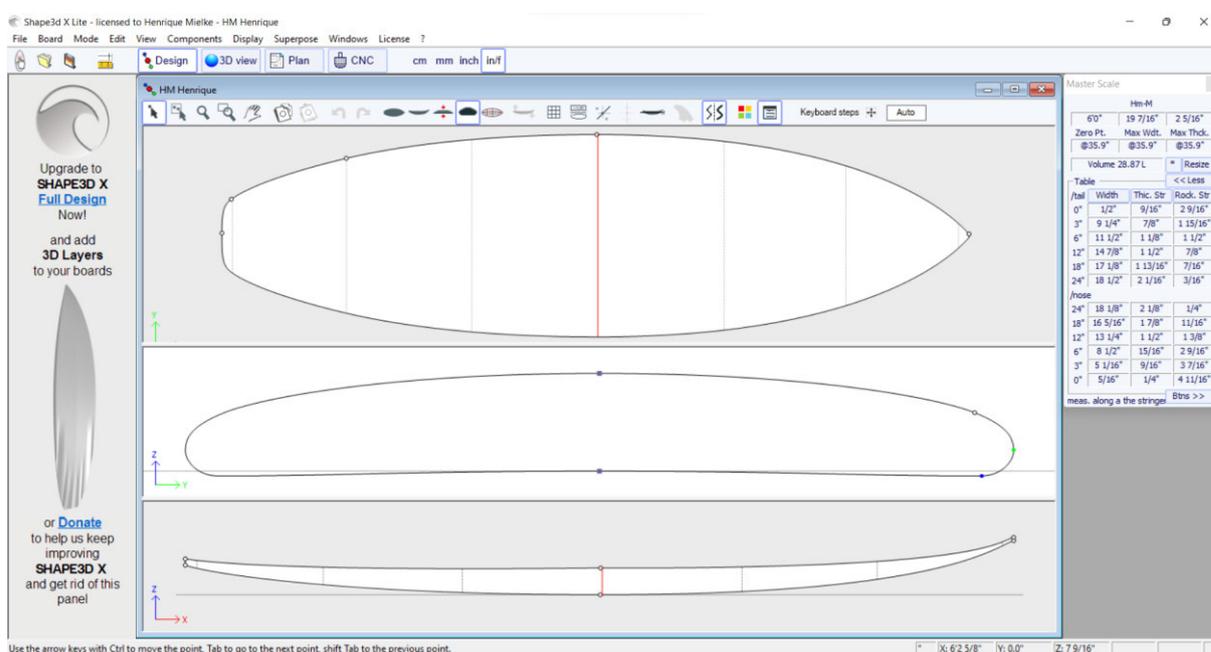


Figura 12 Projeto da prancha no software Shape3D

Fonte: O Autor

A fim de avaliar a influência do avanço na qualidade superficial da usinagem, empregou-se uma taxa de avanço de 5 m/min (50%, TA_5) no *bottom* e uma taxa de avanço de 10 m/min (100%, TA_{10}) no *deck*. Trata-se de uma taxa de avanço pois a velocidade é variável durante a usinagem, com taxa maior na parte central e menor nas extremidades (bico e rabeta).

Devido à dimensão da prancha usinada ser incompatível com o tamanho da área de análise dos microscópios, elaborou-se uma ferramenta para ser utilizada como guia na extração de corpos de prova, Figura 13. Foram extraídos quatro corpos

de prova, dois localizados a 60,9 cm (24 in) da rabeta e dois a 60,9 cm (24 in) do bico, a uma distância de 7,6 cm (3 in) da longarina e de 5,1 cm (2 in) de diâmetro.



Figura 13 Ferramenta utilizada como guia para extração das amostras

Fonte: O Autor

Para as análises de MEV e Confocal, as amostras tiveram que ser ainda mais reduzidas, para 10 mm x 20 mm, conforme mostra a Figura 14.



Figura 14 Exemplo de uma amostra recoberta com ouro utilizada na análise de MEV e Confocal

Fonte: O Autor

A seguir, a Figura 15 apresenta o fluxograma do presente trabalho mostrando simplificadamente a metodologia aplicada.

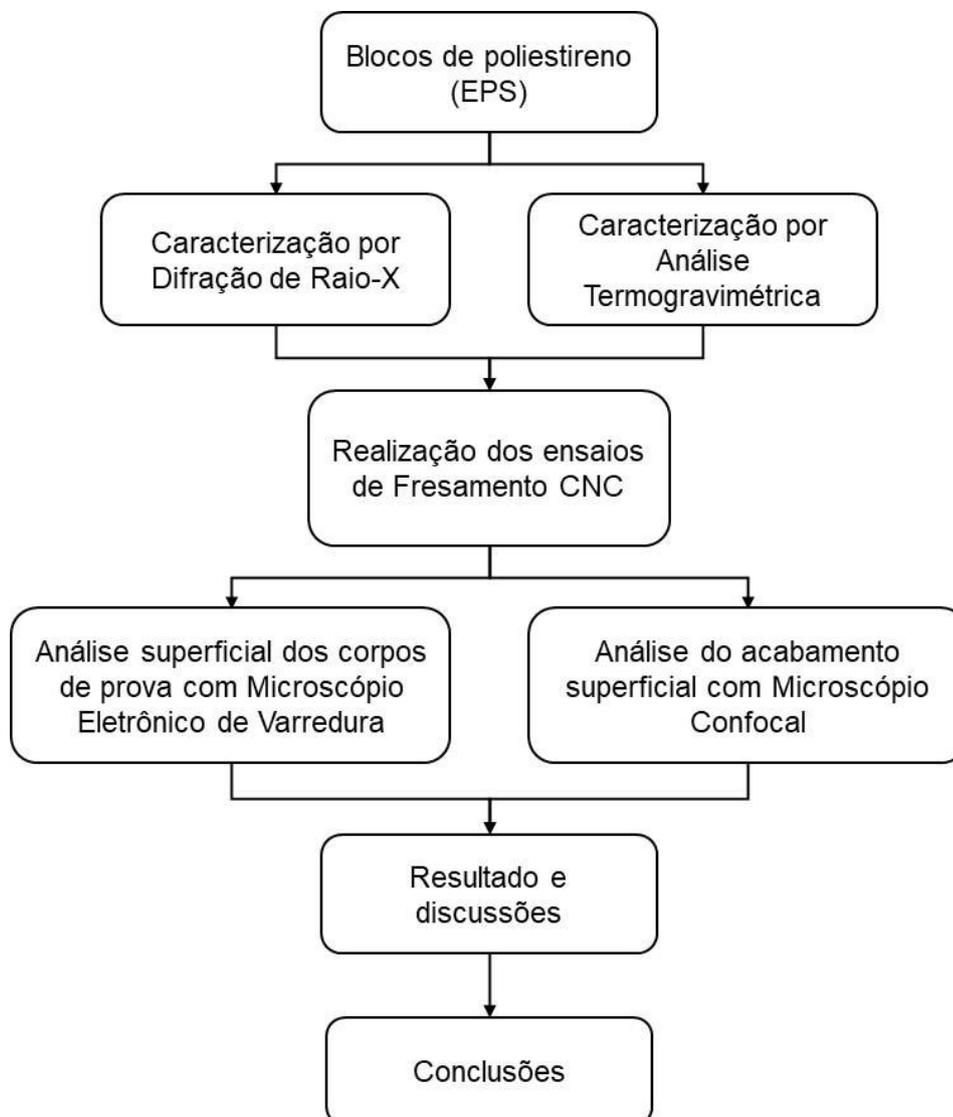


Figura 15 Fluxograma metodológico

Fonte: Elaborado pelo Autor

Todos os ensaios realizados neste trabalho foram efetuados em laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. As análises de DRX, MEV e Confocal foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL). A análise de TGA foi feita no Centro Integrado de Análises (CIA).

3.2.1. Difração de Raio-X (DRX)

Utilizou-se a técnica de Difração de Raio-X (DRX) para aferir a cristalinidade dos materiais. A análise estrutural das amostras foi feita no difratômetro de raios-x modelo D8 Advance, marca Bruker, operando com radiação de cobre ($\text{CuK}\alpha$; $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. Os padrões foram obtidos no modo contínuo, na região de 2θ compreendida entre 20° e 100° , com velocidade de $0,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ e passo de $0,02 \text{ }^\circ/\text{min}$.

3.2.2. Análise Termogravimétrica (TGA)

As propriedades térmicas foram verificadas por Análise Termogravimétrica (TGA). As amostras foram inseridas em um cadinho circular de alumina aberto e submetidas a uma taxa de aquecimento de $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, no intervalo de leitura de 20 a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ em atmosfera inerte de gás nitrogênio com fluxo de $20 \text{ mL}/\text{min}$ no equipamento analisador termogravimétrico modelo TGA-50, marca Shimadzu.

3.2.3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A morfologia das partículas foi realizada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura modelo JSM-6610LV, marca Jeol. As amostras foram preparadas pulverizando-se ouro na superfície a ser analisada com o auxílio do equipamento de *sputtering* marca Dento Vacuum, modelo Desk V.

A análise das imagens foi realizada com o auxílio do software ImageJ (ABRAMOFF et al. 2004) ^[56].

3.2.4. Microscópio Confocal

O acabamento superficial das superfícies usinadas foram analisadas utilizando um microscópio confocal invertido de varredura a laser modelo TCS SP8, marca Leica. Este equipamento concilia a microscopia ótica e a laser para formar imagens com alta

resolução espacial baseando-se na luz refletida pela amostra. Assim, é possível determinar o ponto mais alto e o ponto mais baixo e obter várias imagens da mesma região em pontos diferentes do eixo-Z. Neste ensaio foram avaliadas três amostras, recobertas com ouro, para cada bloco.

Logo depois de obtidas, as imagens pelo microscópio confocal foram analisadas com o auxílio do programa MountainsMap Premium (versão 9.0.9820). Com este software foi possível reconstruir a topografia da seção analisada em três dimensões e nivelar a superfície para obter os parâmetros de rugosidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Difração de Raio-X (DRX)

A Figura 16 indica as curvas de DRX dos quatro blocos de EPS utilizados neste estudo. Visto que o poliestireno é um polímero amorfo, a curva não apresenta nenhum pico significativo na DRX.

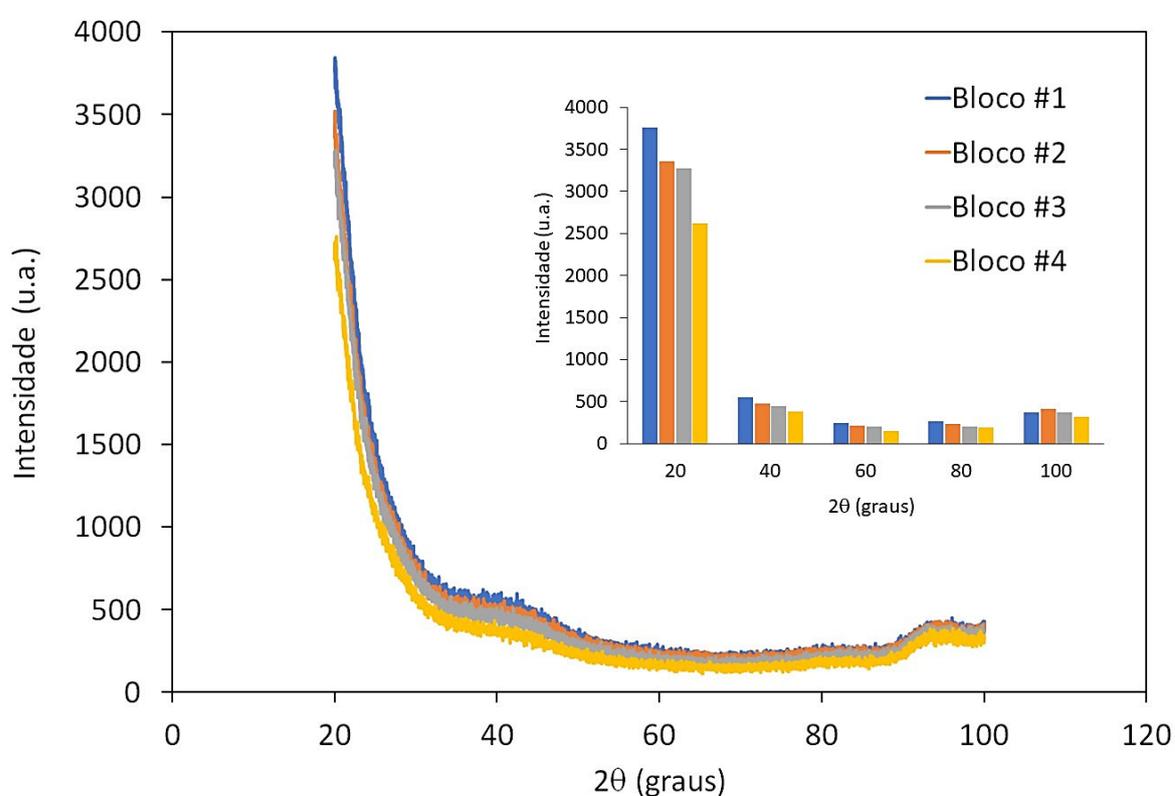


Figura 16 Gráfico da Difração de Raio-X dos blocos

Fonte: Elaborado pelo Autor

Resultados semelhantes foram obtidos e reportados por Cunha (2018) [29], o qual sugere que esse comportamento tenha sido ocasionado pelo fato de que as cadeias poliméricas estão dispostas aleatoriamente e com baixa força de interação intermolecular.

Em outros estudos, as curvas de DRX para o poliestireno apresentaram um desvio de linearidade em torno de 10° e 20° (2θ), como pode ser observado nos resultados reportados por Botan et al. (2011) [57], Botan et al. (2012) [58], Moraes et al.

(2014) [59] e Cunha (2018) [29]. No presente estudo, a análise DRX iniciou em 20° (2θ) onde são obtidos os valores máximos de intensidade reportados na literatura por Botan et al. (2011) [57], Botan et al. (2012) [58], Moraes et al. (2014) [59] e Cunha (2018) [29]. Além disso, neste estudo foi possível observar um pequeno desvio de linearidade em 40° (2θ). Esse desvio não foi observado por Botan et al. (2011) [57], Botan et al. (2012) [58] e Moraes et al. (2014) [59], provavelmente, devido a escala de intensidade utilizada por esses autores. No pico de maior intensidade e no desvio de linearidade, os valores máximos e mínimos foram obtidos para os blocos #1 e #4, respectivamente. Esse fato pode ser explicado pela diferença de densidade, uma vez que o bloco #4 é aquele que apresenta a menor densidade entre os quatro blocos analisados.

4.2. Análise Termogravimétrica (TGA)

Os resultados da análise do TGA para os quatro blocos podem ser visualizados na Figura 17. As massas aferidas de amostras variaram de 0,687 a 3,269 mg.

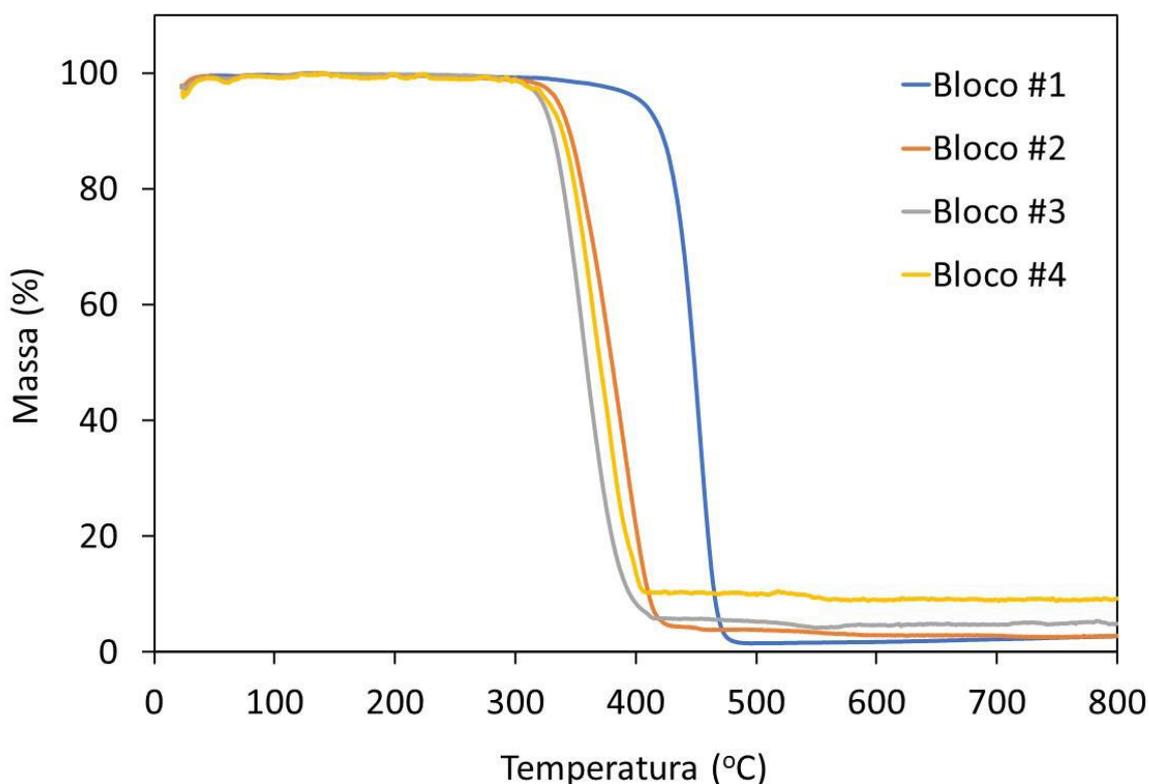


Figura 17 Curvas termogravimétricas dos blocos

Fonte: Elaborado pelo Autor

A faixa de temperatura onde ocorreu a maior perda de massa para os blocos #2, #3 e #4 foi entre 320 °C e 420 °C. Já para o bloco #1, a faixa de temperatura onde ocorreu a maior perda de massa foi entre 400 °C e 470 °C. Os valores residuais de massa para os blocos #1, #2 e #3 foram muito próximos entre si e variaram entre 2% e 5%. Já o valor residual de massa para o bloco #4 foi de 10%. Os resultados referentes as maiores perdas de massa corroboram com os resultados reportados por Botan et al. (2011) [57], Botan et al. (2012) [58], Elyseu et al. (2017) [60], Zhao et al. (2018) [61] e Jesus et al. (2019) [62]. É importante salientar que o bloco #4, que apresentou o maior valor percentual de massa residual é aquele que apresenta a menor densidade entre todos os blocos de EPS analisados neste estudo.

4.3. Usinagem dos blocos de EPS

As pranchas usinadas e suas dimensões finais estão expostas na Figura 18 e Tabela 3, respectivamente.



Figura 18 Pranchas usinadas a partir dos blocos de EPS obtidos

Fonte: O Autor

Tabela 3 Dimensões da prancha

Comprimento [cm (ft/in)]	Largura [cm (ft/in)]	Espessura [cm (ft/in)]	Volume [L]
182,9 (6'0")	49,4 (19 7/16")	5,9 (2 5/16")	28,9

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 19 apresenta os tempos observados na usinagem para 10 m/min e para 5 m/min, bem como o tempo total de cada bloco. Nota-se uma oscilação mais acentuada nos tempos de usinagem da parte inferior, onde empregou-se uma taxa de avanço de 5 m/min, do que na parte superior, onde a taxa de avanço foi de 10 m/min.

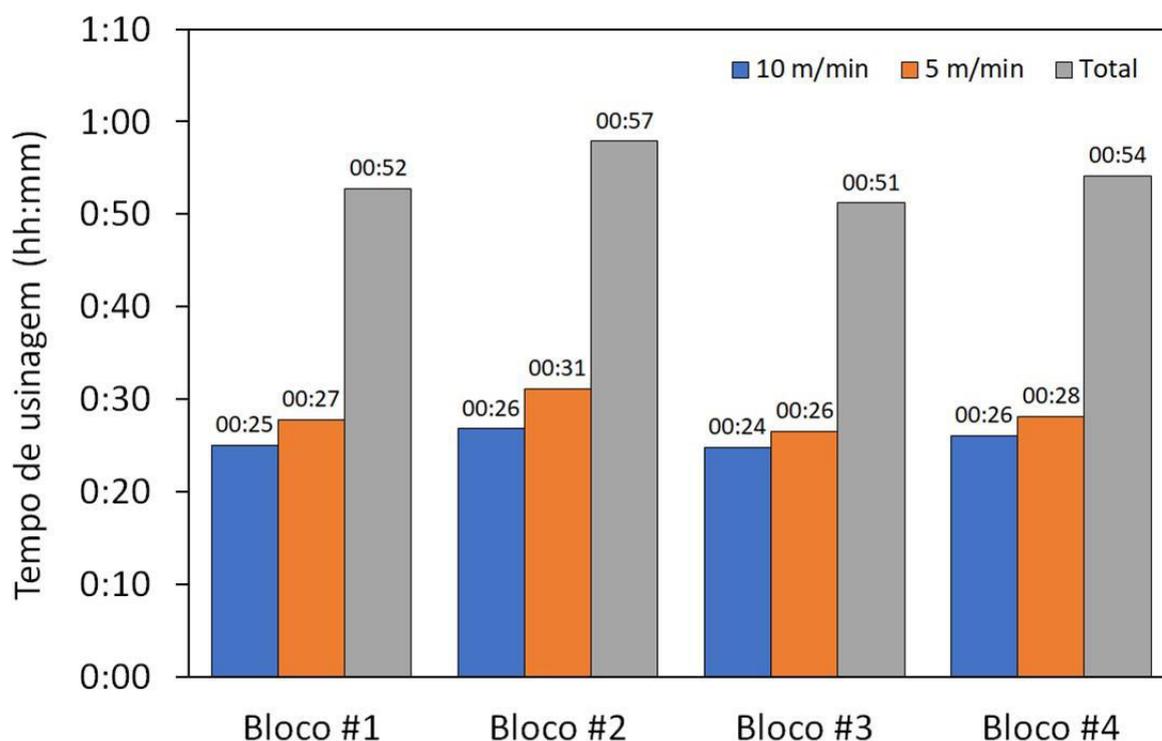


Figura 19 Gráfico dos tempos de usinagem para cada bloco

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os maiores tempos de usinagem foram observados para o bloco #2, principalmente para TA₅. Isso provavelmente ocorreu devido as dimensões de espessura e largura do bloco, que ocasionaram uma maior quantidade de passos que a ferramenta teve que percorrer até atingir a medida do projeto. Em contrapartida, o bloco #3 apresentou menores tempos de usinagem, visto que as dimensões de

espessura e largura são as menores entre os quatro blocos analisados neste estudo. Os tempos de usinagem dos blocos #1 e #4 foram intermediários e semelhantes. Dessa forma, pressupõem-se que a densidade não possui influência nos tempos de usinagem, mas sim as dimensões de espessura e largura de cada bloco.

As características estruturais dos blocos de EPS analisados demonstram que o material usinado é facilmente moldável, não ocasionando danos na ferramenta, que exijam a sua manutenção ou reposição periódica. Estima-se que a ferramenta empregada no estudo já usinou cerca de 800 pranchas entre fevereiro de 2021 e fevereiro de 2022. Assim, devido as características estruturais dos blocos, a alta durabilidade da ferramenta e o pequeno número de amostras não foi possível examinar a sua vida útil.

4.4. Morfologia e Topografia dos blocos

As Figuras 20 a 27 apresentam informações a respeito da morfologia e topografia dos quatro blocos analisados para a Amostra I do Apêndice B.

A Figura 20 mostra a micrografia por MEV para o bloco #1 em diferentes ampliações. As Figuras 20A e 20B exibem a morfologia em TA₁₀ com ampliação de x35 e x200, respectivamente. A morfologia para TA₅ está representada pelas Figuras 20C e 20D. Nas Figuras 20A e 20C é possível observar que as pérolas de EPS estão dispersas aleatoriamente na matriz polimérica.

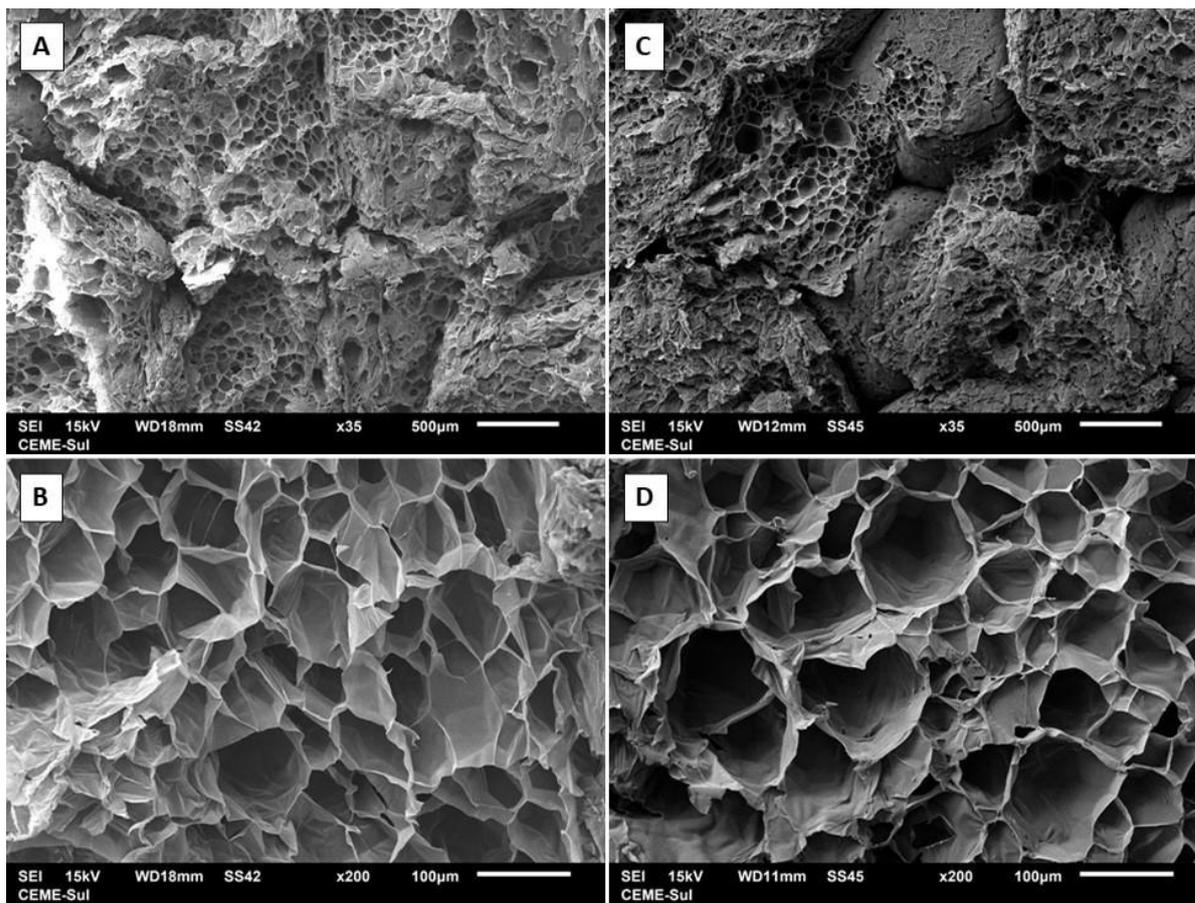


Figura 20 MEV para bloco #1, TA₁₀ (A e B) e TA₅ (C e D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras 20B e 20D permitem uma avaliação mais detalhada das cavidades derivadas do processo de usinagem para o bloco #1. Após a análise realizada com o software ImageJ, foi possível contabilizar para TA₁₀ (Figura 20B) 301 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 24,2 mm² e 0,315 mm², respectivamente. Já para TA₅ (Figura 20D), foi possível contabilizar 264 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 27,6 mm² e 0,384 mm², respectivamente.

A Figura 21 exibe a reconstrução topográfica do bloco #1 em 2D e 3D para TA₁₀ (Figura 21A e Figura 21B, respectivamente) e TA₅ (Figura 21C e Figura 21D, respectivamente). A escala de cores indica que vales estão representados pela cor azul, enquanto os picos são representados pela cor vermelha. As barras de escala das Figuras 21B e 21D possuem um histograma de distribuição de amplitude da superfície analisada.

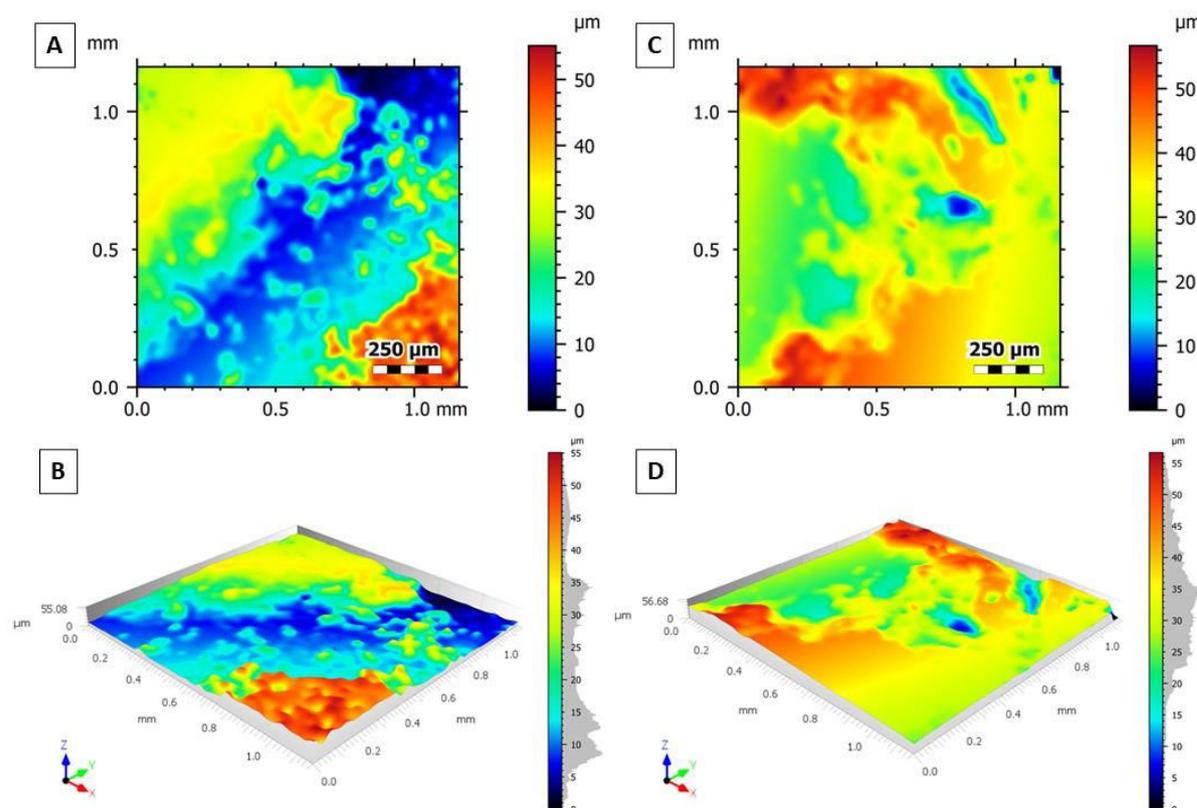


Figura 21 Reconstrução topográfica do bloco #1, TA₁₀ (A 2D e B 3D) e TA₅ (C 2D e D 3D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se pelas Figuras 21A e 21B que a taxa de avanço maior proporcionou uma superfície irregular, com a presença de muitos picos e vales, com o valor máximo da escala de 55,08 μm . Entretanto, ao empregar uma taxa de avanço menor, Figuras 21C e 21D, nota-se uma superfície mais regular, com menos picos e vales, com o valor máximo da escala de 56,68 μm .

A Figura 22 mostra a micrografia por MEV para o bloco #2 em diferentes ampliações. As Figuras 22A e 22B exibem a morfologia em TA₁₀ com ampliação de x35 e x200, respectivamente. A morfologia para TA₅ está representada pelas Figuras 22C e 22D. Nas Figuras 22A e 22C é possível observar que as pérolas de EPS estão dispersas aleatoriamente na matriz polimérica.

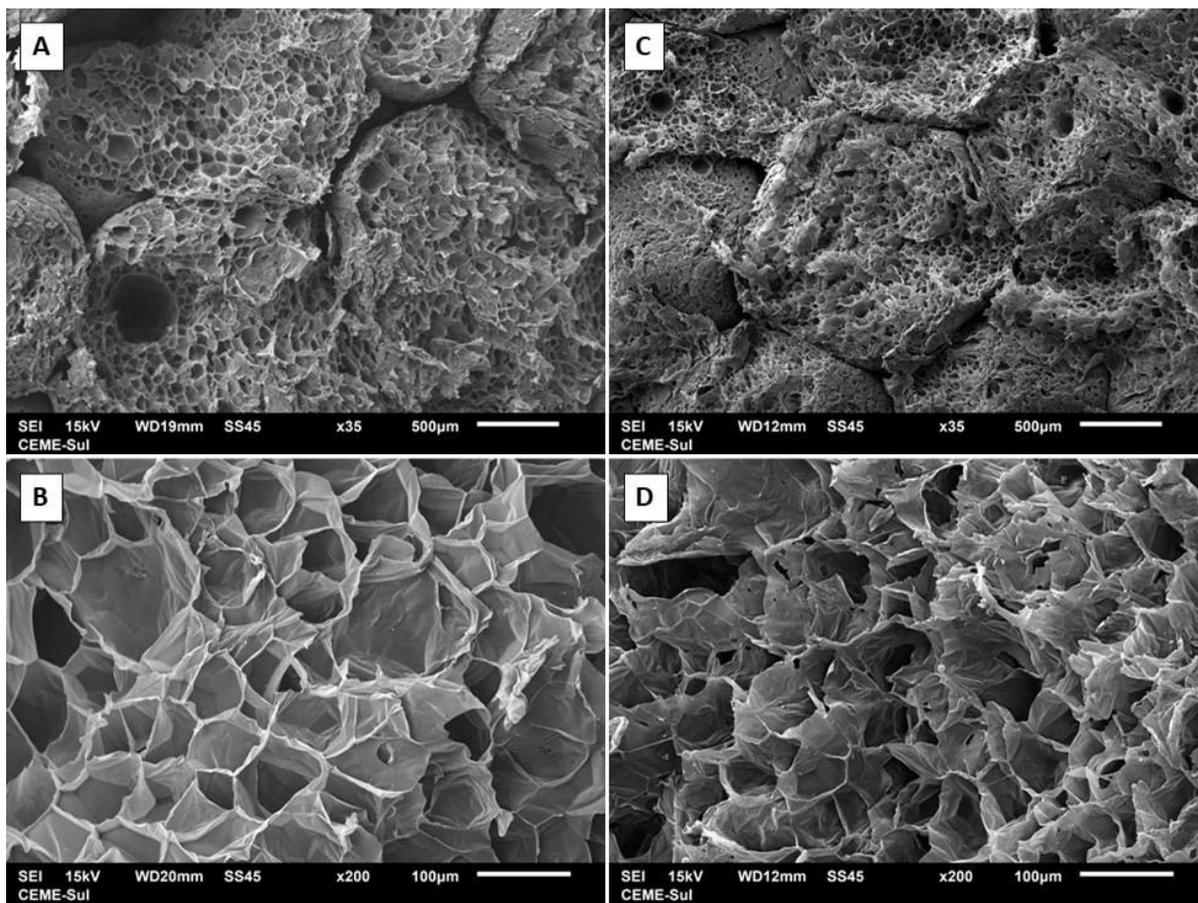


Figura 22 MEV para bloco #2, TA_{10} (A e B) e TA_5 (C e D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras 22B e 22D permitem uma avaliação mais detalhada das cavidades derivadas do processo de usinagem para o bloco #2. Após a análise realizada com o software ImageJ, foi possível contabilizar para TA_{10} (Figura 22B) 358 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 20,1 mm² e 0,369 mm², respectivamente. Já para TA_5 (Figura 22D), foi possível contabilizar 553 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 13,1 mm² e 0,322 mm², respectivamente.

A Figura 23 exibe a reconstrução topográfica do bloco #2 em 2D e 3D para TA_{10} (Figura 23A e Figura 23B, respectivamente) e TA_5 (Figura 23C e Figura 23D, respectivamente).

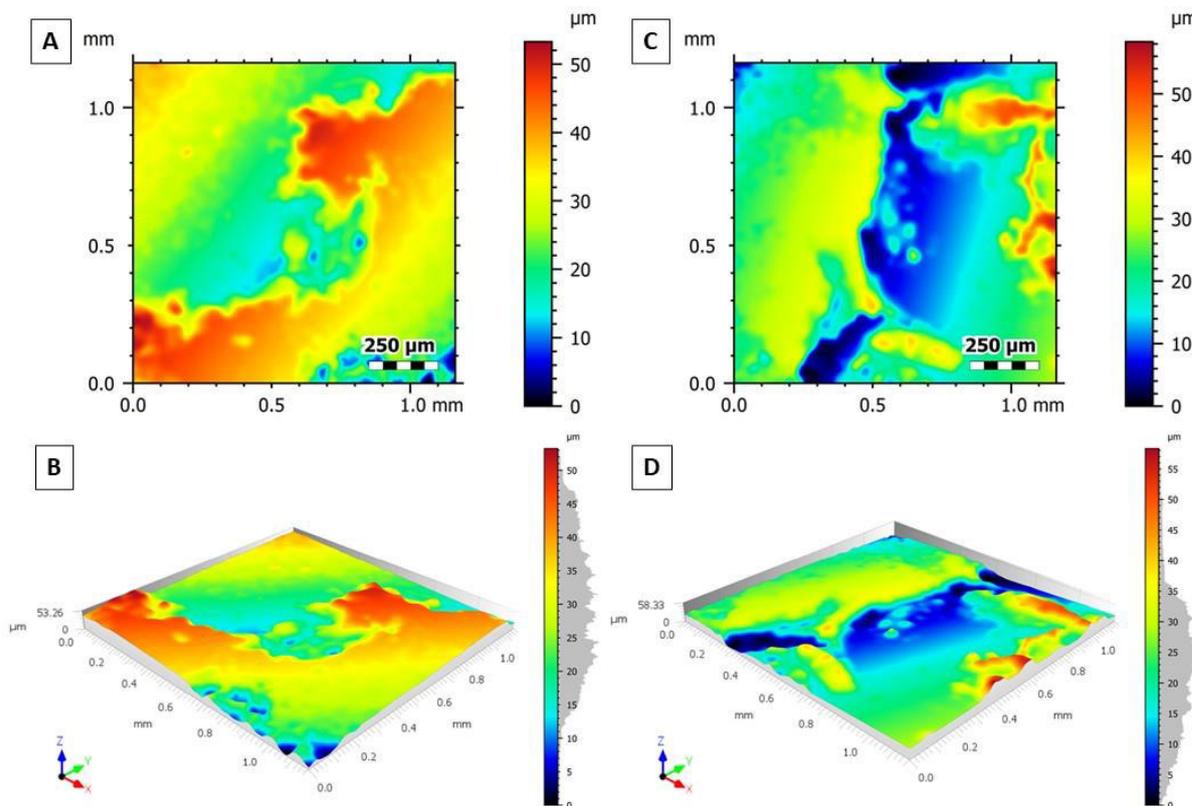


Figura 23 Reconstrução topográfica do bloco #2, TA_{10} (A 2D e B 3D) e TA_5 (C 2D e D 3D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando as Figuras 23A e 23B, observa-se que a taxa de avanço maior proporcionou uma superfície uniforme, mas com a predominância de picos em relação aos vales, com o valor máximo da escala de 53,26 μm . Ao passo que na taxa de avanço menor (Figuras 23C e 23D), embora também tenha resultado em uma superfície uniforme, ocorreu a predominância de vales em relação aos picos, com o valor máximo da escala de 58,33 μm .

A Figura 24 mostra a micrografia por MEV para o bloco #3 em diferentes ampliações. As Figuras 24A e 24B exibem a morfologia em TA_{10} com ampliação de x35 e x200, respectivamente. A morfologia para TA_5 está representada pelas Figuras 24C e 24D. Nas Figuras 24A e 24C é possível observar que as pérolas de EPS estão dispersas aleatoriamente na matriz polimérica.

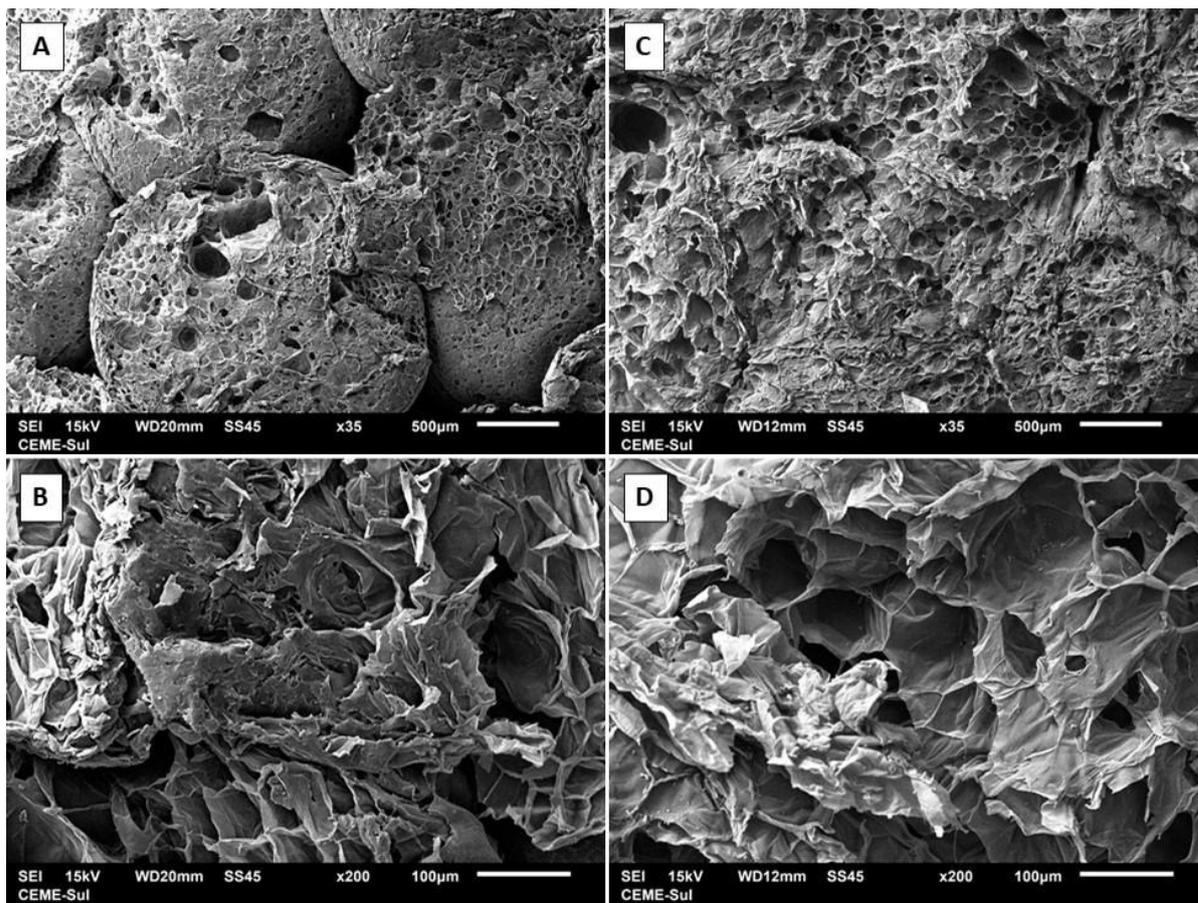


Figura 24 MEV para bloco #3, TA₁₀ (A e B) e TA₅ (C e D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras 24B e 24D permitem uma avaliação mais detalhada das cavidades derivadas do processo de usinagem para o bloco #3. Após a análise realizada com o software ImageJ, foi possível contabilizar para TA₁₀ (Figura 24B) 265 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 33,3 mm² e 0,325 mm², respectivamente. Já para TA₅ (Figura 24D), foi possível contabilizar 231 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 23,0 mm² e 0,217 mm², respectivamente.

A Figura 25 exibe a reconstrução topográfica do bloco #3 em 2D e 3D para TA₁₀ (Figura 25A e Figura 25B, respectivamente) e TA₅ (Figura 25C e Figura 25D, respectivamente).

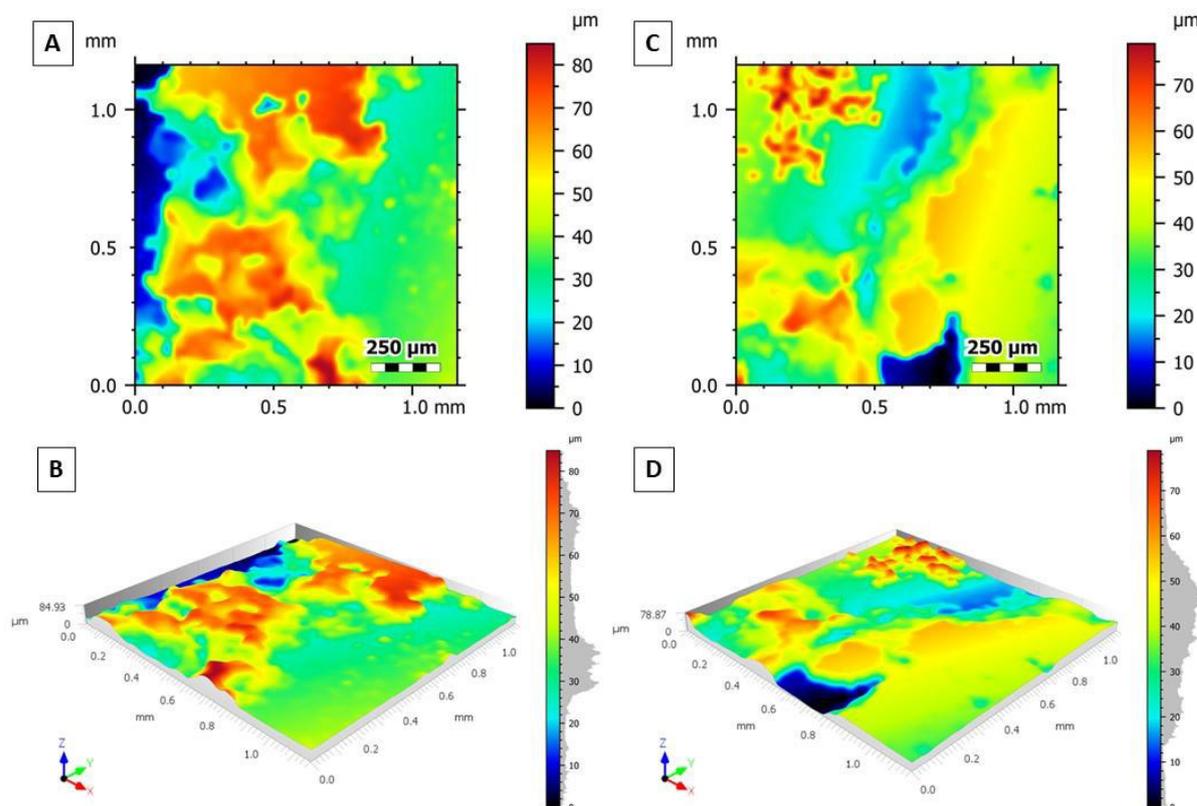


Figura 25 Reconstrução topográfica do bloco #3, TA_{10} (A 2D e B 3D) e TA_5 (C 2D e D 3D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se pelas Figuras 25A e 25B que a taxa de avanço maior proporcionou uma superfície irregular, com a presença de picos muito altos e vales muito profundos, com o valor máximo da escala de 84,93 μm . Ao passo que na taxa de avanço menor (Figuras 25C e 25D), foi possível obter uma superfície mais regular, com menos picos e o valor máximo da escala de 78,87 μm .

A Figura 26 mostra a micrografia por MEV para o bloco #4 em diferentes ampliações. As Figuras 26A e 26B exibem a morfologia em TA_{10} com ampliação de x35 e x200, respectivamente. A morfologia para TA_5 está representada pelas Figuras 26C e 26D. Nas Figuras 26A e 26C é possível observar que as pérolas de EPS estão dispersas aleatoriamente na matriz polimérica.

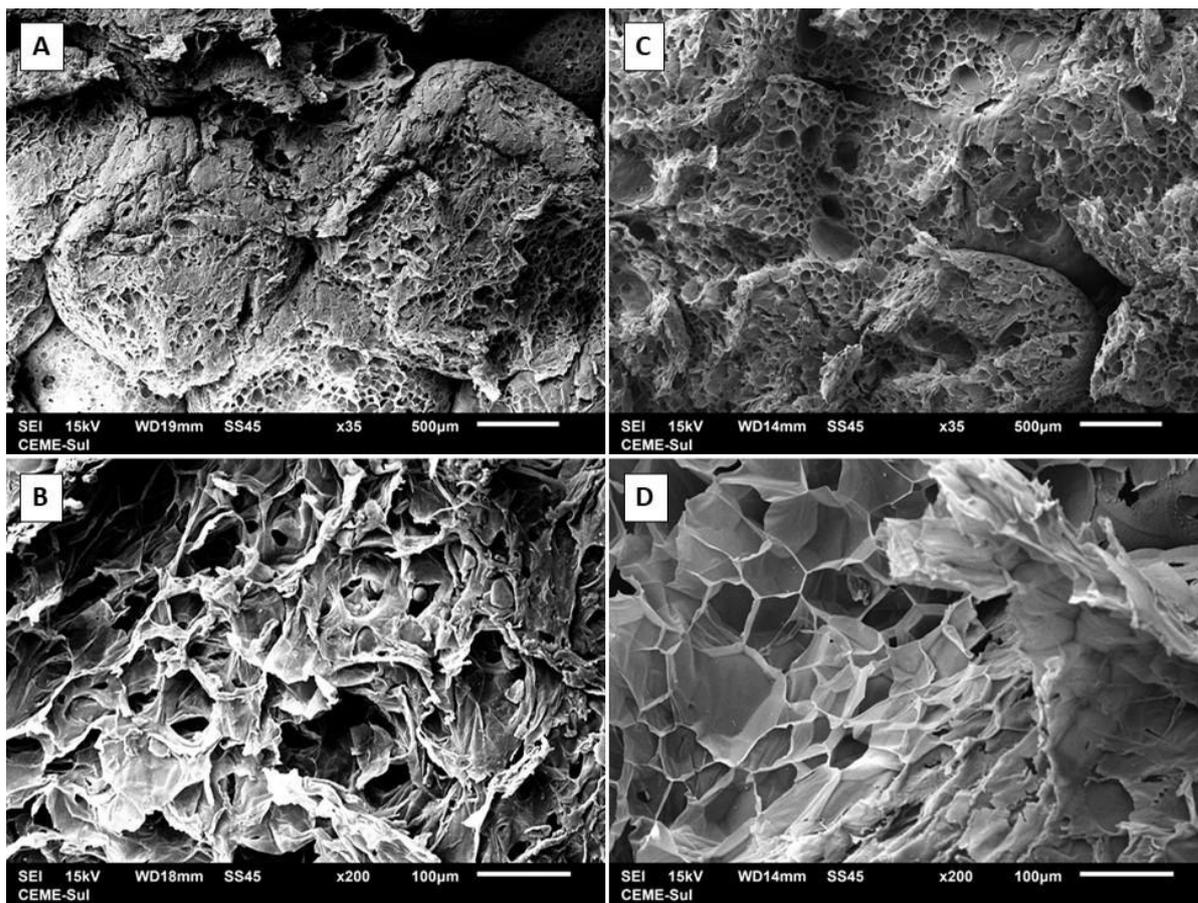


Figura 26 MEV para bloco #4, TA₁₀ (A e B) e TA₅ (C e D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras 26B e 26D permitem uma avaliação mais detalhada das cavidades derivadas do processo de usinagem para o bloco #4. Após a análise realizada com o software ImageJ, foi possível contabilizar para TA₁₀ (Figura 26B) 514 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 13,0 mm² e 0,318 mm², respectivamente. Já para TA₅ (Figura 26D), foi possível contabilizar 337 poros, sendo a média e mediana das áreas das porosidades de 20,1 mm² e 0,290 mm², respectivamente.

A Figura 27 exibe a reconstrução topográfica do bloco #4 em 2D e 3D para TA₁₀ (Figura 27A e Figura 27B, respectivamente) e TA₅ (Figura 27C e Figura 27D, respectivamente).

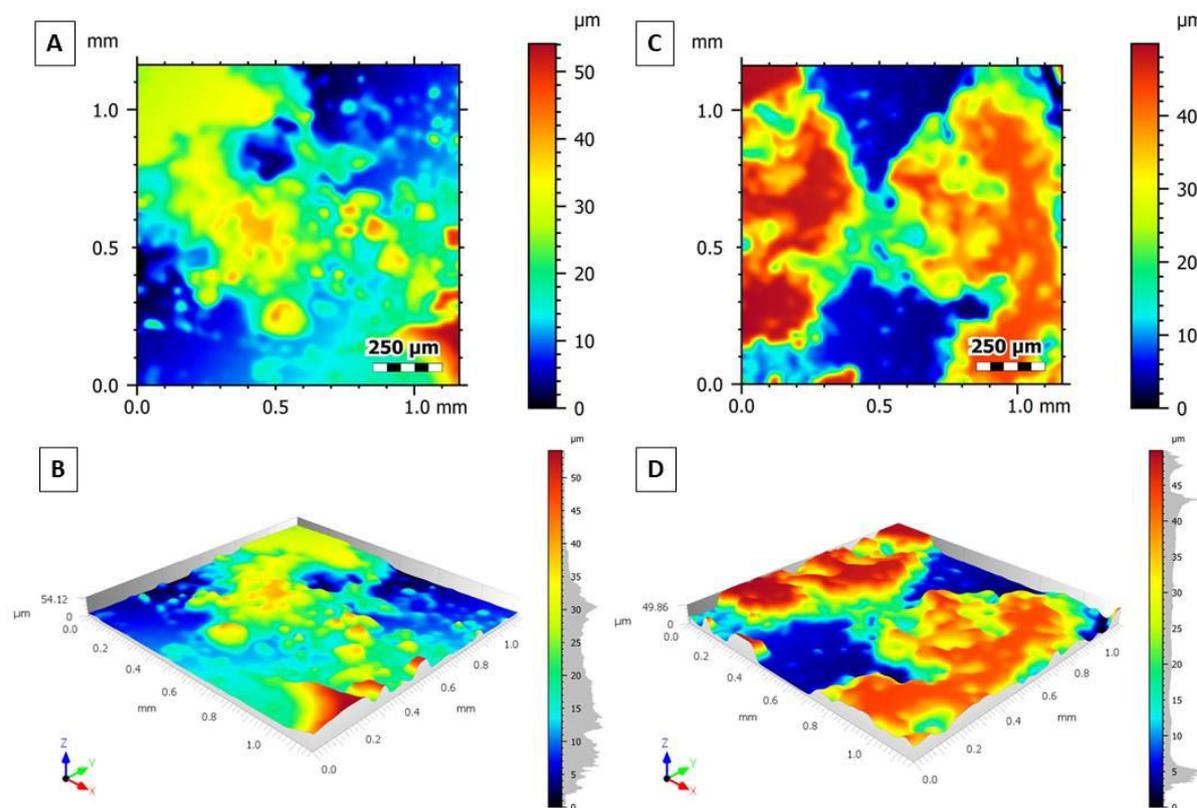


Figura 27 Reconstrução topográfica do bloco #4, TA_{10} (A 2D e B 3D) e TA_5 (C 2D e D 3D)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando a Figura 27, observa-se que, para o bloco #4, as duas taxas de avanço empregadas proporcionaram superfícies bem mais irregulares do que para os demais blocos analisados. A maior taxa de avanço (Figuras 27A e 27B) ocasionou uma superfície irregular com predominância de vales e com o valor máximo da escala de 54,12 μm . Ao passo que a menor taxa de avanço (Figuras 27C e 27D) ocasionou uma superfície irregular com muitos picos e vales, e o valor máximo de escala de 49,86 μm .

Com base nas análises das imagens de MEV pelo software ImageJ, os blocos #1 e #3 apresentaram resultados similares, com menor número de poros e maior área média em comparação com os demais blocos para as duas taxas de avanço. Por outro lado, os blocos #2 e #4 apresentaram resultados semelhantes, porém para taxas de avanço diferentes. Isto é, o bloco #2 apresentou maior número de poros para TA_5 , enquanto o bloco #4 apresentou maior número de poros em TA_{10} . Além disso, o bloco #2 apresentou maior área média das porosidades em TA_{10} e o bloco #4 apresentou maior área média para TA_5 . Considerando que um maior número de poros com área

menor poderia resultar em um melhor acabamento superficial, pelas análises das imagens de MEV pelo software ImageJ houve diferença no acabamento superficial entre os blocos analisados e para as duas taxas de avanço.

Pela análise qualitativa das imagens, MEV e confocal, foi possível observar que o melhor acabamento superficial ocorreu nos blocos com maior densidade, principalmente no bloco #2, e o pior acabamento superficial ocorreu no bloco #4. A seguir será apresentada a análise quantitativa da qualidade do acabamento superficial por meio dos parâmetros de amplitude.

4.5. Parâmetros de acabamento superficial

A Tabela 4 e a Figura 28 apresentam os parâmetros de altura S_a (Figura 28A) e S_q (Figura 28B) para os quatro blocos analisados neste estudo. Com base nas referências encontradas na literatura, pode-se constatar que os valores encontrados neste estudo são superiores aos valores reportados na literatura para outros materiais. Por exemplo, Santos (2016) ^[17] realizou um estudo sobre os efeitos de fluidos de corte no fresamento do ferro fundido nodular e constatou valores de S_a variando entre 1,37 μm e 3,58 μm . Silva et al. (2019) ^[46], utilizando diferentes fluidos de corte na retificação da liga AISI 4340 encontrou valores de S_a variando entre 0,262 μm e 0,752 μm . Neste estudo foram observados valores de S_a variando entre 6,44 μm (bloco #1, TA₅) e 8,82 μm (bloco #4, TA₅) (Tabela 4).

Comparando os dados apresentados na Tabela 4 e nas Figuras 28A e 28B observa-se um padrão bastante semelhante para os dois parâmetros de altura, embora os valores de S_q (Figura 28B) tenham sido ligeiramente superiores em relação a S_a (Figura 28A) para todos os quatro blocos analisados. Kundrak et al. (2008) ^[50] investigou o acabamento superficial da liga 16MnCr5 empregando os processos de retificação e torneamento, e relatou valores de S_q que variaram entre 0,581 μm e 1,22 μm , sendo moderadamente superiores aos valores de S_a que variaram entre 0,467 μm e 1,02 μm . Neste estudo foram observados valores de S_q variando entre 7,80 μm (bloco #1, TA₅) e 10,14 μm (bloco #3, TA₁₀) (Tabela 4).

Nota-se que, tanto para o bloco #1 como para o bloco #3 os valores de S_a e S_q foram superiores em TA_{10} em relação a TA_5 . Já para o bloco #4, observou-se uma relação inversa, onde os valores em TA_5 foram superiores em relação a TA_{10} . Tanto para S_a como para S_q os valores foram muito semelhantes entre TA_{10} e TA_5 para o bloco #2.

Tabela 4 Parâmetros de altura S_a e S_q

Parâmetro	Bloco #1		Bloco #2		Bloco #3		Bloco #4	
	10 m/min	5 m/min						
S_a (μm)	8,29	6,44	6,56	6,62	8,42	7,82	8,01	8,82
S_q (μm)	9,58	7,80	8,01	7,98	10,14	9,20	9,54	9,90

Fonte: Elaborado pelo Autor

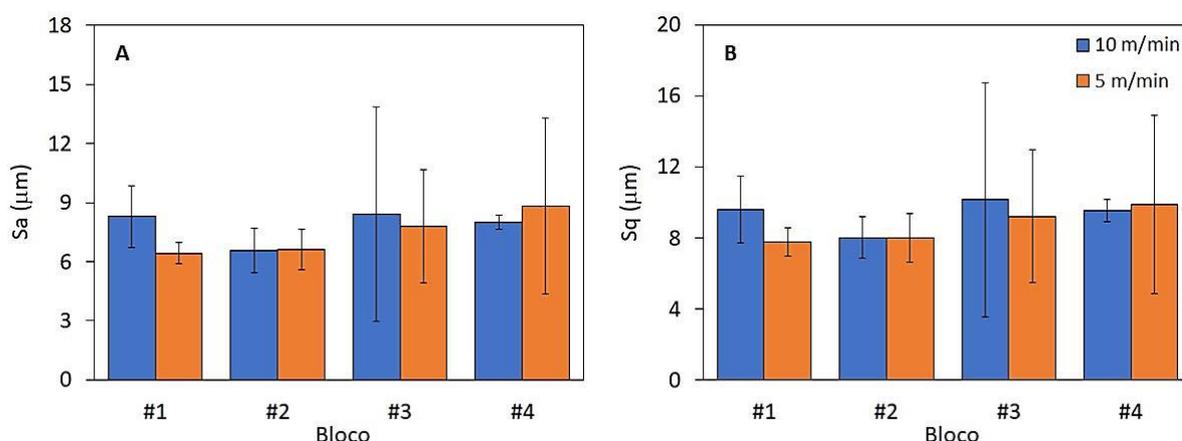


Figura 28 Parâmetros de altura S_a e S_q

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando os dados apresentados na Tabela 4 e na Figura 28A e 28B, verifica-se que os maiores e os menores valores de S_a e S_q para TA_{10} foram registrados no bloco #3 e no bloco #2, respectivamente. Já para TA_5 , os maiores e menores valores de S_a e S_q foram registrados no bloco #4 e no bloco #1, respectivamente.

Nos blocos #1 e #3, os valores de S_a (Figura 28A) e de S_q (Figura 28B) foram superiores para TA_{10} em relação a TA_5 (Tabela 4). Esse fato pode estar relacionado com as diferentes taxas de avanço utilizadas para a usinagem. Gockel et al. (2019) [43] e Charles et al. (2019) [44], analisando a rugosidade superficial de ligas de metal

sinterizadas a laser, observaram que o valor de S_a aumenta com o aumento da velocidade do avanço, obtendo uma rugosidade média maior e, conseqüentemente, uma piora na qualidade superficial. Ademais, o bloco #2 apresentou-se insuscetível as variações da taxa de avanço, além de apresentar valores de S_a (Figura 28A) e de S_q (Figura 28B) inferiores ao demais blocos, com exceção de TA_5 do bloco #1 (Tabela 4). Esses resultados sugerem que ocorreu um acabamento superficial mais uniforme no bloco #2 independentemente das taxas de avanço testadas. De forma inversa ao que foi observado no bloco #1 e no bloco #3, o bloco #4 apresentou os menores valores de S_a (Figura 28A) e S_q (Figura 28B) para TA_{10} , indicando um melhor acabamento superficial com uma taxa de avanço maior (Tabela 4). Este comportamento pode estar associado a densidade do material, uma vez que o bloco #4 apresenta a menor densidade entre os quatro blocos testados.

Conforme discutido acima, os resultados obtidos para os parâmetros de altura S_a e S_q indicam que a taxa de avanço utilizada em máquinas CNC para usinagem de pranchas de surfe tem influência no acabamento superficial de blocos de EPS, embora essa influência não ocorreu como um padrão para os quatro blocos analisados. Ou seja, a interação entre a taxa de avanço e a densidade dos blocos de EPS pode resultar em acabamentos superficiais diferentes, conforme foi constatado no bloco #4. Assim, sugere-se que maiores ou menores taxas de avanço podem ser utilizadas para blocos de EPS com menor ou maior densidade, respectivamente, resultando assim num melhor acabamento superficial.

A seguir, na Tabela 5 e na Figura 29 são apresentados os parâmetros de extremidade S_p (Figura 29A), S_v (Figura 29B) e S_z (Figura 29C).

Tabela 5 Parâmetros de extremidade S_p , S_v e S_z

Parâmetro	Bloco #1		Bloco #2		Bloco #3		Bloco #4	
	10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min
S_p (μm)	25,67	22,75	23,14	24,53	26,35	24,06	30,32	16,50
S_v (μm)	15,55	22,29	22,10	12,82	24,81	20,97	19,68	18,13
S_z (μm)	41,22	45,03	45,23	37,35	51,17	45,05	50,01	34,63

Fonte: Elaborado pelo Autor

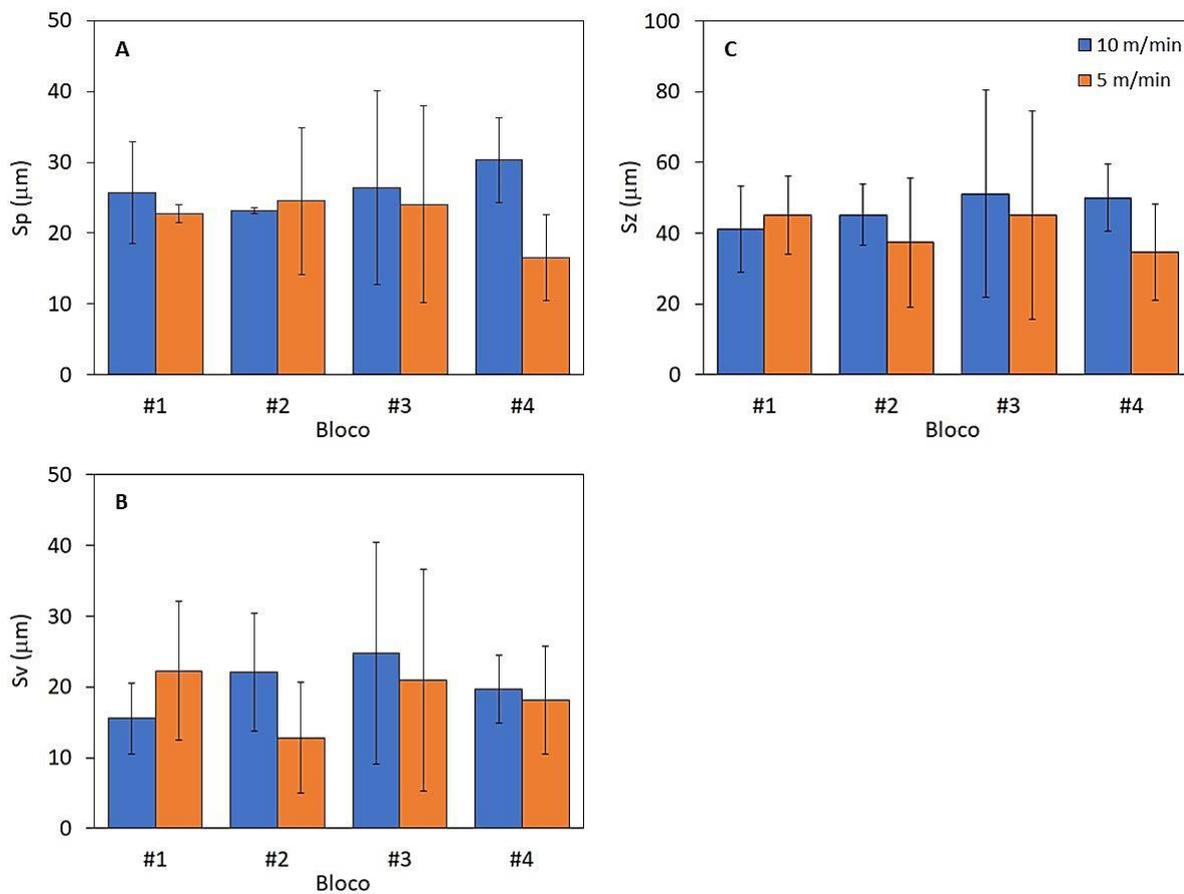


Figura 29 Parâmetros de extremidade S_p , S_v e S_z

Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao analisar os dados da Tabela 5 e as Figuras 29A e 29B, percebe-se uma alternância nos valores de S_p e S_v para TA_{10} e TA_5 , além de ficar evidente que os valores de S_p superam os valores de S_v , com exceção para o bloco #3, o qual também apresentou valores superiores para os dois parâmetros ao empregar uma taxa de avanço maior. No caso dos blocos #1 e #4 os maiores valores de S_p foram observados em TA_{10} e os maiores valores de S_v foram observados em TA_5 (Tabela 5). Resultado inverso foi observado para o bloco #2, onde o maior valor de S_p foi observado em TA_5 e o maior valor de S_v foi observado em TA_{10} . Esses resultados indicam que a maior taxa de avanço proporcionou uma maior altura de picos em relação aos vales nos blocos #1 e #4. Já para o bloco #2, esses resultados foram inversos, onde a maior taxa de avanço resultou em uma maior profundidade de vales em relação aos picos.

Todavia, uma melhor representação dos parâmetros de extremidade pode ser avaliada na Figura 29C com o parâmetro S_z , visto que este é o somatório dos picos mais altos com os vales mais profundos (PAWLUS et al., 2021) [39]. A Figura 29C

sugere que o bloco #1 apresentou uma maior uniformidade entre TA₁₀ e TA₅, dado que os valores de S_z foram muito próximos entre si. Por outro lado, o bloco #3 além de apresentar os maiores valores de S_z dentre os quatro blocos analisados neste estudo, exibiu uma maior diferença de valores entre as faces usinadas (Tabela 5).

Conforme abordado anteriormente, os parâmetros de extremidade S_p, S_v e S_z apresentam problemas de comparação de dados com outros estudos. Por exemplo, Chen et al. (2019) [63] investigaram o efeito da rugosidade superficial na usinagem a laser de diamante sintético CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e reportaram valores de S_z que variaram entre 9,41 µm e 36,95 µm. Santos (2016) [17] realizou um estudo sobre os efeitos de fluidos de corte no fresamento do ferro fundido nodular e constatou valores de S_z variando entre 17,88 µm e 63,60 µm. Em compensação, neste estudo, no processo de fresamento de blocos de EPS, foram observados valores de S_z variando entre 34,63 µm (bloco #4, TA₅) e 51,17 µm (bloco #3, TA₁₀) (Tabela 5).

Na Tabela 6 e na Figura 30 são apresentados os valores do parâmetro S_{dq} para os quatro blocos analisados neste estudo.

Tabela 6 Parâmetro híbrido S_{dq}

Parâmetro	Bloco #1		Bloco #2		Bloco #3		Bloco #4	
	10 m/min	5 m/min						
S _{dq}	0,21	0,20	0,19	0,22	0,24	0,26	0,24	0,24

Fonte: Elaborado pelo Autor

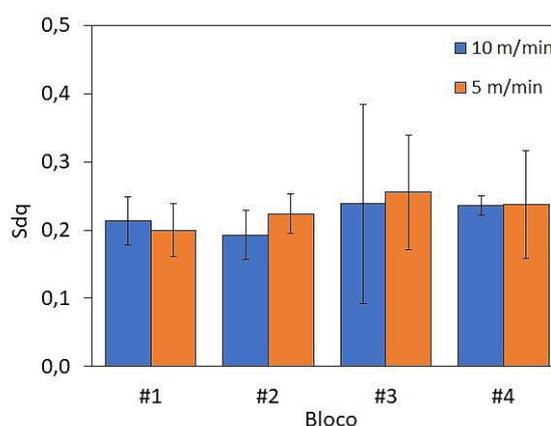


Figura 30 Parâmetro híbrido S_{dq}

Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao observar os dados da Tabela 6 e a Figura 30, nota-se que os valores do parâmetro S_{dq} foram muito semelhantes entre os quatro blocos analisados para as duas taxas de avanço. O maior e o menor valor encontrados foram para o bloco #3 em TA_5 e para o bloco #2 em TA_{10} (Tabela 6), respectivamente. Dentre os blocos analisados, o bloco #3 foi aquele que apresentou superfícies mais acentuadamente inclinadas, ao passo que o bloco #1 apresentou superfícies menos inclinadas. Assim sendo, estatisticamente para S_{dq} , houve pouca influência da taxa de avanço dentre os blocos estudados.

As Figuras 31 a 34 apresentam informações sobre a textura da superfície nas duas taxas de avanço empregadas dos quatro blocos analisados para a Amostra I do Apêndice B.

A Figura 31 apresenta a curva de Abbott-Firestone para TA_{10} (Figura 31A) e para TA_5 (Figura 31B) do bloco #1.

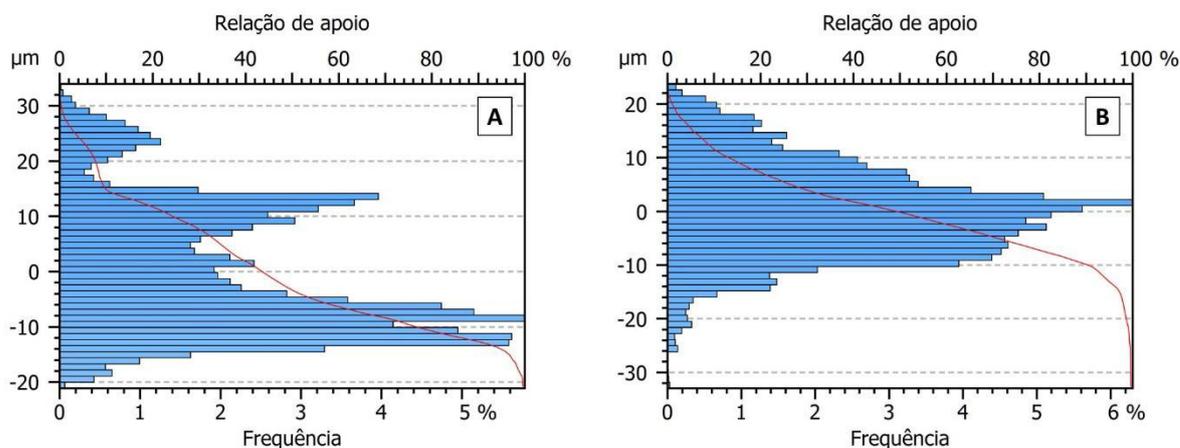


Figura 31 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #1, TA_{10} (A) e TA_5 (B)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 31A caracteriza a forma da rugosidade da superfície para TA_{10} do bloco #1. Observa-se uma distribuição irregular de frequência, com muitos vales e picos com diferentes alturas espalhados pela superfície, o que resulta em uma curva de razão de área longe da ideal. Já para TA_5 (Figura 31B), a distribuição de frequência é mais uniforme e próxima da linha média, proporcionando uma boa relação de apoio para esta superfície. Estes resultados ratificam aqueles obtidos qualitativamente na topografia e quantitativamente pelos parâmetros de amplitude.

A Figura 32 apresenta a curva de Abbott-Firestone para TA₁₀ (Figura 32A) e para TA₅ (Figura 32B) do bloco #2.

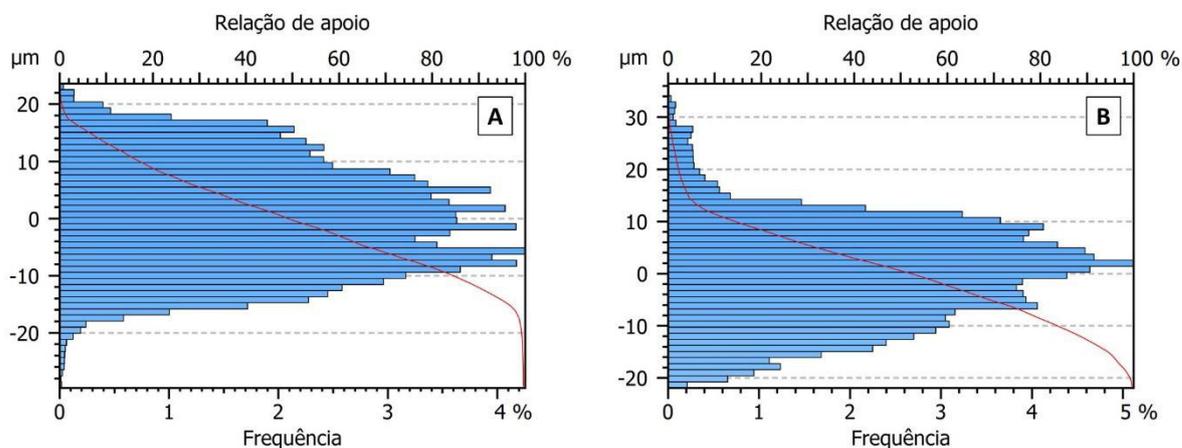


Figura 32 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #2, TA₁₀ (A) e TA₅ (B)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando as Figuras 32A e 32B pode-se observar a forma da rugosidade do bloco #2 para TA₁₀ e TA₅, respectivamente. Nota-se que a taxa de avanço maior (Figura 32A) proporcionou uma superfície regular, mas com uma distribuição de frequência levemente acima da linha média, resultando na predominância de picos em relação aos vales. Ao passo que na taxa de avanço menor (Figura 32B), a distribuição de frequência apresenta-se mais regular, próximo da linha média, promovendo uma boa relação de apoio para esta superfície. Estes resultados ratificam aqueles obtidos qualitativamente na topografia e quantitativamente pelos parâmetros de amplitude.

A Figura 33 apresenta a curva de Abbott-Firestone para TA₁₀ (Figura 33A) e para TA₅ (Figura 33B) do bloco #3.

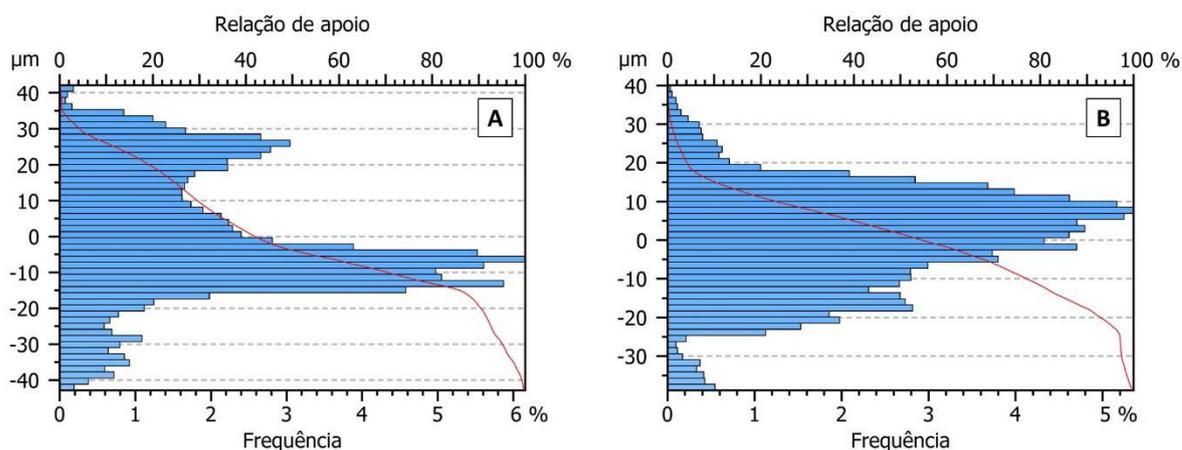


Figura 33 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #3, TA_{10} (A) e TA_5 (B)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 33A apresenta a forma da rugosidade da superfície para TA_{10} do bloco #3. Observa-se que a taxa de avanço maior proporcionou uma distribuição de frequência da superfície irregular, com a predominância de vales e picos muito altos, o que resulta em uma curva de razão de área longe da ideal. Já para TA_5 (Figura 33B), a distribuição da frequência é um pouco mais uniforme, porém com a predominância de picos em relação aos vales e próximo da linha média, o que resulta em uma melhor relação de apoio para esta superfície. Estes resultados ratificam aqueles obtidos qualitativamente na topografia e quantitativamente pelos parâmetros de amplitude.

A Figura 34 apresenta a curva de Abbott-Firestone para TA_{10} (Figura 34A) e para TA_5 (Figura 34B) do bloco #4.

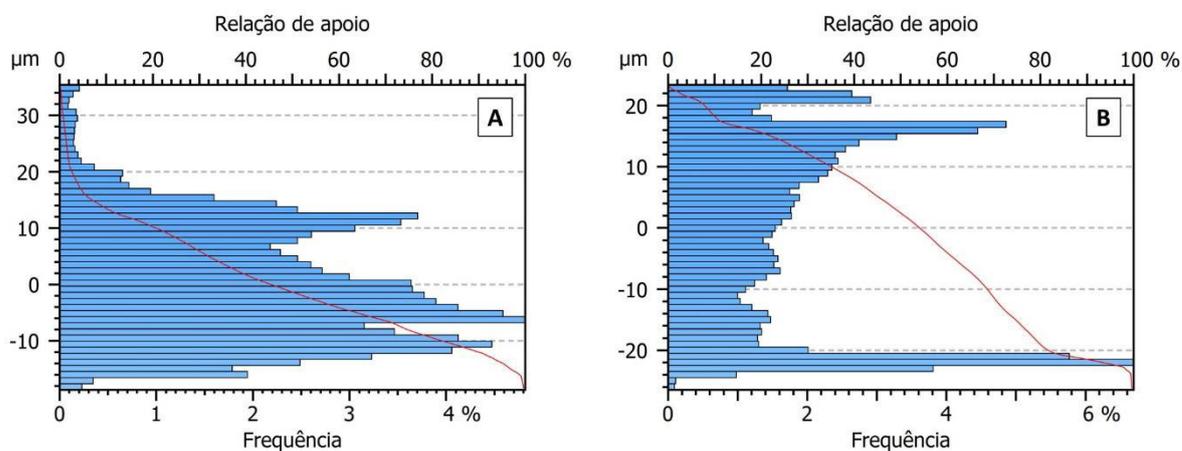


Figura 34 Curva de Abbott-Firestone para o bloco #4, TA_{10} (A) e TA_5 (B)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando as Figuras 34A e 34B pode-se observar a forma da rugosidade do bloco #4 para TA_{10} e TA_5 , respectivamente. Para a taxa de avanço maior (Figura 34A), observa-se uma distribuição um pouco mais regular do que para a taxa de avanço menor (Figura 34B). Em TA_{10} , a distribuição de frequência da superfície possui predominância de vales e alguns picos, porém não muito distantes da linha média, indicando que, para o bloco #4, a maior taxa de avanço resulta em uma melhor relação de apoio para a superfície. Já para TA_5 , a distribuição da frequência é bastante irregular, com picos elevados e vales profundos, o que resulta em uma curva de razão de área longe da ideal. Assim como para os demais blocos analisados neste estudo, estes resultados ratificam aqueles obtidos qualitativamente na topografia e quantitativamente pelos parâmetros de amplitude. Salienta-se que o bloco #4 foi aquele que apresentou as distribuições de frequência mais irregulares e as piores curvas de relação de apoio entre todos os blocos analisados, independentemente da taxa de avanço.

Na Figura 35 são apresentados os valores para S_{sk} e S_{ku} por meio de um gráfico S_{sk} versus S_{ku} revelando o espaço morfológico para os quatro blocos analisados neste estudo.

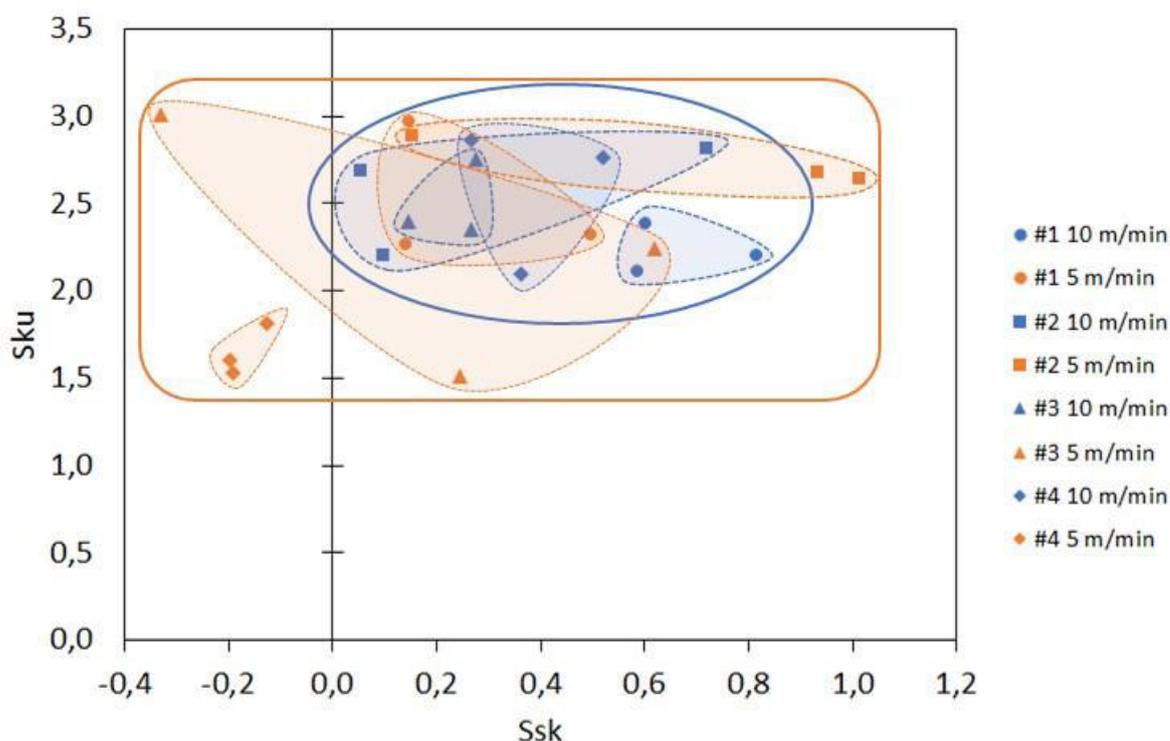


Figura 35 Espaço morfológico S_{sk} versus S_{ku} para as amostras ensaiadas

Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme discutido por Tavares et al. (2021) [64] a avaliação simultânea dos parâmetros S_{sk} e S_{ku} fornece uma análise interessante do espaço morfológico traçando S_{sk} como uma função de S_{ku} (Figura 35). Com esta relação é possível identificar grupos com comportamentos semelhantes. O bloco #1 é representado por círculos, o bloco #2 é representado por quadrados, o bloco #3 é representado por triângulos e o bloco #4 é representado por losangos. O espaço morfológico de TA_{10} está representado pela cor azul, enquanto para TA_5 está representado pela cor laranja.

As amostras cujas superfícies apresentam um melhor acabamento superficial são aquelas que se encontram mais próximas ao zero do eixo de S_{sk} e mais próximas de três no eixo de S_{ku} (PAWLUS et al., 2021) [39]. Para TA_{10} todas as amostras encontram-se no quadrante positivo de S_{sk} com valores variando entre 0,05 e 0,81 e com S_{ku} variando entre 2,10 e 2,86 (Apêndice B). Já para TA_5 , as amostras encontram-se dispersas em nos quadrantes positivo e negativo de S_{sk} com valores variando entre -0,33 e 1,01 e com S_{ku} variando entre 1,51 e 3,01 (Apêndice B).

Observando os dados na Figura 35, constata-se que os maiores valores de S_{sk} , foram encontrados para TA_5 em duas amostras do bloco #2. Ao passo que, foram encontrados valores negativos para TA_5 em uma amostra do bloco #3 e em todas as amostras do bloco #4. Os valores de S_{sk} obtidos nesse estudo e na literatura são bastante distintos, principalmente quando utilizados outros materiais. Por exemplo, Kundrak et al. (2008) [50] investigou o acabamento superficial da liga 16MnCr5 empregando os processos de retificação e torneamento, relatou valores de S_{sk} variando entre -0,060 e 0,662. Silva et al. (2019) [46] utilizando diferentes fluidos de corte na retificação da liga AISI 4340 encontrou valores de S_{sk} variando entre -0,0489 e 0,201. Esse fato indica que, por ser um parâmetro estatístico, os valores de S_{sk} variam bastante em função do tipo de material utilizado.

Ao contrário de S_{sk} os valores de S_{ku} reportados na literatura podem apresentar grandes variações em função do tipo de material utilizado. Por exemplo, Kundrak et al. (2008) [50] empregando os processos de retificação e torneamento na liga 16MnCr5, relatou valores de S_{ku} entre 2,34 e 2,83. Silva et al. (2019) [46] analisando o processo de retificação da liga AISI 4340, reportou valores de S_{ku} que variaram entre 2,37 e 3,62. Liang et al. (2019) [49] investigou os efeitos dos ambientes de corte e posições de injeção no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V e relatou valores de S_{ku}

variando entre 3,5 e 4,5. Observa-se ainda que enquanto os valores de S_{sk} reportados na literatura podem ser positivos ou negativos, os valores de S_{ku} são sempre positivos (KUNDRAK et al., 2008; FARIAS, 2009; SILVA et al., 2019) ^{[50][48][46]}.

Além disso, tanto os resultados obtidos para os parâmetros de altura S_a e S_q , e para os parâmetros estatísticos S_{sk} e S_{ku} , indicam uma melhor qualidade do acabamento superficial para os blocos com maior densidade quando utilizada a menor taxa de avanço (TA_5). Resultado inverso foi obtido para o bloco com menor densidade, bloco #4, para o qual o melhor acabamento superficial foi obtido empregando-se a maior taxa de avanço (TA_{10}).

Diversos estudos reportados na literatura avaliam os parâmetros de rugosidade de perfil (2D) e de superfície (3D) (HAFNER et al., 2016; COUTO, 2019; LUO et al., 2020; TUREK et al., 2020) ^{[23][65][45][66]}. No entanto, no presente estudo, a natureza do material impossibilitou obter uma medição em 2D com um rugosímetro pois estes equipamentos necessitam de um contato com a peça analisada. A solução encontrada foi a utilização do microscópio confocal invertido de varredura a laser, que permitiu caracterizar a topografia da superfície sem o contato com a amostra. Vale ressaltar que, com base na pesquisa bibliográfica realizada, este é o primeiro estudo realizado utilizando essa metodologia para análise topográfica da superfície de blocos de EPS. Assim sendo, para verificar a integridade dos resultados, realizou-se medições com amostras de metal com um rugosímetro portátil e com o microscópio confocal para obter informações sobre os parâmetros de rugosidade de perfil e de superfície, respectivamente. Os resultados obtidos para ambos foram muito semelhantes (dados não apresentados), legitimando o uso do microscópio confocal para a análise de blocos de EPS utilizados para confecção de pranchas de surfe após o processo de fresamento por meio de uma máquina CNC.

4.6. Geração de resíduos

A Tabela 7 apresenta o volume de cada bloco e o respectivo percentual de material descartado. Este resíduo gerado inclui as sobras em cada extremidade e o cavaco gerado durante a usinagem do bloco, Figura 36. Considerando o volume original dos blocos, o percentual de material descartado para o bloco #1, bloco #2,

bloco #3 e bloco #4 foram cerca de 48%, 61%, 41% e 46%, respectivamente. Essas informações corroboram com os dados apresentados por Grijó e Prim (2015) ^[54], e indicam a necessidade de estudos posteriores voltados para o aproveitamento e reciclagem do material descartado durante o processo de usinagem de pranchas de surfe.

Tabela 7 Estimativa de resíduos gerados por cada bloco

Bloco	Volume do bloco (L)	Material descartado (%)
#1	55,8	48
#2	73,5	61
#3	48,8	41
#4	54	46

Fonte: Elaborado pelo Autor



Figura 36 Cavaco gerado na usinagem dos blocos de EPS

Fonte: O Autor

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se a qualidade do acabamento superficial de blocos de EPS usinados por uma fresadora CNC destinada a confecção de pranchas de surfe. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- Os blocos de EPS usinados são facilmente moldáveis devido as suas características estruturais. Desta forma, a usinagem deste tipo de material com uma ferramenta do tipo disco diamantado, não gera danos na ferramenta que necessitem manutenção ou reposição periódica;
- O uso do microscópio confocal demonstrou ser eficiente para a avaliação da qualidade do acabamento superficial de blocos de EPS usinados com fresadora CNC para a confecção de pranchas de surfe;
- Os blocos de maior densidade apresentaram um acabamento superficial melhor quando usinados com a menor taxa de avanço (5.000 mm/min), ao passo que o bloco de menor densidade apresentou um acabamento superficial melhor quando usinado com a maior taxa de avanço (10.000 mm/min);
- O bloco #2 apresentou valores semelhantes nos parâmetros de rugosidade para ambas as taxas de avanço empregadas e os melhores resultados em termos gerais dentre os quatro blocos avaliados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste estudo e como sugestões para trabalhos futuros, destacamos os seguintes itens com a finalidade de melhorar a avaliação da qualidade de blocos usinados com fresadora CNC utilizados para confecção de pranchas de surfe:

- Avaliar o acabamento superficial utilizando a ferramenta do tipo disco diamantado na usinagem de blocos de PU e XPS;
- Comparar o acabamento superficial de blocos de PU, EPS e/ou XPS utilizando uma ferramenta do tipo disco diamantado e uma ferramenta revestida com carboneto de tungstênio;
- Avaliar as propriedades mecânicas de blocos usinados com fresadora CNC para a confecção de pranchas de surfe;
- Aprimorar protocolos para a avaliação do acabamento superficial de blocos usinados com fresadora CNC na indústria de pranchas de surfe.

7. REFERÊNCIAS

7.1. Referências Nominais

- [1] ALMEIDA, M. A. B. D. et al. A evolução histórica da prancha de surf e seu aperfeiçoamento tecnológico. **EFDeportes.com**, Buenos Aires, v. 17, n. 169, p. 1-11, 2012.
- [2] IIDA, A. Surfing 101: Types of surfboards. **EVERYDAY CALIFORNIA**, 2020. Disponível em: <<https://www.everydaycalifornia.com/blogs/everyday-thoughts/surfing-101-types-of-surfboards>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2022.
- [3] SURFERTODAY. Surfboard size chart. **SURFERTODAY**, 2008. Disponível em: <<https://www.surfertoday.com/board-size-chart/surf>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2022.
- [4] OLIVEIRA, Á. S. **Design sustentável em pranchas de surfe: Propondo diretrizes para a produção e uso de pranchas ecoafetivas**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 81. 2019. Trabalho de conclusão de curso.
- [5] MINGUEZ, R. et al. **A new surfboards design and modeling process**. Congresso Internazionale Congiunto XVI ADM – XIX INGEGRAF. Perugia: [s.n.]. 2007. p. 1-8.
- [6] SIEDERSBERGER, D. **Projeto e desenvolvimento de uma fresadora CNC aplicada à produção de pranchas de surfe**. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, p. 74. 2015. Trabalho de conclusão de curso.
- [7] HOLLAND, R. **Revolutionising the surfboard manufacturing process**. The University of Queensland. Brisbane, p. 102. 2016. Trabalho de conclusão de curso.
- [8] OGGIANO, L.; PANHUIS, M. I. H. Modern surfboards and their structural characterization: Towards an engineering approach. **Proceedings**, v. 49, n. 1, p. 65, 2020.
- [9] FALK, S. et al. Computational hydrodynamics of a typical 3-fin surfboard setup. **Journal of Fluids and Structures**, v. 90, p. 297-314, 2019.
- [10] FALK, S. et al. Numerical investigation of the hydrodynamics of changing fin positions within a 4-Fin surfboard configuration. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, p. 816, 2020.
- [11] SHORMANN, D.; OGGIANO, L.; PANHUIS, M. I. H. Numerical CFD investigation of shortboard surfing: fin design vs. cutback turn performance. **Proceedings**, v. 49, n. 1, p. 132, 2020.
- [12] MICHELENA, A. H. et al. Eco-friendly flax fibre/epoxy resin/composite system for surfboard production. In: FANGUEIRO, R.; RANA, S. **Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications**. [S.l.]: RILEM Bookseries 12, 2016. p. 267-277.

- [13] MEDEIROS, E. C. D. **Fresamento tangencial utilizando eixo árvore de material compósito híbrido: Uma avaliação experimental do comportamento dinâmico**. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 99. 2021. Tese de doutorado.
- [14] KIM, D.-H. et al. Smart machining process using machine learning: A review and perspective on machining industry. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 4, p. 555-568, 2018.
- [15] SILVA, F. P. D. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 192. 2011. Tese de doutorado.
- [16] BUJ-CORRAL, I.; VIVANCOS-CALVET, J.; DOMÍNGUEZ-FERNÁNDEZ, A. Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 53, n. 1, p. 151-159, 2012.
- [17] SANTOS, F. D. S. **Análise dos efeitos do tratamento de ozonização de fluidos de corte solúveis em um processo de fresamento**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, p. 121. 2016. Dissertação de mestrado.
- [18] KAR, B. C. et al. Research trends in high speed milling of metal alloys: A short review. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 2657-2662, 2020.
- [19] WEI, W. et al. The research progress of machining mechanisms in milling wood-based materials. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 2139-2149, 2018.
- [20] İŞLEYEN, K.; KARAMANOĞLU,. The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 3266-3277, 2019.
- [21] JAAFAR, J. et al. Important considerations in manufacturing of natural fiber composites: A review. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 6, p. 647-664, 2019.
- [22] SCHNEIDER, E. L. et al. Análise dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de polímeros. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 7, n. 1, p. 25-30, 2008.
- [23] HAFNER, R. et al. Influence of milling process on machined surface of porous polyurethane (PU) foam. **Tehnički vjesnik**, v. 23, n. 4, p. 1089-1093, 2016.
- [24] SILVA, F.; JOAQUIM JUNIOR, C. F.; TARRETO, G. E. **Relações entre parâmetros de corte e acabamento superficial no poliacetal em operação de fresamento**. 5ª Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu. Botucatu: Faculdade de Tecnologia de Botucatu. 2016. p. 1-6.
- [25] NACE, S.; TIERNAN, J.; ANNAIDH, A. N. Manufacturing custom-contoured wheelchair seating: A state-of-the-art review. **Prosthetics and Orthotics International**, v. 43, n. 4, p. 382-395, 2019.

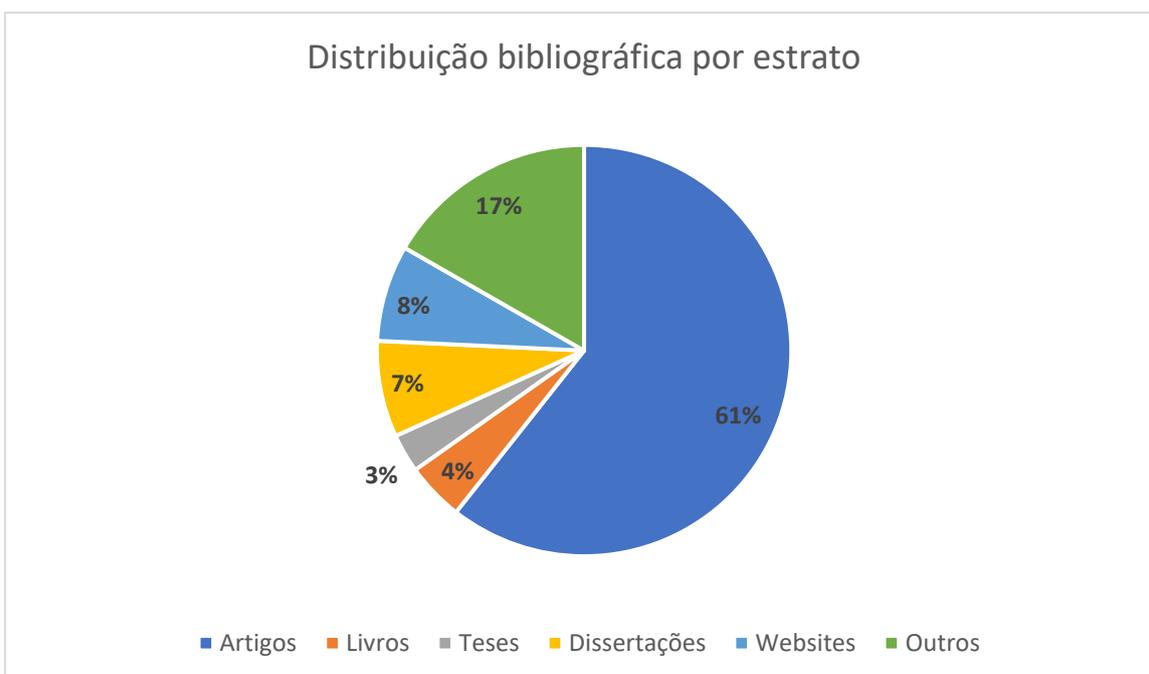
- [26] SIMPSON, A. et al. Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams. **Cellular Polymers**, v. 39, n. 6, p. 238-262, 2020.
- [27] TURNER, A. Foamed polystyrene in the marine environment: Sources, additives, transport, behavior, and impacts. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 17, p. 10411-10420, 2020.
- [28] UTTARAVALLI, A. N.; DINDA, S.; GIDLA, B. R. Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene : A review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 137, p. 140-148, 2020.
- [29] CUNHA, R. D. S. **Preparação e caracterização de nanopartículas obtidas a partir de resíduos de poliestireno expandido via nanoprecipitação**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 60. 2018. Dissertação de mestrado.
- [30] GIBSON, C. R.; WARREN, A. T. Surfboard making and environmental sustainability: New materials and regulations, subcultural norms and economic constraints. In: BORNE, G.; PONTING, J. **Sustainable Surfing**. 1^a. ed. Abingdon, United Kingdom: Routledge, 2017. p. 87-103.
- [31] KOLTY ENGENHARIA. Linha surf. **KOLTY MÁQUINAS E PROJETOS**, 2021. Disponível em: <<https://koltyengenharia.wixsite.com/my-site-1/maquinas-usinagem-prancha-de-surf>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2022.
- [32] KOSBLANKS. Máquinas de shape. **KOSBLANKS**, S/D. Disponível em: <<http://www.kosblanks.com/maquinas>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2022.
- [33] MILIOLI, J. P. M. **Análise no processo de preshape de pranchas de surfe com utilização de ferramenta de corte à quente**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, p. 49. 2018. Trabalho de conclusão de curso.
- [34] SHAPERS MANUFACTURES CO. Surfboard machine cutters. **SHAPERS**, 2022. Disponível em: <<https://shapers.com.au/surfboard-machine-cutters/>>. Acesso em: 1 Fevereiro 2022.
- [35] GESSER, F. J.; POZZOBON, F. R.; BONACORSO, N. G. **Desenvolvimento e construção de uma fresadora CNC de baixo custo destinada à confecção de pranchas de surf**. 4^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF). Estância de São Pedro-SP: [s.n.]. 2007. p. 1-10.
- [36] SUN, B.-J.; JIANG, C.-J.; ZONG, F.-L. Performance and wear of brazing diamond grinding disc in machining gray cast iron. **Diamond & Related Materials**, v. 106, p. 107820, 2020.
- [37] SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem de materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.
- [38] CRAWFORD, R. J. et al. Surface topographical factors influencing bacterial attachment. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 179-182, p. 142-149, 2012.

- [39] PAWLUS, P.; REIZER, R.; WIECZOROWSKI, M. Functional importance of surface texture parameters. **Materials**, v. 14, n. 18, p. 5326, 2021.
- [40] ISO 25178-2:2021. Geometrical product specifications – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. **International Organization for Standardization**. Geneva, p.64. 2021. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/74591.html>>
- [41] QI, Q. et al. A correlational study of areal surface texture parameters on some typical machined surfaces. **Procedia CIRP**, v. 27, p. 149-154, 2015.
- [42] EREIFEJ, N. S.; OWEIS, Y. G.; ELIADES, G. The effect of polishing technique on 3-D surface roughness and gloss of dental restorative resin composites. **Operative Dentistry**, v. 38, n. 1, p. E9-E20, 2013.
- [43] GOCKEL, J. et al. The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v. 124, p. 380-388, 2019.
- [44] CHARLES, A. et al. Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting. **Applied Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1256, 2019.
- [45] LUO, B. et al. The effect of granularity on surface roughness and contact angle in wood sanding process. **Measurement**, v. 165, p. 108133, 2020.
- [46] SILVA, L. R. D. et al. Study of 3D parameters and residual stress in grinding of AISI 4340 steel hardened using different cutting fluids. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, p. 895-905, 2019.
- [47] CAMPOS, C. N. D. **Análise da integridade da região abaixo da superfície no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 150. 2016. Dissertação de mestrado.
- [48] FARIAS, A. D. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 191. 2009. Dissertação de mestrado.
- [49] LIANG, X. et al. Surface integrity analysis for high-pressure jet assisted machined Ti-6Al-4V considering cooling pressures and injection positions. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 40, p. 149-159, 2019.
- [50] KUNDRAK, J.; GYANI, K.; BANA, V. Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 1, p. 110-119, 2008.
- [51] BORYSENKO, et al. Simulation of the burnishing process on real surface structures. **Precision Engineering**, v. 68, p. 166-173, 2021.
- [52] PAWLUS, P. et al. Material ratio curve as information on the state of surface topography—A review. **Precision Engineering**, v. 65, p. 240-258, 2020.

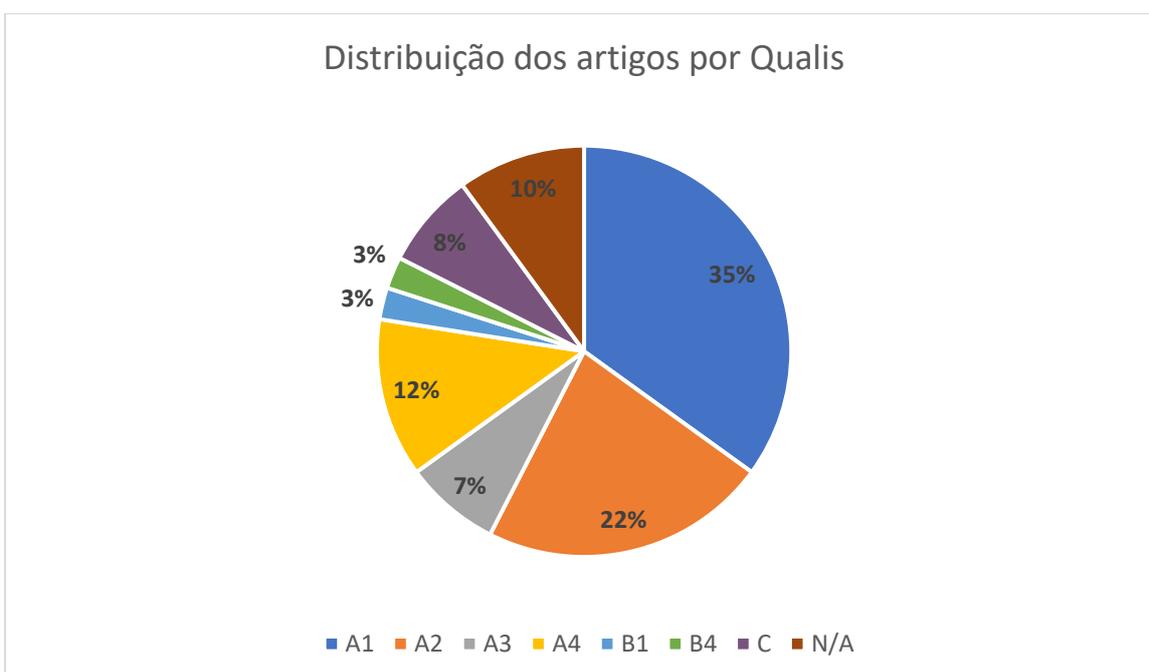
- [53] STIVAL, L. J. L. **Avaliação de riscos físicos e ergonômicos dentro de uma fábrica de pranchas de surfe**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 55. 2018. Monografia de especialização.
- [54] GRIJÓ, P. E. A.; PRIM, E. C. C. **Produção ecológica de pranchas de surfe: Utopia ou realidade**. XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2015. p. 1-18.
- [55] VARTIAINEN, N. **The new wave of sustainable surf industry**. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Helsinki, p. 71. 2018. Trabalho de conclusão de curso.
- [56] ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image processing with ImageJ. **Biophotonics international**, v. 11, n. 7, p. 36-42, 2004.
- [57] BOTAN, R. et al. Síntese e caracterização de nanocompósitos esfoliados de poliestireno – hidróxido duplo lamelar via polimerização in situ. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 21, n. 1, p. 34-38, 2011.
- [58] BOTAN, R. et al. In situ synthesis, morphology, and thermal properties of polystyrene—MgAl layered double hydroxide nanocomposites. **Polymer Engineering & Science**, v. 52, n. 8, p. 1754-1760, 2012.
- [59] MORAES, S. B. D.; RODRIGO, B.; LONA, L. M. F. Síntese e caracterização de nanocompósitos de poliestireno/hidroxissal lamelar. **Química Nova**, v. 37, n. 1, p. 18-21, 2014.
- [60] ELYSEU, G. G. M.; DUMONT, ; FERREIRA, R. V. Síntese e caracterização de nanoesferas de poliestireno para encapsulamento de nanoparticulado magnético. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1259-1270, 2017.
- [61] ZHAO, H. et al. Thermal decomposition studies of EPS foam, polyurethane foam, and epoxy resin (SLA) as patterns for investment casting; Analysis of Hydrogen Cyanide (HCN) from thermal degradation of polyurethane foam. **International Journal of Metalcasting**, v. 13, p. 18-25, 2018.
- [62] JESUS, L. C. C. D. et al. Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e-12421, 2019.
- [63] CHEN, N. et al. Investigating the ablation depth and surface roughness of laser-induced nanoablation of CVD diamond material. **Precision Engineering**, v. 57, p. 220-228, 2019.
- [64] TAVARES, A. F. et al. Effect of transfer layers on friction and wear mechanisms in strip drawing tests of commercially coated forming tools. **Wear**, v. 476, p. 203733, 2021.
- [65] COUTO, D. A. **Caracterização da superfície usinada do aço ABNT 4340 endurecido por meio dos processos de torneamento e retificação**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 168. 2019. Dissertação de mestrado.

- [66] TUREK, P. et al. An analysis of the casting polymer mold wear manufactured using polyjet method based on the measurement of the surface topography. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 3029, 2020.

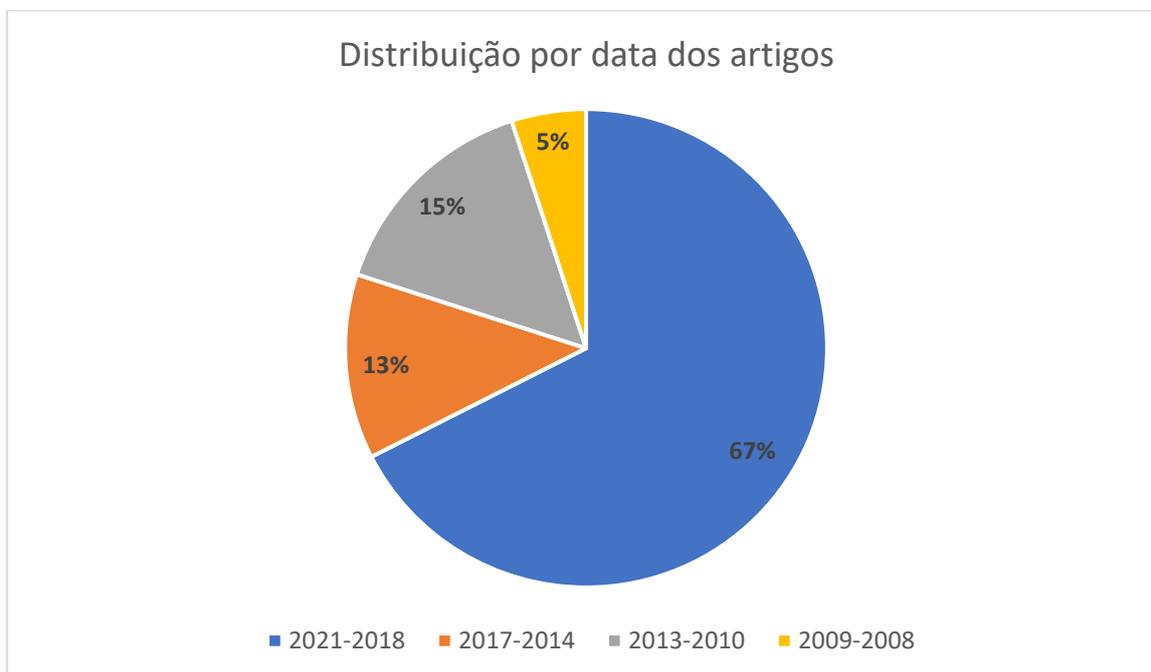
7.2. Referências por Estrato



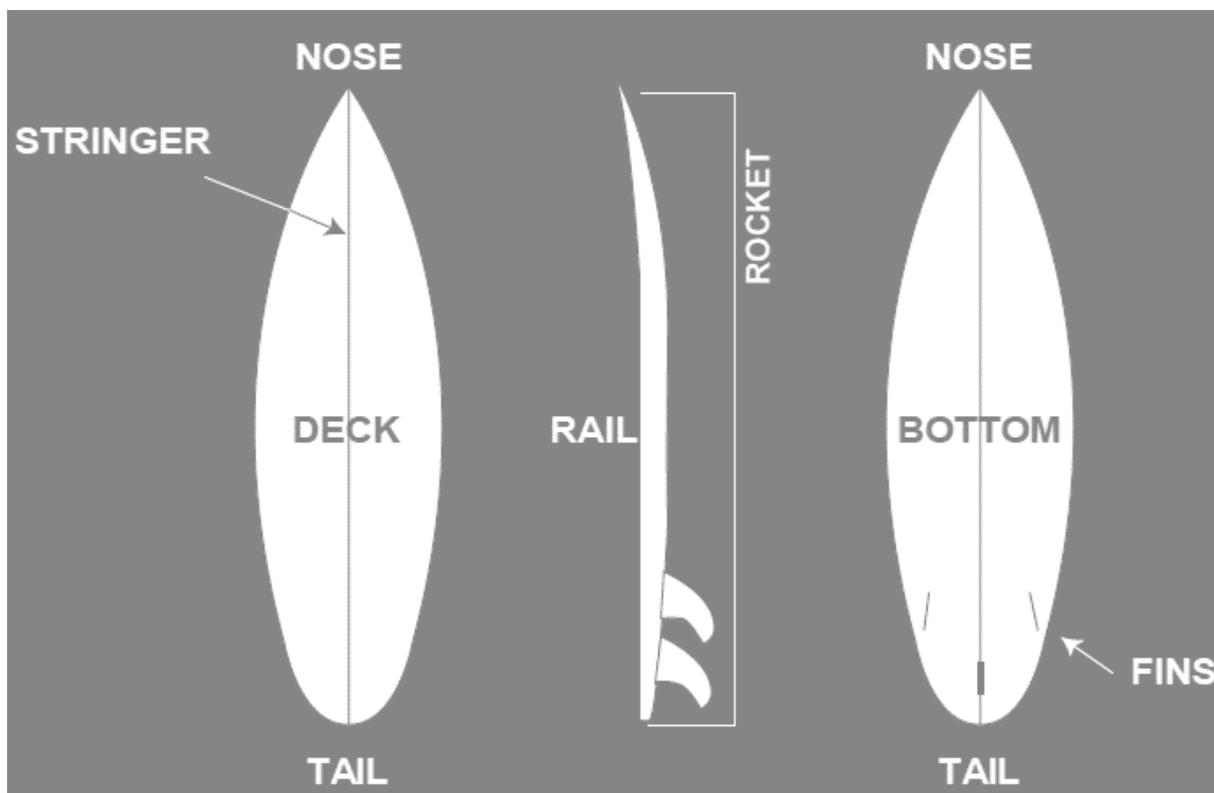
7.3. Referências por Qualis



7.4. Referências por Data dos Artigos



APÊNDICE A



(fonte: VARTIAINEN, 2018) ^[55]

Nose (Bico) – área situada na parte superior da prancha;

Tail (Rabeta) – área situada na parte inferior da prancha;

Stringer (Longarina) – reforço central, geralmente de madeira, colada ao bloco a fim de dar resistência longitudinal;

Deck – é a parte superior da prancha, onde o surfista pisa;

Bottom – é a parte inferior da prancha, onde ocorre a interação prancha - água;

Rail (Bordas) – área de transição entre o *deck* e o *bottom*;

Rocker – é a curvatura ao longo da longarina;

Fins (Quilhas) – possuem a função de dar estabilidade atenuando a pressão do fluxo de água.

APÊNDICE B

Amostra	Parâmetro	Bloco #1		Bloco #2		Bloco #3		Bloco #4	
		10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min	10 m/min	5 m/min
I	S_a (μm)	10,11	6,77	7,80	7,71	14,52	10,54	8,45	13,47
	S_q (μm)	11,77	8,51	9,29	9,50	17,58	13,10	10,13	15,16
	S_p (μm)	33,97	23,74	23,60	36,43	42,10	40,05	35,41	23,40
	S_v (μm)	21,11	32,94	29,66	21,90	42,83	38,82	18,71	26,46
	S_z (μm)	55,08	56,68	53,26	58,33	84,93	78,87	54,12	49,86
	S_{dq}	0,25	0,19	0,19	0,25	0,41	0,35	0,25	0,32
	S_{sk}	0,60	0,15	0,10	0,15	0,15	-0,33	0,52	-0,20
	S_{ku}	2,38	2,97	2,21	2,90	2,39	3,01	2,77	1,61
II	S_a (μm)	7,56	5,81	5,58	5,67	4,13	8,11	7,76	8,44
	S_q (μm)	8,60	6,93	7,04	6,82	5,13	8,87	9,55	9,40
	S_p (μm)	21,59	21,27	22,99	17,54	17,29	16,68	31,81	14,08
	S_v (μm)	11,21	13,54	13,09	8,27	14,54	14,42	24,89	16,56
	S_z (μm)	32,80	34,82	36,07	24,81	31,84	31,10	56,71	30,63
	S_{dq}	0,19	0,17	0,16	0,23	0,14	0,21	0,24	0,23
	S_{sk}	0,81	0,50	0,72	0,93	0,28	0,25	0,27	-0,19
	S_{ku}	2,21	2,33	2,82	2,68	2,76	1,51	2,86	1,53
III	S_a (μm)	7,22	6,73	6,29	6,47	6,61	4,81	7,83	4,54
	S_q (μm)	8,38	7,95	7,70	7,64	7,73	5,65	8,92	5,15
	S_p (μm)	21,44	23,23	22,82	19,62	19,67	15,46	23,75	12,02
	S_v (μm)	14,33	20,38	23,54	8,30	17,06	9,68	15,44	11,37
	S_z (μm)	35,77	43,60	46,36	27,92	36,73	25,18	39,19	23,39
	S_{dq}	0,20	0,24	0,23	0,19	0,17	0,21	0,22	0,16
	S_{sk}	0,59	0,14	0,05	1,01	0,27	0,62	0,36	-0,13
	S_{ku}	2,11	2,27	2,69	2,65	2,35	2,25	2,10	1,82