

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS,
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SERVIÇO SOCIAL

RAFFAELA FERNANDES PIMENTA

**APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO
FATORIAL FRACIONADO PARA ANÁLISE DA
RUGOSIDADE EM IMPRESSÃO 3D**

ITUIUTABA
2023

RAFFAELA FERNANDES PIMENTA

**APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO
FATORIAL FRACIONADO PARA ANÁLISE DA
RUGOSIDADE EM IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço Social (FACES) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como requisito parcial do título de Bacharel em Engenharia de Produção. Orientador: Ricardo Batista Penteadó

ITUIUTABA
2023

APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO PARA ANÁLISE DA RUGOSIDADE EM IMPRESSÃO 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço Social (FACES) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como requisito parcial do título de Bacharel em Engenharia de Produção.
Orientador: Ricardo Batista Penteado

Ituiutaba, 7 de junho de 2023.
Banca Examinadora:

Ricardo Batista Penteado
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Eugênio Pacceli Costa
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Marcus Vinicius Ribeiro Machado
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu pai Tiago, que sempre acreditou e apoiou meus estudos e nunca mediu esforços para que esse sonho se tornasse realidade. Ni, sem você nada disso seria possível, obrigada por cada conselho, cada abraço e todo o acolhimento, você é a base de toda minha formação pessoal e profissional. A Karina sua esposa, que esteve comigo desde o início dessa jornada me apoiando e aconselhando em diversos momentos, obrigada!

Gostaria de agradecer também minha mãe Cristina, minha tia avó Durvalina e minha prima Laura, mulheres incríveis que sempre me ensinaram a ser forte e determinada, vocês me inspiram a continuar e caminhar em busca dos meus sonhos e objetivos, obrigada por todo amor e ensinamento, mas principalmente, por me mostrar que nós mulheres podemos ser o que quisermos ser.

Aos meus amigos Suzana, Marcelo, Vagner e a Ariane, que estiveram comigo desde o início da Universidade, me apoiando em todos os momentos, hoje, vocês também são parte da minha família. A minha amiga Yana, que mesmo de longe sempre se fez presente, me apoiando e acreditando na minha caminhada. Obrigada por cada risada, cada conselho e por todo o afeto durante essa jornada, sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu companheiro e parceiro da vida Gabriel, que esteve comigo desde o início desse trabalho me apoiando e acreditando na minha capacidade, obrigada por todo carinho e companheirismo.

A todo o corpo docente do curso de Engenharia de Produção, composto por profissionais competentes e capacitados que auxiliaram no meu desenvolvimento profissional e pessoal. Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador Ricardo Penteado, que não mediu esforços para me orientar nesta pesquisa, obrigada por todas as orientações, conselhos e acolhimento.

Gostaria de agradecer também a professora Maria Aparecida Satto, que me orientou nos projetos AFIN e DEPAE, foi um privilégio poder trabalhar com uma profissional competente e inteligente, obrigada por ter me ensinado tanto sobre a vida, por todo o carinho e afeto.

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.”

Paulo Freire

RESUMO

Com o avanço da tecnologia e novas formas de produção surgindo, a manufatura aditiva cresce de forma exponencial no mercado, apresentando uma nova forma de produzir por meio da adição de materiais, camada por camada, para a formação de um objeto desejado. Com isso, diversos estudos sobre os fatores e seus efeitos sobre o resultado da impressão, se ampliam à medida que a complexidade dos projetos aumenta. Afim de compreender os efeitos da altura da camada, velocidade de impressão, temperatura do bico e temperatura da mesa tem sobre a rugosidade de um corpo impresso na impressora Ender 3, foi realizado a aplicação do planejamento de experimentos fatorial fracionado 2^{4-1} . A análise da variância será mostrada juntamente com os gráficos de efeitos e gráfico de Pareto para mostrar a influência de cada fator sobre a rugosidade. Após as representações gráficas e análise de variância foi possível constatar que o único fator de significância na rugosidade média é a altura da camada, já os demais fatores não demonstraram influência significativa na resposta desejada.

Palavras-chave: planejamento de experimento, manufatura aditiva, rugosidade.

ABSTRACT

With the advancement of technology and new forms of production emerging, additive manufacturing grows exponentially in the market, presenting a new way of producing through the addition of materials layer by layer for the formation of a desired object. As a result, several studies on the factors and their effects on the result of printing expand as the complexity of the projects increases. In order to understand the effects of layer height, print speed, nozzle temperature and table temperature has on the roughness of a body printed on the Printer Ender 3, the application of fractional factorial design 2^{4-1} was carried out. The variance analysis will be shown along with the effects charts and Pareto chart to show the influence of each factor on roughness. After the graphic representations and analysis of variance it was possible to verify that the only factor of significance in the average roughness is the height of the layer, while the other factors did not show significant influence on the desired response.

Keywords: design experiment, additive manufacturing, roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais técnicas de impressão 3D.....	14
Figura 2 - Perfil da rugosidade média (Ra)	15
Figura 3 - Matriz de planejamento fracionário	18
Figura 4- Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}	18
Figura 5- Análise de variância (ANOVA).....	20
Figura 6 - Aparelho rugosímetro Mitutoyo SJ – 210	24
Figura 7 - modelo CAD	26
Figura 8- peça impressa.....	27
Figura 9- Impressora Ender 3 Pro	27
Figura 10- Valor padronizado conforme a ISO 4288;1996.....	28
Figura 11 - Estrutura base do rugosímetro e da peça medida.....	29
Figura 12 - Rugosímetro e peça posicionados para a medição.....	29
Figura 13 - Gráfico normal dos efeitos.....	31
Figura 14 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.....	32
Figura 15 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade média	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Confundimentos do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1}	18
Tabela 2 - Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}	19
Tabela 3- Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}	19
Tabela 4 – Classificação da pesquisa	23
Tabela 5 - Fatores e níveis experimentais	24
Tabela 6- Matriz de planejamento de experimento	25
Tabela 7 - Medição média de cada lado, grupo 1:.....	30
Tabela 8 - Medição média de cada lado, grupo 2:.....	30
Tabela 9 - Medição da rugosidade de cada corpo de acordo com o planejamento de experimento fatorial.....	30
Tabela 10- Análise de variância rugosidade média (Ra).....	33
Tabela 11- Coeficientes Codificados.....	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de variância
CAD	Projeto/Desenho assistido por computador
DOE	Planejamentos de Experimentos
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
FFF	Fabricação por Filamentos Fundidos
MA	Manufatura Aditiva
PLA	Ácido polilático
Ra	Rugosidade média
SLA	Estereolitografia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	9
1.2	OBJETIVOS DE PESQUISA.....	10
1.3	JUSTIFICATIVA.....	10
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	11
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	13
2.2	RUGOSIDADE.....	14
2.3	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO.....	15
2.4	PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO 2^{k-1}	17
3	METODOLOGIA	22
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	22
3.2	TÉCNICA DE COLETA DE DADOS	23
3.3	TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS.....	25
3.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
3.5	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	26
3.6	ANÁLISE DE RUGOSIDADE	28
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
4.1	CONCLUSÕES DO TRABALHO	35
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas duas décadas, com o crescente avanço da tecnologia e sua ampliação, pequenas e grandes empresas buscam cada vez mais adaptar seus processos a fim de ganharem destaque no mercado competitivo. Diante dessa era digital, novas formas e conceitos de produção se consolidam através da integralização de seus sistemas produtivos. Para Stock e Seliger (2016), a concorrência entre os sistemas produtivos das empresas faz com que a busca pelo desenvolvimento de melhores processos digitais seja uma prática cada vez mais comum no cenário mercadológico.

Kotler *et al.* (2017) ainda acrescentam que, em um mundo de informações digitais, as organizações estão cada vez mais competitivas e conectadas às transformações tecnológicas e buscam se reinventar continuamente para obter resultados satisfatórios de maneira rápida e eficiente. Dessa forma, a partir da última década, conhecida como indústria 4.0 se estruturou e ganhou força dentro dos centros industriais estruturados no que existe de mais moderno em automação e sistemas inteligentes (LAURETH, 2014). Assim, ganhando espaço nos meios de produção, mediante a alguns benefícios previstos como a redução de custos, redução de erros, economia de energia e conservação ambiental (VENTURELLI, 2014).

Neste contexto, um dos principais pilares da indústria 4.0 é a manufatura aditiva que, ao contrário do método tradicional, funciona adicionando a matéria-prima até a formação completa de um produto (PEDERNEIRAS, 2020). A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, utiliza de um modelo digital para a produção de peças tridimensionais à medida que se adiciona a matéria-prima uma camada por vez. Segundo Aires *et al.* (2020), a manufatura aditiva é essencial para que se consiga atingir os resultados de melhoria de produto na obtenção de estruturas mais leves, eficientes e inovadoras.

Contudo, por tratar-se de uma metodologia mais avançada e em processo de evolução ainda pode ser aprimorada por meio de melhorias na qualidade e otimização das impressões 3D. Para isso, uma das possíveis técnicas a serem utilizadas para tal otimização e melhor eficiência na manufatura aditiva é o planejamento de experimento, definida por Button (2016) como um método que utiliza de ferramentas de controle estatístico para analisar as variáveis que impactam no processo e, com isso, poder melhorá-lo continuamente.

Calado e Montgomery (2006) determinam que o planejamento experimental tem por objetivo auxiliar pesquisadores a delimitar quais variáveis exercem maior influência no desempenho de um processo, obtendo como resultado:

- A redução da variação do processo tendo assim, melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos;
- A redução do tempo do processo;
- A redução do custo operacional;
- A melhoria no rendimento do processo.

Portanto, a aplicação do DOE dentro da manufatura aditiva, poderá auxiliar no melhor desempenho e resultado visando o aperfeiçoamento do processo e a obtenção de produtos conforme as especificações pretendidas.

Com base nas considerações iniciais, a presente pesquisa tem como temática a exploração dos conhecimentos sobre a manufatura aditiva e de que modo o DOE pode ser utilizado como ferramenta para a coleta e análise de dados com o intuito de verificar os impactos da variação 4 fatores de entrada sobre uma resposta desejada.

1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo analisar, utilizando o planejamento de experimento (DOE), os fatores de entrada: altura da camada, velocidade de impressão, temperatura da mesa e temperatura do bico, seus impactos sobre a rugosidade das paredes externas de uma peça impressa em uma impressora 3D de baixo custo.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Seleção dos fatores de impacto no processo.
- Elaboração de hipóteses e conjunturas sobre o processo.
- Realização de testes e análises experimentais.
- Análise da rugosidade do produto.

1.3 JUSTIFICATIVA

O surgimento de novas tecnologias intensifica a atenção de organizações para a busca do que se tem de mais inovador para a aplicação em sua cadeia produtiva. Neste sentido a Manufatura Aditiva (MA) ganha destaque como uma nova maneira de se produzir e atender

demandas que antes eram realizadas por uma cadeia convencional, trazendo benefícios em toda cadeia suprimentos, do nível estratégico ao operacional (SARTORI, 2019). Considerando que a MA se encontra em processo de desenvolvimento, a aplicação de ferramentas de gestão da qualidade e experimentos para a otimização de seu processo tornam-se viáveis a nível de pesquisa e informação para comunidade.

O interesse da escolha do tema desta pesquisa surgiu devido ao novo laboratório de Manufatura Aditiva inaugurado na Universidade Federal de Uberlândia em 2021, onde contém duas impressoras 3D de baixo custo disponíveis para o desenvolvimento de projetos dos alunos de graduação do campus Pontal.

Ao aplicar o DOE no processo de impressão 3D, busca-se a otimização das impressões afim de entender a melhor combinação das variáveis para o melhor resultado do produto desejado. Dessa forma, o DOE direcionou os procedimentos experimentais, possibilitando mensurar e compreender quais parâmetro da máquina tem maior influência sobre a variável de resposta a ser analisada.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa apresenta um breve resumo sobre manufatura aditiva, planejamento de experimento, planejamento de experimento fatorial fracionado e rugosidade.

A pesquisa constitui-se de um experimento realizado em uma impressora 3D de baixo custo em condições de altura da camada, velocidade de impressão, temperatura da mesa e temperatura do bico estabelecidas pela pesquisadora para a análise da rugosidade da parede externa de uma peça impressa.

O trabalho limita-se a aplicação na impressora Ender 3 Pro e em condições determinadas anteriormente, sendo assim, está limitado aplicações posteriores a este modelo de impressora ou similares.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A partir da fundamentação dos objetivos da pesquisa, estruturou-se o trabalho de conclusão de curso da seguinte forma:

- Introdução: irá apresentar a contextualização do assunto pesquisado, os objetivos gerais e específicos da pesquisa e a justificativa sobre a relevância do trabalho apresentado.

- Fundamentação teórica: são apresentados os conceitos sobre manufatura aditiva, planejamento de experimento, planejamento de experimento fatorial fracionado, rugosidade e análise de variância utilizados na condução do estudo.
- Metodologia: apresenta-se a natureza e o problema do trabalho, objetivos e procedimentos, técnica de coleta e análise de dados e os procedimentos metodológicos utilizados durante o desenvolvimento da pesquisa.
- Resultados: será feita a contextualização do local e máquina utilizada no experimento, definição do problema, o resultado das análises e o levantamento de propostas de melhoria.
- Conclusão: será retomado o assunto estudado, as conclusões da pesquisa e do experimento e a sugestão para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Na década de 1980, nos EUA, foi criada a Manufatura Aditiva, usada inicialmente na produção de protótipos físicos e para a construção de produtos. Contudo, com o passar dos anos a MA, passou a ser definida como um método de impressão que une materiais, onde os produtos são construídos camada por camada, através de cortes transversais, a partir de um modelo 3D (BERTHON, 2015).

O processo da impressão tridimensional inicia-se com a criação de um modelo 3D do objeto desejado, em algum *software* de edição no computador. A partir disso, o modelo é enviado para a impressora, onde serão definidas as dimensões e espessuras do objeto. O *software* da impressora é responsável por analisar o modelo enviado e assim, determinar como imprimí-lo utilizando a menor quantidade de material e tempo.

Após a definição das principais configurações desejadas, o *software* compila os dados e “fatia” o objeto em camadas horizontais, cada “fatia” representa um conjunto de comandos que faz com que a impressora se movimente nas direções x e y enquanto realiza o processo de extrusão do material ou projeção do laser no pó ou na resina, dependendo do tipo de técnica utilizada.

A primeira técnica de criação de modelos e protótipos tridimensionais utilizando um arquivo virtual, foi realizada por Chuck Hull, em 1984, utilizando estereolitografia ou *Stereolithography* (SLA) como método de aplicação. O modelo de impressão SLA utiliza de raios ultravioleta (UV) a laser, que ao entrar em contato com determinada resina, solidifica-se e assim, a radiação é projetada sucessivamente nas camadas a serem solidificadas de modo que a sua construção seja vertical, camada após camada.

Contudo, com o passar dos anos, outras técnicas de impressões 3D foram desenvolvidas, como por exemplo a Modelagem por Deposição Fundida (FDM), também conhecida como Fabricação por Filamentos Fundidos (FFF) que utiliza de materiais termoplásticos, ou seja, polímeros ou plásticos que alteram sua forma de acordo com a temperatura, onde ocorrerá a extrusão através de um bico aquecido, para a construção do produto desejado. Posteriormente, cria-se a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), realizando as impressões utilizando de ligas metálicas, como titânio, alumínio e aço inoxidável para a confecção das peças.

A Tabela 1 abaixo apresenta as principais técnicas de impressão 3D:

Tabela 1 - Principais técnicas de impressão 3D

Técnica	Tecnologia	Materiais
Fotopolimerização	Estereolitografia (SLA)/ Polimerização de 2 fótons (2PP)	Foto polímeros e resinas
Extrusão	Modelagem por Deposição Fundida (FDM)	Termoplásticos, misturas e metais eutéticos
Granular	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)/ Fusão Seletiva a Laser (SLM)	Ligas metálicas: titânio, alumínio, aço inoxidável, termoplásticos, pós metálicos e cerâmicos

Fonte: adaptado de Dabague, 2014.

Segundo Brenken *et al.* (2018), a manufatura aditiva por Modelagem por Deposição Fundida (FDM) tornou-se um dos melhores métodos da manufatura aditiva de polímeros devido ao seu baixo custo e sua flexibilidade pois, utiliza filamentos termoplásticos como material de partida. Para isso, o material PLA (ácido polilático) e o ABS (acrilonitrila butadieno esterino) são os principais polímeros usados para FDM (LIGON *et al.*, 2017). Dessa forma, o filamento é extrudado através de um bico aquecido e depositado camada por camada para a construção do componente em 3D.

Durante o processo de impressão diversos parâmetros controláveis podem influenciar na qualidade e estrutura das peças. Jiang (2018), demonstrou por meio de um estudo de Modelagem por Deposição Fundida que a orientação da camada, temperatura do bucal e a temperatura ambiente influenciavam significativamente a qualidade da superfície do material impresso. Liu 2017 *et al*, utilizando o método Taguchi, para estudar os efeitos dos parâmetros no processo de extrusão, completa que a espessura da camada e a velocidade de deposição também são parâmetros que contribuem para a variação do processo de impressão.

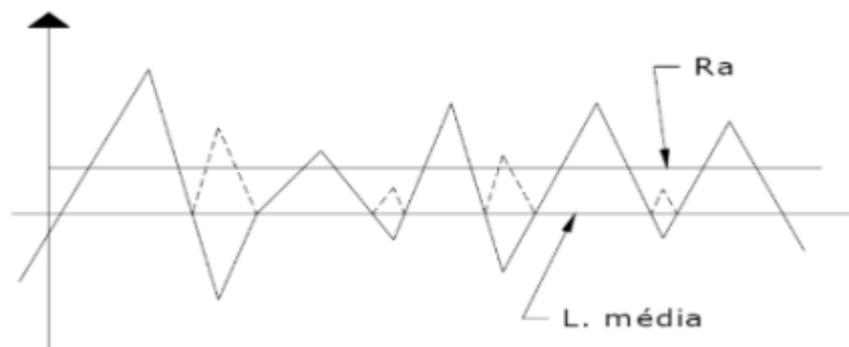
2.2 RUGOSIDADE

De acordo com Araujo (2016), a altura da camada tem influência direta com a qualidade, rugosidade, resistência, tempo de fabricação, design, entre outras características. O autor ainda reitera que, quanto maior a altura da camada, maior será a velocidade de fabricação e consequentemente menor será seu custo, porém, a qualidade e resistência também passam a ser menores. Murugan (2018) ainda cita que, a altura de impressão é o que define o acabamento da peça e dessa forma tem grande influência sobre sua rugosidade.

A rugosidade pode ser definida como uma superfície de irregularidades finas e repetidas existentes quando comparadas a superfície ideal de uma peça (OLIVEIRA, 2015). A aferição da rugosidade é uma forma de avaliar as irregularidades superficiais de uma peça e pode ser medida a partir de aparelhos eletrônicos, por exemplo, o rugosímetro. Dessa forma, é possível mensurar e analisar seu comportamento quando há a variação dos fatores de controle.

A forma mais comum, devido sua facilidade de cálculo, para medir a rugosidade é a rugosidade média (Ra), sendo o mais utilizado para analisar o acabamento superficial após o processo de usinagem (ESPANHOL, 2008). A rugosidade média (Ra) é utilizada quando é necessário a medição contínua sobre as linhas de uma peça, ela é medida com base em uma série de comprimentos de amostragem, ou seja, comprimento de referência ou *cut-off* (OLIVEIRA, 2015). O parâmetro *cut-off* é o mínimo comprimento de amostragem, sendo assim, devem ser respeitados conforme a norma ISO 4288 (1996). Oliveira (2015), define a rugosidade média (Ra) como sendo a distância média de um perfil desde a sua linha média, sobre um comprimento medido. A Figura 1 mostra a rugosidade média do perfil de uma peça:

Figura 1 - Perfil da rugosidade média (Ra)



Fonte: Palma (2006)

Dessa forma, seu cálculo é feito a partir da média aritmética entre os picos e vales considerando como parâmetro inicial a linha média (L).

2.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

O Planejamento de Experimentos é uma técnica utilizada para definir quais dados, em quais quantidades e condições devem ser coletadas durante determinado experimento, buscando satisfazer os principais objetivos: alta precisão estatística na reposta e o menor custo possível (ROZENFELD, 2014). Assim, teve sua origem a partir dos conceitos de Lean Six Sigma, que

tem como principal objetivo, reduzir a variabilidade de um processo através do uso de ferramentas estatísticas.

Os experimentos planejados são uma poderosa ferramenta para a melhoria de um processo em que depende de diversas variáveis e da combinação delas. Dessa forma, Montgomery (1997) define as etapas que compõe a elaboração do planejamento de experimentos:

- Reconhecimento e relato do problema: é importante que todos os envolvidos na pesquisa e no experimento tenham com clareza a existência do problema e quais os objetivos a serem alcançados ao final do experimento.
- Escolha dos fatores e dos níveis: é necessário definir quais os fatores irão variar e os níveis que cada rodada do experimento será realizada.
- Seleção da variável resposta: será a média e/ou o desvio padrão dos experimentos.
- Escolha do planejamento experimental: considera-se o tamanho da amostra, seleção de uma ordem para as tentativas ou a aleatorização das rodadas.
- Realização do experimento: é importante monitorar o processo para garantir que tudo está sendo feito de acordo com planejado.
- Análise de dados: utilização de métodos estatísticos para a análise de dados, de modo que os resultados e conclusões sejam objetivos.
- Conclusões e recomendações: conclusões práticas sobre os resultados para uma possível recomendação das ações a serem tomadas.

O *Design of Experiments* (DOE) surgiu na década de 1920, difundida por Sir. Ronald Fisher através de uma pesquisa na Estação de Pesquisa em Agricultura na Inglaterra. Ronald mostrou como um experimento poderia ser conduzido na presença de condições variáveis como: temperatura, condições de solo e chuva. De acordo com Jankovic *et al.* (2021), o DOE engloba a uma série de aplicações de ferramentas estatísticas utilizadas para classificar e mensurar sistematicamente as relações de causa e efeito entre as variáveis de um processo, a fim de descobrir as melhores configurações entre elas para um processo otimizado.

Por tratar-se de um processo experimental e análise estatística, os planejamentos de experimentos podem variar de acordo com o tipo de procedimento estudado. Segundo Button (2016), o planejamento fatorial é utilizado quando se deseja analisar os efeitos de duas ou mais

variáveis e permite o estudo de diversos fatores com um número reduzido de experimentos. Button (2016), ainda reforça que o planejamento fatorial não interfere na qualidade da informação e permite o estudo simultâneo de diversas variáveis separando seus efeitos.

Dessa forma, o planejamento fatorial pode ser dividido em dois fatores: completo ou fracionado. O planejamento fatorial completo exige que todas as combinações possíveis entre níveis e fatores sejam consideradas, fazendo com que gere um grande número de ensaios, mesmo que para um pequeno número de fatores e níveis selecionados. Por outro lado, o planejamento fatorial fracionado, permite que seja considerado apenas uma fração das variáveis selecionadas, permitindo a redução do número de ensaios sem interferir na qualidade dos resultados obtidos (PAREDES, 2015).

Neste cenário, por tratar-se de uma pesquisa que irá considerar 2 níveis e 4 fatores de análises, optou-se pela utilização do planejamento fatorial fracionado, afim de reduzir o tempo e custo com os ensaios a serem realizados.

2.4 PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONADO 2^{k-1}

O planejamento fatorial fracionado nos permite uma análise do processo com corridas reduzidas. Assim, as informações sobre os efeitos principais e interações de ordem menor podem ser obtidas utilizando apenas uma fração do experimento fatorial completo (AZEVEDO, 2012). Ele ainda completa que, a partir dos experimentos fatoriais fracionários é possível projetar experimentos mais completos dentro de um subconjunto de fatores significantes.

Segundo Mazen *et al.* (2022) o experimento fatorial fracionado deve ser utilizado quando em um experimento fatorial completo as interações de mais altas ordens possam ser desprezadas se forem insignificantes. É uma forma de solucionar o aumento exponencial do número de experimentos a serem executados quando aumentado o número de fatores a serem analisados. Carpinetti (2009), reforça que os efeitos de alta ordem, em sua maioria, pode ser desprezados, uma vez que, não se mostram significativos, porém, há interesse prático em considerá-los e utilizar frações de planejamentos fatoriais.

Para ilustrar a representação de uma matriz de experimentos fracionários, Carpinetti (2009), demonstra na Figura 2 abaixo:

Figura 2 - Matriz de planejamento fracionário

Teste	1	2	3	4 = 123
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

Fonte: Carpinetti (2009)

Carpinetti (2009) traz também a representação do cálculo realizado, por meio da matriz de cálculo dos efeitos mostrado na Figura 3:

Figura 3- Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}

Teste	1	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
3	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
5	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fonte: Carpinetti (2009)

A análise da matriz de cálculo, mostra que muitas colunas são idênticas. Das 16 colunas da matriz, apenas 8 colunas são únicas, ou seja, a combinação linear para o cálculo do efeito da variável 1 é o mesmo que para o cálculo do efeito da interação entre 234 (CARPENETTI, 2009). E da mesma forma, tem-se os seguintes confundimentos (Tabela 2):

Tabela 2 - Confundimentos do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1}

Efeito	Confundimento	Efeito	Confundimento
1	234	12	34
2	134	13	24
3	124	23	14
4	123	Média I	1234

Fonte: Adaptado de Carpinetti (2009)

Dessa forma, Carpinetti (2009) complementa que ao multiplicarmos a coluna 12 pela coluna de dados e dividir por 4, o valor obtido será a soma dos efeitos das interações 12 e 34. Similarmente ocorre com os demais complementos e interações.

Nesse caso, afirma-se que essas duas interações são "confusas". Em outras palavras, o valor descoberto é, na verdade, o resultado da soma dos resultados das interações 12 e 34. A confusão entre os outros impactos mencionados acima é semelhante. Assim, as combinações lineares dos efeitos de confusão $I_0, I_1, I_2, \dots, I_{123}$ são obtidas multiplicando as 8 colunas distintas pela coluna de dados e dividindo o resultado por 4 ($N/2$). Portanto, tem-se que:

Tabela 3 - Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}

I_0	estima	Média + (1/2)1234
I_1	estima	1 + 234
I_2	estima	2 + 134
I_3	estima	3 + 124
I_{12}	estima	12 + 34
I_{13}	estima	13 + 24
I_{23}	estima	23 + 14
I_{123}	estima	4 ÷ 123

Fonte: Adaptado de Carpinetti (2009)

O experimento produz as seguintes combinações lineares se assumirmos que as interações entre os três e quatro fatores podem ser ignoradas.

Tabela 4- Matriz de cálculo, experimento fracionário 2^{4-1}

I_0	estima	Média
I_1	estima	1
I_2	estima	2
I_3	estima	3
I_{12}	estima	12 + 34
I_{13}	estima	13 + 24
I_{23}	estima	23 + 14
I_{123}	estima	4

Fonte: Adaptado de Carpinetti (2009)

Como resultado, o planejamento de experimento fatorial fracionado refere-se a este *layout* de 4 componentes, 2 níveis e 8 combinações de teste. É um exemplo da classe geral de experimentos fatorial fracionado $2k-p$ em que as seguintes condições devem ser atendidas:

- a) k fatores são examinados;
- b) em combinações de teste $2k-p$;
- c) o planejamento fatorial fracionado $2k-p$ requer a introdução de p variáveis;
- d) a introdução de variáveis é feita a partir das colunas de interação da matriz de cálculo de um experimento fatorial $2k-p$.

2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância, também conhecida como ANOVA é um procedimento estatístico utilizado para comparação entre três ou mais grupos de amostras de um ou vários fatores de controle. Seu principal objetivo é realizar testes estatísticos para identificar as causas e efeitos entre variáveis, permitindo a comparação entre as médias de diversos grupos ao mesmo tempo (MENDONÇA, 2016).

Paiva (2007), explica que se dois níveis de um fator geram respostas médias estatisticamente iguais, entende-se que o fator não influencia na resposta, porém, se a resposta média em um nível específico é estatisticamente diferente das respostas alcançadas nos outros níveis, entende-se que o fator é significativo.

Dessa forma, a análise de variância ANOVA tem o papel de auxiliar na descoberta dos principais fatores de efeito sobre a resposta, essa análise permite enxergar o quanto de significância existe entre os efeitos dos resultados da variação dos grupos. (PENTEADO, 2011).

Para ilustrar a descrição sobre a ANOVA, a Figura 4 foi construída utilizando dois fatores A e B e suas interações:

Figura 4- Análise de variância (ANOVA)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀
Fator A	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Fator B	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interação AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Erro	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
TOTAL	SS_T	$abn-1$		

Fonte: Penteado (2011)

Dessa forma, pode-se descrever os cálculos de SSA e SSB, soma dos quadrados dos principais efeitos, pelas equações 2 e 3:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (2)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^a y_j^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (3)$$

Em que:

a = número de categorias do fator A;

b = número de categorias do fator B;

y = a média dos efeitos individuais da medida, (+) e (-) corresponde ao nível alto e nível baixo;

n= número total de observações.

Para a realização do cálculo dos efeitos de interação SSAB, é necessário primeiro a realização do cálculo da soma dos quadrados subtotais, dada pela Equação 4:

$$SS_{Subtotais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a y_{ij}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (4)$$

E posteriormente, realizar o cálculo pela Equação 5

$$SS_{AB} = SS_{Subtotais} - SS_A - SS_B \quad (5)$$

O cálculo de do erro SSE é dado pela Equação 6

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotais} \quad (6)$$

E a soma total dos quadrados pela Equação 7

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^a y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (7)$$

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia utilizada neste trabalho é de natureza aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para soluções práticas através das posições teóricas (LEÃO, 2017). O problema é desenvolvido de forma quantitativa utilizando a manipulação de dados coletados para cálculos e análises estatísticas. De acordo com Knechtel (2014) a pesquisa quantitativa atua sobre um problema baseando-se no teste de uma teoria usando variáveis quantificadas em números. Gomes *et al.* (2014) ainda acrescenta que a abordagem quantitativa utiliza desde as técnicas estatísticas mais simples, como porcentagens, médias e desvio padrão, às mais complexas como coeficiente de correlação e geração de fórmulas aplicáveis a algum processo.

O objetivo deste trabalho é explicativo, uma vez que, tem como preocupação central identificar os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos (Gil, 2002) que neste caso impactam no resultado produto. Ainda de acordo com Gil, as pesquisas explicativas valem-se quase exclusivamente do método experimental, portanto, a pesquisa utiliza de procedimentos experimentais em uma impressora 3D para controlar e medir os resultados obtidos a partir das hipóteses geradas.

Dessa forma, de acordo com Fachin (2017), a pesquisa experimental, desempenha duas funções: descobrir conexões casuais e atingir a demonstrabilidade, ou seja, aceitar os resultados como eles se apresentam, incluindo os imprevistos que podem ocorrer durante os experimentos, examinando os agentes em suas relações e dimensionando-os.

Afim de apresentar de forma visual a classificação da pesquisa, Penteadó (2015), resume, através da Tabela 5, as classificações da pesquisa.

Tabela 5 – Classificação da pesquisa

CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA			
Natureza	Problema	Objetivos	Procedimentos
Básica Aplicada	Quantitativa	Exploratória	- Bibliográfica - Documental - Experimental - Levantamento
	Qualitativa	Explicativa Descritiva	- Estudo de caso - Ex-post-facto - Pesquisa-ação - Participante - Modelagem e simulação
			<ul style="list-style-type: none"> - Axiomática - Normativa axiomática - Descritiva empírica - Normativa empírica - Descritiva

Fonte: Adaptado de Penteadó (2015)

Com isso, a classificação desta pesquisa é de natureza aplicada, atua sobre o problema de forma quantitativa, possui objetivo explicativo e utiliza de procedimentos experimentais para o desenvolvimento do trabalho.

3.2 TÉCNICA DE COLETA DE DADOS

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento do planejamento de experimento fatorial fracionado, para a análise da rugosidade. Para isso, será utilizado o rugosímetro Mitutoyo SJ-210, afim de determinar a rugosidade média (Ra) - Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade- na superfície da peça impressa. A Figura 5 mostram o aparelho rugosímetro utilizado para a realização dos testes:

Figura 5 - Aparelho rugosímetro Mitutoyo SJ – 210



Fonte: Da autora (2022)

Primeiramente foram levantados os fatores de entrada: altura da camada, velocidade de impressão, temperatura da mesa e temperatura do bico e definidos os níveis mínimos e máximos. A técnica do fatorial fracionado, nos possibilita a combinação de $2^{4-1} = 2^3$, ou seja, uma combinação de 8 testes. Contudo, neste estudo, será realizado 2 grupos de experimentos considerando as mesmas condições, totalizando 16 testes. A Tabela 6 abaixo mostra os fatores e seus níveis selecionados.

Tabela 6 - Fatores e níveis experimentais

FATORES E NÍVEIS EXPERIMENTAIS			
FATOR	DESCRIÇÃO	NÍVEL -1	NÍVEL +1
A	ALTURA DA CAMADA (mm)	0,1	0,2
B	VELOCIDADE (mm/s)	50	70
C	TEMPERATURA DA MESA (°C)	40	60
D	TEMPERATURA DO BICO (°C)	195	205

Fonte: Da autora (2022)

Após essa seleção é feita a matriz de planejamento de experimentos, Tabela 7, que irá guiar as condições de cada teste.

Tabela 7- Matriz de planejamento de experimento

MATRIZ DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO				
EXPERIMENTO	A	B	C	ABC=D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1

Fonte: Da autora (2022)

Com a matriz de planejamento de experimentos geradas, os testes foram realizados seguindo as etapas abaixo:

- 1) Para a impressão, foi utilizado o *software* Utimaker Cura. Será nele que a mudança das variáveis de impressão será realizada.
- 2) Foi realizado o nivelamento da mesa e colocado um *spray* adesivo para a peça não se movimentar.
- 3) Dado o início da impressão, o material PLA foi extrudado camada por camada de forma linear até a formação do objeto projetado.
- 4) Ao final de cada impressão, foi necessário esperar que o equipamento voltasse para a sua temperatura inicial, para não influenciar nos demais experimentos.
- 5) A mudança dos parâmetros foi realizada de acordo com a matriz de experimentos, gerada de forma aleatória
- 6) Ao final de cada ciclo, era dado início a uma nova impressão com uma nova condição até finalizar os 16 testes.

3.3 TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS

Após a coleta de dados e estruturação da Tabela de planejamento de experimentos mencionada anteriormente, os dados serão analisados por meio do *software* Minitab®, uma ferramenta estatística frequentemente utilizada por profissionais e estudantes de engenharias e outras áreas de exatas. A ANOVA, será uma ferramenta utilizada para a verificação da significância dos fatores analisados e suas interações.

3.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para dar início aos experimentos, foi necessário identificar quais os possíveis fatores de impacto sobre o resultado. Além disso, foi preciso verificar a disponibilidade de matéria-prima para se realizar os testes e tempo disponível para a finalização da pesquisa, para em seguida definir qual método experimental a ser utilizado. Após ser feito o levantamento anterior, foi definido como o método mais viável, devido ao tempo e matéria-prima disponível, o fatorial fracionado, uma vez que ele possibilita a realização de uma quantidade menor de testes para a análise.

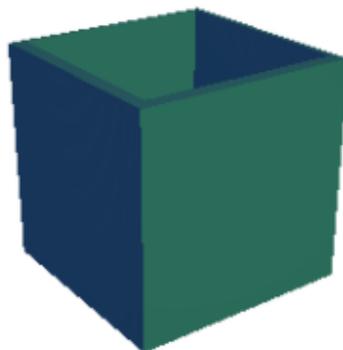
Em seguida, foram definidos os fatores de entrada a serem analisados e seus níveis de variação, para a construção da matriz de planejamento de experimento. A impressão de cada teste foi realizada nas mesmas condições iniciais para que não houvesse impacto ou influência entre uma impressão ou outra. A coleta de dados foi realizada após a impressão de todos os experimentos, por meio do rugosímetro.

Por fim, foi realizada a análise dos dados no *software* MiniTab que auxiliou na construção dos gráficos e equações presentes na pesquisa.

3.5 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Utilizando o AutoCAD foi feito o modelo da caixinha a ser impressa, sendo ela sem tampa e com as dimensões de 25mm cada aresta. A seguir será apresentado o modelo em CAD e a peça pronta nas Figuras 6 e 7:

Figura 6 - modelo CAD



Fonte: Da autora (2022)

Figura 7- peça impressa



Fonte: Da autora (2022)

Para a impressão das peças, foi utilizada a impressora Ender 3 Pro, com uma mesa de vidro de 0,3 mm de espessura, conforme apresentado na Figura 8. A Ender 3 Pro, possui a tecnologia FDM e consegue imprimir materiais PLA, ABS e TPU. As impressões foram realizadas sem uma câmara de proteção, ou seja, todas as peças foram expostas ao contato com o ar, podendo assim, haver certa influência na temperatura apresentada pelo display e uma má distribuição de calor nas extremidades da peça e dessa forma, uma interferência externa nas características mecânicas nas caixinhas.

Figura 8- Impressora Ender 3 Pro



Fonte: 3dLab (2023)

O material utilizado, foi o PLA de cor preta e espessura de 1,75mm, com a temperatura de impressão sugerida entre 190°C e 210 °C e temperatura da mesa sugerida acima de 60 °C. Contudo, neste trabalho, foi utilizada a temperatura da mesa variando de 40 °C a 60 °C afim de

reduzir os custos operacionais. Os demais limites, foram definidos de acordo com os interesses do autor.

3.6 ANÁLISE DE RUGOSIDADE

Para iniciar os testes de rugosidade dos corpos impressos, foi necessário a enumeração da ordem de cada peça impressa nas condições determinadas anteriormente, afim de analisar quais variáveis de maior impacto na rugosidade do corpo. Após isso, foi necessário a calibração do equipamento- rugosímetro- com o corpo padrão disponível e definido os parâmetros a serem utilizados para a medição média (Ra) da rugosidade.

Costa (2022), afirma que o parâmetro Ra é utilizado em superfícies onde os sulcos de usinagem são bem orientados (fresagem), além de ser a medição mais utilizada e aplicável a maioria dos processos de fabricação. A rugosidade média (Ra) é medida com base em uma série de comprimentos de amostragem, ou seja, comprimento de referência ou *cut off*. De acordo com a ISO 4288 (1996) o *cut off* é o mínimo comprimento de amostragem que o aparelho de medição deve percorrer sobre a peça antes de determinar sua rugosidade. Assim, antes de realizar a medição deve ser feita uma avaliação e análise considerando as variáveis de perfil: periódico e aperiódico e parâmetros de medição RSm, Ra e Rz mostrados na Figura 9:

Figura 9- Valor padronizado conforme a ISO 4288;1996

Perfil Periódico (Ex: torneamento, fresamento)	Perfil aperiódico (Ex: retificação, eletroerosão)		Ir = λc (mm)	ln (mm)	λs (μm)	r ⁽¹⁾ (μm)
	RSm (mm) ⁽²⁾	Ra (μm)				
> 0,013 ...0,04	> (0,0063) ...0,02	> (0,025) ...0,1	0,08	0,4	2,5	2
> 0,04 ...0,13	> 0,02 ...0,1	> 0,1 ...2	0,25	1,25	2,5	2
> 0,13 ...0,4	> 0,1 ...2	> 2 ...10	0,8	4	2,5	2 ou 5 ⁽³⁾
> 0,4 ...1,3	> 2 ...10	> 10 ...50	2,5	12,5	8	5
> 1,3 ...4	> 10 ...80	> 50 ...200	8	40	25	10

⁽¹⁾ r = valor máximo para o raio da ponta de apalpação
⁽²⁾ RSm = valor médio da largura dos elementos do perfil no comprimento de amostragem
⁽³⁾ aplicável para superfícies com Ra > 0,5 μm ou Rz > 3 μm

Fonte: Fischer *et al.* (2012)

Dessa forma, foi escolhido de forma aleatória um dos corpos para a medição do Rsm, Ra e Rz resultando em 1,01 (mm)²; 6,14 μm e 40,56 μm respectivamente e assim, definido o cut-off de 2,5mm. Outro parâmetro definido pelo pesquisador foi o de velocidade medição do aparelho em 0,25mm/s.

Para iniciar as medições, o rugosímetro foi sobreposto em uma mesa padrão de medição, disponível no laboratório de metrologia. Já as peças, foram sobrepostas em blocos padrões em 1,78 mm para atingir a altura necessária do sensor e suas laterais fixadas para evitar que qualquer movimento prejudicasse a medição, uma vez, que o sensor do rugosímetro é extremamente sensível. A medição da rugosidade média, foi realizada de forma perpendicular às camadas da peça. Abaixo as Figuras 10 e 11 da estrutura de como as medições foram realizadas:

Figura 10 - Estrutura base do rugosímetro e da peça medida



Fonte: Da autora (2022)

Figura 11 - Rugosímetro e peça posicionados para a medição



Fonte: Da autora (2022)

É importante ressaltar que foi realizada a medição da rugosidade média (Ra) apenas da parte externa de cada peça e afim de obter maior precisão dos dados, cada lado foi medido 3 vezes, e posteriormente feito a média. Após a medição dos quatro lados de cada peça, foi realizada a média para obtenção do resultado de Ra que será utilizado na pesquisa, como mostrado nas Tabelas 8, 9 e 10:

Tabela 8 - Medição média de cada lado, grupo 1:

GRUPO 1- Ra μm								
LADOS DA CAIXA	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8
LADO 1	6,921	14,285	7,366	13,378	7,080	12,287	8,425	14,096
LADO 2	7,430	13,985	7,911	12,408	7,683	13,380	7,905	13,299
LADO 3	7,129	13,354	8,538	13,037	7,425	14,246	7,702	12,144
LADO 4	7,180	13,843	7,556	13,342	7,556	13,654	7,296	13,215
MÉDIA	7,165	13,867	7,843	13,041	7,436	13,392	7,832	13,189

Fonte: Da autora (2022)

Tabela 9 - Medição média de cada lado, grupo 2:

GRUPO 2- Ra μm								
LADOS DA CAIXA	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8
LADO 1	7,472	13,591	7,503	13,698	8,512	12,313	6,715	13,434
LADO 2	7,173	12,100	8,215	14,748	8,488	13,620	6,845	13,698
LADO 3	7,794	13,174	6,813	13,589	8,469	14,201	6,730	13,535
LADO 4	8,032	14,154	7,274	12,795	7,787	13,944	7,053	11,968
MÉDIA	7,618	13,255	7,451	13,708	8,314	13,520	6,836	13,159

Fonte: Da autora (2022)

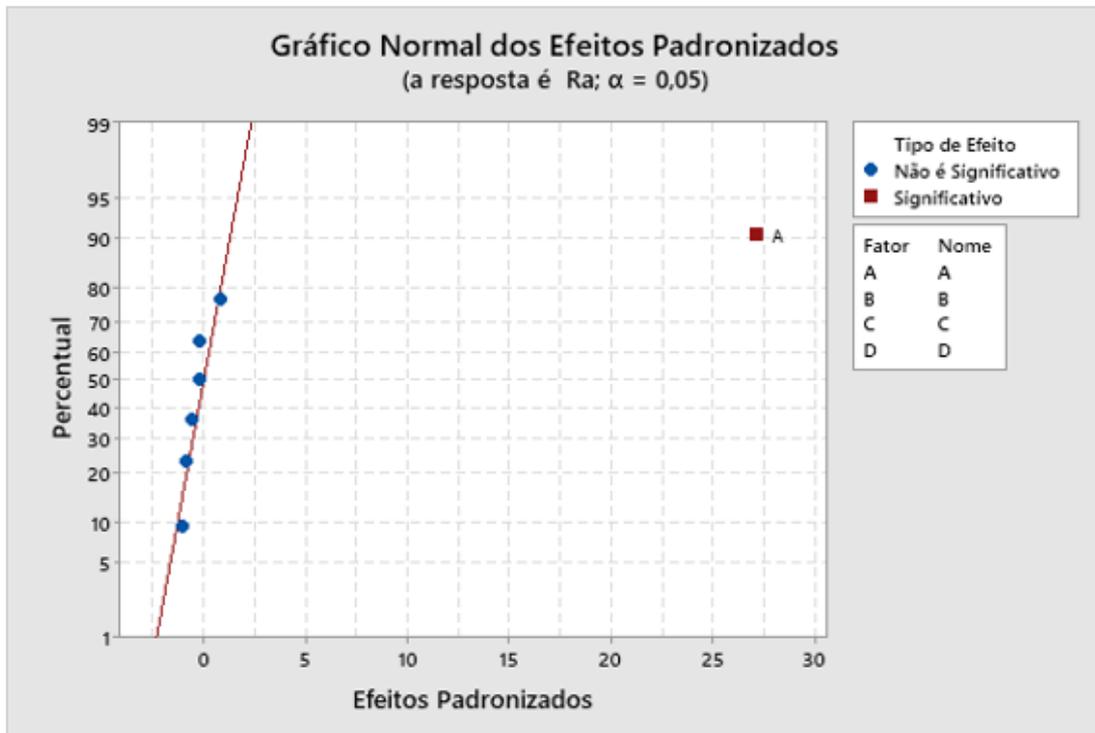
Tabela 10 - Medição da rugosidade de cada corpo de acordo com o planejamento de experimento fatorial

MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE MÉDIA (Ra)						
EXPERIMENTO	A	B	C	ABC=D	GRUPO 1 Ra μm	GRUPO 2 Ra μm
1	-1	-1	-1	-1	7,165	7,618
2	1	-1	-1	1	13,867	13,255
3	-1	1	-1	1	7,843	7,451
4	1	1	-1	-1	13,041	13,708
5	-1	-1	1	1	7,436	8,314
6	1	-1	1	-1	13,392	13,52
7	-1	1	1	-1	7,832	6,836
8	1	1	1	1	13,189	13,159

Fonte: Da autora (2022)

O gráfico normal dos efeitos padronizado, Figura 12, demonstra que o fator significativo para a resposta sobre rugosidade é o A, ou seja, altura da camada. O gráfico mostra que o fator A tem efeito positivo, sendo assim, quando o processo altera do nível -1 para o nível +1 a resposta aumenta.

Figura 12 - Gráfico normal dos efeitos



Fonte: Da autora (2022)

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, Figura 13, indica que o fator de maior influência sobre a resposta é o Fator A, ou seja, a altura da camada é o fator que provoca o maior efeito sobre a rugosidade. Em seguida, temos a interação AD (altura da camada e temperatura do bico) como o segundo fator de maior influência no processo. Contudo, pode-se observar que a linha de referência não cruza a interação, o que sugere que mesmo sendo o segundo maior causador de efeito sobre a resposta, não possui efeito significativo.

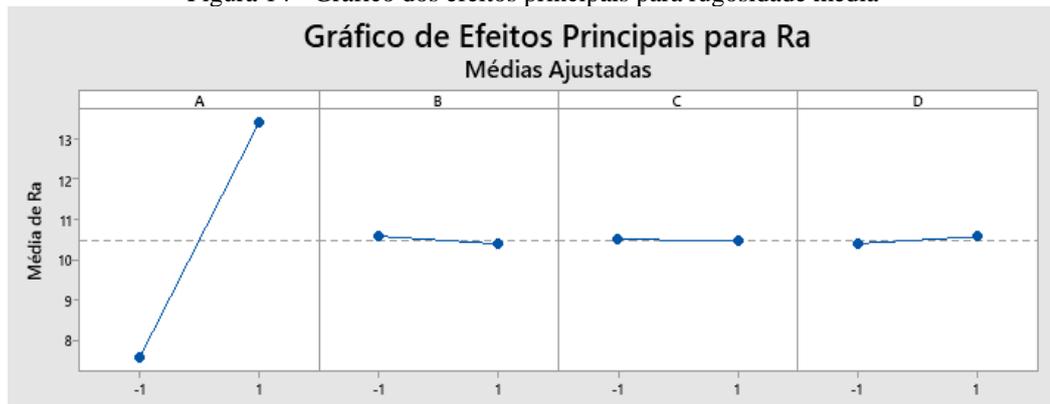
Figura 13 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados



Fonte: Da autora (2022)

No gráfico dos efeitos principais, Figura 14, é possível perceber nitidamente que os Fatores B, C e D não alteram de forma significativa o valor da rugosidade quando variam do nível -1 para o nível +1. Os Fatores B e D, é possível perceber uma leve alteração ao variar do nível -1 ao nível +1, enquanto o Fator C permanece praticamente constante. No entanto, mesmo com pequenas variações, esses efeitos para a rugosidade média são quase insignificantes quando observamos a variação no Fator A. O fator A, quando alterado do nível -1 para o nível +1 mostra uma mudança de quase o dobro do valor encontrado para a rugosidade média e assim, demonstra-se o fator de maior significância no impacto do resultado da rugosidade média.

Figura 14 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade média



Fonte: Da autora (2022)

Quando se realiza a variação do nível -1 (0,1 mm) para o nível +1 (0,2mm) do Fator A, tem-se a praticamente o dobro da resultante rugosidade média (Ra). A Tabela 11, mostra a análise de variância da rugosidade média, através da sua análise é possível perceber que o único fator abaixo de 0,05 no Valor -P é o Fator A, sendo assim o único com 95% de confiança, mostrando-se o único estatisticamente significativo.

Tabela 11- Análise de variância rugosidade média (Ra)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	136,369	19,481	105,38	0,000
Linear	4	136,098	34,024	184,06	0,000
A	1	135,827	135,827	734,76	0,000
B	1	0,146	0,146	0,79	0,401
C	1	0,005	0,005	0,03	0,871
D	1	0,120	0,120	0,65	0,444
Interações de 2 fatores	3	0,271	0,090	0,49	0,700
A*B	1	0,009	0,009	0,05	0,829
A*C	1	0,059	0,059	0,32	0,588
A*D	1	0,203	0,203	1,10	0,325
Erro	8	1,479	0,185		
Total	15	137,848			

Fonte: Da autora (2022)

A Tabela 12, apresenta os coeficientes codificados, sua análise mostra que todos os fatores onde o Valor -P é abaixo de 0,05 são significativos. O coeficiente tem a função de representar o tamanho e direção no modelo matemático, assim, os fatores onde o Valor -P apresenta-se menor que 0,05, terão seu coeficiente utilizado para a composição do modelo matemático na previsão do valor da rugosidade média. Dessa forma, o Fator A é único com o Valor -P abaixo de 0,05 e, portanto, o único fator significativo para a construção do modelo. É possível observar essa composição na Equação 8

Tabela 12- Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante		10,475	0,107	97,46	0,000
A	5,827	2,914	0,107	27,11	0,000
B	-0,191	-0,095	0,107	-0,89	0,401
C	-0,036	-0,018	0,107	-0,17	0,871
D	0,173	0,087	0,107	0,80	0,444
A*B	-0,048	-0,024	0,107	-0,22	0,829
A*C	-0,121	-0,061	0,107	-0,56	0,588
A*D	-0,225	-0,113	0,107	-1,05	0,325

Fonte: Da autora (2022)

$$\text{Rugosidade média (Ra)} = 10,475 + 2,914 A \quad (8)$$

É importante ressaltar que para a construção da equação os fatores que não se mostraram influentes sobre a variável resposta para um nível de significância de 5% foram descartados pois, não apresentam impacto sobre a resposta.

A rugosidade é uma medida da irregularidade ou aspereza de uma superfície. Ela pode ser quantificada por parâmetros como a altura média da rugosidade (Ra) e a média aritmética do desvio absoluto (Rz), neste caso, o parâmetro utilizado para mostrar o comportamento da irregularidade da superfície analisada é a Rugosidade média.

Quando uma camada é depositada em uma superfície, ela geralmente apresenta uma espessura e uma topografia própria. Se a camada tiver uma altura significativa em relação à superfície original, a rugosidade aumentará proporcionalmente. Isso ocorre porque a deposição da camada introduz novas irregularidades na superfície, que são somadas às irregularidades já existentes. Essas irregularidades podem ser causadas por vários fatores, como a natureza do material da camada, o processo de deposição e a interação entre a camada e a superfície subjacente.

Um estudo publicado por M. Mortazavi *et al.* em 2016 analisou o efeito da espessura do revestimento sobre a rugosidade da superfície. Os resultados mostraram uma relação linear entre a espessura do revestimento e a rugosidade da superfície. Dessa forma, é possível analisar a Equação 8 através do modelo de regressão linear simples.

Segundo Rodrigues (2012), a regressão linear simples é definida como a relação linear entre a variável dependente ou variável resposta (Y) e uma independente (X). Com isso, a equação linear simples é representada por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

onde:

- y_i representa o valor da variável resposta ou variável dependente, Y , na observação i , $i = 1, \dots, n$ (aleatória);
- x_i representa o valor da variável independente, X , na observação i , $i = 1, \dots, n$ (não aleatória)
- ε_i , $i = 1, \dots, n$ são variáveis aleatórias que correspondem ao erro
- β_0 corresponde ao ponto em que a reta regressora corta o eixo yy quando $X = 0$ e chamado de coeficiente linear.
- β_1 representa a inclinação da reta regressora, expressando a taxa de mudança em Y , ou seja, indica a mudança na média da distribuição de probabilidade de Y para o aumento de uma unidade na variável X .

Dessa forma, tem-se que a relação entre Y e X é linear e os erros independentes com a média nula. Assim, considerando $E(\varepsilon_i = 0)$ contem-se:

$$\begin{aligned}
 E(y_i) &= E(\beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i) \\
 &= \beta_0 + \beta_1 x_i + E(\varepsilon_i) \\
 &= \beta_0 + \beta_1 x_i
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Portanto, a Equação 8 que representa a rugosidade média nos corpos analisados é uma equação linear simples, ou seja, à medida que o Fator A (altura da camada), variável independente, se alterar, o valor de R_a (rugosidade média), variável dependente, também sofrerá alteração.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO

A presente pesquisa, possibilitou analisar e verificar, por meio do planejamento de experimentos, quais os principais fatores de impacto sobre a resposta desejada e seu comportamento com a alteração do nível de cada uma. Assim, foi constatado que o fator de maior significância para a alteração da rugosidade é da altura da camada, ou seja, a variação desse fator é diretamente proporcional ao aumento ou diminuição da rugosidade da peça.

A rugosidade pode ser, de modo direto, ligada a qualidade da peça, visto que, uma superfície menos rugosa e mais lisa, está correlacionada a maior resistência e durabilidade além de esteticamente ser mais atraente aos olhos do consumidor. Com isso, constatou-se que quanto mais finas as camadas de um corpo impresso, menor será seu grau de rugosidade e o contrário também se faz verdadeiro.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para novas pesquisas, coloca-se a necessidade de compreender, de forma mais detalhada, utilizando cálculos mais robustos, a influência de outros fatores que não apresentaram significância a partir desse estudo. Além disso, o mesmo planejamento pode ser realizado utilizando as dimensões internas da peça, a fim de obter novos dados e, possivelmente, uma resposta mais completa acerca desses efeitos.

Outra sugestão seria a aplicação do método *Desirability* afim de otimizar um problema de múltiplas respostas. A função *Desirability* tem como objetivo garantir que todas as respostas de um experimento fiquem dentro dos critérios estabelecidos, e ao mesmo tempo, gere o melhor valor para uma única resposta final (MONTGOMERY 2019). Para isso, com a utilização do trabalho “*Aplicação do Planejamento de Experimentos Fatorial Fracionário para análise de variáveis em impressão 3D*” (SANTOS, DENER 2022) e os dados coletados na pesquisa juntamente com os dados coletados sobre o comportamento da rugosidade tem-se um cenário com múltiplas respostas geradas a partir das mesmas variáveis de entrada: altura da cama, temperatura do bico, temperatura da mesa e velocidade tornando-se possível a junção das respostas obtidas para a aplicação da função *Desirability*.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Mônia Stremel et al. **Desenvolvimento, otimização e validação de metodologia analítica para determinação de ácidos orgânicos alifáticos em cachaças utilizando eletroforese capilar de zona**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Alimentos, Florianópolis, 2012.

BOMTEMPO, Gabriel Vaz de Oliveira. **Análise da rugosidade em amostras fabricadas por manufatura aditiva metálica e tipos de roscas para aplicações em implantodontia**. 2018. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

CARPINETTI, Luiz C. R. **Planejamento e análise de experimentos**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, De Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Cap. 9.

CAMPBELL, R.I.; Martorelli, M.; Lee, H.S. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Comput. Aided Des. Appl.* 2002, 34, 717–725

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N. PLANEJAMENTO FATORIAL: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. *Visão Acadêmica*, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-10, 30 jun. 2008. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/acd.v9i1.14635>.

EL MAGRI, Anouar *et al.* Experimental investigation and optimization of printing parameters of 3D printed polyphenylene sulfide through response surface methodology. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 1, p. 49625, 2021.

FACHIN, Odília. **Fundamentos da Metodologia Científica**: noções básicas em pesquisa científica. 6. Ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

FUCK, Marcos Paulo. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Curso de Graduação em Ciências Econômicas Dabague, Leonardo Augusto Moraes, 1988.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Como Elaborar Projetos de Pesquisa, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 1-176, dez. 2002.

GOMES, Edenilson Luiz *et al.* Análise da Produção Acadêmica: o uso da Metodologia Quantitativa em Estrutura de Capital nas Publicações do EnAnpad de 2006 a 2010. *Reac*, Santa Luiza, v. 3, n. 1, p. 70-92, dez. 2014.

KNECHTEL, Maria do Rosário. Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada. *Práxis Educativa*, v. 11, n. 2, p. 531-534, 2016.

KOTLER, P.; KARTAJAYA, H.; SETIAWAN, I. **Marketing 4.0**: do tradicional ao digital. Rio de Janeiro (RJ): Sextante.2017.

LAURETH, Waleska Camargo. Convergência Tecnológica, Educação e Trabalho: do discurso social global aos desafios regionais. **Revista da Associação Brasileira de Estudos do Trabalho**, v. 13, n. 2, p. 279- 293, jul./dez. 2014.

LEÃO, Lourdes Meireles. **Metodologia e Pesquisa Científica em Ciências Sociais: facilitando a vida dos estudantes, professores e pesquisadores**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2017.

MAGRI, Anouar El; MABROUK, Khalil El; VAUDREUIL, Sébastien; TOUHAMI, Mohamed Ebn. Experimental investigation and optimization of printing parameters of 3D printed polyphenylene sulfide through response surface methodology. **Journal Of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 138, n. 1, p. 49625, 17 jul. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.49625>.

MAZEN, Amna; MCCLANAHAN, Brendan; WEAVER, Jonathan M. Factors affecting ultimate tensile strength and impact toughness of 3d printed parts using fractional factorial design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 3, p. 2639-2651, 2022.

Mortazavi, M., et al. (2016). Investigating the Effect of Coating Thickness on Surface Roughness. *Journal of Materials Science and Engineering A*.

MURUGAN, Ramu; MITILESH, R. N.; SINGAMNENI, Sarat. Influence of process parameters on the mechanical behaviour and processing time of 3D printing. **Int J Mod Manuf Technol**, v. 1, n. 1, p. 21- 27, 2019.

NASCIMENTO, Carlos; OLIVEIRA, Carlos Henrique de; PAIVA, Emerson José de; VIEIRA, Fabiana; FREDERICO, Patricia; BRITO, Tarcisio. Análise da rugosidade Ra no torneamento do aço inoxidável super duplex uns S32750 utilizando planejamento de experimentos. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-5, 10 jan. 2019. ABCM. <http://dx.doi.org/10.26678/abcm.cobef2019.cof2019-0582>.

OLIVEIRA, José Francisco de. **Estudo do Fresamento de Acabamento da Liga de Alumínio Aeronáutico 7075-T6**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

PAIVA, A. P., COSTA, S. C., PAIVA, E. J., BALESTRASSI, P. P., FERREIRA, J. R. Multi objective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores. **International Journal Adv. Manuf. Technol.**, 2007.

PEDERNEIRAS, G. Como otimizar o gerenciamento de projetos na Indústria 4.0. **Ind 4.0 Manufatura Avançada**, v. 5, n. 06, p. 2020, 2020.

PENTEADO, Ricardo Batista. **Utilização de técnicas do planejamento de experimentos na otimização de um processo de torneamento da superliga NIMONIC 80A**. 2011. 88 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

SANTOS, Dener Augusto Oliveira. **Aplicação do planejamento de experimentos fatorial fracionário para análise de variáveis em impressão 3d**. 2022. 51 f. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, 2022.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. ESTUDO DOS AVANÇOS DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D E DA SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Estudo dos **Avanços da Tecnologia de Impressão 3D e da Sua Aplicação na Construção Civil**, Rio de Janeiro, v.1, n.1, p.1-93, nov. 2016.

RITTER, Gustavo Marques. **Influência dos parâmetros de uma impressora 3D sobre a produção de peças**. 2014. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, 2014.

SARTORI, A. Análise dos efeitos da Manufatura Aditiva na Cadeia de Suprimentos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SEVEGNANI, Richard. **Análise dos fatores relacionados ao defeito de fervura em tinta aplicada em motor industrial por meio de planejamento de experimentos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. **Procedia Cirp**, v. 40, p. 536-541, 2016.

RODRIGUES, Sandra Cristina Antunes. **Modelos de regressão linear e suas aplicações: relatório de estágio para obtenção do grau de mestre em ensino de matemática no 3º ciclo do ensino básico e no ensino secundário (2º ciclo de estudos)**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

VENTURELLI, Márcio. **Indústria 4.0: Uma Visão da Automação Industrial**. 2017.

VOLPATO, N. *et al.* **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: E. Blucher, 2017.