

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ERNESTO LOURENÇO JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE MANUFATURA ADITIVA  
SOBRE A RUGOSIDADE DE MODELOS ORTODÔNTICOS PRODUZIDOS POR  
ABS**

**MANAUS-AM**

**2023**

**ERNESTO LOURENÇO JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE MANUFATURA ADITIVA  
SOBRE A RUGOSIDADE DE MODELOS ORTODÔNTICOS PRODUZIDOS POR  
ABS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção. Linha de Pesquisa: Tecnologia Emergente; Sublinha de pesquisa: Manufatura Aditiva.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Júnior

**MANAUS-AM**

**2023**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L892a Lourenço Júnior, Ernesto  
Avaliação dos efeitos dos parâmetros de manufatura aditiva sobre a rugosidade de modelos ortodônticos produzidos por ABS / Ernesto Lourenço Júnior . 2023  
90 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jaime Casanova Soeiro Júnior  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Modelos ortodônticos. 2. FDM - Fused Deposition Modeling . 3. Rugosidade. 4. ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno . 5. Manufatura Aditiva. I. Soeiro Júnior, Jaime Casanova. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

**ERNESTO LOURENÇO JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE MANUFATURA ADITIVA  
SOBRE A RUGOSIDADE DE MODELOS ORTODÔNTICOS PRODUZIDOS POR  
ABS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção. Linha de Pesquisa: Tecnologia Emergente; Sublinha de pesquisa: Manufatura Aditiva.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 29/11/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior - UFAM  
Orientador

---

Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves - UFAM  
Avaliador

---

Prof. Dr. Marcelo de Albuquerque de Oliveira - UFAM  
Avaliador

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, fonte das minhas inspirações, da minha fé e das minhas esperanças. A meus pais, pelo apoio, conselhos e sacrifícios onde me foi possível concretizar um sonho. À minha esposa, por toda a parceria. Aos meus filhos, minhas maiores e melhores motivações. Por eles vislumbro um mundo infinito de possibilidades e compartilho seus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

A lista de agradecimento é extremamente vasta, pois a construção de um conhecimento refletido em trabalho científico se perfaz ao longo de uma vida, principalmente quando seu objeto de estudo se torna uma inquietação acadêmica e social. O agradecimento abstrato não mitiga o brilho das reverências que devo dispor aos meus professores, amigos, familiares e colegas de jornada.

Ao meu pai, pela vida e pelo exemplo e, especialmente, por ter sido meu companheiro de jornada nesta vida. O senhor é uma bênção sem comparação e só espero que um dia os meus filhos possam sentir um orgulho igual por mim.

Serei grato, eternamente, à minha mãe. Com seu carinho, amor e dedicação, ela me impulsionou nos momentos mais conturbados dessa trajetória. Mulher lutadora, forte e que sempre vibra com minhas vitórias. Serei eternamente grato por cada colo, por cada sorriso e por cada palavra gentil.

À minha esposa, por toda a parceria desses anos. Por me incentivar nos momentos que esmoreço, sempre com uma palavra amiga e de carinho.

Aos meus filhos, que souberam entender tantos dias ausentes, quer seja para o trabalho, quer seja para os estudos.

Aos meus irmãos, por jamais desacreditarem que esse momento seria possível.

À toda minha família que ofereceram força, apoio e motivação em toda a minha trajetória acadêmica.

A todos os professores que, com sua ação impagável, sua atuação indelével e sua dedicação incomensurável, entregaram o conhecimento.

À Empresa AROTEC na pessoa do Sr. Miguel Rodrigues

Aos amigos e amigas presentes no princípio, meio e fim, parceiros, cúmplices e incentivo na jornada acadêmica.

Gratidão, para todo o sempre. Deus abençoe a todos!

## RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) apresenta forte impacto na área odontológica oferecendo vantagens na produtividade, custo e customização de diversos produtos. Entre as técnicas de MA, a *Fused Deposition Modeling* (FDM) tem grande aplicação na produção de modelos ortodônticos (MO) quando comparada às técnicas tradicionais. Entretanto, a rugosidade dos MO produzidos por FDM são maiores quando comparados às peças produzidas em gesso. Esse fato nos conduz a tentar entender se os parâmetros de fabricação via FDM apresentam influência sobre a rugosidade. Para isso, um modelo de superfície de resposta foi aplicado no desenvolvimento, melhora e otimização do processo de produção de modelos ortodônticos dos elementos Canino, Incisivo e Molar, utilizando filamento ABS. Para a otimização do modelo, foram combinados parâmetros de Diâmetro do Bico Extrusor, Altura da Camada e Percentual de Preenchimento, tendo como variável resposta, o Tempo de Impressão, a Massa e a Rugosidade. Entre os resultados obtidos, foi verificado que os parâmetros ótimos para a produção dos MOs é o Diâmetro do Bico Extrusor em 0,4 mm, Altura da Camada em 0,24 mm e 40 % de preenchimento, resultando em 53 minutos de impressão, 14,35 g de massa e 1,711  $\mu\text{m}$  de Rugosidade. A altura da camada (AC) é o fator de maior influência na rugosidade do elemento incisivo. Para os elementos canino e molar, o Diâmetro do Bico Extrusor é o fator de maior influência na rugosidade. Assim, ao se objetivar o melhor controle da rugosidade em MO produzidos via MA, deve-se controlar parâmetros como altura da camada, diâmetro do bico extrusor e porcentagem de preenchimento.

Palavras-chave: Modelos ortodônticos; FDM; Rugosidade; ABS; Manufatura Aditiva.

## ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has a strong impact on the dental area, offering advantages in productivity, cost and customization of various products. Among the MA techniques, fused deposition modeling (FDM) has great application in the production of orthodontic models (OM) when compared to traditional techniques. However, the roughness of the OM produced by FDM is higher when compared to the pieces produced in plaster. This fact leads us to try to understand if the manufacturing parameters via FDM have an influence on the roughness. For this, a response surface model was applied in the development, improvement and optimization of the production process of orthodontic models of the Canine, Incisive and Molar elements, using ABS filament. For the optimization of the model, parameters of Extruder Nozzle Diameter, Layer Height and Filling Percentage were combined, having as response variable, the Printing Time, the Mass and the Roughness. Among the results obtained, it was verified that the optimal parameters for the production of the OMs are the Diameter of the Extruder Nozzle in 0.4 mm, Height of the Layer in 0.24 mm and 40 % of filling, resulting in 53 minutes of printing, 14.35 g of mass and 1.711 $\mu$ M of Roughness. The height of the layer (CA) is the factor of greatest influence on the roughness of the incisive element. For the canine and molar elements, the Diameter of the Extruder Nozzle is the factor with the greatest influence on roughness. Thus, when aiming at the best control of roughness in OM produced via MA, parameters such as layer height, diameter of the extruder nozzle and percentage of filling should be controlled.

Keywords: Orthodontic Models; FDM; Roughness; ABS; Additive Manufacturing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Cuba de resina de SLA .....	15
<b>Figura 2</b> - Feixe de laser.....	18
<b>Figura 3</b> - Cabeçote e bico de extrusão.....	19
<b>Figura 4</b> - Peça odontológica tridimensional.....	20
<b>Figura 5</b> - Sinterização direta a laser de metal (DMLS) .....	22
<b>Figura 6</b> - Modelo odontológico em Impressão Polyjet 3D (PJP) .....	23
<b>Figura 7</b> - Impressora 3D Sethi – Modelo S3 e Filamento ABS.....	36
<b>Figura 8</b> - Mesa aquecida .....	36
<b>Figura 9</b> - Temperatura da impressora .....	37
<b>Figura 10</b> - Modelo ortodôntico utilizado nos experimentos.....	38
<b>Figura 11</b> - Regiões selecionadas para análise .....	40
<b>Figura 12</b> - Balança analítica da marca Shimadzu™ .....	41
<b>Figura 13</b> - Microscópio digital Olympus, modelo DSX 1000.....	42
<b>Figura 14</b> - Influência do Diâmetro do bico, Altura da camada e Preenchimento sobre o tempo de produção.....	46
<b>Figura 15</b> - Gráfico de Pareto dos fatores individuais sobre a Massa.....	47
<b>Figura 16</b> - Gráfico de Pareto da comparação da rugosidade nos fatores estudados .....	48
<b>Figura 17</b> - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (diâmetro do bico e a interação entre diâmetro do bico e altura da camada) .....	50
<b>Figura 18</b> - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (diâmetro do bico e fator quadrático) .....	51
<b>Figura 19</b> - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (avaliação qualitativa) .....	54
<b>Figura 20</b> - Gráfico de contorno com 40% de preenchimento .....	57
<b>Figura 21</b> - Gráfico de contorno com 60% de preenchimento .....	57

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Tecnologias de manufatura aditiva .....	26
<b>Tabela 2</b> - Resumo dos experimentos .....	38
<b>Tabela 3</b> - Tipo de ponto .....	39
<b>Tabela 4</b> - Fatores e níveis adotados durante a produção das amostras .....	39
<b>Tabela 5</b> - Sumario do modelo tempo, massa, rugosidade Rc-I, rugosidade Rc-C, rugosidade Rc-M .....	43
<b>Tabela 6</b> - Descrição dos experimentos .....	44
<b>Tabela 7</b> - Setups e os resultados .....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA .....	15
2.1.1	Estereolitografia (SLA) .....	15
2.1.2	Sinterização Seletiva a Laser (SSL).....	17
2.1.3	Modelagem por Deposição Fundida (MDF) .....	18
2.1.4	Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS).....	21
2.1.5	Impressão Polyjet 3D (PJP) .....	22
2.1.6	Impressão 3D a Jato de Tinta (IJP).....	23
2.1.7	Fabricação de Objetos Laminados (LOM) .....	24
2.1.8	Color-Jet-Printing (CJP) .....	24
2.1.9	Fusão de Feixe de Elétrons (EBM) .....	25
2.1.10	Multi-Jet-Printing (MJP).....	25
2.2	FILAMENTOS ABS .....	27
2.3	MANUFATURA ADITIVA NA ÁREA ODONTOLÓGICA .....	28
2.4	EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO VIA FDM NA RUGOSIDADE DE PEÇAS DE POLÍMEROS.....	30
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>34</b>
3.1	OBJETIVO GERAL .....	34
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
4.1	MATERIAL DE ADIÇÃO .....	35
4.2	TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA.....	35
4.3	MODELOS .....	37
4.4	PARÂMETROS ANALISADOS NO MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	38
4.5	AMOSTRAS PRODUZIDAS VIA MANUFATURA ADITIVA .....	40
4.6	MEDIÇÃO DA MASSA DOS MODELOS PRODUZIDOS .....	41
4.7	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS MODELOS PRODUZIDOS.....	41
4.8	AVALIAÇÃO QUALITATIVA .....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>

5.1	RESULTADOS GERAIS .....	43
5.2	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: TEMPO (MIN.) .....	45
5.3	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: MASSA (G).....	46
5.4	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: RUGOSIDADE RC- I ( $\mu\text{M}$ ) .....	47
5.5	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA RUGOSIDADE RC-C ( $\mu\text{M}$ ) .....	49
5.6	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: RUGOSIDADE RC-M ( $\mu\text{M}$ ) VERSUS DIÂMETRO DO BICO (MM); ALTURA DA CAMADA (MM); PREENCHIMENTO (%).....	50
5.7	REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: AVALIAÇÃO QUALITATIVA VERSUS DIÂMETRO DO BICO (MM); ALTURA DA CAMADA (MM); PREENCHIMENTO (%) .....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES .....</b>	<b>60</b>
7.1	CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS.....	60
7.2	CONTRIBUIÇÕES ECONÔMICAS.....	60
7.3	CONTRIBUIÇÕES SOCIAIS.....	60
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é usada para criar objetos sólidos diretamente dos dados CAD sob controle do computador. Várias áreas da manufatura, como indústrias, defesa, aeroespacial, arte, medicina e design, estão adotando a manufatura aditiva para customização e produção rápida de produtos. Hoje em dia, existe várias aplicações no campo da odontologia em que é possível a fabricação de modelos personalizados (AMIR *et al.*, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2018).

O processo de MA começa com uma imagem virtual que é criada por um scanner 3D ou software CAD e gera o produto por diferentes tecnologias de MA. As tecnologias MA atendem aos desafios complexos da área médica e odontológica. Essas tecnologias agora estão disponíveis para melhorar os resultados dos pacientes (CHEN *et al.*, 2017).

Um pré-requisito essencial dos modelos dentais é criar uma réplica precisa dos dentes e dos tecidos circundantes para servir aos propósitos pretendidos. Tais como auxiliar no diagnóstico e na restauração para avaliação, planejamento de tratamento e fabricação de vários aparelhos dentários e próteses. Atualmente, réplicas de gesso derramados em moldes convencionais (por exemplo, silicões de alginatos, polissulfuros, éteres) são considerados o padrão “ouro” para a construção dentária (HYUNG *et al.*, 2016; JUMYUNG *et al.*, 2017).

A precisão dos modelos resultantes está sujeita a diversos fatores que podem introduzir imprecisões. Esses fatores englobam desde a aquisição de dados e o processamento de imagens dos tecidos orais duros e moles, até a ampla variedade de parâmetros envolvidos nos processos de fabricação e pós-processamento. Adicionalmente, os modelos obtidos por meio de polimerização em cuba e jato de material apresentam propensão a sofrer alterações dimensionais (redução das dimensões) durante a fase de polimerização, assim como a apresentarem superfícies com degraus devido à técnica de estratificação empregada na construção. Esses modelos também demonstram mudanças dimensionais pós-processamento à medida que envelhecem (LIU; SHIN, 2019; MOHENSEN, 2017).

Entre as décadas de 1980 e 2000, estudos documentaram questões relacionadas à qualidade de moldes protéticos e modelos enviados aos laboratórios dentários. Em uma pesquisa realizada nos Estados Unidos e publicada em 2000, técnicos de laboratório constataram que a inadequação das moldagens era o problema mais frequente. Surpreendentemente, cerca de 90% das moldagens finais não conseguiam

reproduzir com precisão as linhas de acabamento da preparação dentária. (IMBERY *et al.*, 2016).

Em um estudo semelhante realizado na Grã-Bretanha e publicado em 1997, foram relatadas as avaliações de 290 impressões recebidas por quatro laboratórios comerciais. Dentre elas, 98 foram consideradas boas, 151 satisfatórias e 41 ruins. Além disso, Carrotte *et al.*, relataram em 1993 que, de 50 casos apresentados, apenas 12 foram considerados satisfatórios para a construção de uma restauração. (CARROTTE *et al.*, 1993).

Em um estudo conduzido por Farah *et al.*, em 2011, foram investigados laboratórios dentários com o objetivo de avaliar os problemas enfrentados pelos técnicos de laboratório. Os resultados revelaram que os problemas mais comuns encontrados foram a preparação insuficiente do dente (oclusal inadequada e redução axial) e margens mal definidas (FARAH *et al.*, 1991).

A perda de precisão e a distorção dos modelos que ocorrem na clínica podem ser atribuídas a fatores além daqueles inerentes ao material. Por exemplo, a posição do paciente durante a moldagem, o método de remoção do molde e a técnica empregada para a moldagem podem desempenhar um papel significativo. Dentre outras considerações, a acurácia dimensional é uma das características mais importantes de um material de moldagem (WANG *et al.*, 1996).

Consequentemente, diversos autores dedicaram-se a investigar as alterações que esses materiais podem sofrer e suas possíveis causas. Realizaram-se estudos variados, abrangendo desde a análise do próprio material, sua interação com o ambiente até a influência das técnicas utilizadas. Tudo isso com o propósito de compreender e aprimorar a qualidade das moldagens e dos modelos utilizados na prática clínica (WANG *et al.*, 1996).

Na área da odontologia, o controle dimensional é uma abordagem utilizada para verificar, validar e calibrar as características geométricas de objetos, equipamentos ou estruturas. Esse método desempenha um papel fundamental na fabricação de peças únicas, exigindo uma metodologia específica de inspeção e verificação. Seu principal propósito é assegurar um controle efetivo da produção, aprimorar a qualidade do produto e identificar possíveis erros nos processos de fabricação (KANG; MA, 2017).

O equipamento de digitalização 3D possui parâmetros de precisão válidos para a análise desses elementos. Permitem ainda atingir o objetivo final do controle de qualidade, que é a inspeção das diferentes fases do processo de construção de forma a garantir a sua montagem, bom funcionamento, substituição de peças e componentes do

equipamento, identificação de erros e defeitos geométricos, bem como a análise de superfícies (KANG; MA, 2017).

O processo de produção dos modelos ortodônticos em gesso é complexo e demorado, os resultados com relação a rugosidade são bastante satisfatórios, apresentam brilho e lisura, consolidados no mercado em razão do seu longo tempo de uso, diferentemente dos modelos produzidos em ABS via manufatura aditiva que são de rápida produção, entretanto apresentam rugosidade. Diante do exposto, o presente trabalho justifica-se em apresentar um modelo que possa melhorar a rugosidade dos modelos ortodônticos confeccionados pela técnica de modelagem por fusão e deposição (em inglês, *Fused Deposition Modelling* - FDM) utilizando filamento de ABS, desta forma, minimizar o tempo de trabalho e substituir o processamento por moldagem a gesso.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

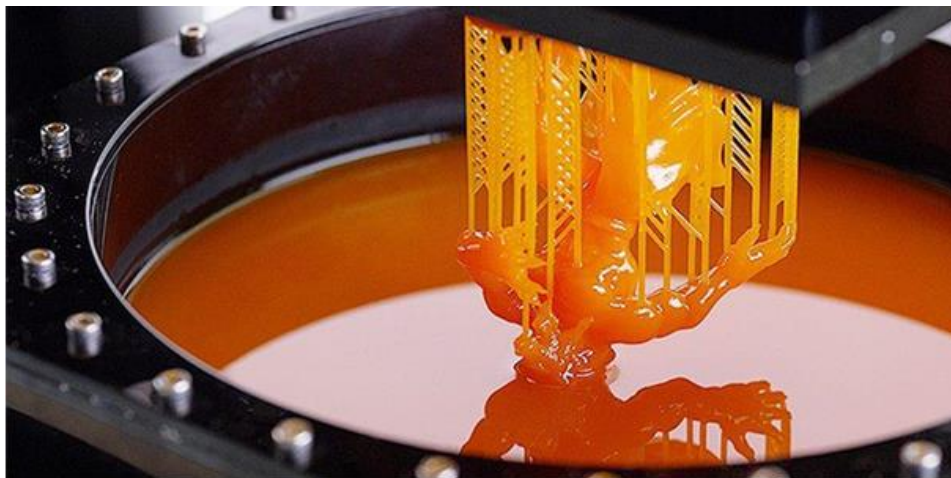
### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

O princípio fundamental da Manufatura Aditiva (MA) é criar diretamente um modelo físico 3D adicionando camada por camada a partir de um modelo CAD (gerado com a ajuda do software de design ou pelo scanner 3D, CT, MRI) (Volpato 2021). Existem várias tecnologias MA usadas para construir camada por camada do produto; cada um adota diferentes métodos de produção do modelo físico, conforme discutido abaixo:

#### 2.1.1 Estereolitografia (SLA)

Os produtos são construídos com aplicação de laser ultravioleta dentro de uma cuba de resina (**Figura 1**). Existe uma disponibilidade limitada de materiais utilizáveis com esta tecnologia, pois usa polímeros sensíveis à luz ultravioleta. Essa técnica proporciona melhor acabamento superficial e menor desperdício de matéria-prima (TUNCHEL *et al.*, 2016).

**Figura 1** - Cuba de resina de SLA



**Fonte:** Productcalab, 2022

A estereolitografia oferece uma grande vantagem ao permitir que a peça seja construída em um período relativamente curto, devido à rápida cura do polímero



(mudança de estado físico). O tempo necessário para a construção da peça varia dependendo do tamanho, complexidade e altura da camada utilizada. Em geral, a produção das peças pode levar de algumas horas a um dia ou até mais, dependendo dos parâmetros de fabricação específicos (COELHO *et al.*, 2018).

Desde sua introdução inicial, a tecnologia de estereolitografia (SLA) tem passado por refinamentos significativos em termos de capacidade de processamento padrão, bem como na ampliação da variedade de materiais que podem ser utilizados nesse processo. Nos últimos anos, houve avanços notáveis que tornaram o SLA um método padrão para a união de pós-metálicos e, inclusive, cerâmicos, antes de serem submetidos ao processo de sinterização (ROYZEN 2009).

Essa evolução tem possibilitado a fabricação inicial de praticamente todos os componentes usando o SLA, e até mesmo peças altamente complexas necessárias para aplicações de alta temperatura ou altamente abrasivas podem ser produzidas sem recorrer a técnicas de usinagem de alto custo. Dessa forma, o SLA tem se tornado uma opção viável e eficiente para uma ampla gama de aplicações industriais (FERRAGE *et al.*, 2017).

No entanto, como todos os sistemas de engenharia, o SLA não é um ajuste perfeito e sofre de algumas desvantagens notáveis em comparação com outras rotas de fabricação. Embora muitas das desvantagens percebidas associadas ao processo estejam relacionadas ao armazenamento das peças componentes e seu uso (COELHO *et al.*, 2018).

A resina fotossensível apresenta desafios no processo de SLA. O manuseio cuidadoso dessa resina torna-se um fator crucial, uma vez que é necessário evitar que ela comece a se curar antes de ser aplicada ao modelo. Isso implica que a moldagem deve ser realizada em áreas com pouca luz ou incluir seções protegidas para prevenir a ativação indesejada da resina. Com os novos processos de modelagem 3D sendo refinados o tempo todo, há sempre a possibilidade de algo entregar o mesmo nível de qualidade e produção, mas a um preço de compra e custo operacional mais baixos.

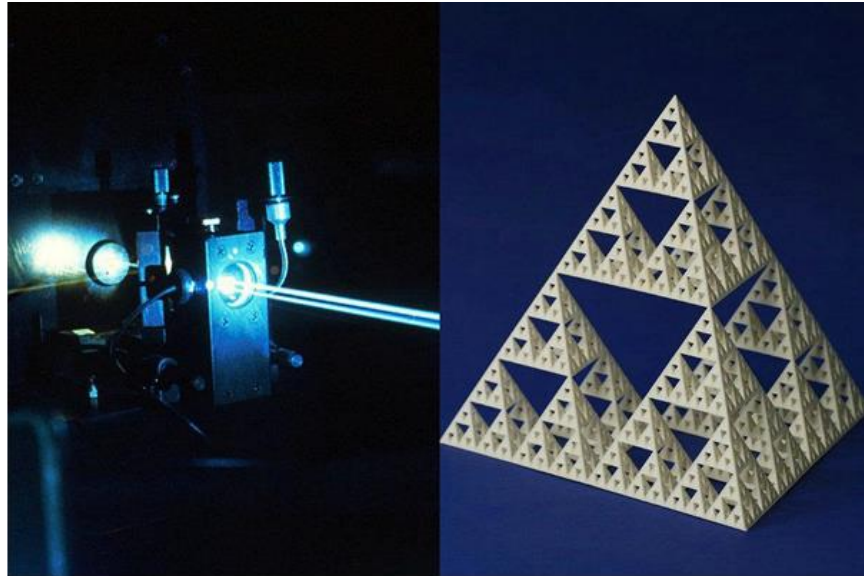
### 2.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SSL)

Nesta tecnologia de manufatura aditiva, realiza-se a sinterização com a aplicação de um feixe de laser (**Figura 2**). O material utilizado está na forma de pó, e o pó é sinterizado a laser (ZHU *et al.*, 2016).

Os sistemas de impressão por Sinterização Seletiva a Laser (SSL) têm se destacado como um dos principais métodos de manufatura aditiva, especialmente para a produção em lote de peças personalizadas. Em aplicações industriais, esse método tem se mostrado confiável, preciso e rápido, tendo resistido ao teste do tempo.

Uma das vantagens-chave de utilizar a impressão por SSL é que os projetos não requerem nenhuma estrutura de suporte. Durante a construção da impressão, todos os espaços vazios são automaticamente preenchidos com pó não utilizado, o que torna as impressões por SSL autoportantes. Esse recurso proporciona aos modeladores e designers de produtos uma ampla liberdade no design. Modelos com grandes espaços ocos, saliências ou partes muito finas não são mais um problema ao imprimir com a técnica SSL (SANTOS, 2012).

Além disso, a impressão por SSL pode ser uma solução viável para imprimir designs complexos que, de outra forma, exigiriam a impressão de várias partes usando métodos como FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou SLA (*Stereolithography*). Essa abordagem permite a produção de peças de forma mais eficiente e evita a necessidade de montagem posterior. Em suma, a impressão por Sinterização Seletiva a Laser tem se mostrado uma opção versátil e eficaz para a fabricação de peças personalizadas e designs complexos, proporcionando benefícios como a eliminação de suportes e maior liberdade no processo de criação (SANTOS, 2012).

**Figura 2 - Feixe de laser**

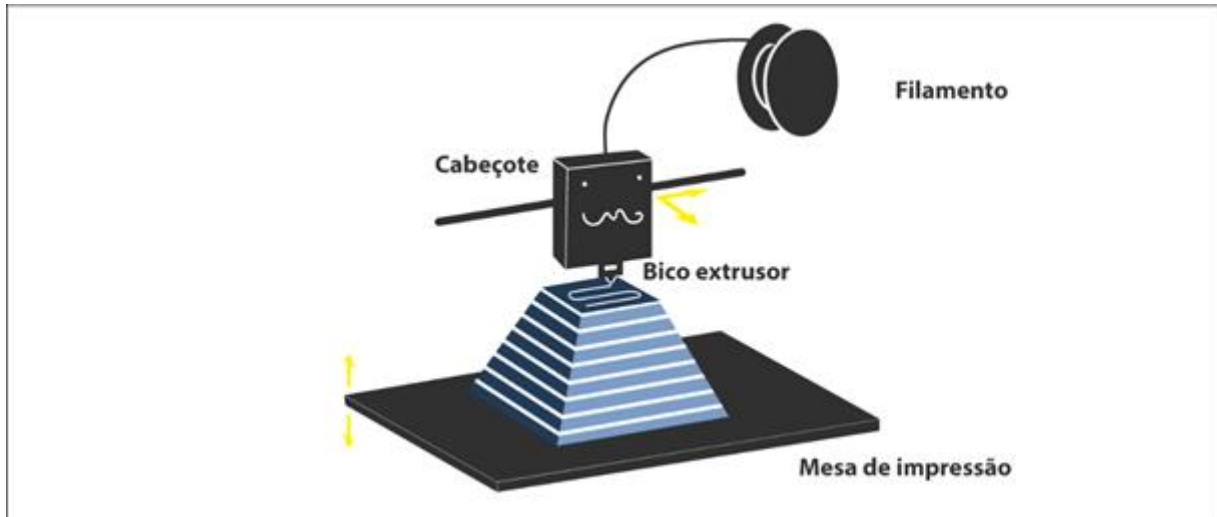
Fonte: Isour, 2022

Apesar das vantagens da impressão SLS, ela não é uma solução abrangente para todas as necessidades de prototipagem rápida. A aplicação em uma escala de mesa é problemática devido às complexidades e custos associados ao processo, tornando-a menos atrativa para entusiastas da impressão 3D casuais. A porosidade que torna as impressões SLS ideais para tingimento também compromete sua integridade estrutural. Embora tenham resistência à tração comparável à tecnologia SLA, são menos flexíveis e têm menor capacidade de deformação antes da falha. Assim, as impressões SLS são mais adequadas para protótipos conceituais do que para peças funcionais (VOLPATO, 2015).

### 2.1.3 Modelagem por Deposição Fundida (MDF)

É um dos sistemas de manufatura aditiva mais comuns. Foi desenvolvido por Scott Crump e vendido pela Stratasys desde 1991. O produto é fabricado de forma semelhante ao processo de extrusão, onde um material termoplástico aquecido é adicionado camada por camada para fabricar um modelo. Neste processo, o cabeçote de impressão consiste em bicos múltiplos e extrude (**Figura 3**) de diferentes tipos de material ao mesmo tempo (KUMAR *et al.*, 2016).

**Figura 3** - Cabeçote e bico de extrusão



Fonte: Mousta, 2022.

Os principais parâmetros são, de acordo com Sood *et al.*, (2010):

- Orientação de Construção: refere-se à orientação da peça em relação ao sistema eixos X, Y, Z da plataforma de construção.
- Altura da Camada: é a altura de cada camada depositada pelo nozzle ou bico de extrusão e depende do material e da dimensão do nozzle.
- Ângulo de Enchimento (raster angle): é a direção do fio depositado no interior das curvas da peça relativamente ao eixo x da plataforma.
- Largura do Cordão (road width): trata-se da largura do fio depositado no interior das curvas da peça.
- Air Gap no enchimento: é a separação que existe entre fios adjacentes depositados na mesma camada (também designado por infill air gap).

O sistema MDF constrói peças tridimensionais (**Figura 4**) fundindo e alimentando um fino fio de polímero através de um cabeçote de extrusão controlado por computador, produzindo peças prontas para uso. O sistema é composto por uma mesa com movimento vertical (eixo Z) e um cabeçote automatizada em dois movimentos planos ortogonais (eixo X e eixo Y). A cabeça funciona como uma extrusora, alimentando um filamento de material termoplástico e aquecendo-o até fundir o material. Cada seção ou camada da peça é construída depositando esse material em uma base. Quando a

camada estiver completa, a mesa abaixa para continuar com a próxima (SAFIRA *et al.*, 2010).

**Figura 4** - Peça odontológica tridimensional



**Fonte:** *Treemodels, 2022*

O cabeçote de extrusão é mantido a uma temperatura logo abaixo do ponto de fusão do polímero e tão pouca energia é necessária para fundi-lo. Em algumas ocasiões, a necessidade de uso de suportes deve ser levada em consideração durante a construção das peças. Esses suportes são feitos com menor densidade de material para que possam ser facilmente removidos posteriormente (BARROS *et al.*, 2016).

Atualmente, os materiais comumente utilizados na Manufatura por Deposição de Material (MDF) incluem ABS, PLA, PS, PET, PP, NYLON, HDPE, HIPS, PE e EVA. A precisão e a exatidão no processo de MDF são alcançadas através da coordenação cuidadosa da alimentação do material e do movimento do cabeçote de extrusão. Esses elementos são ajustados constantemente para produzir um fio plano de material com alturas variando de 0,20 mm a 0,97 mm e uma altura mínima de 0,05 polegadas (0,13 mm) (BARBOSA *et al.*, 2015).

Nas máquinas de MDF de alto desempenho, a precisão ou tolerância da peça pode chegar a 0,03 polegadas (0,08 mm), equiparando-se à moldagem por injeção. O

processo envolve o impulso do filamento de plástico através do misturador do bico quente por meio de rodas motrizes. A pressão empurra o polímero através de um pequeno orifício na ponta do bico, que é pressionado para achatar a extrusão. Simultaneamente, o fuso acelera e desacelera enquanto se move na direção vertical (eixo Z) da mesa de impressão. Durante essas mudanças de velocidade do fuso, as rodas motrizes ajustam o fluxo de material. O resultado é uma largura de extrusão precisa e ajustável, garantindo a produção da peça com exatidão (BARBOSA *et al.*, 2015).

As principais vantagens é que MDF é uma tecnologia de manufatura aditiva barata e acessível. Isso o torna perfeito para iniciantes em impressão 3D. É também a tecnologia de prototipagem rápida mais utilizada devido à sua facilidade de acesso. A tecnologia é fácil de usar e as impressoras geralmente são fáceis de usar. Isso ocorre porque o MDF é principalmente um consumidor, e não um processo de impressão 3D industrial, portanto, é feito um esforço para tornar as impressoras 3D fáceis de usar (BARROS *et al.*, 2016; SAFIRA *et al.*, 2010).

As desvantagens do MDF incluem a qualidade de produção inferior às tecnologias SLA ou SSL, resultando em propriedades mecânicas anisotrópicas devido à adesão entre as camadas. Algumas peças podem requerer acabamento manual para a remoção de estruturas de suporte, adicionando trabalho pós-impressão. A velocidade de impressão do MDF é mais lenta, o que pode ser problemático em setores que demandam produção rápida de grandes quantidades de peças. Além disso, a impressão camada por camada no MDF pode ocasionalmente levar a pequenos problemas de deformação e encolhimento, afetando a precisão dimensional em algumas peças (BARROS *et al.*, 2016; SAFIRA *et al.*, 2010).

#### **2.1.4 Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS)**

Esta tecnologia é utilizada para produzir peças metálicas com alta precisão e melhor resistência mecânica (**Figura 4**). Nessa tecnologia, o material metálico é adicionado camada por camada e um feixe de laser é usado para fundir o pó em um ponto definido. Na sinterização não há fusão completa. Existe uma fusão parcial em alguns pontos. De uma forma geral a sinterização é baseada na difusão (movimentação

de matéria no estado sólido) dos átomos que compõem a matéria (MATOZINHOS *et al.*, 2017).

**Figura 5 - Sinterização direta a laser de metal (DMLS)**



Fonte: AMSBrasil, 2022.

### 2.1.5 Impressão Polyjet 3D (PJP)

Execução da fabricação da peça em polímero acrílico curável por luz ultravioleta (UV). Ele usa vários tipos de materiais de impressão. Na área médica e odontológica, o modelo impresso por esta tecnologia proporciona um melhor entendimento da anatomia do paciente (CASTRO; STOPPA, 2018).

A impressão Polyjet® é conhecida por sua rapidez, tornando o protótipo imediatamente utilizável assim que é impresso. A capacidade de impressão híbrida permite produzir vários objetos em uma única tiragem ou combinar diferentes materiais em um único protótipo. Esse recurso proporciona mais tempo para projetar, testar e aprimorar o protótipo, acelerando o caminho para a fabricação e comercialização em grande escala (KRÖGER; DEKIFF; DIRKSEN, 2017).

A tecnologia Polyjet® se aplica a muitos produtos. Isso inclui próteses, implantes, auxiliares de mobilidade para a saúde, modelos arquitetônicos, protótipos de robótica,



estruturas e ferramentas intertravadas no setor de fabricação industrial e projetos sob medida para peças de carros, bicicletas e aviões (**Figura 5**).

**Figura 6** - Modelo odontológico em Impressão Polyjet 3D (PJP)



Fonte: AMSBrasil, 2022

### 2.1.6 Impressão 3D a Jato de Tinta (IJP)

Esta tecnologia utiliza diferentes fluidos, como solução de polímero fornecida na forma líquida e depositada camada por camada para construir um produto. Imprime variedades de materiais com menos tempo e custo (ZHU *et al.*, 2016).

A impressão 3D a jato de tinta possui uma resolução suficientemente alta, resultando em um acabamento superficial suave o bastante nos condutores e substratos impressos, o que elimina a necessidade de etapas adicionais de acabamento. A rugosidade dos condutores impressos em 3D para PCBs é comparável aos processos tradicionais de fabricação de PCBs. A alta resolução da impressão 3D a jato de tinta também permite a impressão de traços de microstrip e stripline que correspondem aos de PCBs fabricados tradicionalmente.

No entanto, uma desvantagem importante é que peças impressas em 3D com jato de tinta tendem a ter menor resistência mecânica, o que as torna mais propensas a



fraturas quando comparadas a uma placa tradicional com a mesma geometria (VOLPATO, 2015).

### **2.1.7 Fabricação de Objetos Laminados (LOM)**

Os modelos 3D são fabricados adicionando camadas da folha de materiais definida. Um laser é usado para cortar o material da folha de acordo com a seção transversal necessária. Os adesivos são usados para combinar as camadas e gerados pela repetição das etapas (TUNCHEL *et al.*, 2016).

A LOM oferece várias vantagens para a indústria para a produção rápida e barata de protótipos e outros produtos. As empresas podem usar um modelo gerado por computador de um produto para construir de forma rápida e eficiente um protótipo a partir de materiais de construção baratos, como papel, tornando o LOM preferível para prototipagem rápida do que outros processos de fabricação, incluindo impressoras 3D (JIAO *et al.*, 2020).

Apesar de todas as vantagens do LOM, ainda existem algumas desvantagens associadas a esse processo. Em primeiro lugar, devido ao LOM ser um método subtrativo, pode ser mais difícil produzir formas geométricas complexas em comparação com outros processos de impressão 3D. Isso ocorre porque nem sempre é possível acessar as partes internas do objeto ou remover o excesso de material de dentro de um objeto. A natureza do LOM pode dificultar a criação de estruturas internas e reentrâncias, e pode resultar em desafios relacionados à quebra de peças laminadas. Além disso, a precisão dimensional do LOM é geralmente menor em comparação com tecnologias como estereolitografia e sinterização seletiva a laser (NGO *et al.*, 2018).

### **2.1.8 Color-Jet-Printing (CJP)**

Esta tecnologia usa pó como material do núcleo e aglutinante como resina e a peça é construída espalhando o material do núcleo na camada, sobre a plataforma de construção por meio de um rolo. Jatos de cabeçote de impressão / aglutinante em spray (adesivo) na camada de pó em pontos específicos, conforme decidido pelo software

CAD, portanto, um produto colorido é construído (impresso) e tem amplo uso na área médica (TUNCHEL *et al.*, 2016).

### **2.1.9 Fusão de Feixe de Elétrons (EBM)**

Um poderoso feixe de elétrons é usado para construir o produto camada por camada usando um pó de metal por comando do modelo CAD com geometria exata. Sob o vácuo, a matéria-prima é armazenada e fundida por um feixe de elétrons (ZHU *et al.*, 2016).

### **2.1.10 Multi-Jet-Printing (MJP)**

Nesta tecnologia, os bicos são usados para pulverizar aglutinante de líquido sobre pó metálico ou cerâmico para criar uma fina camada sólida. Após a produção do modelo, ele deve ser sinterizado no forno para aumentar a resistência (ZHU *et al.*, 2016). Todas essas tecnologias de manufatura aditiva oferecem diferentes materiais odontológicos com diferentes precisões. A **Tabela 1** descreve os diferentes materiais odontológicos, precisão junto com os prós e contras de cada tecnologia de MA.

**Tabela 1 - Tecnologias de manufatura aditiva**

<b>S</b>	<b>Tecnologia MA</b>	<b>Precisão Aproximada</b>	<b>Material Odontológico</b>	<b>Prós</b>	<b>Contras</b>
1	Estereolitografia	50-55 $\mu\text{m}$	Fotopolímero de acrilato Plástico	Alta velocidade de produção dos modelos anatômicos, próteses,	As peças obtidas são mais frágeis; Baixa produção; alto custo.
2	Sinterização seletiva a laser	45-50 $\mu\text{m}$	Termoplásticos Pó Plástico Metais Cerâmica	Peças possuem alta resistência e rigidez; possibilidades de acabamento; resistência química;	Peças impressas possui superfície porosa;
3	Modelagem de deposição fundida	35-40 $\mu\text{m}$	Polycarbonato Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) polipropileno Poliésteres	Produzida peça de alta resistência; econômico e à prova d'água; Diversas cores de materiais	Frequentemente leva a nervuras que mostram linhas de cada camada
4	Sinterização direta a laser de metal	20-35 $\mu\text{m}$	Titânio, cobalto Alumínio Liga de bronze, Aço Aço inoxidável Liga de níquel	Alta resistência; precisão do produto final; Fabrica de forma eficiente produto de formato complicado.	Peças porosas áspera, distorção peças fabricadas.
5	Impressão 3D Polyjet	20-85 $\mu\text{m}$	Fotopolímeros	Peças com formas complexas, delicadas; Processo mais flexível usado com sucesso no setor de saúde e odontologia;	Qualidade dos materiais são inferiores às dos moldes injetados. Não é adequado para produção em massa.
6	Impressão 3D a jato de tinta	35-40 $\mu\text{m}$	Pó Aglutinante líquido	Peça complexa de design rapidamente; Aplicado em cuidados de saúde.	O tamanho peças limitado; Alto custo da máquina
7	Fabricação de objetos laminados	60-70 $\mu\text{m}$	Metal Plástico	Produção de modelos em escala maior; Boa resistência; Não é prejudicial à saúde.	Baixa estabilidade dos materiais
8	Impressão a jato de cores	23-30 $\mu\text{m}$	Pó de gesso Encadernador	Produz impressões coloridas de alta qualidade; rápida e silenciosa, pequenas empresas, doméstico.	Alto custo da impressão baixa resistência mecânica.
9	Derretimento de feixe de elétrons	40-50 $\mu\text{m}$	Pó de metal titânio	Alto nível de energia em um feixe estreito; Menor consumo de energia, bem como menor manutenção.	Requer vácuo, é caro e precisa de manutenção; produz raios-X
10	Impressão Multijato	10 $\mu\text{m}$	Pó Plásticos	Peças precisas com alta complexidade; Alta velocidade de produção; Nenhum tratamento de acabamento extra necessário.	Pouco material disponível, Falta de informações precisas sobre as especificações MA de cerâmicas

## 2.2 FILAMENTOS ABS

O filamento ABS, acrilonitrila butadieno estireno, é um polímero termoplástico amplamente utilizado na indústria devido às suas vantagens, como excelente resistência a baixas temperaturas e leveza. É comumente empregado na fabricação de eletrodomésticos e encontrado em cascos de barcos, decoração e brinquedos, notavelmente nos famosos tijolos da marca LEGO™. Além disso, o ABS é altamente popular no mercado de impressão 3D, sendo amplamente utilizado na tecnologia de Manufatura por Deposição de Material Fundido (MDF). É, de fato, um dos polímeros mais comuns e versáteis na impressão 3D (OLIVEIRA; MARQUES, 2015).

O polímero ABS, desenvolvido principalmente a partir da década de 90, é classificado como um 'terpolímero' e é obtido principalmente pela polimerização de acrilonitrila e estireno na presença de polibutadieno. Essa combinação geralmente possui cerca de 20% de acrilonitrila, 25% de butadieno e 55% de estireno. As propriedades do ABS podem ser ajustadas ao modificar essas proporções. Por exemplo, o estireno contribui para a rigidez e o brilho do ABS, enquanto o butadieno proporciona resistência ao impacto e características de baixa temperatura (CASTRO; STTOPA, 2018).

O ABS está disponível na forma de filamentos 3D com diâmetros de 1,75 mm ou 2,85 mm em uma ampla variedade de cores. Esse material possui propriedades atrativas para diversas indústrias que buscam imprimir peças funcionais ou protótipos em 3D. Embora sua impressão possa ser mais desafiadora em comparação com o PLA, o ABS ainda é a escolha preferida dos profissionais de impressão 3D devido à sua alta resistência a impactos e temperatura (entre -20 °C e 80 °C). Além disso, o ABS proporciona superfícies lisas e brilhantes, e pode ser limpo quimicamente com acetona para obter melhores acabamentos (DUTRA *et al.*, 2017).

O filamento ABS tem uma temperatura de fusão aproximada de 200°C, sendo recomendado que a temperatura da extrusora da impressora 3D fique entre 230°C e 260°C. Ao imprimir com ABS, é essencial utilizar uma bandeja aquecida, cuja temperatura deve ficar entre 80°C e 130°C. Isso é necessário para evitar a retração do plástico em contato com o ar, que pode causar deformação da peça e levar ao desprendimento da bandeja de impressão. Para peças maiores, é aconselhável o uso de adesivos especiais, como Kapton® ou uma laca adesiva.

Além disso, uma impressora 3D com câmara fechada é preferível quando se trabalha com ABS, uma vez que esse plástico pode emitir partículas que podem ser

prejudiciais ao usuário. Portanto, é importante garantir um ambiente controlado e seguro para a impressão de peças com ABS (ZHU *et al.*, 2016).

### 2.3 MANUFATURA ADITIVA NA ÁREA ODONTOLÓGICA

Profissionais do mundo odontológico começaram a usar a manufatura aditiva para projetar guias cirúrgicos, talas dentais personalizadas, peças de resina fundível ou impressões para moldes e coroas dentárias temporárias (TIAN *et al.*, 2021). Os usos da impressão 3D em odontologia podem ser classificados em três categorias:

A impressão 3D possibilita a fabricação direta de dispositivos odontológicos personalizados, incluindo guias cirúrgicos para implantes, que auxiliam o cirurgião durante a perfuração, respeitando o planejamento prévio do implante digital, considerando a localização, angulação e profundidade dos implantes. Além disso, é viável imprimir usando resinas biocompatíveis classe III, adequadas para coroas provisórias, e talas confortáveis e perfeitamente adaptadas à boca do paciente para tratamentos como clareamento, tratamento do bruxismo e aplicação de gel de flúor.

A impressão 3D também é utilizada para criar dispositivos ortodônticos personalizados, como talas para alinhamento correto, talas de transferência de braquetes, guias de osteotomia e guias de reposicionamento. Adicionalmente, a tecnologia permite fabricar uma variedade de órteses e aparelhos ortodônticos interceptores. Essa abordagem personalizada proporciona soluções mais precisas e eficazes no campo da odontologia (AMIR *et al.*, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2018).

Dispositivos de cirurgia maxilofacial (genioplastia, rinoplastia, epítese) também podem ser impressos em 3D, bem como moldes odontológicos pela técnica de cera perdida. Uma versão 3D da prótese dentária (coroa, ponte, entre outros) impressa em resina fundível é usada para fazer um molde personalizado usando a técnica de cera perdida. A prótese final é obtida despejando o material escolhido (cerâmica, metal, entre outros) neste molde (CHEN *et al.*, 2017).

A fabricação direta de restaurações dentárias e próteses: Graças à impressão 3D, é possível projetar facetas dentárias, coroas e pontes provisórias com resinas biocompatíveis. Essas restaurações se encaixam perfeitamente na boca do paciente graças à alta precisão da digitalização 3D e impressões 3D de resinas SLA ou DLP. Entretanto, deve-se ressaltar que ainda é impossível imprimir diretamente em 3D coroas permanentes ou próteses dentárias em resina ou cerâmica. A fabricação de metais aditivos permite a fabricação direta de coroas, pontes e implantes dentários, bem como

da parte metálica das estélites dentais e da base de próteses totais removíveis (HYUNG *et al.*, 2016; JUMYUNG *et al.*, 2017).

Cada aplicação com sua técnica: SLA de guias cirúrgicos de aplicação técnica; prótese provisória SLA; aparelhos ortodônticos interceptivos, talas dentais, modelos SLA; cirurgia maxilofacial (genioplastia, rinoplastia, epítese) e ortodontia: guia de osteotomia e guia de reposicionamento; bases de prótese total removíveis; estrutura FDM; metálica de próteses parciais removíveis; fabricação por adição de metal (JUMYUNG *et al.*, 2017).

A impressão 3D e suas técnicas relacionadas têm desempenhado um papel significativo no setor odontológico devido à sua flexibilidade, eficiência, rapidez e precisão. Essas técnicas aditivas permitem otimizar a fabricação de próteses e diversos aparelhos dentários, tradicionalmente dominados por processos Mecanizados, sem comprometer a qualidade final dos produtos.

Uma das principais vantagens da impressão 3D no campo odontológico é a capacidade de fabricar dispositivos sob medida, o que resolve um grande desafio na medicina em geral e, especificamente, na odontologia. Os dados indicam que o mercado odontológico tem um futuro promissor, e as técnicas digitais estão permitindo obter o máximo retorno desse avanço tecnológico (CASTRO; STTOPA, 2018).

A possibilidade de utilizar impressoras 3D para a confecção de modelos odontológicos vem sendo cada vez mais aceita na prática clínica, substituindo os modelos convencionais de gesso. Essa tecnologia apresenta inúmeras vantagens, como a facilidade de armazenamento, recuperação e transferência de dados, em comparação com o método convencional que requer uma grande área de armazenamento e está sujeito a danos durante o transporte (SILVEIRA & MIGOTO 2020).

Embora nem sempre seja necessário imprimir um modelo atualmente, ainda estamos acostumados a ver restaurações exibidas em modelos, mesmo quando são fabricadas digitalmente. Além disso, os dados do modelo do paciente podem ser arquivados digitalmente e impressos apenas quando necessário, proporcionando maior praticidade e eficiência no gerenciamento das informações odontológicas (HYUNG *et al.*, 2016; JUMYUNG *et al.*, 2017).

Os estudos conduzidos por Manuelli *et al.*, (2018) e Camardella *et al.*, (2017) avaliaram a acurácia dos modelos odontológicos produzidos por impressoras 3D e modelos de gesso. Ambos concordaram que existem algumas diferenças significativas nas medidas entre os modelos impressos e os de gesso, porém essas divergências não foram clinicamente relevantes.

Além disso, Vasques (2018) realizou um estudo clínico randomizado comparativo entre placas mio-relaxantes produzidas por impressão 3D e placas produzidas de forma convencional em laboratório. Os resultados do estudo demonstraram que os pacientes que utilizaram as placas produzidas por impressão 3D relataram maior conforto em comparação ao grupo que utilizou as placas convencionais.

Esses estudos corroboram o potencial e os benefícios da impressão 3D no campo odontológico, tanto em relação à precisão dos modelos como na confecção de dispositivos clínicos personalizados que proporcionam maior conforto ao paciente.

Segundo as pesquisas conduzidas por Vasconcelos *et al.*, (2018) e Hattori *et al.*, (2011), foi feita uma comparação entre a efetividade de guias cirúrgicos produzidos por técnicas convencionais e pela estereolitografia. Utilizando imagens obtidas por tomografia computadorizada, foram analisadas as diferenças de posicionamento e angulações dos implantes antes e após a sua instalação. Os resultados indicaram que os implantes instalados com guias produzidos por estereolitografia apresentaram uma melhor precisão de posicionamento em relação aos instalados com guias convencionais.

#### 2.4 EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO VIA FDM NA RUGOSIDADE DE PEÇAS DE POLÍMEROS

Anitha *et al.*, (2001) conduziram um estudo utilizando o método Taguchi para avaliar a influência de três parâmetros de processo (altura da camada, largura da camada depositada e velocidade de deposição) na rugosidade superficial das peças fabricadas por MDF (Modelagem por Deposição de Fusão). Os resultados indicaram que a altura da camada é o fator mais relevante, afetando 49,37% da rugosidade sem agrupamento e 51,57% com agrupamento em um nível de significância de 95% e 99%, respectivamente. Os outros fatores, largura da camada e velocidade, contribuíram com 15,57% e 15,83% em um nível de significância de 99%. A análise revelou uma relação inversa entre a altura da camada e a rugosidade da superfície. De acordo com a análise S/N, a altura de 0,3556mm, largura de 0,537mm e velocidade de 200mm são as configurações mais efetivas. Em conclusão, a altura da camada é o fator mais significativo na influência da rugosidade, seguido pela largura e velocidade do raster.

Campbell *et al.*, (2002) conduziram um estudo comparando a rugosidade da superfície em várias amostras de teste produzidas por diferentes processos de prototipagem rápida (PR), como SLA, Thermo Jet, MDF, LOM e impressora 3D. Eles utilizaram a equação proposta por Reeves e Cobb (**Equação 1**) para prever a rugosidade

da superfície em uma ampla gama de ângulos. Os resultados mostraram que a maioria dos sistemas em SLS, Thermo Jet, MDF e LOM pode ter sua rugosidade da superfície prevista com sucesso.

No entanto, para alguns sistemas, o efeito escada não parece ser o principal fator determinante da rugosidade. Especificamente, as peças construídas em Thermo Jet, a maioria das superfícies de peças FDM e impressora 3D apresentaram valores mais altos de rugosidade da superfície quando previstos pela **Equação 1**. Esses achados indicaram que além da altura da camada, existem outros parâmetros de processo que influenciam a rugosidade da superfície em diferentes sistemas de prototipagem rápida.

$$Ra = \frac{Lt \sin}{4tan} \quad (1)$$

Onde:

Ra é a rugosidade média;

Lt é a altura da camada e tan é o ângulo entre a direção normal e vertical da superfície.

Pulak M. Pandey *et al.*, (2003) apresentaram um modelo semi-empírico para avaliação da rugosidade superficial de peças fabricadas em camadas por MDF, considerando a altura da camada e a orientação da construção como variáveis de processo.

A peça MDF é fabricada com altura de camada de 0,254mm, temperatura do modelo de 270 °C, temperatura da estrutura de suporte de 265 °C, largura da estrada de 0,511mm e entreferro (superfície) zero para realizar estudo de rugosidade da superfície. Além disso, apresentar a rugosidade superficial resultante do efeito escada em peças prototipadas é um dos principais problemas. Foi feito um experimento de um sistema FDM híbrido no qual deposição de material camada por camada e usinagem de arestas por fresa a quente simultaneamente. Experimentos são concluídos que o método de usinagem proposto é capaz de produzir acabamento superficial da ordem de 0,3 µm com nível de confiança de 87%.

Thrimurthulu *et al.*, (2004) conduziu um estudo com o objetivo de melhorar o acabamento da superfície e reduzir o tempo de construção no processo de MDF (Modelagem por Deposição Fundida). Eles desenvolveram um modelo que avalia a rugosidade média da superfície da peça e o tempo de construção. Para isso, assumiram arestas de construção parabólicas para a peça e utilizaram o conceito de rugosidade de



superfície mínima em relação à altura da camada e à orientação da peça construída, a fim de determinar a melhor orientação para a peça.

Os dois objetivos do estudo, a minimização do tempo de construção e da rugosidade média da superfície da peça, são contraditórios e foram abordados através da minimização da soma ponderada desses dois fatores. Além disso, o efeito da estrutura de suporte foi considerado durante a avaliação dos dois objetivos. Utilizando o fatiamento adaptativo, eles determinaram a orientação ideal de deposição da peça para alcançar os melhores resultados em termos de acabamento e tempo de construção.

Em um estudo conduzido por M. Galantucci *et al.*, (2009), foi investigada a relação entre os parâmetros do processo FDM (Modelagem por Deposição Fundida) e o acabamento superficial dos protótipos. Para melhorar o aspecto das peças, foi estudado um método químico de acabamento. A pesquisa consistiu em duas fases: a fabricação das amostras e o acabamento químico.

O estudo utilizou um plano experimental fatorial completo com parâmetros do processo em dois níveis: tamanho da ponta em m (0,254, 0,305), largura do raster em mm (0,305, 0,709) e altura da camada em mm (0,178, 0,254). O tratamento químico das peças de ABS impressas em FDM foi realizado por imersão em uma solução de 90% de dimetilcetona e 10% de água por 300 segundos.

Os resultados demonstraram que o tratamento químico remove o material em excesso, porém, o ABS subtraído é compensado pela absorção da solução, resultando em melhorias significativas na rugosidade da superfície das peças em comparação com as peças não tratadas. O método proposto de tratamento químico é econômico, rápido e fácil de aplicar, tornando-se uma abordagem promissora para melhorar o acabamento superficial dos protótipos produzidos por FDM.

Em um estudo realizado por Daekeon Ahn *et al.*, (2009), foi proposta uma nova abordagem para modelar a rugosidade da superfície na técnica de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Um modelo teórico foi desenvolvido para prever a rugosidade superficial, levando em consideração o ângulo da superfície, a altura da camada e o intervalo de sobreposição entre camadas adjacentes em peças fabricadas pelo processo FDM usando filamento de seção transversal elíptica.

Para verificar a validade da expressão proposta, foram fabricadas peças de teste MDF utilizando material ABS. Os dados medidos foram comparados com os valores computados e a expressão proposta foi confirmada como válida. Além disso, os efeitos do ângulo da superfície, altura da camada, forma da seção transversal do filamento e intervalo de sobreposição na rugosidade da superfície foram analisados e avaliados.

Os resultados indicam que é possível realizar uma previsão precisa da rugosidade superficial das peças fabricadas pelo processo FDM usando a expressão proposta para modelar a rugosidade da superfície. Isso representa um avanço importante na compreensão e otimização do processo de impressão 3D por FDM, contribuindo para o aprimoramento da qualidade e do acabamento das peças produzidas por essa tecnologia.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Identificar os parâmetros ótimos para a redução da rugosidade média dos modelos ortodônticos produzidos por manufatura aditiva com ABS.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a influência do diâmetro do bico, altura da camada e percentual de preenchimento sobre a rugosidade média dos modelos ortodôntico produzidos;
- Avaliar quantitativamente o modelo ortodôntico produzido com a otimização dos parâmetros;

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAL DE ADIÇÃO

O filamento utilizado para o estudo foi o ABS, com diâmetro de 1,75mm, especialmente em razão de sua resistência à temperatura e absorção de impactos que o torna um material apto para manufatura aditiva. Além disso, sua cor branca opaca tem um visual agradável para peças odontológicas que necessitam de menos brilho.

A capacidade de adaptação a projetos de natureza complexa e estabilidade dimensional são características que tornaram o ABS como material atrativo, facilidade de acabamento após a impressão, maior resistência a impactos e temperatura, usado em aplicações que exigem maior durabilidade, como peças automotivas, brinquedos, componentes eletrônicos, etc. Por ser um material de dureza superficial baixa, se torna abrasivo e fácil de lixar, além de possuir a acetona como solvente.

### 4.2 TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA

Foi utilizada a técnica de manufatura aditiva via *Fused Deposition Modeling* (FDM), em impressora 3D Sethi – Modelo S3™, com filamento ABS com diâmetro de 1,75mm na cor branca (**Figura 7**). O equipamento apresenta uma área útil de trabalho de 270 x 270 x 320 mm. A resolução ajustável em todos os eixos (X, Y e Z) é de 50 a 300 microns. A velocidade de alimentação do filamento foi de 150 mm/s e de deslocamento do cabeçote foi de 300 mm/s. Foi utilizado a temperatura de 110 °C na mesa do equipamento.

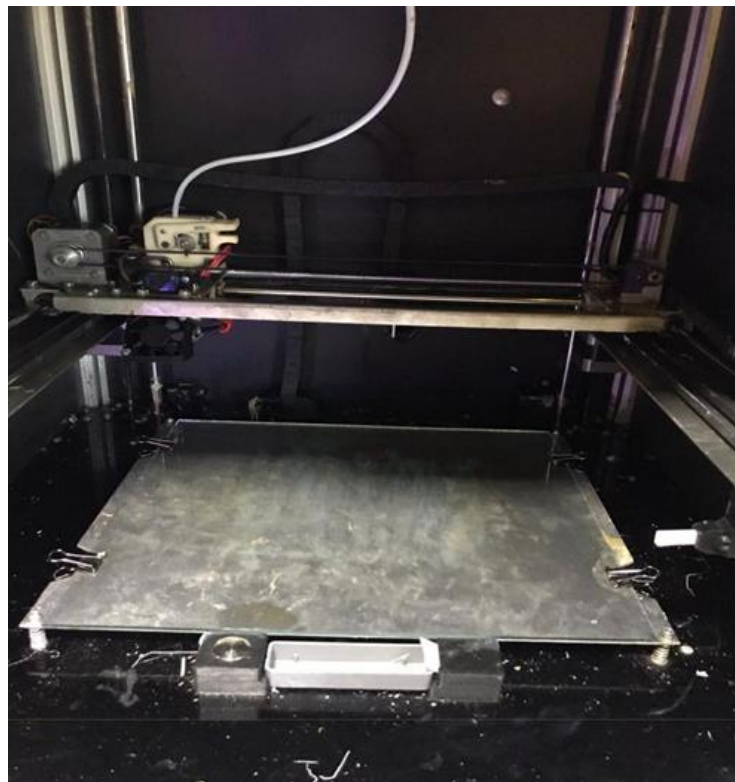
**Figura 7 - Impressora 3D Sethi – Modelo S3 e Filamento ABS**



*Fonte: Próprio autor (2022).*

Resolução ajustável subir e descer o extrusor (Eixo Z) de 50 microns (0.05mm) a 300 microns (0.3mm) - Altura de camada. Velocidade de alimentação do filamento de até 150 mm/s e de deslocamento do cabeçote de até 300 mm/s. Mesa aquecida de alumínio (**Figura 8**).

**Figura 8 - Mesa aquecida**



*Fonte: Próprio autor (2022)*

Esta mesa é totalmente estática. Ela não se movimenta, o que praticamente elimina as vibrações do movimento da mesa. Todo movimento fica no cabeçote com o

bico aquecido. Conexão com computador através de interface USB. Algumas das principais informações acerca da temperatura da impressão podem ser evidenciadas através da **Figura 9**.

**Figura 9** - Temperatura da impressora



Fonte: Próprio autor (2022)

### 4.3 MODELOS

Para a produção das amostras via manufatura aditiva foi utilizado um modelo Typodontes™ que tem grande aplicação para estudantes e profissionais de odontologia na realização de práticas pré-clínicas e no desenvolvimento dos conhecimentos teóricos de anatomia.

Na reprodução do modelo (**Figura 10**) foi utilizado um scanner intraoral da marca iTero™, obtendo-se uma cópia exata do modelo com possibilidade de reproduzir

inúmeras vezes com a mesma qualidade. Para maximizar a produção das diversas amostras, foi adotado o quadrante superior direito do modelo ortodôntico por oferecer os detalhes anatômicos que consigam representar toda as geometrias do modelo completo.

**Figura 10** - Modelo ortodôntico utilizado nos experimentos



*Fonte: Próprios autores (2023).*

#### 4.4 PARÂMETROS ANALISADOS NO MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Com o objetivo de otimizar e obter as melhores respostas, utilizamos um modelo de regressão de superfície de resposta no processo de produção de modelos ortodônticos por manufatura aditiva, visando otimizar o tempo de produção, aferir a massa e obter a menor rugosidade nos modelos produzidos. Dessa forma, viabilizando a produção em maior escala, mantendo a qualidade necessária para a satisfação do profissional.

Para realizar a modelagem, adotamos um delineamento composto central, no qual foram produzidas 40 amostras com 2 réplicas, conforme apresentado na **Tabela 2**. Além disso, utilizamos pontos centrais, conforme demonstrado na **Tabela 3**, para a realização do Experimento Central Composto com alfa igual a 1. Consideramos como fator a ser estudado: o diâmetro do bico com menor e maior vazão, a altura da camada com menor e maior altura e o preenchimento da amostra para conferir resistência ao modelo gerado.

**Tabela 2** - Resumo dos experimentos

<b>Fatores</b>	<b>3</b>
<b>Ensaio</b>	20
<b>Replicas</b>	2
<b>Total de ensaios</b>	40

*Fonte: Próprios autores (2023)*

**Tabela 3** - Tipo de ponto

Pontos do cubo	16
Pontos centrais no cubo	12
Pontos axiais	12

Fonte: Próprios autores (2023).

**Tabela 4** - Fatores e níveis adotados durante a produção das amostras

Fator/ Parâmetro	Nível (mínimo)	Nível (intermediário)	Nível (máximo)
Diâmetro do Bico Extrusor (mm)	0,2	0,4	0,6
Altura da Camada Depositada (mm)	0,1	0,25	0,4
Preenchimento da Amostra (%)	40	60	80

Fonte: Próprios autores (2023)

Os fatores e os níveis utilizados para a análise dos dados experimentais na avaliação da rugosidade das superfícies obtidas a partir de execuções de projeto composto central será feita no software MINITAB usando o modelo de superfície de resposta quadrática completo para determinar a influência dos fatores: diâmetro do bico extrusor, altura da camada, preenchimento e as respostas no tempo de produção e a massa obtida.

O primeiro requisito para metodologia de superfície de resposta envolve o projeto de experimentos para obter uma medição adequada e confiável da resposta de interesse. Para atender a esse requisito, uma técnica de planejamento experimental apropriada deverá ser empregada. As técnicas de projeto experimental comumente usadas para análise e modelagem de processos são os projetos fatorial completo, fatorial parcial e composto central. Um planejamento fatorial completo requer pelo menos três níveis por variável para estimar os coeficientes dos termos quadráticos no modelo de resposta. Um planejamento fatorial parcial requer menos experimentos do que o planejamento fatorial completo. No entanto, o primeiro é particularmente útil se certas variáveis já são conhecidas por não mostrarem interação. Uma alternativa eficaz ao planejamento fatorial é o planejamento composto central, requer muito menos testes do



que o planejamento fatorial completo e tem se mostrado suficiente para descrever a maioria das respostas do processo em estado estacionário. Portanto, neste estudo, decidiu-se usar o Projeto Composto Central (PCC) para projetar os experimentos.

#### 4.5 AMOSTRAS PRODUZIDAS VIA MANUFATURA ADITIVA

A **Figura 11** demonstra as regiões selecionadas para análise da rugosidade em três elementos dentários distintos que apresentam diferentes formas anatômicas, volume e geometria. Foram selecionados os elementos incisivo, canino e o primeiro molar. A medida da rugosidade nos elementos incisivo e canino foi realizada na linha central do elemento, no sentido do longo eixo da coroa e entre a cervical e bordo incisal. Para o primeiro molar, a medida linear de rugosidade foi realizada no longo eixo da coroa e entre a cervical e bordo incisal da cúspide mesial, esse conjunto representa de uma maneira geral quase todos os elementos de uma arcada dentária, facilitando assim a leitura e visualização da rugosidade.

**Figura 11** - Regiões selecionadas para análise



**Fonte:** Próprios autores (2023)

#### 4.6 MEDIÇÃO DA MASSA DOS MODELOS PRODUZIDOS

Demonstrada na **Figura 12** a quantificação da massa de cada amostra foi realizada após a produção dos modelos ortodônticos. As medidas foram realizadas por uma balança analítica da marca Shimadzu™ com precisão de 0,1 mg.

**Figura 12** - Balança analítica da marca Shimadzu™



**Fonte:** Próprios autores (2023)

#### 4.7 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DOS MODELOS PRODUZIDOS

A quantificação da rugosidade foi realizada no laboratório da indústria Arotec, utilizando microscópio digital Olympus, modelo DSX 1000™ com lente objetiva de 10X. A medição da rugosidade seguiu o parâmetro de amplitude (pico e vale) de acordo com a norma ISO 4287:1997 e foi medida a rugosidade média (Rc).

**Figura 13** - Microscópio digital Olympus, modelo DSX 1000



**Fonte:** <https://www.olympus-ims.com/pt/microscope/dsx1000/high-resolution-model/>

#### 4.8 AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Para a avaliação qualitativa foram selecionados 2 profissionais de Odontologia de forma não probabilística intencional por conveniência. Um dos profissionais possui mais de 10 anos de experiência em ortodontia o outro é um profissional recém-formado com menos de um ano de formado. Após a seleção dos profissionais, foi lhes fornecido os mesmos modelos impressos sem qualquer informação adicional sobre os fatores utilizados no processo de manufatura aditiva, e em seguida foi solicitado que fornecessem uma avaliação de 0 a 5 para cada modelo com base na sua avaliação subjetiva de qualidade do modelo, sendo 0 equivalente à pior qualidade do modelo e 5 a melhor qualidade, observados os seguintes itens: 1) Brilho do modelo; 2) Textura do modelo; 3) Reprodução da Anatomia; 4) Nível da rugosidade perceptível ao olho nu; 5) Cor; 6) Resistencia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RESULTADOS GERAIS

A **Tabela 5** descreve o sumário do modelo de regressão de superfície de resposta.

**Tabela 5** - Sumario do modelo tempo, massa, rugosidade Rc-I, rugosidade Rc-C, rugosidade Rc-M

	Tempo (min)	Massa (g)	Rugosidade Rc-I	Rugosidade Rc-C	Rugosidade Rc-M
S	10,7866	0,307944	0,840953	0,385885	1,22971
R <sup>2</sup>	98,63%	99,09%	69,86%	55,86%	47,35%
R <sup>2</sup> (aj)	98,21%	98,81%	60,82%	42,62%	31,56%
R <sup>2</sup> (pred)	97,12%	98,06%	35,63%	10,97%	1,22%

Sumario do modelo tempo, massa, rugosidade. Rc-I = Rugosidade incisivo, Rc-C= Rugosidade canino, Rc- M= Rugosidade molar.

Na **Tabela 6** observam-se todas as combinações dos parâmetros de Diâmetro do Bico Extrusor, Altura da Camada e Percentual de preenchimento e suas influências sobre o Tempo de impressão, Massa e Altura Média da Rugosidade dos modelos impressos.

**Tabela 6 - Descrição dos experimentos**

ORDEM	DIÂMETRO DO BICO (mm)	CAMADA (mm)	PREENCHIMENTO (%)	TEMPO (min.)	MASSA (g)	RUGOSIDADE Rc (µm)			AVALIAÇÃO QUALITATIVA
						I	C	M	
1	0,4	0,25	40	60	13,044	1,496	1,101	1,496	3
2	0,4	0,25	60	72	16,895	2,063	1,544	1,644	3
3	0,4	0,25	60	72	16,5865	2,163	1,354	1,576	3
4	0,4	0,25	60	72	16,748	2,088	1,594	1,698	3
5	0,4	0,25	60	72	16,895	2,123	1,544	1,754	3
6	0,4	0,25	60	72	16,814	2,063	1,589	1,649	3
7	0,4	0,25	60	72	16,847	2,243	1,638	1,644	3
8	0,4	0,10	60	170	17,100	3,067	2,049	0,980	5
9	0,4	0,25	60	72	16,821	2,087	1,654	1,7234	3
10	0,4	0,25	80	83	20,450	3,162	0,787	2,204	3
11	0,4	0,25	60	72	16,895	2,063	1,684	1,721	3
12	0,4	0,25	80	83	20,450	3,452	0,887	2,341	3
13	0,4	0,40	60	44	16,072	1,717	1,184	3,192	2
14	0,4	0,25	60	72	16,952	2,255	1,364	1,587	3
15	0,4	0,25	60	72	16,832	2,113	1,544	1,644	3
16	0,4	0,10	60	170	17,150	3,357	2,329	0,923	5
17	0,4	0,25	60	72	16,893	2,088	1,648	1,643	3
18	0,4	0,25	40	60	13,044	1,496	1,101	1,496	3
19	0,4	0,40	60	44	16,074	1,887	1,251	3,158	2
20	0,4	0,25	60	72	16,889	2,163	1,498	1,435	3
21	0,6	0,10	40	106	12,627	3,342	1,789	2,276	3
22	0,6	0,40	40	28	11,894	3,579	0,883	1,283	2
23	0,6	0,10	80	149	20,545	2,649	1,600	1,775	4
24	0,6	0,10	40	106	12,557	3,672	1,598	2,587	3
25	0,6	0,40	80	38	18,388	3,091	0,672	0,676	1
26	0,6	0,40	40	28	11,894	3,663	0,899	1,528	2
27	0,6	0,25	60	54	16,633	3,198	2,095	1,586	2
28	0,6	0,25	60	54	16,630	3,298	2,546	1,787	2
29	0,6	0,40	80	38	18,424	3,291	0,867	0,841	1
30	0,6	0,10	80	149	20,895	2,352	1,852	1,556	4
31	0,2	0,40	80	97	16,562	3,484	2,807	2,904	1
32	0,2	0,25	60	134	15,090	4,197	0,906	8,000	1
33	0,2	0,40	40	67	10,859	7,779	1,400	1,723	1
34	0,2	0,25	60	134	15,190	4,285	0,067	8,357	1
35	0,2	0,10	80	370	21,286	2,243	1,950	1,688	5
36	0,2	0,40	80	97	16,442	3,547	2,600	2,702	1
37	0,2	0,10	80	370	21,886	2,257	1,850	1,698	5
38	0,2	0,40	40	67	10,798	7,998	1,400	1,825	1
39	0,2	0,10	40	255	12,632	2,243	1,950	1,687	5
40	0,2	0,10	40	255	12,567	2,425	1,988	1,697	5

**I = Elemento Incisivo; C = Elemento Canino; M = Elemento Molar; Rc = Rugosidade Média.**

## 5.2 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: TEMPO (min.)

É importante destacar que foi observada uma significativa interação entre o tempo e os outros fatores, com um valor de  $R^2$  de 98,63%. Esse resultado indica que os dados se ajustam bem ao modelo proposto. Ademais, os valores de  $R^2$  ajustado (98,21%) e  $R^2$  preditivo (97,12%) também são próximos, evidenciando uma excelente aderência do modelo aos dados.

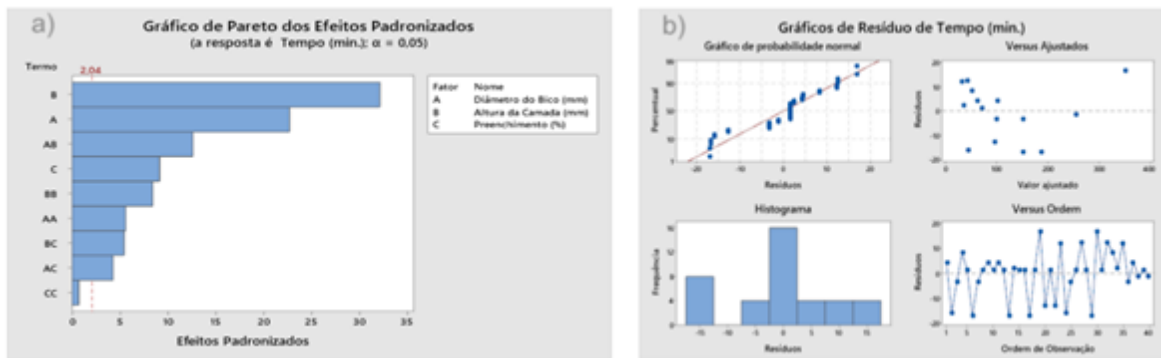
$$\begin{aligned} \text{Tempo (min.)} = & 453,3 - 899 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} - 1536 \text{ Altura da Camada (mm)} \\ & + 2,52 \text{ Preenchimento (\%)} + 643 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\ & + 1721 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\ & + 0,0081 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\ & + 1133,3 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} \\ & - 2,875 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\ & - 4,917 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)} \end{aligned} \quad (2)$$

A equação demonstra a influência dos fatores altura da camada, diâmetro do bico e preenchimento em relação a resposta tempo de produção dos modelos, sendo altura da camada com maior influência seguida do diâmetro do bico e a combinação dos fatores diâmetro do bico e altura da camada. O fator preenchimento exerce menor influência e mesmo quando combinado entre si não exerce influência. Este resultado corrobora com os resultados de Anitha *et al.*, 2001, que conduziram um estudo utilizando o método Taguchi para avaliar a influência de três parâmetros de processo (altura da camada, largura da camada depositada e velocidade de deposição), na rugosidade superficial das peças fabricadas por MDF (Modelagem por Deposição de Fusão).

Os resultados indicaram que a altura da camada é o fator mais relevante. Este resultado está demonstrado na **Figura 14a**, gráfico de Pareto onde a altura da camada é o fator de maior influência no tempo do processo, seguido pelo diâmetro do bico, que também exerce um impacto significativo, embora menor que a altura da camada. Por outro lado, o fator de preenchimento apresenta uma influência relativamente menor em comparação com os outros dois fatores. A **Figura 14b**, confirma a representatividade dos resultados, uma vez que o Gráfico de probabilidade normal de resíduos apresenta pontos próximos da linha central, além do Gráfico de Resíduos versus ordem não seguir um padrão bem definido, confirmando a independência dos dados.

Além disso, a combinação dos fatores "diâmetro do bico" com "altura da camada" revelou uma influência ainda mais expressiva no tempo do processo, em comparação com a combinação da "altura da camada" com o fator de preenchimento. O fator quadrático preenchimento demonstra pouca influência no tempo do processo.

**Figura 14** - Influência do Diâmetro do bico, Altura da camada e Preenchimento sobre o tempo de produção.



*Fonte: Próprios autores (2023)*

### 5.3 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: MASSA (g)

O baixo desvio padrão (S) de 0,307944 aponta para uma menor dispersão dos dados, o que significa que os valores estão próximos uns dos outros. Além disso, o alto valor de  $R \geq (99,09\%)$  sugere um ajuste muito bem-sucedido dos dados ao modelo. Os valores igualmente significativos de R ajustado (98,81%) e  $R^2$  preditivo (98,06%) indicam que os termos adicionados ao modelo têm um efeito relevante, e o modelo em si tem uma excelente capacidade de aderência e previsão. Esses resultados fortalecem a ideia de que o modelo representa adequadamente a variável da massa e é capaz de explicar e prever com precisão os valores da massa.

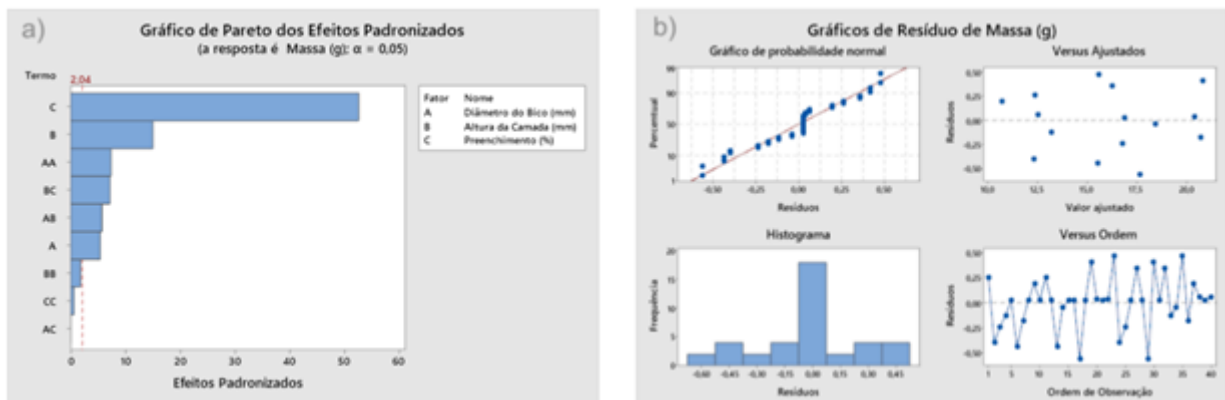
$$\begin{aligned}
 \text{Massa (g)} = & 0,42 + 17,52 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} + 3,64 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,2515 \text{ Preenchimento (\%)} - 24,17 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} * \text{Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & - 10,69 \text{ Altura da Camada (mm)} * \text{Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,000199 \text{ Preenchimento (\%)} * \text{Preenchimento (\%)} \\
 & + 14,76 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} * \text{Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,0003 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} * \text{Preenchimento (\%)} \\
 & - 0,1850 \text{ Altura da Camada (mm)} * \text{Preenchimento (\%)}
 \end{aligned} \tag{3}$$

O gráfico de Pareto na **Figura 15a** demonstra a análise dos fatores individuais, revelando que o preenchimento exerce maior influência, destacando-se como o fator mais significativo. A **Figura 15b**, reforça a representatividade dos resultados, já que o Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos apresenta pontos próximos à linha central. Adicionalmente, o Gráfico de Resíduos em função da ordem não demonstra um padrão

claramente definido, o que corrobora a independência dos dados. Por outro lado, o diâmetro do bico apresenta menor influência. Notavelmente, tanto o diâmetro do bico quanto a altura da camada contribuem para o aumento da massa, mas a interação entre o diâmetro do bico e o preenchimento não demonstra relevância.

Essas descobertas possibilitam uma compreensão mais aprofundada do impacto dos diferentes fatores analisados em relação ao preenchimento, diâmetro do bico, altura da camada e massa. A partir dessas informações, é viável tomar decisões mais fundamentadas e otimizar o processo, levando em conta os aspectos mais influentes para obter melhores resultados.

**Figura 15** - Gráfico de Pareto dos fatores individuais sobre a Massa



**Fonte:** Próprios autores (2023)

#### 5.4 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: RUGOSIDADE RC- I ( $\mu\text{m}$ )

A rugosidade de superfície do elemento incisivo foi avaliada usando o desvio padrão (S) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para analisar a qualidade do ajuste do modelo estatístico. Com base nos resultados obtidos, o desvio padrão (S) de 0,840953 indica uma certa dispersão dos dados em torno da média, sugerindo alguma variação na rugosidade da superfície do incisivo. O valor de  $R^2$  de 69,86% indica que aproximadamente 69,86% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, sugerindo um ajuste aceitável do modelo estatístico e uma certa precisão nas medidas, com os dados aderindo ao modelo.

É importante observar o valor de  $R^2$  pred (35,63%), que indica uma menor aderência do modelo aos dados previstos, o que sugere que as previsões podem ser menos precisas. Contudo, é relevante considerar outros fatores, como o tamanho da amostra, a precisão dos dados e a validade do próprio modelo estatístico.

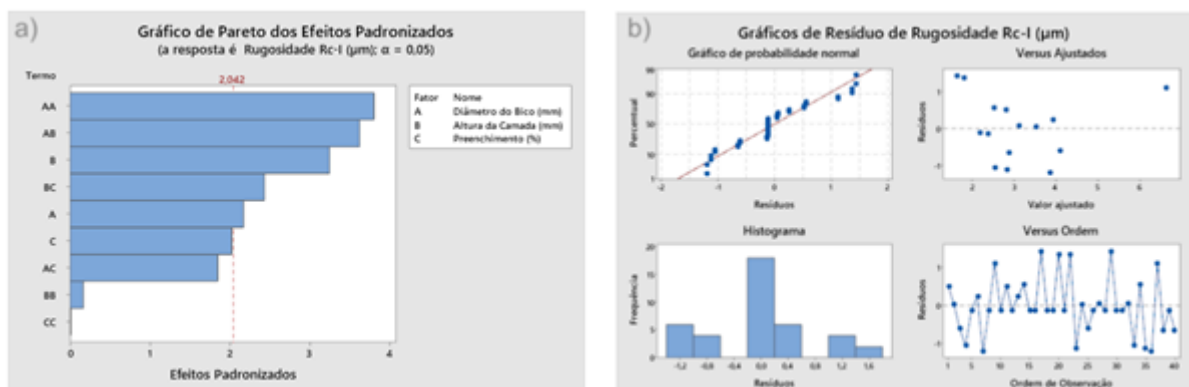


$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Rc-I } (\mu\text{m}) = & 5,95 - 28,83 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} + 23,14 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,014 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 & + 34,12 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & + 2,6 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,000009 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 25,41 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,0973 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 0,1704 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Com base nos resultados obtidos, é observado que a rugosidade do incisivo é principalmente influenciada pelo fator altura da camada, seguido pelo fator diâmetro do bico, sugerindo que o fator preenchimento não exerce uma influência significativa na rugosidade. Além disso, ao considerar a combinação de fatores, a interação entre o diâmetro do bico e a altura da camada tem a maior influência na rugosidade, seguida pela interação entre a altura da camada e o preenchimento, conforme demonstrado no gráfico de Pareto da **Figura 16a** e **16b**.

Com relação aos fatores quadráticos, o fator quadrático do diâmetro do bico é o de maior influência na rugosidade, enquanto o fator quadrático de preenchimento não exerce influência significativa na rugosidade, como pode ser visto na **Figura 16**. A **Figura 16b** reforça a validade dos resultados, pois o Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos apresenta pontos que se encontram próximos da linha central. Adicionalmente, o Gráfico de Resíduos versus Ordem não manifesta um padrão claramente definido, corroborando assim a independência dos dados, embora apresente um possível *Outlier*. Essas informações sugerem que, para compreender e controlar a rugosidade do incisivo, é crucial dar especial atenção ao diâmetro do bico e a altura da camada, bem como considerar suas interações para obter resultados mais precisos.

**Figura 16** - Gráfico de Pareto da comparação da rugosidade nos fatores estudados.



Fonte: Próprios autores (2023)

## 5.5 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA RUGOSIDADE RC-C ( $\mu\text{m}$ )

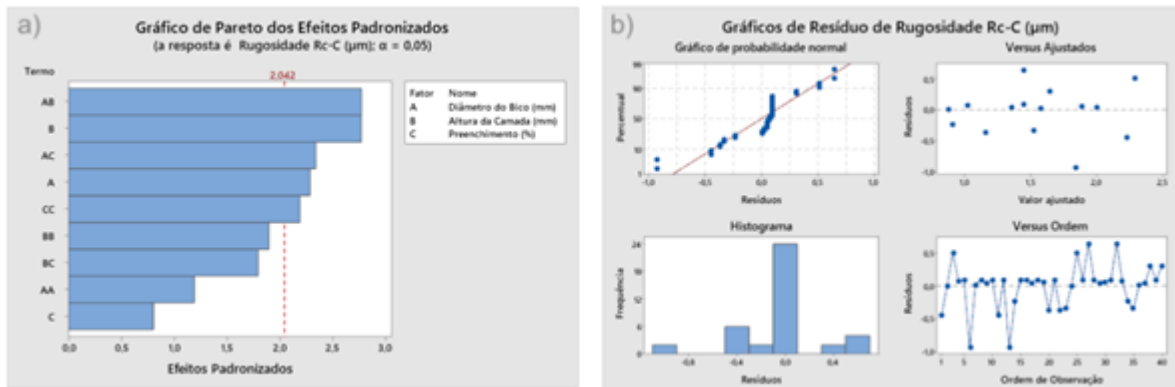
Conforme demonstra a **Tabela 6** o presente resumo descreve um modelo de regressão de superfície de resposta aplicado à análise da rugosidade RC-C (em  $\mu\text{m}$ ), com o diâmetro do bico (mm), altura da camada (mm) e preenchimento (%) como variáveis preditoras. O desvio padrão de 0,385885 indica que os dados estão próximos entre si, sugerindo consistência na medição da rugosidade.

O valor de  $R^2$  de 55,86% significa que aproximadamente 55,86% da variabilidade da rugosidade é explicada pelo modelo, demonstrando um ajuste aceitável. Contudo, o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  aj) de 42,62% indica que apenas 42,62% da variabilidade da rugosidade é explicada pelo modelo após o ajuste. Por outro lado, o valor de 10,97% ( $R^2$  pred) indica que somente 10,97% da variabilidade dos dados previstos pelo modelo é explicada pelo próprio modelo, indicando uma aderência limitada.

A **Figura 17a** ilustra a análise do efeito do Diâmetro do Bico Extrusor (mm), Altura da Camada (mm) e Preenchimento da Amostra (%) sobre a Média de Rugosidade do Canino ( $\mu\text{m}$ ). Os resultados mostram que a altura da camada e a combinação entre os fatores diâmetro do bico e altura da camada são os que exercem maior influência na rugosidade média do canino, o fator preenchimento isoladamente não exercem influência, entretanto quando combinado entre si como fator quadrático demonstra contribuir na rugosidade média do canino. A **Figura 17b** sustenta a representatividade dos resultados, pois o Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos revela a proximidade dos pontos em relação à linha central. Adicionalmente, o Gráfico de Resíduos versus Ordem não manifesta um padrão claramente definido, o que ratifica a independência dos dados.

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Rc-C } (\mu\text{m}) = & -0,94 + 0,71 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} - 8,42 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,1198 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 & + 4,90 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & + 13,86 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,000901 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 8,92 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,0565 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\
 & + 0,0577 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

**Figura 17** - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (diâmetro do bico e a interação entre diâmetro do bico e altura da camada)



*Fonte: Próprios autores (2023)*

## 5.6 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: RUGOSIDADE RC-M (µm) VERSUS DIÂMETRO DO BICO (mm); ALTURA DA CAMADA (mm); PREENCHIMENTO (%)

Com base no resumo do modelo de regressão de superfície de resposta, a variável de resposta é a rugosidade RC-M (em µm), enquanto as variáveis preditoras são o diâmetro do bico (em mm), a altura da camada (em mm) e o preenchimento (%). O desvio padrão (S) de 1,22971 indica que os dados apresentam uma dispersão significativa, sugerindo uma considerável variabilidade na rugosidade medida.

O valor de  $R^2$  de 47,35% mostra que aproximadamente 47,35% da variabilidade da rugosidade é explicada pelo modelo. Isso indica que o modelo possui alguma capacidade de explicação dos dados, mas ainda existe uma parcela substancial de variabilidade não explicada. Os valores de  $R^2$  aj de 31,56% e  $R^2$  pred de 1,22 indicam que a interação entre as variáveis preditoras não é significativa e que o modelo apresenta uma fraca aderência aos dados. Isso sugere que o modelo não é capaz de explicar adequadamente a variabilidade observada na rugosidade.

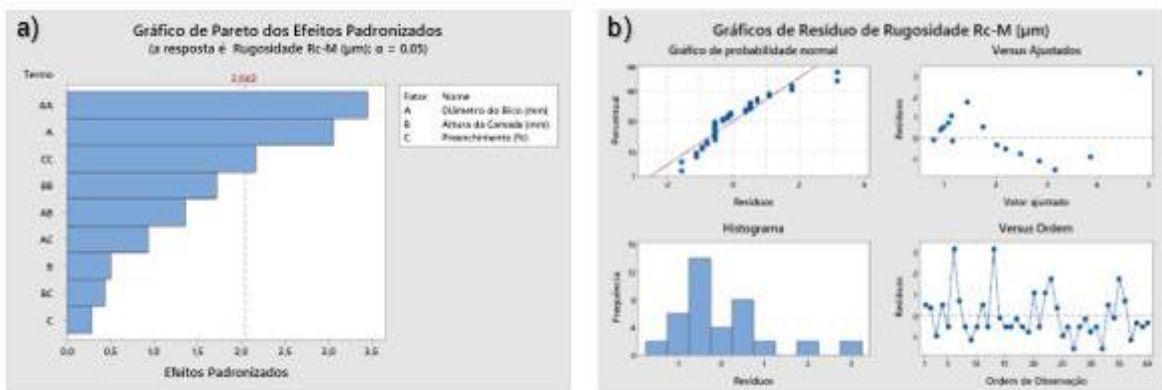
Os resultados indicam que o modelo possui uma dispersão significativa dos dados e uma aderência forte, sugerindo que não há uma interação relevante entre as variáveis preditoras para explicar a rugosidade medida. É importante considerar outras possíveis abordagens ou ajustes do modelo para melhorar sua precisão e aderência aos dados.

Com base nas informações fornecidas e ilustradas na **Figura 18a**, é possível afirmar que o fator isolado mais influente na rugosidade é o diâmetro do bico. Isso indica que o diâmetro do bico tem um impacto significativo na rugosidade, independentemente

dos outros fatores analisados. Além disso, os fatores quadráticos do diâmetro do bico e do preenchimento também têm influência na rugosidade. A representatividade dos resultados é corroborada pela **Figura 15b**, dado que o Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos apresenta pontos próximos à linha central. Adicionalmente, o Gráfico de Resíduos versus Ordem não demonstra um padrão claramente definido, o que sustenta a independência dos dados, embora os dados apresentem um possível Outlier. Esses resultados sugerem que a relação entre o diâmetro do bico e a rugosidade pode não ser linear, e que existe uma relação não linear entre o preenchimento e a rugosidade.

Em contraste, os demais fatores e combinações não apresentam influência significativa na rugosidade. Essas informações são importantes para compreender quais fatores têm um impacto mais relevante na rugosidade do molar e podem ajudar a direcionar esforços para o controle e otimização dos parâmetros relacionados ao diâmetro do bico e ao preenchimento, visando a melhoria da qualidade da superfície do molar.

**Figura 18** - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (diâmetro do bico e fator quadrático)



**Fonte:** Próprios autores (2023)

Com base nas informações fornecidas, foram conduzidas análises de regressão de superfície de resposta para relacionar a rugosidade (R) com o diâmetro do bico (mm), altura da camada (mm) e preenchimento (%) em diferentes elementos dentários, como incisivos, caninos e molares. Entretanto, foram observadas divergências significativas nos resultados das medidas de rugosidade linear para cada tipo de dente.

Especificamente para o elemento incisivo, o desvio padrão (S) de 0,840953 indica uma certa uniformidade nos resultados de rugosidade. No entanto, ao considerar o valor de  $R^2$  pred de 35,63%, verifica-se que o ajuste do modelo possui pouca aderência aos dados de rugosidade específicos para o elemento incisivo.

Essas divergências significativas nos resultados sugerem que pode haver diferenças substanciais na rugosidade entre os diferentes tipos de dentes, como incisivos, caninos e molares. Essas diferenças podem ser atribuídas a características anatômicas, funcionais ou outras particularidades inerentes a cada tipo de dente. Essa análise ressalta a importância de considerar as particularidades de cada elemento dentário ao investigar e interpretar os resultados da rugosidade, o que pode ser relevante para fins clínicos ou de pesquisa odontológica.

Na análise da rugosidade de superfície para o elemento canino no modelo gerado, verificou-se que a combinação dos fatores diâmetro do bico e altura da camada, juntamente com o fator isolado altura da camada, exercem maior influência na rugosidade desse elemento específico. Isso implica que esses fatores têm um impacto significativo na rugosidade do canino. O baixo desvio padrão (S) de 0,385885 sugere que os dados do conjunto estão próximos uns dos outros, indicando uma certa consistência nas medições da rugosidade para o elemento canino. Além disso, o valor de  $R^2$  predito de 10,97% demonstra que o modelo possui uma aderência limitada aos dados de rugosidade do elemento canino. Isso sugere que o modelo tem dificuldades em prever a rugosidade com base nos fatores considerados, comprometendo sua capacidade de previsão.

No caso do elemento molar, a análise revelou um desvio padrão (S) de 1,22971, indicando uma dispersão significativa dos dados de rugosidade. Essa variabilidade considerável sugere diferenças notáveis nas medições de rugosidade nessa região específica. Além disso, o valor de  $R^2$  predito de 1,22 aponta que o modelo tem uma aderência fraca aos dados de rugosidade do elemento molar, indicando que não há interação significativa entre os fatores considerados pelo modelo nessa região.

Ao comparar os resultados para cada elemento (incisivos, caninos e molares), sugere-se que os fatores utilizados não possuem a mesma influência em cada área. Essas divergências podem ser atribuídas a diversas variáveis, como a forma geométrica dos dentes, seu volume, complexidade ou até mesmo a dificuldade de obter medições precisas de rugosidade para o processo específico do elemento molar. Portanto, essas variáveis mencionadas são prováveis causas para os resultados divergentes entre os diferentes elementos dentários.

Ao interpretar os resultados da análise da rugosidade, é essencial considerar esses fatores adicionais e reconhecer que diferentes regiões dentárias podem apresentar comportamentos distintos em relação aos fatores que influenciam a rugosidade de superfície.

Na região do Elemento Incisivo ficou evidente a aderência dos fatores em um nível considerado ótimo, entretanto percebe-se que na região de canino começa a perder a aderência dos fatores, mas continua dentro dos limites aceitáveis; na região de molar os fatores não têm aderência, portanto, considerado fraco.

Nos estudos de Anitha *et al.*, (2001), foi verificada uma relação inversa entre a altura da camada e a rugosidade da superfície. Este estudo revelou que o fator mais importante de influência na rugosidade da superfície é a altura da camada. Também revelou que existe uma relação inversa entre a altura da camada e a superfície rugosidade, corroborando com os dados encontrados neste estudo.

#### 5.7 REGRESSÃO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: AVALIAÇÃO QUALITATIVA VERSUS DIÂMETRO DO BICO (mm); ALTURA DA CAMADA (mm); PREENCHIMENTO (%)

O sumário do modelo na avaliação qualitativa revela que o valor de  $R^2$  de 97,73% indica que aproximadamente 97,73% da variação da resposta (avaliação qualitativa) é explicada pelo modelo. Esse resultado aponta para um ajuste robusto dos dados, sugerindo que o modelo é capaz de explicar a maior parte da variação observada na resposta.

O valor de  $R^2$  aj de 93,14%, conhecido como coeficiente de determinação ajustado, leva em consideração o número de preditores no modelo. Essa métrica indica que o modelo possui uma boa capacidade de explicar a variação, considerando a complexidade do modelo e a quantidade de preditores envolvidos.

Além disso, o valor de  $R^2$  pred de 88,68% representa o coeficiente de determinação preditivo, que indica a capacidade do modelo de prever valores futuros ou não observados anteriormente. Um valor alto, próximo a 100%, denota que o modelo possui uma boa capacidade de fazer previsões precisas.

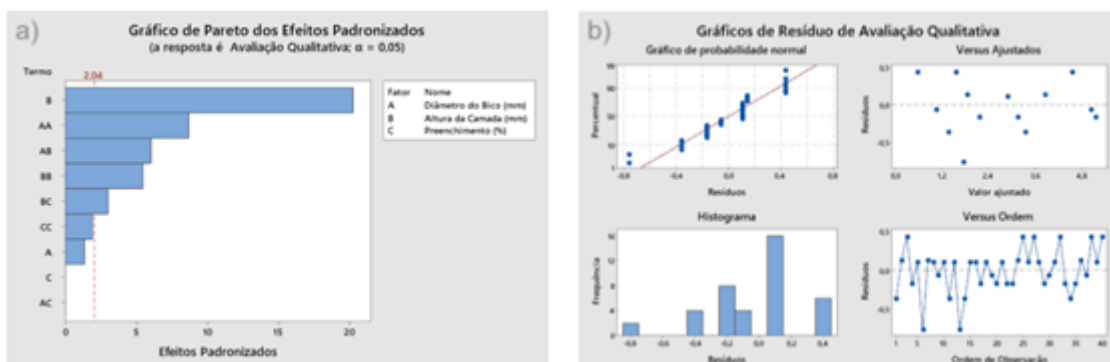
Com base nessas métricas, é possível concluir que o modelo possui um bom ajuste e uma boa aderência aos dados de avaliação qualitativa. Isso sugere que o modelo é capaz de explicar e prever de forma precisa a resposta com base nos valores do diâmetro do bico, altura da camada e preenchimento considerados no estudo.

Na avaliação qualitativa realizada, foi observado que o fator que exerce a maior influência é a altura da camada. Isso significa que a variação na altura da camada tem um impacto significativo na avaliação qualitativa. Por outro lado, os fatores diâmetro do bico e preenchimento não exercem influência na avaliação qualitativa. Isso indica que as

variações nesses fatores não afetam significativamente a qualidade da avaliação. Quanto à interação entre os fatores, foi observado que a combinação do diâmetro do bico e da altura da camada apresenta a maior influência na avaliação qualitativa. Além disso, o fator quadrático do diâmetro do bico contribui com uma influência maior nessa combinação. Isso sugere que a relação entre o diâmetro do bico e a avaliação qualitativa pode não ser linear, e o efeito do diâmetro do bico é amplificado pela sua influência quadrática.

Essas informações são importantes para entender quais fatores são relevantes na avaliação qualitativa e como eles interagem entre si. Isso pode auxiliar no controle e otimização dos parâmetros relacionados à altura da camada e diâmetro do bico para obter os melhores resultados na avaliação qualitativa (**Figura 19a**). A **Figura 19b** reforça a validade dos resultados, visto que o Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos apresenta pontos em proximidade com a linha central. Além disso, o Gráfico de Resíduos versus Ordem não demonstra um padrão claramente definido, o que sustenta a conclusão de que os dados são independentes.

**Figura 19** - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (avaliação qualitativa)



**Fonte:** Próprios autores (2023)

Ao analisar os resultados das medições de rugosidade linear em diferentes elementos dentários (incisivos, caninos e molares), é evidente a presença de divergências significativas. Isso sugere que os fatores considerados não exercem uma influência uniforme em todas as áreas, indicando que sua aplicação não deve ser homogênea em todas as regiões dentárias.

Entre as variáveis que provavelmente contribuem para essas discrepâncias, destacam-se a forma geométrica, volume, complexidade e dificuldade do processo de obtenção. Esses fatores introduzem variações substanciais nos resultados de rugosidade para cada tipo de dente.

Essas conclusões são congruentes com as descobertas de Lu e Shin (2017) e Mohensen (2017), que enfatizam a dependência de diversos fatores na precisão dos modelos resultantes, incluindo aquisição de dados, processamento de imagem dos tecidos orais duros e moles, e consideração de uma variedade de parâmetros nos processos de manufatura e pós-processamento.

Além disso, é crucial ter em mente que os modelos obtidos por polimerização em cuba e jato de material estão suscetíveis a alterações dimensionais (redução das dimensões) durante a polimerização, assim como podem apresentar superfícies escalonadas devido à técnica de estratificação utilizada na construção. Esses modelos também podem sofrer alterações dimensionais após o envelhecimento.

Quanto às vantagens, destaca-se que a Manufatura de Deposição Fundida (MDF) é uma tecnologia de manufatura aditiva acessível e econômica. Isso a torna ideal para iniciantes em impressão 3D, sendo a técnica de prototipagem rápida mais amplamente utilizada devido à sua facilidade de acesso. A facilidade de uso das impressoras 3D associadas à MDF é notável, uma vez que esta é predominantemente uma tecnologia de consumo, facilitando a experiência do usuário (BARROS *et al.*, 2016; SAFIRA *et al.*, 2010).

Entre as técnicas de Manufatura Aditiva (MA), a Fused Deposition Modeling (FDM) utilizando ABS tem desempenhado um papel crucial na produção de produtos personalizados na área de saúde e qualidade de vida. Espera-se que essa técnica desempenhe um papel significativo nos cuidados de saúde, melhorando a segurança, qualidade, eficácia, reduzindo o impacto ambiental e promovendo a sustentabilidade econômica. A melhoria dos processos e a minimização de defeitos tornam a FDM mais competitiva em comparação com outras técnicas de manufatura aditiva (HUANG *et al.*, 2013).

A otimização da rugosidade em modelos produzidos por manufatura aditiva requer ajustes nas configurações para obter resultados desejados. Os fatores que podem ser ajustados incluem o diâmetro do bico da impressora, a altura da camada e o preenchimento do modelo. A seleção adequada do diâmetro do bico pode contribuir para melhorar a qualidade da superfície das peças impressas, reduzindo a rugosidade.

É essencial escolher um valor de diâmetro que esteja próximo dos fatores disponíveis para a produção das peças, a fim de alcançar os melhores resultados. Através da predição de múltiplas respostas (**Tabela 7**), foi gerada uma configuração que permite a obtenção dos modelos produzidos por manufatura aditiva, onde os valores devem ser ajustados para se aproximarem dos fatores disponíveis na produção das



peças. Essa abordagem visa obter modelos com menor rugosidade e melhor qualidade superficial, ao mesmo tempo em que se leva em conta as limitações dos equipamentos e recursos disponíveis.

**Tabela 7** - Setups e os resultados

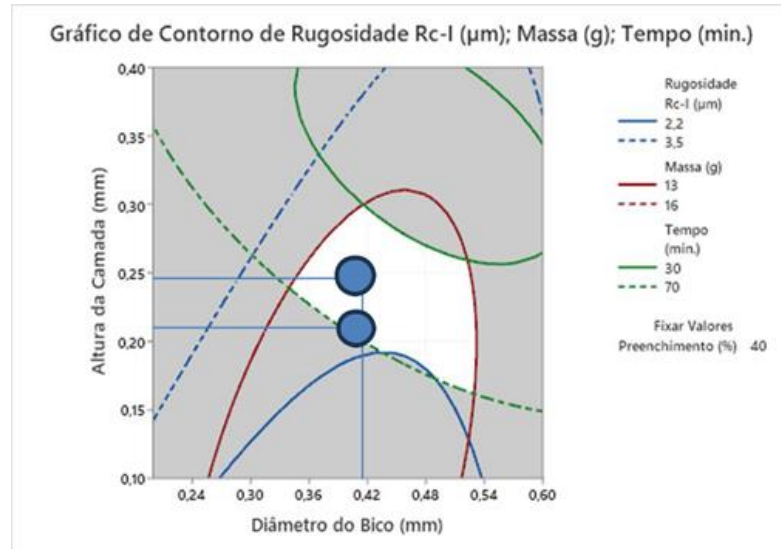
Ordem	Bico	Camada	Preenchimento	Tempo (min)	Massa	Altura Rugosidade Rc-I ( $\mu\text{m}$ )	Avaliação Qualitativa
1	0,4	0,25	40	53	14,3589	1,685	5
2	0,4	0,25	40	53	14,3527	2,224	5
3	0,4	0,25	40	53	14,3669	1,226	5
4	0,4	0,21	40	62	14,3526	1,856	5
5	0,4	0,21	40	62	14,3586	1,422	5
6	0,4	0,21	40	62	14,3236	2,151	5
7	0,4	0,35	60	45	14,5690	2,266	3
8	0,4	0,35	60	45	14,7273	1,586	2
9	0,4	0,35	60	45	14,5534	4,676	1

Fonte: Próprios autores (2023)

Os valores máximos foram configurados em 0,4 mm para o diâmetro do bico e 0,25 mm para a altura da camada, com 40% de preenchimento. Já para os valores mínimos, foram configurados em 0,4 mm para o diâmetro do bico, 0,21 mm para a altura da camada, também com 40% de preenchimento. Além disso, foi gerado um terceiro cenário de previsão extrema, com diâmetro do bico de 0,4 mm, altura da camada de 0,35 mm e preenchimento de 60%. Essas configurações estabelecem parâmetros críticos para os fatores analisados no estudo.

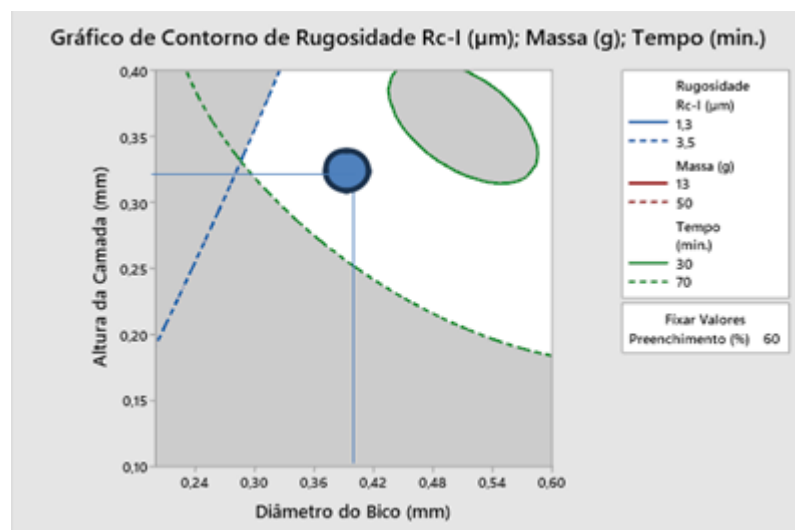
Ao comparar os fatores estudados, nota-se que a altura da camada exerceu a maior influência na média dos resultados, seguido pelo diâmetro do bico. O gráfico de contorno gerado (**Figura 20**) para a predição da rugosidade do elemento incisivo (Rc-I em  $\mu\text{m}$ ), considerando a massa (em g) e o tempo (em minutos), permite fazer uma previsão da rugosidade nesse cenário específico.

**Figura 20** - Gráfico de contorno com 40% de preenchimento



A **Figura 21** mostra o gráfico de contorno com resultados obtidos para os parâmetros críticos dos modelos confeccionados, com os seguintes fatores: diâmetro do bico de 0,4 mm, altura da camada de 0,35 mm e preenchimento de 60%, resultaram em uma média de rugosidade de 2,842  $\mu\text{m}$ . Isso mostra que há espaço para melhorias, e a continuação da exploração de diferentes parâmetros e técnicas pode ajudar a atingir resultados ainda melhores.

**Figura 21** - Gráfico de contorno com 60% de preenchimento



**Fonte:** Próprios autores (2023)

Com base nos dados obtidos nos modelos produzidos com diâmetro do bico 0,4mm, altura de camada de 0,2 mm, e preenchimento de 40%. constata-se que o valor máximo da rugosidade média do elemento incisivo para o modelo final foi de 1,711  $\mu\text{m}$ ,

os modelos analisados demonstraram resultados significativos para a melhoria do processo de produção de modelos em ABS via FDM conforme fica demonstrado dentro da área considera zona ótima no gráfico de contorno na **Figura 20**. O modelo com diâmetro do bico de 0,4 mm, camada de 0,21 mm e preenchimento de 40% apresentou uma acurácia em relação a rugosidade média de 1,809  $\mu\text{m}$ , Isso destaca a efetividade do ajuste dos parâmetros para alcançar resultados mais próximos do desejado na fabricação dos modelos, contribuindo para aprimorar a qualidade dos produtos produzidos via manufatura aditiva em ABS.

O controle preciso dos parâmetros de processo, como altura da camada, diâmetro do bico extrusor e preenchimento do modelo, é de suma importância para obter resultados de qualidade na manufatura aditiva de modelos ortodônticos. Esses fatores têm influência direta na precisão, resistência e adaptação dos modelos produzidos, desempenhando um papel crucial na sua funcionalidade. É importante ressaltar a fundamental continuação no aprimoramento da técnica de manufatura aditiva, voltada para a produção de modelos ortodônticos, considerando diferentes combinações de parâmetros de manufatura e matéria-prima, para beneficiar tanto os profissionais da área quanto os pacientes, ao oferecer soluções mais precisas, personalizadas e eficazes no tratamento ortodôntico.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos materiais e métodos utilizados, pode-se concluir que:

1. Os parâmetros ideais para a produção de Modelos Ortodônticos são um Diâmetro do Bico Extrusor de 0,4 mm, Altura da Camada de 0,25 mm e 40 % de preenchimento. Isso resulta em 53 minutos de produção, 14,35 g de massa e uma Altura Média da Rugosidade de 1,711  $\mu\text{m}$ .
2. O aumento do Diâmetro do Bico Extrusor e da Altura da Camada está associado a um menor tempo de produção para o Modelo Ortodôntico.
3. A Altura da Camada mostrou ser o fator mais influente na rugosidade do Elemento Incisivo, enquanto, para os Elementos Canino e Molar, o Diâmetro do Bico Extrusor desempenhou o papel mais significativo na rugosidade.
4. O modelo aplicado mostrou aderência e capacidade de prever as respostas relacionadas ao tempo de produção, massa e rugosidade média dos incisivos.
5. Diferenças entre os elementos dentários foram observadas, destacando a importância de considerar características específicas de cada elemento ao otimizar os parâmetros de impressão.
6. O fator Preenchimento teve influência significativa na resposta Massa, enquanto a Altura da Camada foi o fator isolado mais relevante para a rugosidade média do Elemento Incisivo.

## 7 CONTRIBUIÇÕES

### 7.1 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

Contribui significativamente ao aprofundar o conhecimento em manufatura aditiva, investigar parâmetros de produção, desenvolver metodologias de avaliação e fornecer aplicações práticas na odontologia. Além disso, ela promove a otimização do processo de produção, incentiva a pesquisa interdisciplinar, estabelece uma base para estudos futuros e contribui para a comunidade científica por meio da publicação de resultados.

### 7.2 CONTRIBUIÇÕES ECONÔMICAS

Pode contribuir economicamente ao otimizar a produção, reduzir custos, melhorar a qualidade dos modelos ortodônticos, incentivar inovações tecnológicas, aumentar a competitividade na indústria odontológica e potencialmente gerar oportunidades de patentes. Essas contribuições têm o potencial de impactar positivamente tanto profissionais quanto a economia em geral.

### 7.3 CONTRIBUIÇÕES SOCIAIS

Maior acessibilidade a tratamentos ortodônticos, melhoria na qualidade dos cuidados odontológicos, incentivo à inovação na saúde bucal, capacitação profissional, possível impacto ambiental positivo, promoção da colaboração interdisciplinar, estímulo à pesquisa na odontologia e potencial benefício para comunidades carentes. Essas contribuições têm o potencial de impactar positivamente a sociedade e a prática odontológica.

## 8 REFERÊNCIAS

AMIR, M. *et al.,,*. Accelerated process optimization for laser-based additive manufacturing by leveraging similar prior studies. **IISE Transactions**. v. 49, n. 1, p. 31-44, 2016.

ANITHA, S. *et al.,,*. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, p. 385-388, 2001.

BARBOSA, P. *et al.,,*. Utilización del prototipado rápido en la Odontología. **Revista Estomatológica Herediana**, v. 25, n. 2, p. 167-174, 2015.

BARROS, A. *et al.,,*. Passos para a obtenção de biomodelos em manufatura aditiva para a saúde. **Revista Gaúcha de Odontologia**, v. 64, n. 4, p. 442-446, 2016.

CAMARDELLA, Leonardo Tavares *et al.,,*. Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models Genauigkeit von stereolitographisch gedruckten digitalen Modellen im Vergleich zu Gipsmodellen. **J. Orofac. Orthop. Fortschritte Kieferorthopädie**, v. 40, p. 162-402, 2017.

CAMPBELL, M. *et al.,,*. Surface roughness visualization for rapid prototyping models. **Computer-Aided Design**, v. 34, p. 717- 725, 2002.

CARROTTE, P. V.; WINSTANLEY, R. B.; GREEN, J. R. A study of the quality of impressions for anterior crowns received at a commercial laboratory. **British dental journal**, v. 174, n. 7, p. 235-240, 1993.

CASTRO, J.; STOPPA, M. Prototipagem 3D aplicada a cirurgias de implantes dentários. **HOLOS**, v. 8, p. 49-58, 2018.

CHEN, S. *et al.,,*. Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe<sub>3</sub>Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 88, n. 5, p.2009-2018, 2017.

COELHO, A. W. *et al.,,*. Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 2018.

- DAEKEON, A. *et al.,,*. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5593-5600, 2009.
- DUTRA, D. *et al.,,*. Aplicabilidade da prototipagem rápida na Odontologia—uma revisão de literatura. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 16, n. 1, p. 89-95, 2017.
- FARAH, J. W. *et al.,,*. Insights of dental technicians: a survey of business and laboratory relations with dentists. **Trends & Techniques in the Contemporary Dental Laboratory**, v. 8, n. 2, 17-8, 1991.
- FERRAGE, L. *et al.,,*. A review of the additive manufacturing (3DP) of bioceramics: alumina, zirconia (PSZ) and hydroxyapatite. **Journal Of The Australian Ceramic Society**, Sydney, v. 53, n. 1, pp. 11-20, 13 dez. 2017.
- GALANTUCCI, F. *et al.,,*. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 58, p. 189-192, 2009.
- HATTORI, Katia Emiko *et al.,,*. Inovações tecnológicas em reabilitação oral protética. **RGO. Revista Gaúcha de Odontologia (Online)**, v. 59, p. 59-66, 2011.
- HUANG, Samuel H. *et al.,,*. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. **The International journal of advanced manufacturing technology**, v. 67, p. 1191-1203, 2013.
- HYUNG, Y. *et al.,,*. Prosthetic rehabilitation with an implant-supported fixed prosthesis using computer- -aided *design* and computer-aided manufacturing dental technology for a patient with a mandibulectomy: a clinical report. **J Prosthet Dent**. v. 115, p. 133-136, 2016.
- IMBERY, Terence A. *et al.,,*. Quality of impressions and work authorizations submitted by dental students supervised by prosthodontists and general dentists. **Journal of dental education**, v. 80, n. 10, p. 1229-1236, 2016.
- JIAO, C. *et al.,,*. Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> scaffolds with controllable multi-level pores via digital light processing. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 40, n. 15, p. 6087–6094, 2020.
- JUMYUNG, U. *et al.,,*. STEP-NC compliant process planning of additive manufacturing: remanufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 88, n. 5-8, p. 1215- 1230, 2017.

KRÖGER, E.; DEKIFF, M.; DIRKSEN, D. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. **European Journal of Dental Education**, v. 21, n. 4, p. e119–e125, 2017.

KUMAR, A. *et al.,,*. Rapid prototyping: a future in orthodontics. **Journal of Orthodontic Research**, v. 4, n. 1, p. 1, 2016.

LIU, S.; SHIN, Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. **Materials & Design**. v. 164, 2019.

MANUELLI, M. *et al.,,*. Comparison of linear transverse measures between plaster and resin printed digital models. **Journal of biological regulators and homeostatic agents**, v. 32, n. 2 Suppl. 2, p. 81-85, 2018.

MATOZINHOS, I. *et al.,,*. Impressão 3D: inovações no campo da medicina. **Revista Interdisciplinar Ciências Médicas**, v. 1, n. 1, p. 143-162, 2017.

MOHSEN, A. The rise of 3D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business Horizons**. v. 60, n. 5, p. 677-688, 2017.

NGO, T. D. *et al.,,*. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 143, p. 172–196, Jun. 2018.

OLIVEIRA, G.; MARQUES, J. Uso da tecnologia de impressão tridimensional na rugoscopia palatina. **Revista Brasileira de Odontologia Legal**, v. 2, n. 2, 2015.

PULAK, M. *et al.,,*. Dhane, Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 132, p. 323-331, 2003.

ROYZEN, Beatriz Gonçalves Boskovitz. **Os recursos da computação gráfica na elaboração de projetos**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAFIRA, Lucio Costa *et al.,,*. Aplicação dos biomodelos de prototipagem rápida na Odontologia, confeccionados pela técnica da impressão tridimensional. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 9, n. 3, p. 240-246, 2010.



SANTOS, F. C. Desenvolvimento de *software* para equipamento de prototipagem rápida por sinterização seletiva a laser (SLS). **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SILVEIRA, Igor Eduardo Luciano da; MIGOTO, Mario Guilherme. Escaneamento digital e suas aplicações na odontologia: revisão de literatura. 2020.

SOOD, A. K. *et al.,,*. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Mater. Des.**, v. 31, n. 1, p. 287–295, 2010.

THRIMURTHULU, M. *et al.,,*. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling, International. **Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p.585-594, 2004.

TIAN, Yueyi *et al.,,*. A review of 3D printing in dentistry: Technologies, affecting factors, and applications. **Scanning**, v. 2021, 2021.

TUNCHEL, S. *et al.,,*. 3D Printing / Additive Manufacturing Single Titanium Dental Implants : A Prospective Multicenter Study with 3 Years of Follow-Up.**International Journal of Dentistry**, v. 2016, p. 1–9, 2016.

VASCONCELOS, B. *et al.,,*. A tecnologia 3D e suas aplicações na Odontologia moderna uma revisão sistemática de literatura. **Full Dent Sci**, v. 10, p. 37, 2018.

VASQUES, Mayra Torres. **Desenvolvimento de uma técnica de desenho digital e impressão em 3D de placas oclusais e sua aplicabilidade no tratamento de pacientes com disfunção temporomandibular**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VOLPATO, N.; Time-saving and accuracy issues in rapid tooling by selective laser sintering; **Tese de Doutorado**. Escola de Engenharia Mecânica. Universidade de Leeds, Leeds, 2015.

VOLPATO, Neri. Manufatura Aditiva. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão D**, v. 3, p. 3, 2021

WANG, H. Y., Lu, Y. C., Shiau, Y. Y., & Tsou, D. Vertical distortion in distal extension ridges and palatal area of casts made by different techniques. **The Journal of prosthetic dentistry**, v. 75, n.3, 302-308, 1996.

ZHU, W. *et al.*,,. Study on the selective laser sintering of a low-isotacticity polypropylene powder. **Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited**, v. 22, n. 4, p. 1-19, 2016.

## 9 APÊNDICES

WORKSHEET 3

### Regressão de Superfície de Resposta: Tempo (min.) versus Diâmetro do Bico (mm); Altura da Camada (mm); Preenchimento (%)

#### Coefficientes Codificados

Termo	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
	Coef	Coef			
Constante	70,51	2,62	26,89	0,000	
Diâmetro do Bico (mm)	-54,80	2,41	-22,72	0,000	1,00
Altura da Camada (mm)	-77,60	2,41	-32,17	0,000	1,00
Preenchimento (%)	22,10	2,41	9,16	0,000	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	25,73	4,60	5,59	0,000	1,82
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	38,73	4,60	8,42	0,000	1,82
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	3,23	4,60	0,70	0,488	1,82
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	34,00	2,70	12,61	0,000	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	-11,50	2,70	-4,26	0,000	1,00
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	-14,75	2,70	-5,47	0,000	1,00

#### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
10,7866	98,63%	98,21%	97,12%

#### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	250531	27837	239,25	0,000
Linear	3	190264	63421	545,09	0,000
Diâmetro do Bico (mm)	1	60061	60061	516,21	0,000
Altura da Camada (mm)	1	120435	120435	1035,11	0,000
Preenchimento (%)	1	9768	9768	83,96	0,000
Quadrado	3	36173	12058	103,63	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1	3640	3640	31,29	0,000
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	1	8249	8249	70,90	0,000
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	1	57	57	0,49	0,488
Interação com 2 Fatores	3	24093	8031	69,02	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	1	18496	18496	158,97	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	1	2116	2116	18,19	0,000
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	1	3481	3481	29,92	0,000
Erro	30	3490	116		
Falta de ajuste	5	3490	698	*	*
Erro puro	25	0	0	*	*
Total	39	254021			

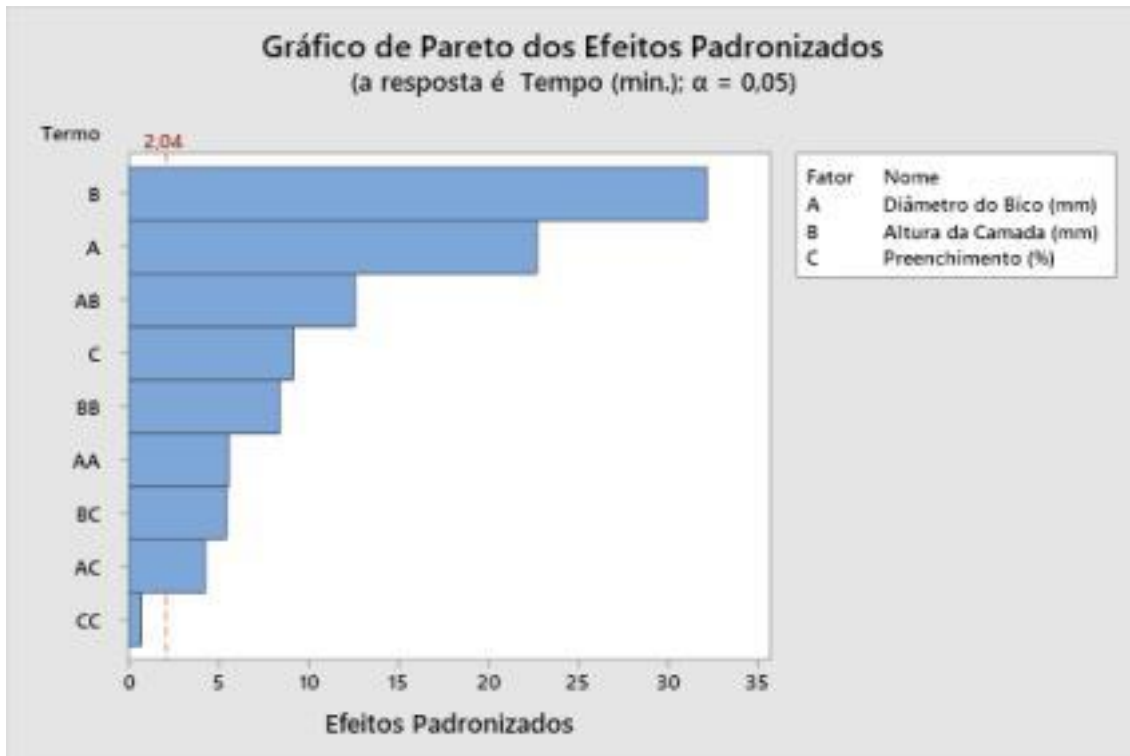
#### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

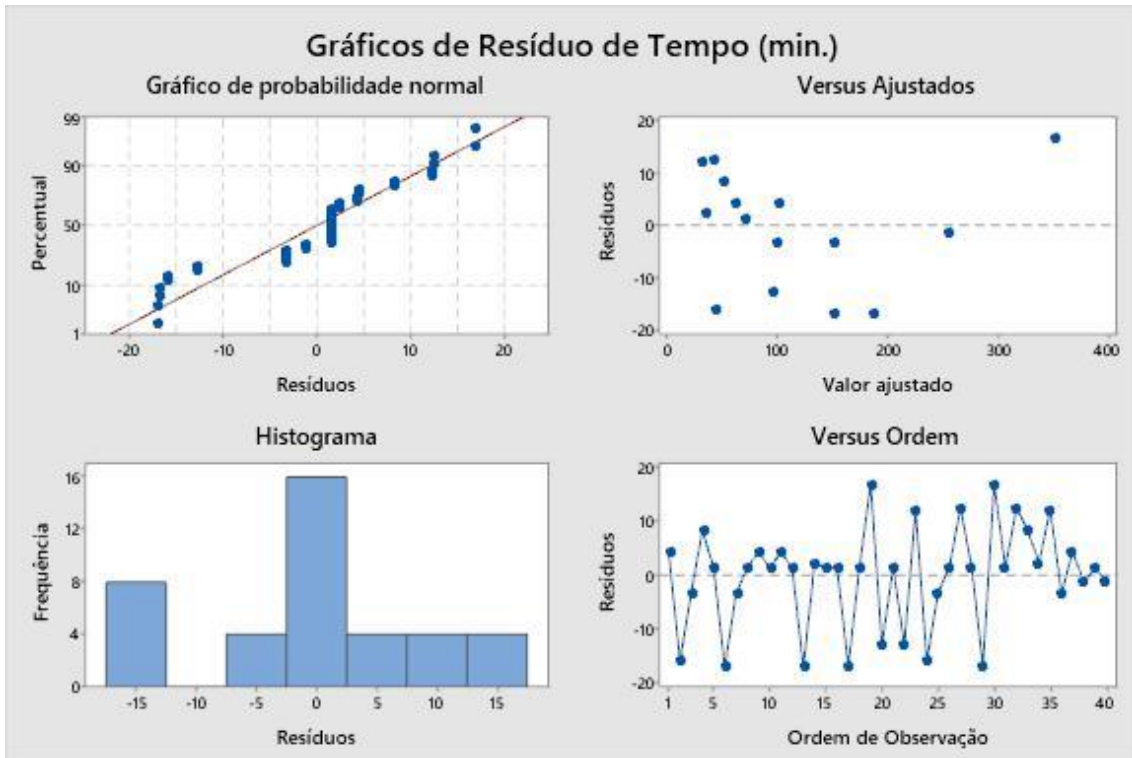
$$\begin{aligned}
 \text{Tempo (min.)} = & 453,3 - 899 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} - 1536 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & + 2,52 \text{ Preenchimento (\%)} + 643 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & + 1721 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,0081 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 & + 1133,3 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 2,875 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 4,917 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}$$

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Tempo		Resíd	
	(min.)	Ajuste	ResídPad	
19	370,00	352,94	17,062,04	R
30	370,00	352,94	17,062,04	R

R Resíduo grande

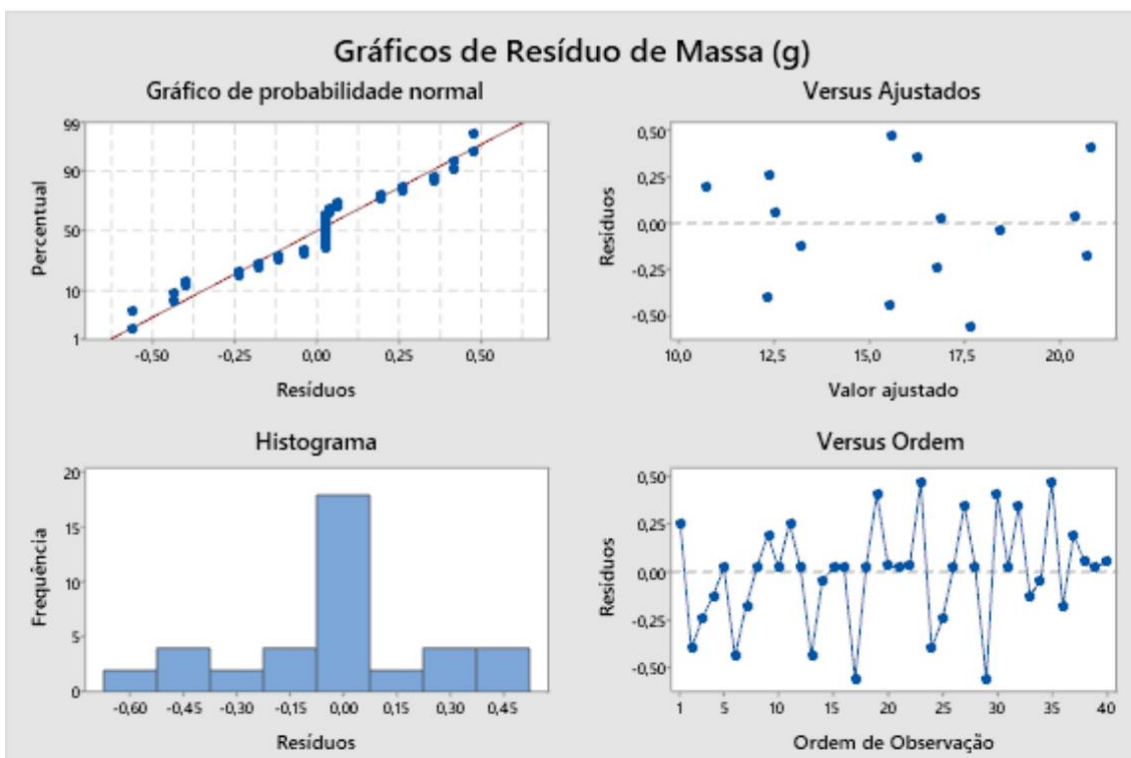
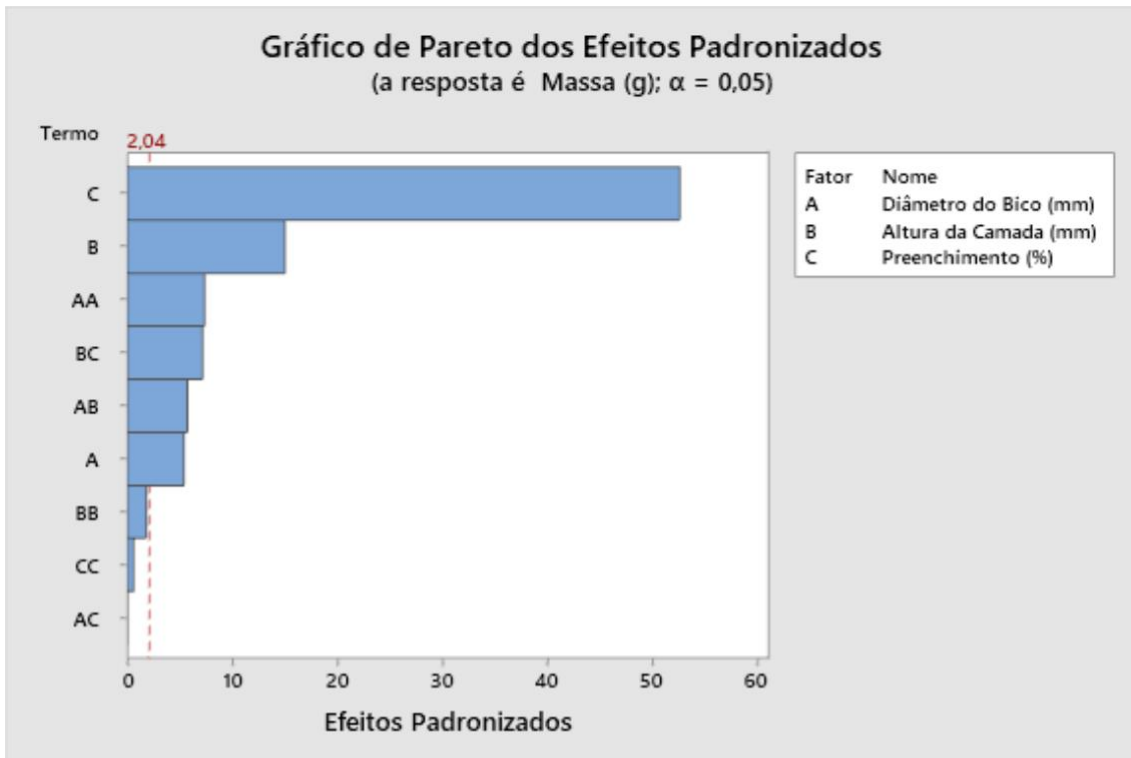






17 17,100 17,662 -0,562 -2,10 R  
 29 17,100 17,662 -0,562 -2,10 R

R Resíduo grande



WORKSHEET 3

## Regressão de Superfície de Resposta: Rugosidade Rc-I ( $\mu\text{m}$ ) versus Diâmetro do Bico (mm); Altura da Camada (mm); Preenchimento (%)

### Coefficientes Codificados

Termo	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
	Coef	Coef			
Constante	2,171	0,204	10,62	0,000	
Diâmetro do Bico (mm)	-0,409	0,188	-2,17	0,038	1,00
Altura da Camada (mm)	0,611	0,188	3,25	0,003	1,00
Preenchimento (%)	-0,381	0,188	-2,03	0,052	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1,365	0,359	3,81	0,001	1,82
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	0,059	0,359	0,17	0,869	1,82
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	-0,004	0,359	-0,01	0,992	1,82
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	-0,762	0,210	-3,63	0,001	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	0,389	0,210	1,85	0,074	1,00
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	-0,511	0,210	-2,43	0,021	1,00

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,840953	69,86%	60,82%	35,63%

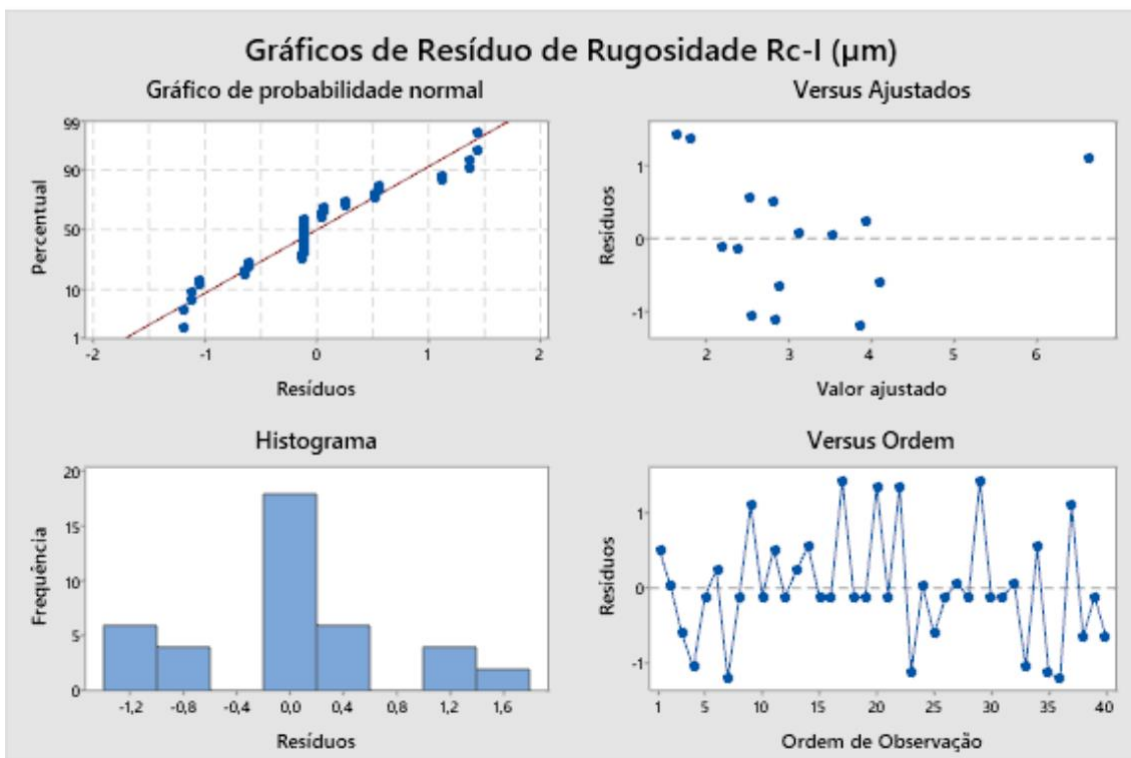
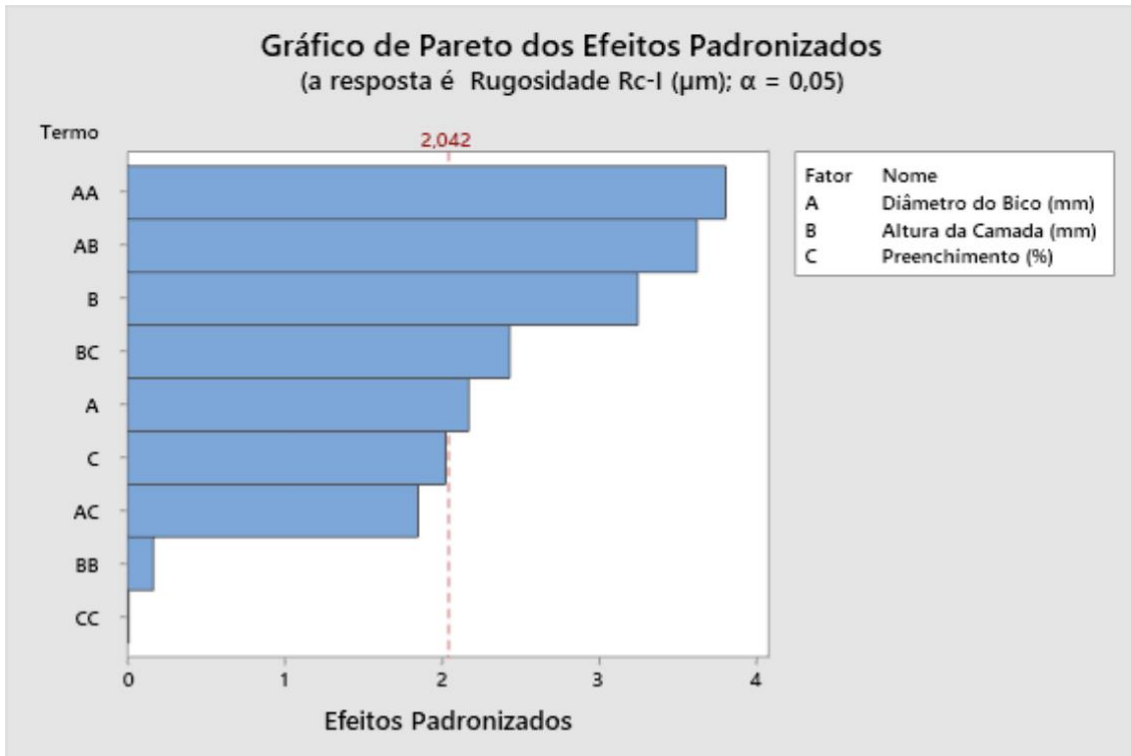
### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	49,1830	5,4648	7,73	0,000
Linear	3	13,7006	4,5669	6,46	0,002
Diâmetro do Bico (mm)	1	3,3407	3,3407	4,72	0,038
Altura da Camada (mm)	1	7,4566	7,4566	10,54	0,003
Preenchimento (%)	1	2,9032	2,9032	4,11	0,052
Quadrado	3	19,5797	6,5266	9,23	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1	10,2471	10,2471	14,49	0,001
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	1	0,0194	0,0194	0,03	0,869
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	1	0,0001	0,0001	0,00	0,992
Interação com 2 Fatores	3	15,9027	5,3009	7,50	0,001
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	1	9,2964	9,2964	13,15	0,001
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	1	2,4242	2,4242	3,43	0,074
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	1	4,1820	4,1820	5,91	0,021
Erro	30	21,2161	0,7072		
Falta de ajuste	5	21,2161	4,2432	*	*
Erro puro	25	0,0000	0,0000	*	*
Total	39	70,3990			

### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Rc-I } (\mu\text{m}) &= 5,95 - 28,83 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} + 23,14 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 &- 0,014 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 &\quad + 34,12 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 &\quad + 2,6 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 &\quad - 0,000009 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 &- 25,41 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 &\quad + 0,0973 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\
 &\quad - 0,1704 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}$$





WORKSHEET 3

## Regressão de Superfície de Resposta: Rugosidade Rc-C ( $\mu\text{m}$ ) versus Diâmetro do Bico (mm); Altura da Camada (mm); Preenchimento (%)

### Coefficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	1,4482	0,0938	15,44	0,000	
Diâmetro do Bico (mm)	-0,1974	0,0863	-2,29	0,029	1,00
Altura da Camada (mm)	-0,2392	0,0863	-2,77	0,009	1,00
Preenchimento (%)	0,0693	0,0863	0,80	0,428	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	0,196	0,165	1,19	0,243	1,82
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	0,312	0,165	1,90	0,068	1,82
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	-0,361	0,165	-2,19	0,036	1,82
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	-0,2676	0,0965	-2,77	0,009	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	-0,2259	0,0965	-2,34	0,026	1,00
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	0,1731	0,0965	1,79	0,083	1,00

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,385885	55,86%	42,62%	10,97%

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	5,6544	0,62827	4,22	0,001
Linear	3	2,0197	0,67324	4,52	0,010
Diâmetro do Bico (mm)	1	0,7793	0,77934	5,23	0,029
Altura da Camada (mm)	1	1,1443	1,14433	7,68	0,009
Preenchimento (%)	1	0,0960	0,09605	0,65	0,428
Quadrado	3	1,1928	0,39761	2,67	0,065
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1	0,2111	0,21109	1,42	0,243
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	1	0,5351	0,53508	3,59	0,068
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	1	0,7151	0,71514	4,80	0,036
Interação com 2 Fatores	3	2,4418	0,81395	5,47	0,004
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	1	1,1460	1,14597	7,70	0,009
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	1	0,8163	0,81631	5,48	0,026
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	1	0,4796	0,47956	3,22	0,083
Erro	30	4,4672	0,14891		
Falta de ajuste	5	4,4672	0,89344	*	*
Erro puro	25	0,0000	0,00000	*	*
Total	39	10,1216			

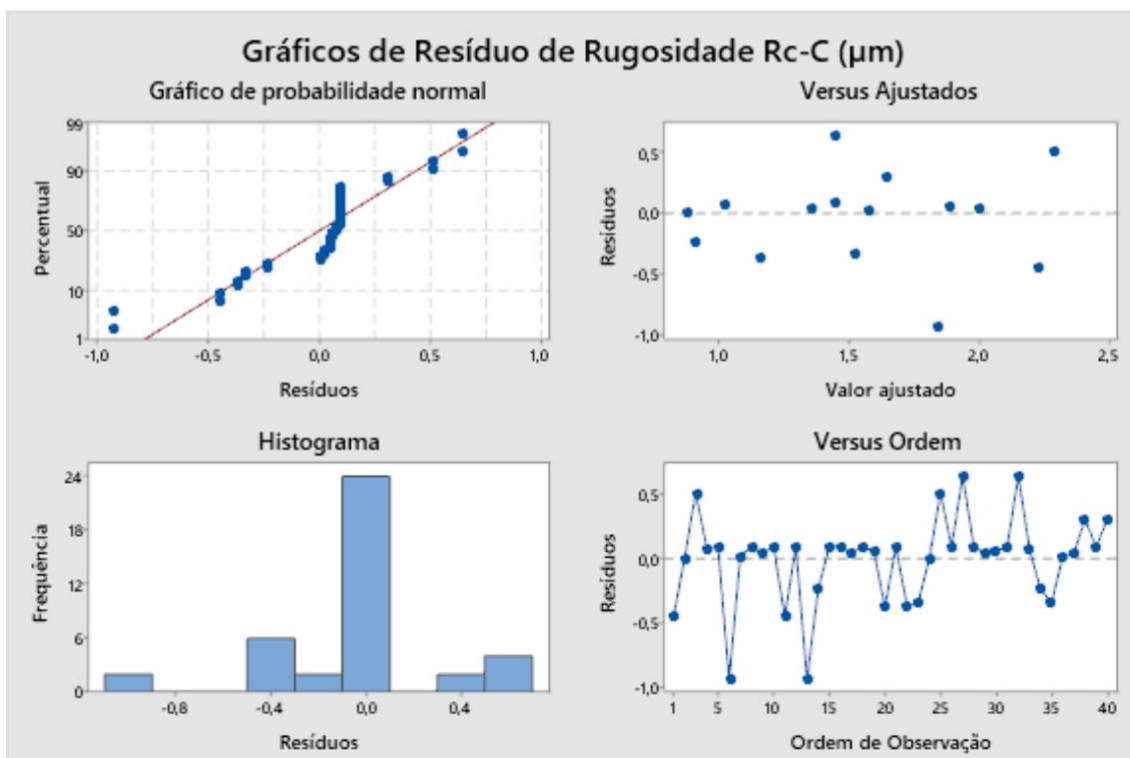
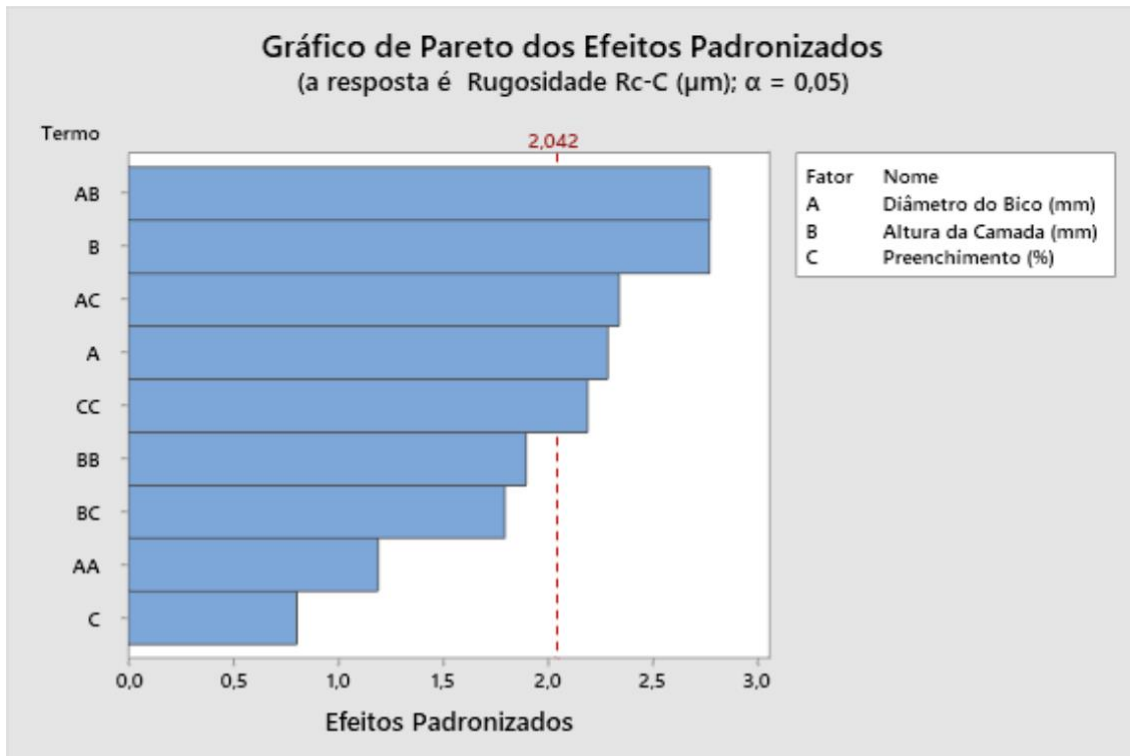
### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Rc-C } (\mu\text{m}) = & -0,94 + 0,71 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} - 8,42 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,1198 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 & + 4,90 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & + 13,86 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,000901 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 8,92 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} - 0,0565 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (\%)} \\
 & + 0,0577 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}$$

## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Rugosidade				
Obs.	Rc-C ( $\mu\text{m}$ )	Ajuste	Resíd	Resíd Pad
6	0,906	1,842	-0,936	-2,79 R
13	0,906	1,842	-0,936	-2,79 R

R Resíduo grande



WORKSHEET 3

## Regressão de Superfície de Resposta: Rugosidade Rc-M ( $\mu\text{m}$ ) versus Diâmetro do Bico (mm); Altura da Camada (mm); Preenchimento (%)

### Coefficientes Codificados

Termo	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
	Coef	Coef			
Constante	2,181	0,299	7,29	0,000	
Diâmetro do Bico (mm)	-0,841	0,275	-3,06	0,005	1,00
Altura da Camada (mm)	0,137	0,275	0,50	0,621	1,00
Preenchimento (%)	0,078	0,275	0,28	0,778	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1,807	0,524	3,45	0,002	1,82
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	-0,900	0,524	-1,72	0,097	1,82
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	-1,136	0,524	-2,17	0,038	1,82
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	-0,418	0,307	-1,36	0,184	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	-0,286	0,307	-0,93	0,359	1,00
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	0,134	0,307	0,44	0,665	1,00

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,22971	47,35%	31,56%	1,22%

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	40,7999	4,5333	3,00	0,011
Linear	3	14,6309	4,8770	3,23	0,036
Diâmetro do Bico (mm)	1	14,1322	14,1322	9,35	0,005
Altura da Camada (mm)	1	0,3765	0,3765	0,25	0,621
Preenchimento (%)	1	0,1223	0,1223	0,08	0,778
Quadrado	3	21,7740	7,2580	4,80	0,008
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1	17,9661	17,9661	11,88	0,002
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	1	4,4514	4,4514	2,94	0,097
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	1	7,0932	7,0932	4,69	0,038
Interação com 2 Fatores	3	4,3950	1,4650	0,97	0,420
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	1	2,7956	2,7956	1,85	0,184
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	1	1,3110	1,3110	0,87	0,359
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	1	0,2884	0,2884	0,19	0,665
Erro	30	45,3658	1,5122		
Falta de ajuste	5	45,3658	9,0732	*	*
Erro puro	25	0,0000	0,0000	*	*
Total	39	86,1657			

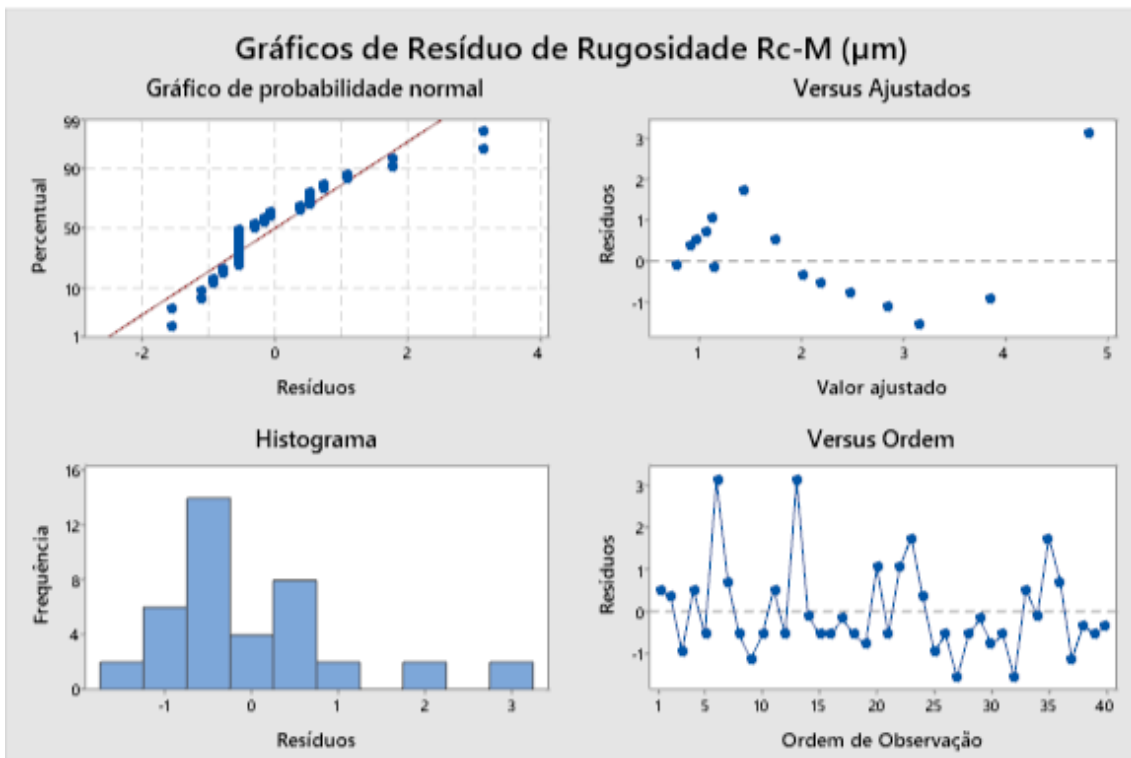
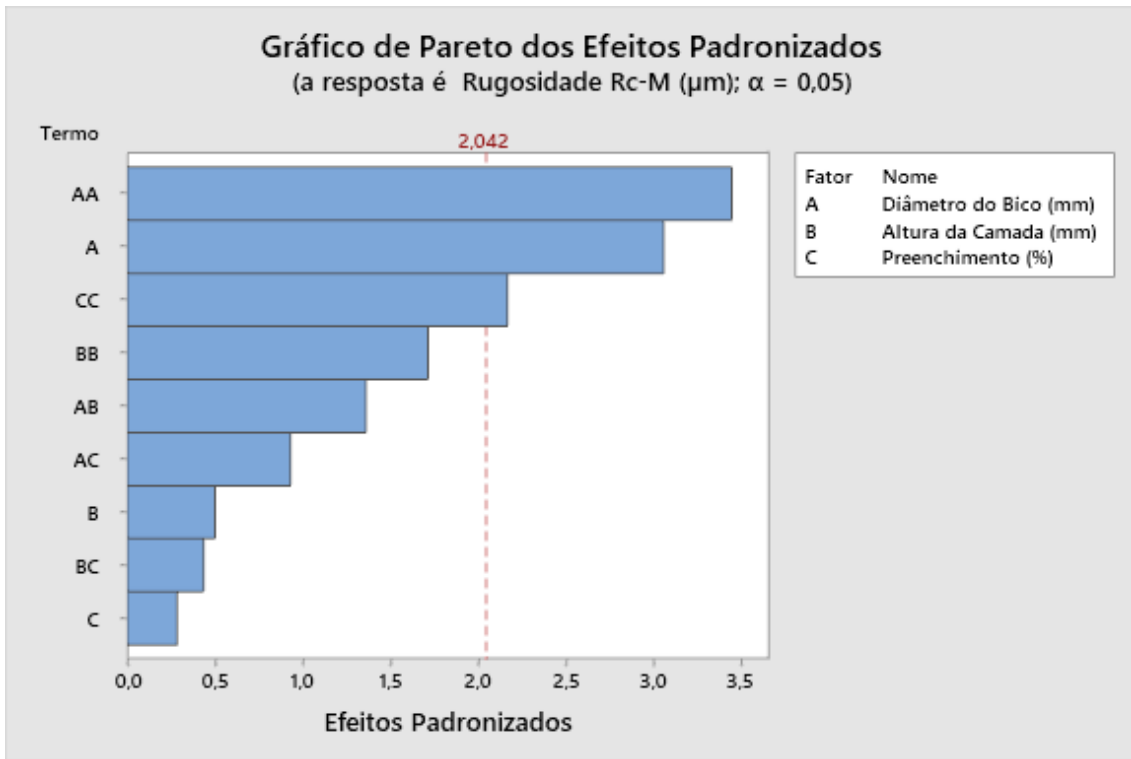
### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Rc-M } (\mu\text{m}) = & -4,53 - 32,6 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} + 23,8 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 & + 0,362 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 & + 45,2 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 & - 40,0 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 & - 0,00284 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 & - 13,9 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} - 0,0716 \text{ Diâmetro do Bico} \\
 & (\text{mm}) * \text{Preenchimento (\%)} \\
 & + 0,045 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}$$

### Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Rugosidade		Resid	
	Rc-M ( $\mu\text{m}$ )	Ajuste	ResidPad	
6	8,000	4,829	3,1712,97	R
13	8,000	4,829	3,1712,97	R

R Resíduo grande



WORKSHEET 3

## Regressão de Superfície de Resposta: Avaliação Qualitativa versus Diâmetro do Bico (mm); Altura da Camada (mm); Preenchimento (%)

### Coefficientes Codificados

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	2,8909	0,0805	35,91	0,000	
Diâmetro do Bico (mm)	-0,1000	0,0741	-1,35	0,187	1,00
Altura da Camada (mm)	-1,5000	0,0741	-20,25	0,000	1,00
Preenchimento (%)	-0,0000	0,0741	-0,00	1,000	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	-1,227	0,141	-8,69	0,000	1,82
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	0,773	0,141	5,47	0,000	1,82
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	0,273	0,141	1,93	0,063	1,82
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	0,5000	0,0828	6,04	0,000	1,00
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	0,0000	0,0828	0,00	1,000	1,00
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	-0,2500	0,0828	-3,02	0,005	1,00

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,331205	94,73%	93,14%	88,68%

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	59,1091	6,5677	59,87	0,000
Linear	3	45,2000	15,0667	137,35	0,000
Diâmetro do Bico (mm)	1	0,2000	0,2000	1,82	0,187
Altura da Camada (mm)	1	45,0000	45,0000	410,22	0,000
Preenchimento (%)	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Quadrado	3	8,9091	2,9697	27,07	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)	1	8,2841	8,2841	75,52	0,000
Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)	1	3,2841	3,2841	29,94	0,000
Preenchimento (%)*Preenchimento (%)	1	0,4091	0,4091	3,73	0,063
Interação com 2 Fatores	3	5,0000	1,6667	15,19	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)	1	4,0000	4,0000	36,46	0,000
Diâmetro do Bico (mm)*Preenchimento (%)	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Altura da Camada (mm)*Preenchimento (%)	1	1,0000	1,0000	9,12	0,005
Erro	30	3,2909	0,1097		
Falta de ajuste	5	3,2909	0,6582	*	*
Erro puro	25	0,0000	0,0000	*	*
Total	39	62,4000			

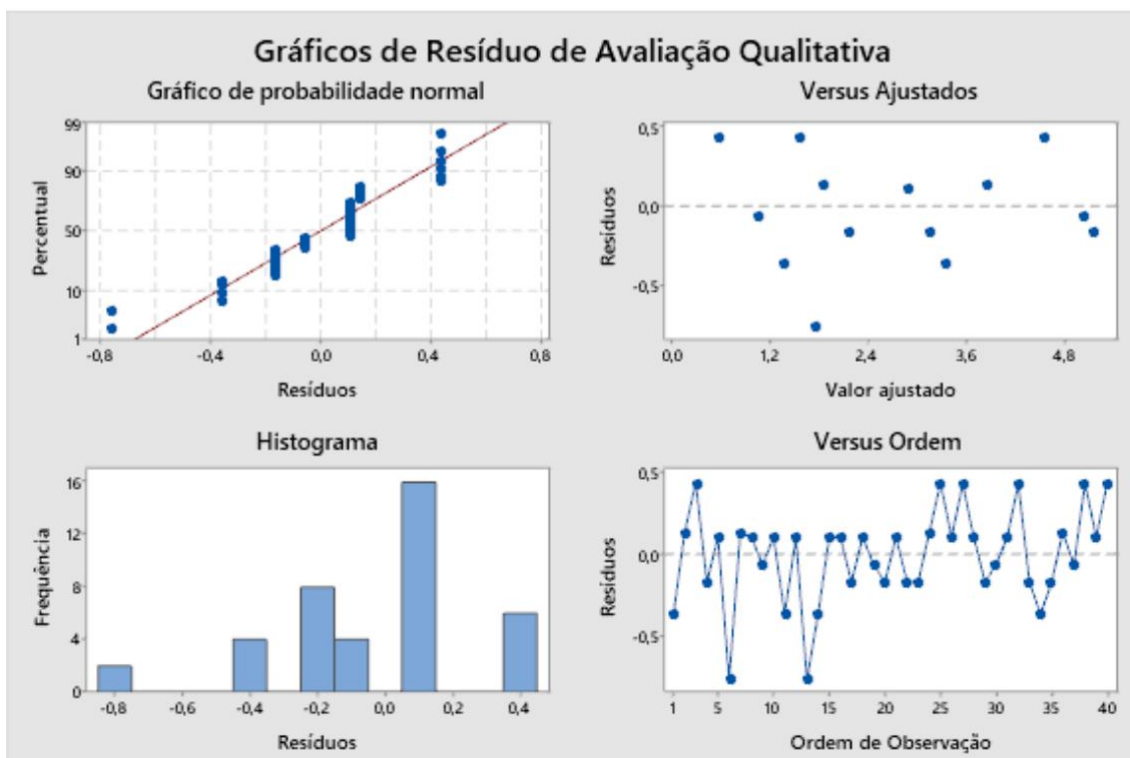
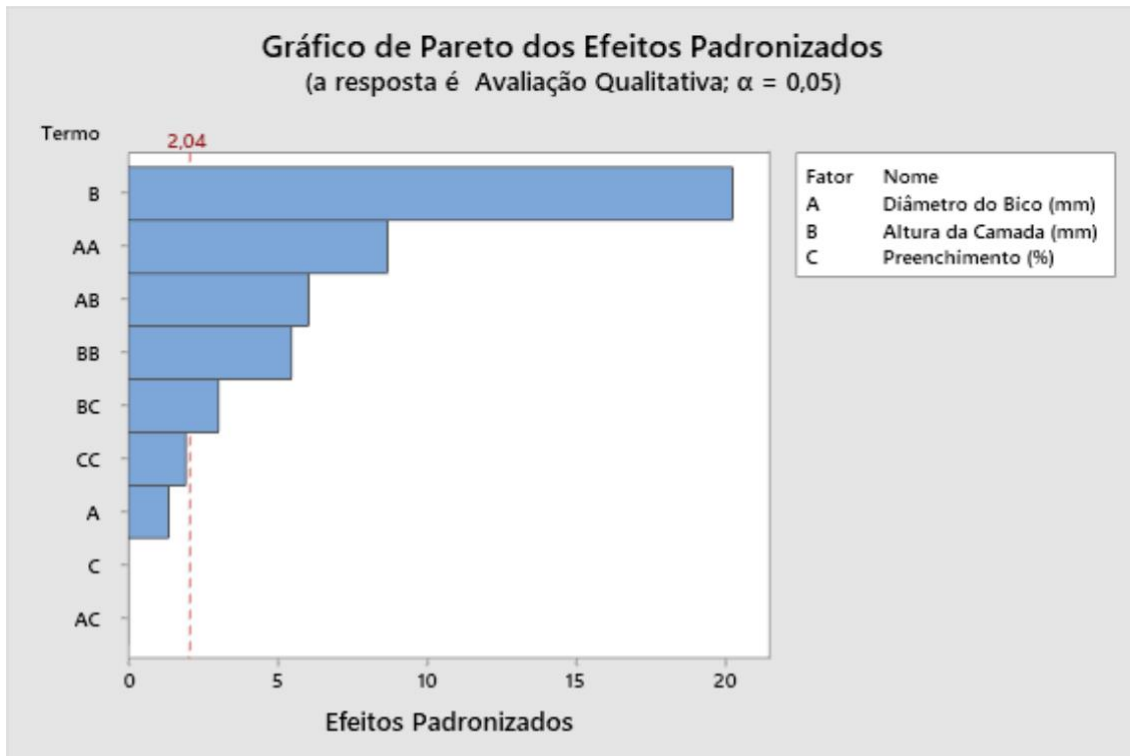
### Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Avaliação Qualitativa} &= 5,70 + 19,88 \text{ Diâmetro do Bico (mm)} - 28,84 \text{ Altura da Camada (mm)} \\
 &\quad - 0,0610 \text{ Preenchimento (\%)} \\
 &\quad - 30,68 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Diâmetro do Bico (mm)} \\
 &\quad + 34,34 \text{ Altura da Camada (mm)*Altura da Camada (mm)} \\
 &\quad + 0,000682 \text{ Preenchimento (\%)*Preenchimento (\%)} \\
 &+ 16,67 \text{ Diâmetro do Bico (mm)*Altura da Camada (mm)} + 0,0000 \text{ Diâmetro do Bico} \\
 &(\text{mm})*\text{Preenchimento (\%)} \\
 &\quad - 0,0833 \text{ Altura da Camada (mm)*Preenchimento (\%)}
 \end{aligned}$$

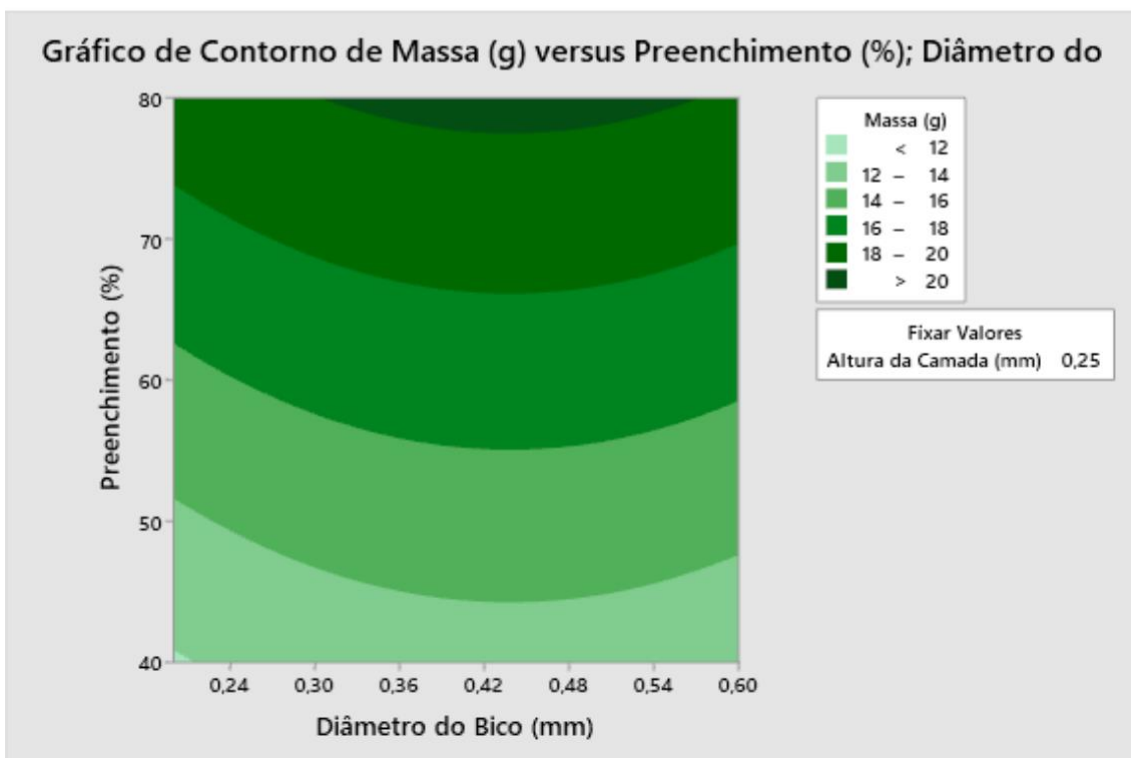
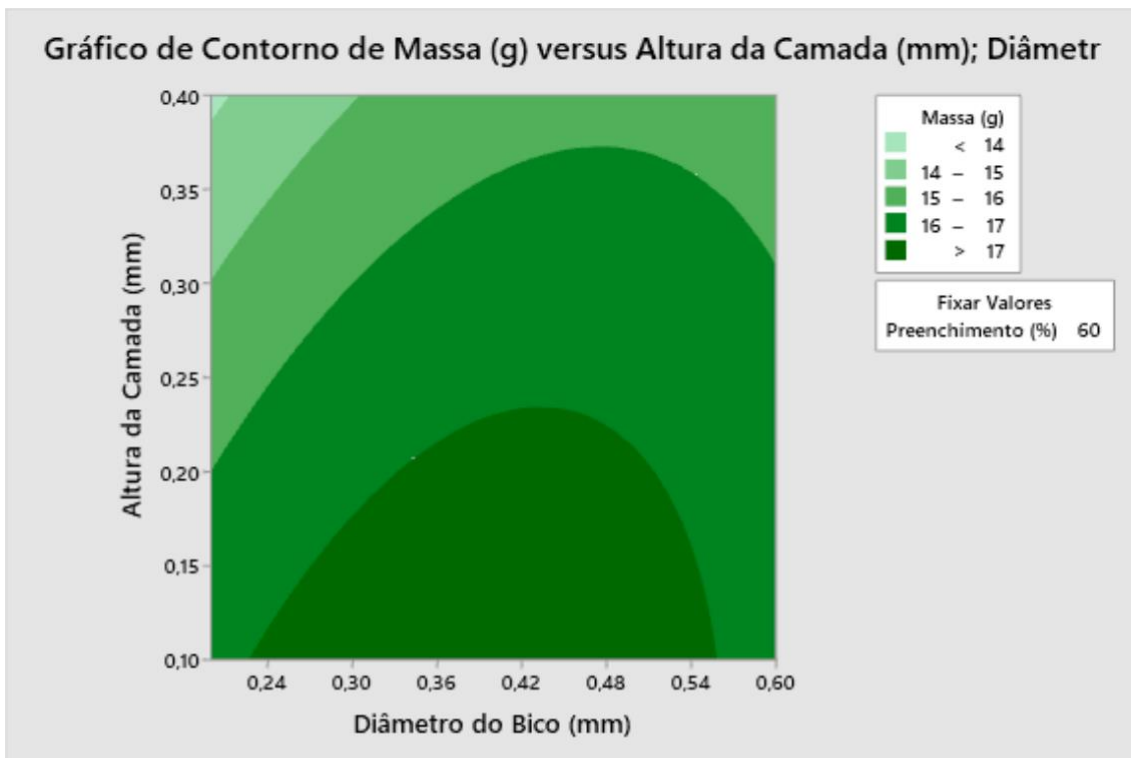
## Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Avaliação		
	Qualitativa	Ajuste	ResídResíd Pad
6	1,000	1,764	-0,764 -2,65 R
13	1,000	1,764	-0,764 -2,65 R

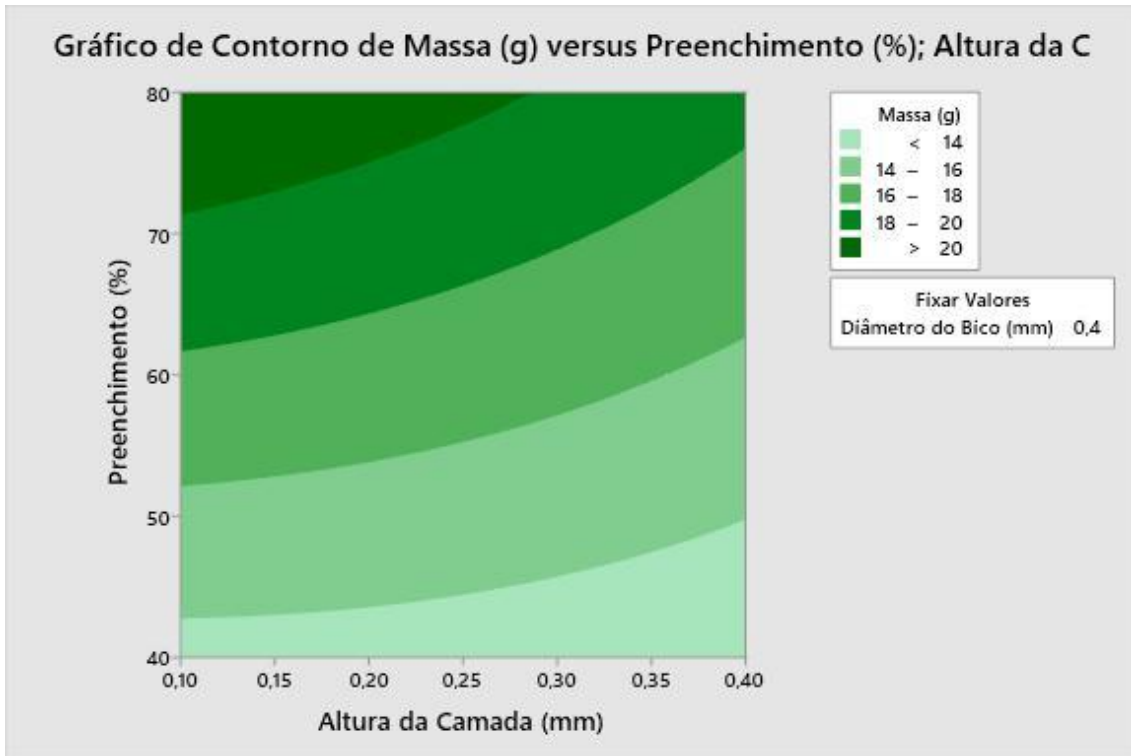
R Resíduo grande



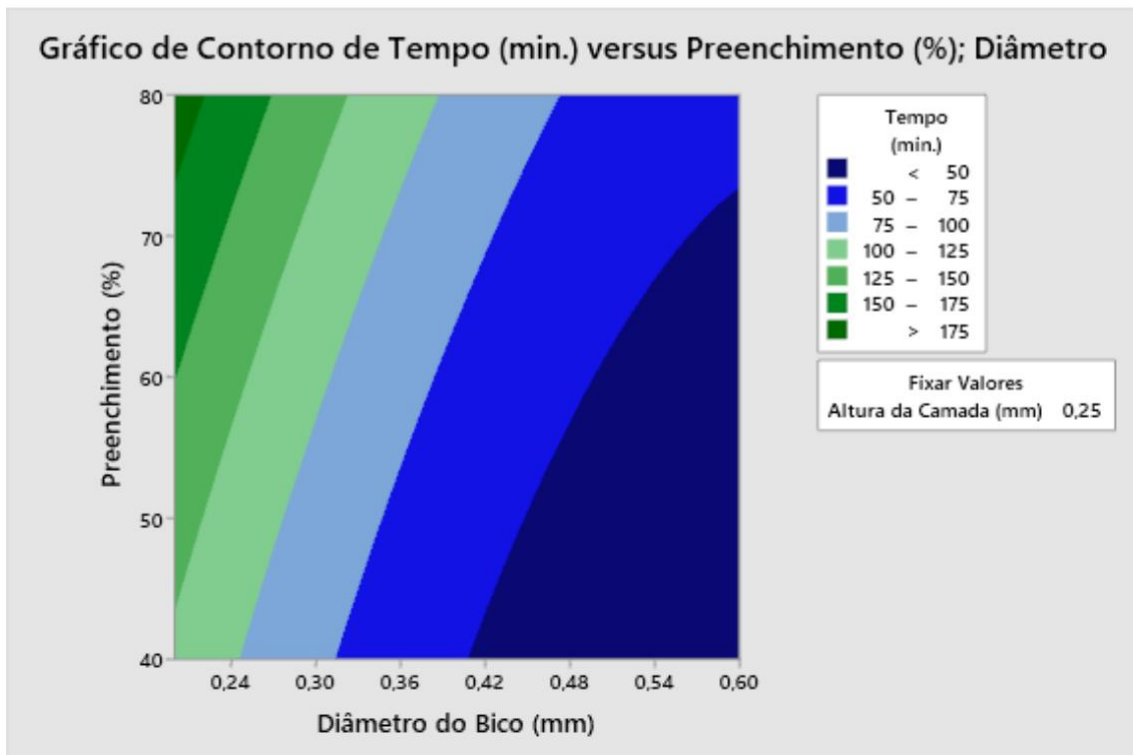
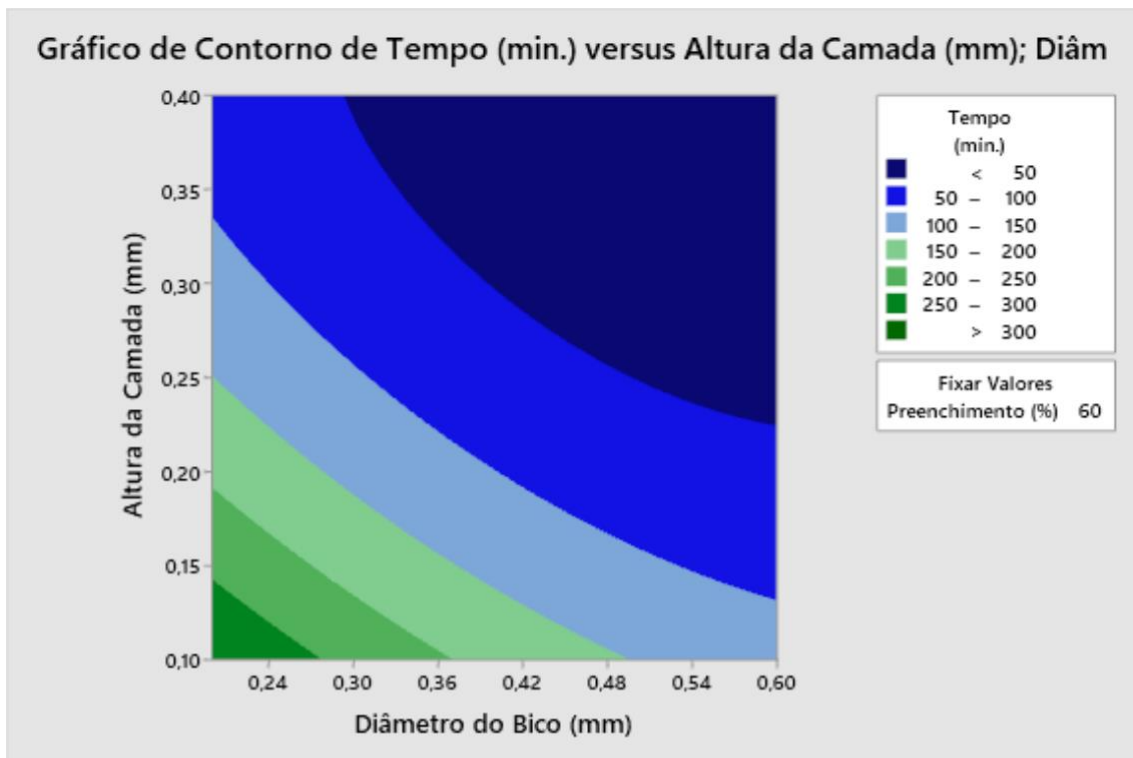
## WORKSHEET 3

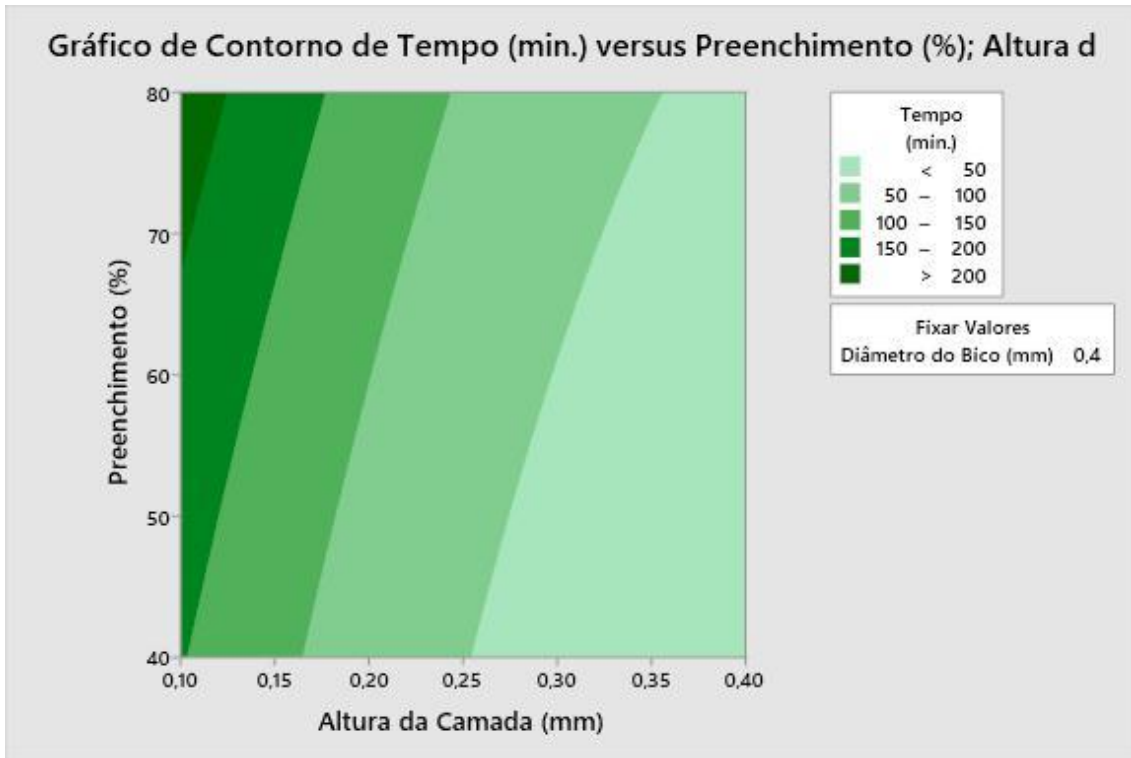
**Gráficos de Contorno de Massa (g)**





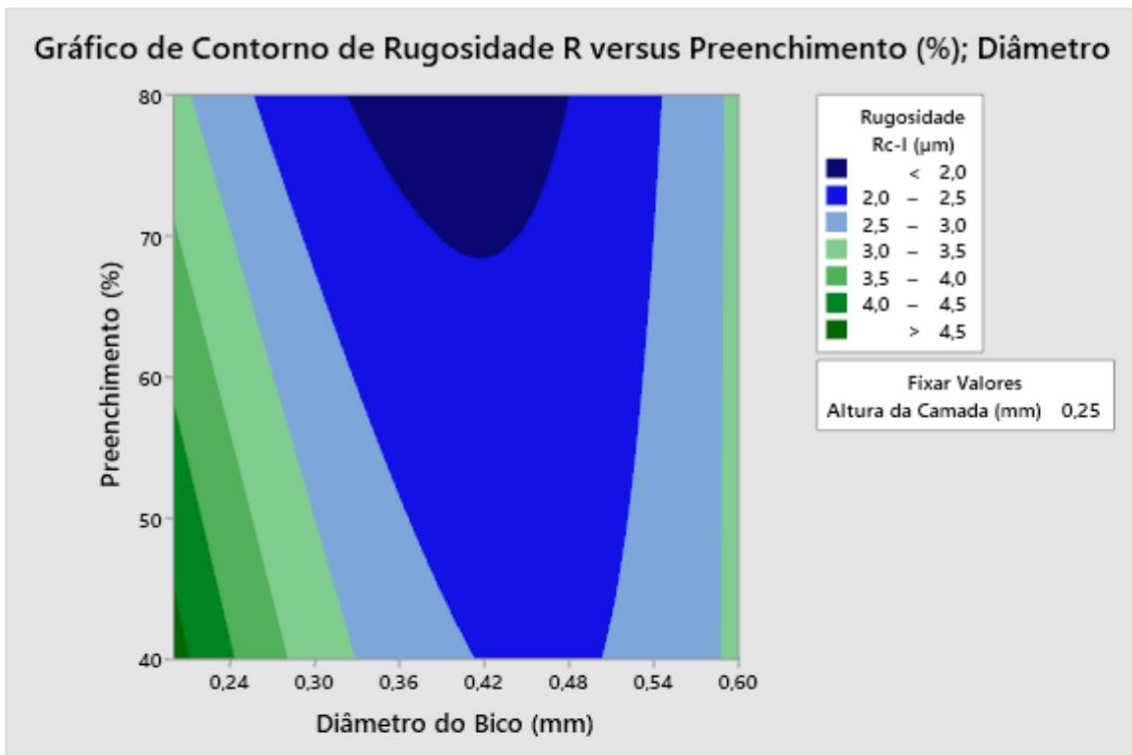
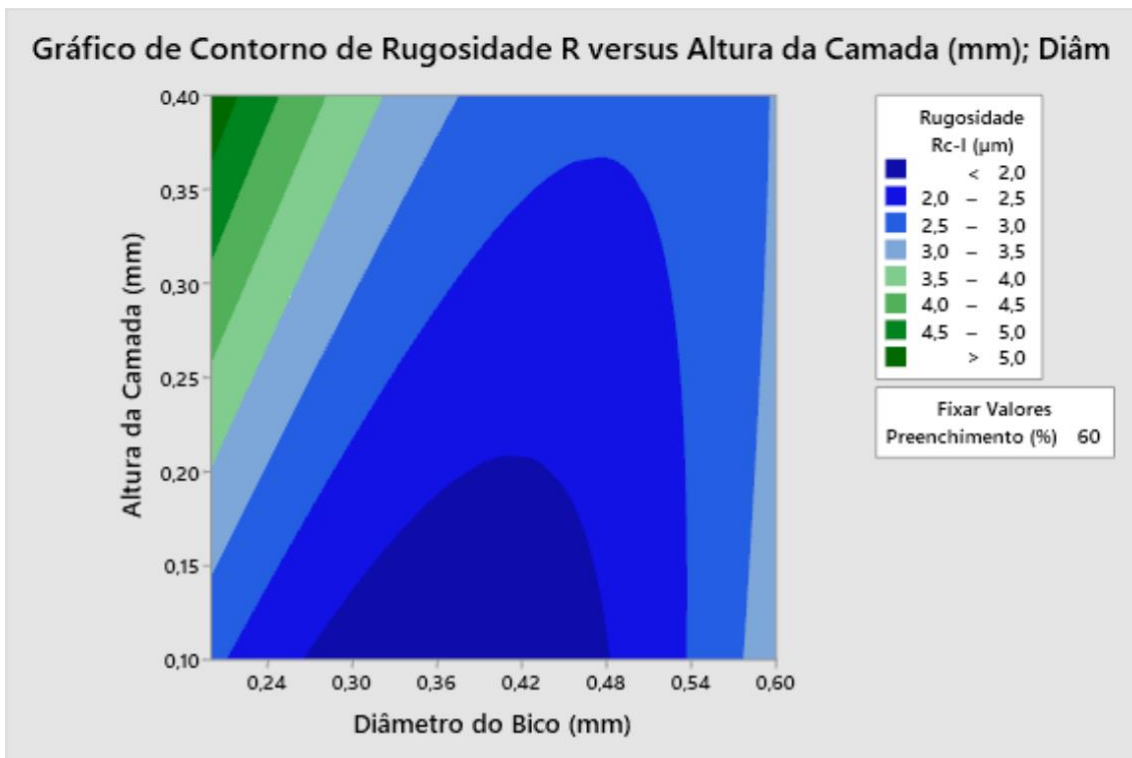
## WORKSHEET 3

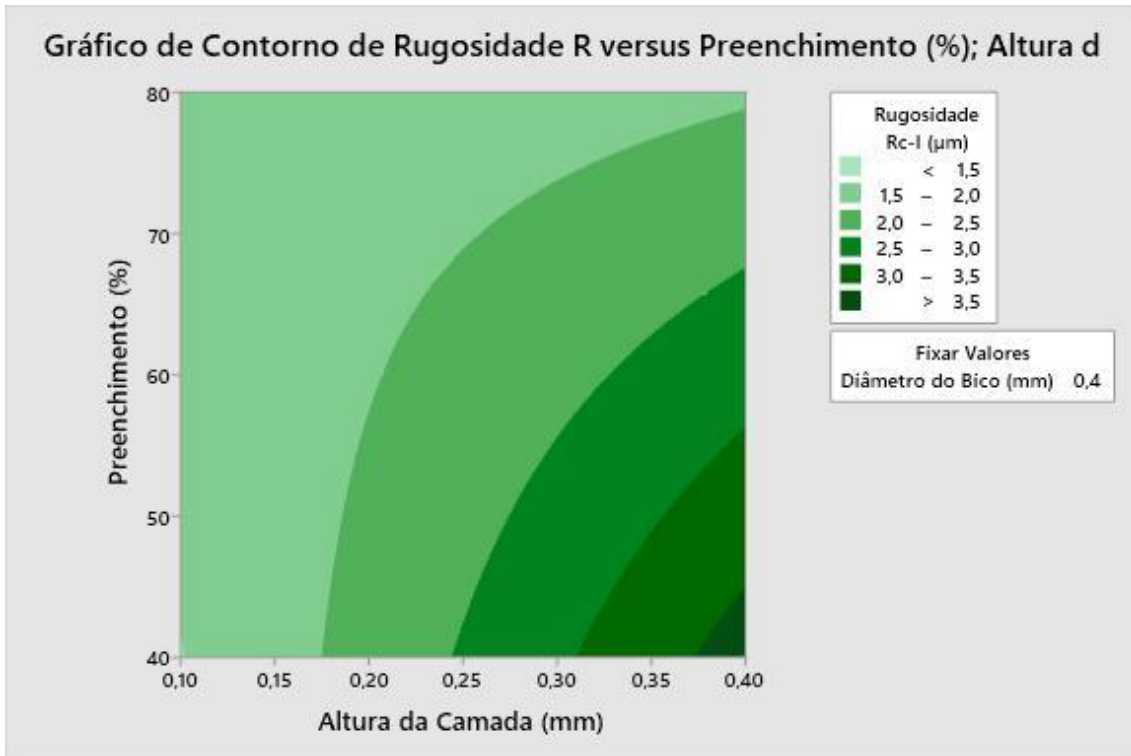
**Gráficos de Contorno de Tempo (min.)**



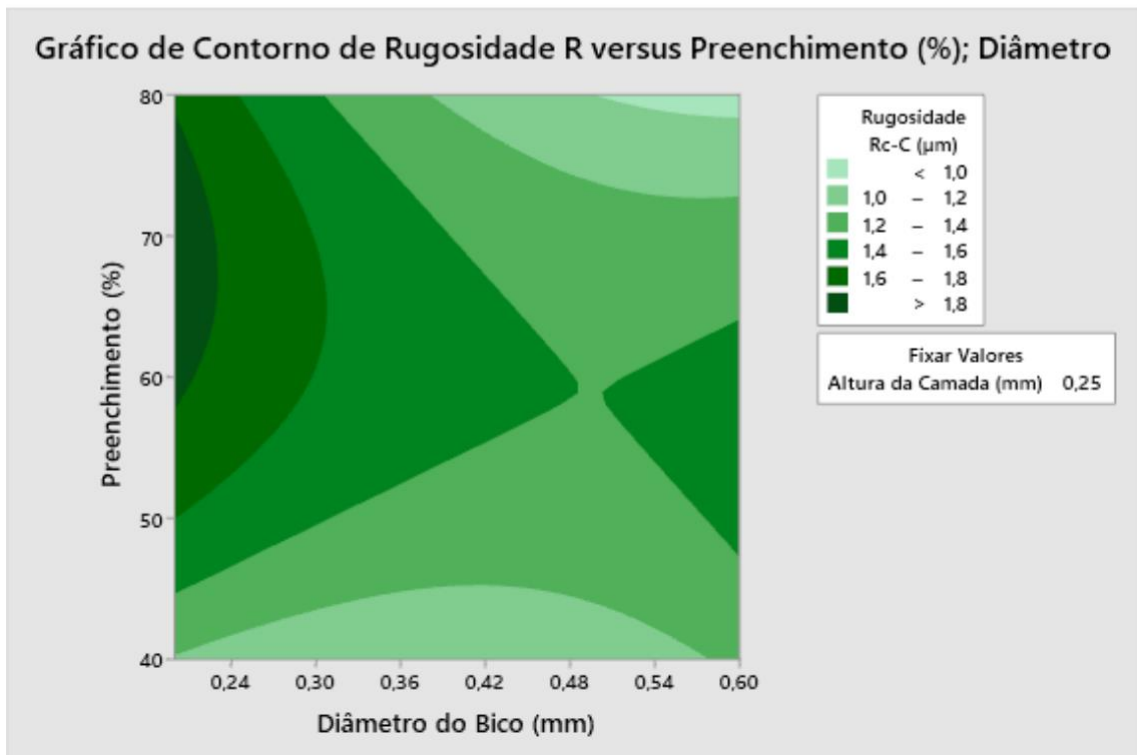
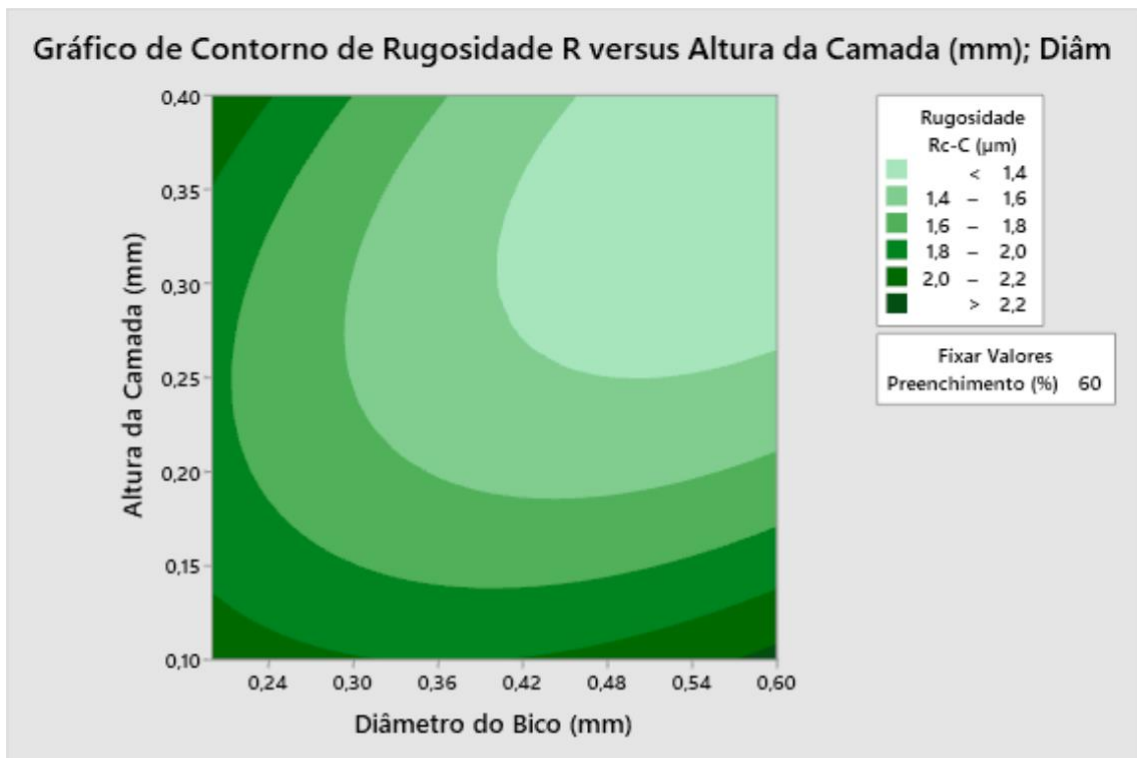
WORKSHEET 3

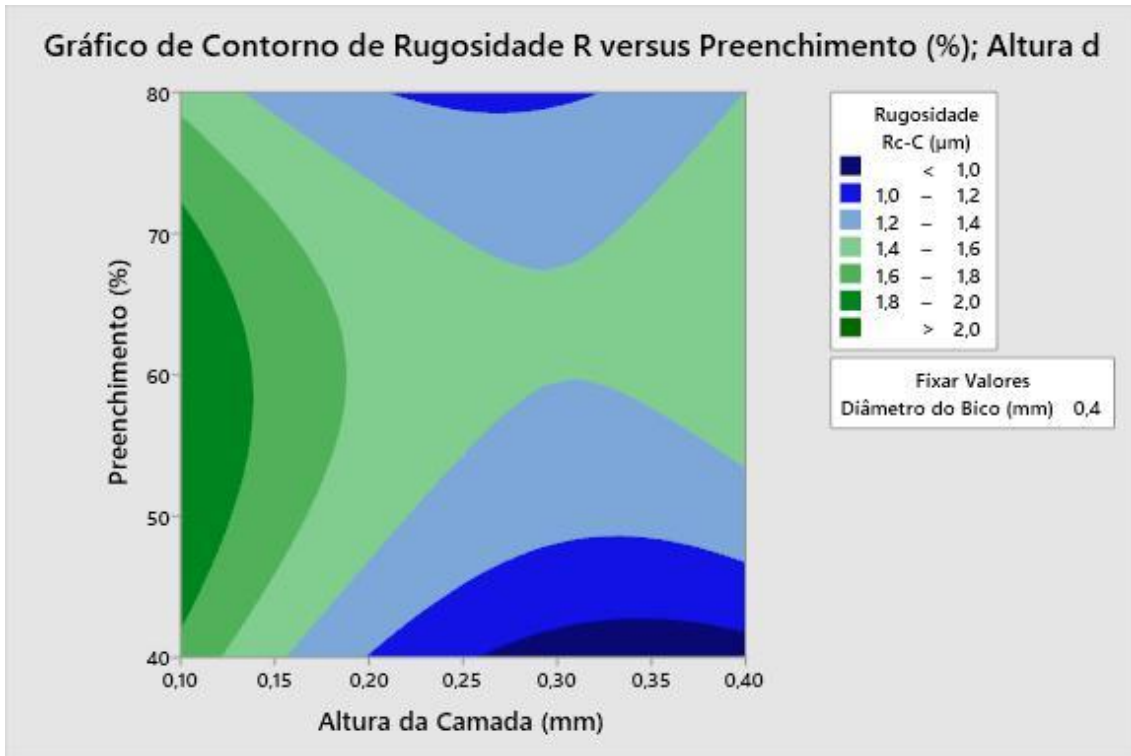
## Gráficos de Contorno de Rugosidade Rc-I ( $\mu\text{m}$ )





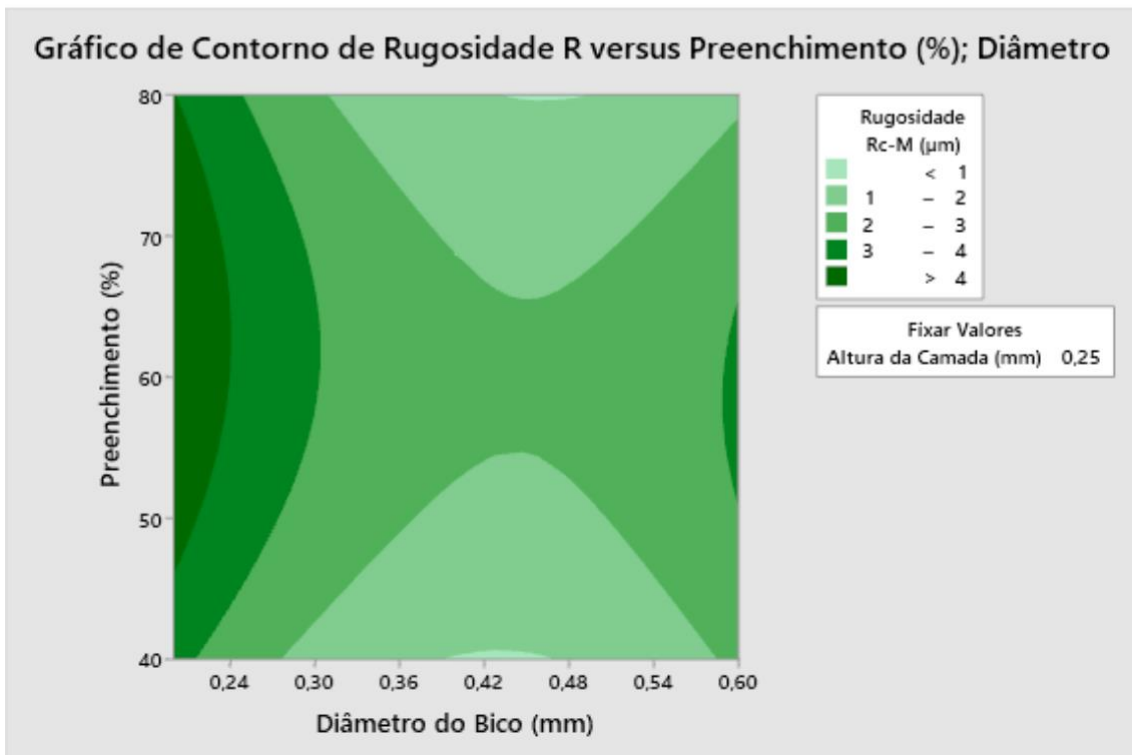
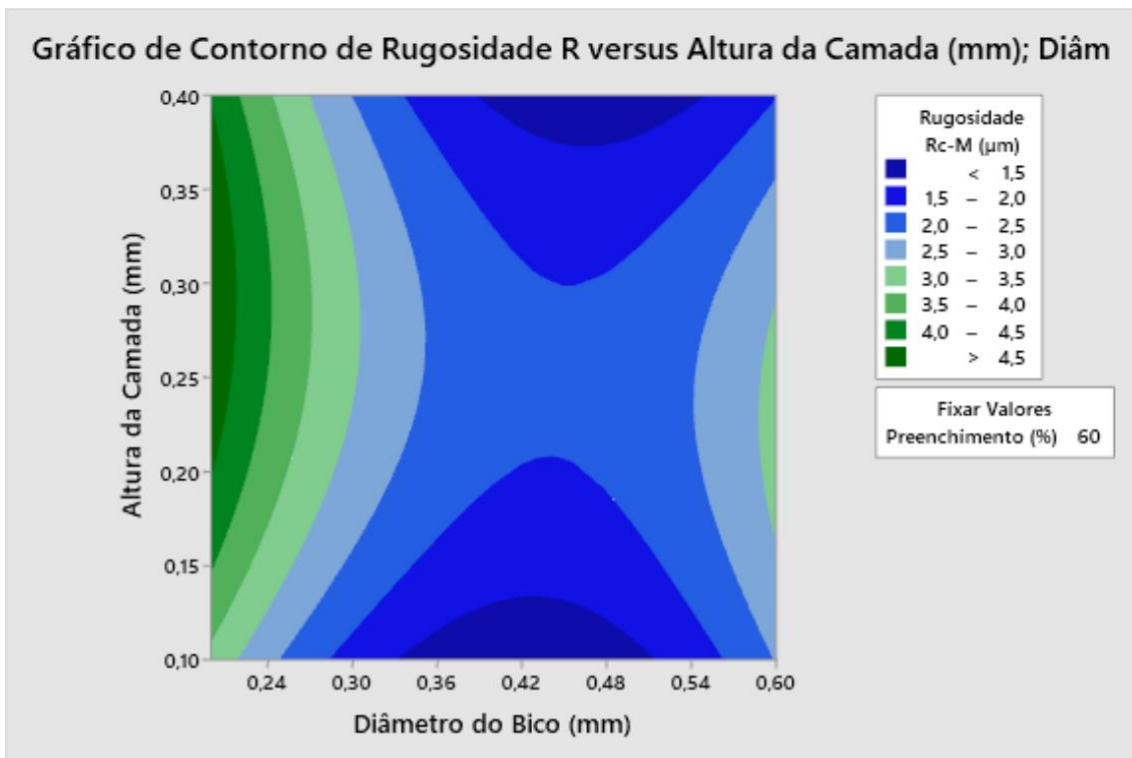
## Gráficos de Contorno de Rugosidade Rc-C ( $\mu\text{m}$ )



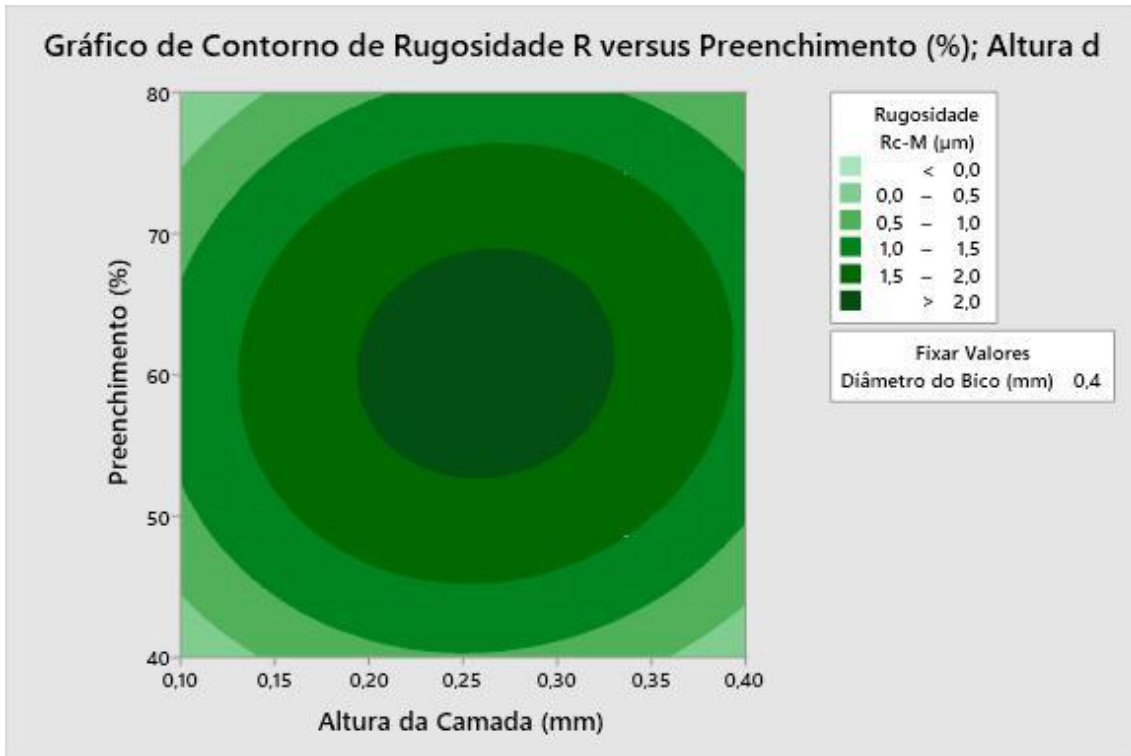


WORKSHEET 3

## Gráficos de Contorno de Rugosidade Rc-M ( $\mu\text{m}$ )







## Gráficos de Contorno de Avaliação Qualitativa

