

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Sarah Rabaioli

**ANÁLISE DA QUALIDADE DIMENSIONAL E GEOMETRICA DE  
UMA PEÇA FABRICADA UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA**

Santa Maria, RS  
2019

**Sarah Rabaioli**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DIMENSIONAL E GEOMETRICA DE UMA PEÇA  
FABRICADA UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA**

Projeto de pesquisa do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira de Produção**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Morgana Pizzolato

Santa Maria, RS

2019

## RESUMO

### ANÁLISE DA QUALIDADE DIMENSIONAL E GEOMETRICA DE UMA PEÇA FABRICADA UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA

AUTORA: Sarah Rabaioli  
ORIENTADORA: Morgana Pizzolato

Esse trabalho apresenta um estudo da qualidade dimensional e geométrica de uma impressora tridimensional. Por meio deste, estudou-se a combinação dos fatores que geram menor erro geométrico e dimensional para as seguintes variáveis de resposta: esfericidade, paralelismo, cilíndricidade interna e externa, planeza de duas faces, comprimento, largura, altura e raio. O método utilizado para a realização do estudo foi um planejamento experimental  $2^3$ , análises de dados pelo Minitab®, análise de regressão, solver e planilhas eletrônicas. Os resultados obtidos demonstraram ajustes ótimos próximos de zero distintos para cada uma das variáveis de resposta (VRs), houve também a possibilidade de unificar ajustes ótimos para algumas VRs. Há a necessidade, porém, de novos estudos que abordem diferentes níveis dos fatores para que o erro igual a zero seja viável. Concluiu-se que o ajuste dos fatores deverá ser feito conforme a geometria a qual se deseja imprimir com maior precisão, pois verificou-se a inviabilidade de atender de forma simultânea um único ajuste que abranja o mínimo de erro para todas as variáveis de resposta estudadas nessa pesquisa.

**Palavras-chave:** Impressão tridimensional; Planejamento Experimental; Variabilidade geométrica e dimensional; Qualidade de impressão.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF THE DIMENSIONAL AND GEOMETRIC QUALITY OF A MANUFACTURED PART USING ADDITIVE MANUFACTURING**

AUTHOR: Sarah Rabaioli

ADVISOR: Morgana Pizzolato

This project presents a study of dimensional and geometric quality of three-dimensional printer of Welding and Electron Microscopy Laboratory of Federal University of Santa Maria. Through this, a combination of factors that generate the least geometric and dimensional error for the following response variables (VRs) was studied: sphericity, parallelism, internal and external cylindricity, flatness of two sides, length, width, height and radius. The method used for the realization of this study was a  $2^3$  design of Experiment (DoE), data analysis by Minitab®, regression analysis, solver and spreadsheets. The results obtained showed optimal adjustments close to zero for each response variables (VRs), there was also the possibility of unifying optimal adjustments for some VRs. There is a need, however, for a new study that addresses different levels of factors so that the error equal to zero is feasible. It was concluded that the adjustment of the factors should be done according to the geometry to which it is desired to print with greater precision, because it was verified that it was impossible to simultaneously attend to a single adjustment that covers the minimum or error for all the variables of response studied in this research.

**KEYWORDS:** Three-dimensional printing; Design of Experiment; Geometric and dimensional variability; Printing quality.

## 1 INTRODUÇÃO

A alta concorrência entre empresas exige uma busca constante por melhorias nos processos produtivos. Essas alterações buscam reduzir o tempo de produção, aumentar a qualidade e competitividade dos produtos. Foi nesse cenário que, na década de 1980, um novo modo de fabricação baseado na adição de material foi lançado, designado manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) ou impressão 3D. Essa nova possibilidade de fabricação é considerada um marco da evolução da produção, acreditando-se ser está a terceira revolução industrial (VOLPATO, 2017).

Para Giordano, Zancul e Rodrigues (2016), a redução de etapas de processamento e economia de material são algumas das características que tornam as impressoras 3D um avanço na fabricação de peças, principalmente as mais complexas. Ao utilizar métodos comuns de produção é necessário o uso de diferentes máquinas, ferramentas, processos de usinagem e acabamento. Ao fazer uso da tecnologia de AM é possível concentrar todas essas etapas na impressora 3D (GIORDANO; ZANCUL; RODRIGUES, 2016).

Segundo a revista Forbes (2016), 56% dos fabricantes dos Estados Unidos adotaram a impressão 3D antecipadamente e preveem que mais da metade dos demais irão adotar essa tecnologia até 2020. Esses acreditam que a manufatura aditiva é uma vantagem competitiva e é vista como parte de uma estratégia mais ampla para atingir o cliente final, acelerando o desenvolvimento de novos produtos. A revista afirma ainda que até o final de 2019 serão gastos mais de 27 bilhões de dólares com impressoras 3D (FORBES, 2016).

Conforme Volpato (2017), uma das vantagens de escolher a manufatura aditiva é a possibilidade de fabricar peças com geometrias muito complexas, normalmente difíceis de serem fabricadas por outros processos de fabricação. Além disso, a impressão 3D gera pouco desperdício de material e a peça é fabricada em apenas um equipamento, não sendo necessárias as etapas intermediárias de *setup* das máquinas (VOLPATO, 2017). Segundo o autor, entretanto, a precisão e o acabamento superficial são inferiores quando comparados aos obtidos pelos processos convencionais e, além disso, a impressora 3D é lenta e de alto custo para fabricações em grande escala.

A Revista Pesquisa FAPESP citou, em fevereiro de 2019, as possíveis aplicações da manufatura aditiva: próteses médicas e dentárias personalizadas, peças automotivas e aeroespaciais complexas, moldes e bens de consumo customizados ou de baixo volume.

Volpato (2017) cita que cerca de 29% das aplicações da impressora 3D concentram-se na produção de peças funcionais, 23% na fabricação de modelos para molde-protótipo, modelos para fundição de metal e componentes para ferramental. Além disso, o autor menciona que vários setores podem ser beneficiados pela tecnologia de AM, estas já bem difundidas nas indústrias aeroespacial, automobilística, bioengenharia, produtos elétricos e eletrônicos. Os setores de joalheria, artes, engenharia civil e arquitetura também foram citados.

O objetivo geral do presente estudo concentra-se em analisar a variação dimensional e geométrica de peças fabricadas em uma impressora 3D. Já os objetivos específicos compreendem-se em: planejar e realizar o experimento; analisar estatisticamente os dados; encontrar a combinação ótima dos parâmetros da impressora estudada; contribuir com a otimização da qualidade das peças impressas pela impressora.

O principal tema abordado pela pesquisa é a qualidade de produtos, por meio do planejamento experimental do processo produtivo de uma impressora 3D. A importância do tema supracitado é atual e, devido a isso, complementar a literatura por meio de um estudo aprofundado da qualidade das peças impressas torna a pesquisa relevante. Sendo assim, fica clara a relevância prática de uma pesquisa relacionada a variabilidade do processo de fabricação em impressoras tridimensionais pois, apesar de ser importante, a variabilidade do processo pode restringir suas aplicações. Além disso, tem-se a relevância do estudo no que se refere a questão teórica, o qual contribuirá para o conhecimento do processo de fabricação com impressoras 3D.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente seção aborda assuntos importantes para o desenvolvimento da pesquisa aplicada. A manufatura aditiva é o primeiro item a ser abordado, seguido do item planejamento experimental e qualidade em impressões 3D.

### **2.1 MANUFATURA ADITIVA**

A ISO/ASTM 52900:2015 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015), norma que aborda os princípios gerais de manufatura aditiva, explicita que AM é o termo geral que, por meio de representações geométricas, cria objetos físicos pela adição sucessiva de material. Em um cenário no qual necessitava-se de um método de criação de protótipos de forma mais rápida, essa tecnologia ganhou visibilidade e força.

Segundo Volpato (2017), o princípio fundamental da manufatura aditiva, construção de camada por camada, não é novo, a aplicação deste conceito é bastante antiga, como na construção das pirâmides egípcias.

Apesar de parecer uma tecnologia recente, a primeira versão da impressora 3D foi criada a mais de 30 anos pelo engenheiro estadunidense Charles Hull em 1986 (PRINCE, 2014). O Engenheiro realizou experimentos, onde concluiu que resinas eram sensíveis à luz emitida pela fonte de raio *laser* de uma impressora comercial e, a partir dessa descoberta, patenteou o primeiro equipamento de manufatura aditiva. O foco inicial da primeira impressora 3D era produzir protótipos por meio da estereolitografia (VOLPATO, 2017).

Nos anos seguintes, segundo Prince (2014), a manufatura aditiva fez-se presente em diferentes setores, como na indústria automotiva, aviação, medicina, decorações, dentre outros. A ideia inicial de utilização da impressora 3D para produção de protótipos foi ultrapassada e este tipo de impressão é considerado uma tecnologia disruptiva e que promete mudar a maneira de consumir, criar e mudar até mesmo o modo de viver (PRINCE, 2014).

Segundo a ISO/ASTM 52900:2015 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015), existem sete diferentes classificações distintas para os processos de impressão: jateamento de aglutinante, deposição de energia direcionada, extrusão de material, jateamento de material, fusão de camada em pó, adição de lâminas e fotopolimerização em cuba.

Para Volpato (2017), o processo de fotopolimerização em cuba utiliza irradiação de uma fonte ultravioleta (UV) para causar reações químicas na resina polimérica em estado líquido e, a cuba ou bandeja, permite a solidificação do material, originando peças com excelente acabamento superficial. Segundo o autor, o processo por jateamento de material utiliza da forma líquida da matéria prima para formar a peça para, na sequência, ser solidificada em camadas por ações físicas ou químicas. Já o processo de jateamento de aglutinante, utiliza o jateamento de um fluido sobre um material em pó distribuído sob a plataforma da impressora (VOLPATO, 2017).

O processo por deposição de energia direcionada, segundo a ISO/ASTM 52900:2015 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2015), utiliza da energia térmica concentrada, ou seja, uma fonte de energia concentrada derrete o material e o funde enquanto é depositado. A tecnologia por adição de lâminas ocorre através da deposição de lâminas de material, até formar a peça desejada. Já o processo por fusão de camada em pó,

usa da energia térmica para fundir de forma seletiva regiões de um leito em pó (ISO/ASTM 52900:2015).

Por fim, a tecnologia de extrusão de material, segundo Volpato (2017), deposita filamentos por extrusão por meio de um bico calibrado. O autor detalha que, para se obter a forma desejada, o cabeçote extrusor é montado sob um sistema com movimentos no plano X-Y. Além disso, a plataforma de construção construída, local onde o sistema opera, se desloca na direção do eixo Z, movimentando-se para baixo numa distância equivalente a espessura da camada (VOLPATO, 2017). O processo se repete a cada camada até que a peça projetada seja finalizada.

Volpato (2017) cita que a tecnologia de extrusão de material possui alguns princípios de alimentação da impressora, entretanto, o princípio utilizado que mais se destaca comercialmente é o processo denominado FDM (*Fused Deposition Modeling*). Segundo o autor, este processo utiliza filamentos termoplásticos, extrudados por bicos de 10, 12 ou 16 milésimos de polegadas. Além disso, o que diferencia os equipamentos FDM dos demais é a plataforma de fabricação, sendo que esta é fechada em uma câmara de construção e mantida aquecida a uma temperatura inferior à do material extrudado, de forma que solidifique ao entrar em contato com a camada anterior, causando a sua adesão (VOLPATO, 2017).

## 2.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Realizar testes ou uma série de testes caracteriza planejar experimentos, onde são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um determinado processo, de modo a observar as mudanças na variável de saída (MONTGOMERY, 2017). O processo é caracterizado como uma combinação de máquinas, métodos e mão de obra que transforma um material de entrada (fatores) em um produto de saída (resposta) (MONTGOMERY, 2017).

Os fatores são classificados como controláveis ou não controláveis, onde o primeiro pode ser mudado durante o experimento com a finalidade de testar o efeito na variável de resposta, já o segundo, chamados também de fatores de ruído, não pode ser modificado, devido à motivos técnicos ou financeiros (TOLEDO et al., 2017). Além disso, os fatores podem apresentar diferentes níveis, chamados também de tratamentos, onde estes assumem diferentes valores (TOLEDO et al., 2017).

Os objetivos inclusos no desenvolvimento de um planejamento experimental podem ser, segundo Montgomery (2017): determinação de quais variáveis são mais influentes no produto

de saída; determinação dos valores a serem atribuídos aos fatores controláveis de modo que o produto de saída esteja perto da exigência nominal; determinação dos valores a serem atribuídos aos fatores controláveis de modo que a variabilidade do produto de saída seja mínimo; determinação dos valores a serem atribuídos aos fatores controláveis de modo que os efeitos das variáveis não controláveis sejam minimizados. Ainda segundo o autor, planejamento experimental pode ser utilizado tanto para o desenvolvimento de processos quanto na solução de problemas, para melhorá-lo ou torná-lo não sensível a fontes externas de variabilidade.

### **2.2.1 Roteiro para realização de projeto de experimentos**

Para garantir que o planejamento experimental ocorra da forma adequada, é importante seguir uma sequência de etapas. Montgomery (2017) sugere o seguinte roteiro:

- (i) Reconhecimento e relato do problema: Nesta etapa é importante obter um relato claro do problema e dos objetivos do experimento, a fim de compreender melhor o processo e chegar a uma possível solução do problema.
- (ii) Escolha dos fatores e níveis: É necessário conhecimento do processo para realizar esta etapa. A pessoa que conduz o experimento deverá escolher os fatores variáveis e os níveis específicos para cada rodada.
- (iii) Seleção da variável de resposta: Nesta etapa é preciso ter certeza de que a variável de resposta escolhida trará informações úteis sobre o processo em estudo. Este e o passo anterior podem ser realizados simultaneamente.
- (iv) Escolha do planejamento experimental: Para realizar a escolha do planejamento experimental se considera o tamanho da amostra, seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais, ou se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas.
- (v) Realização do experimento: Nesta etapa é indispensável monitorar o processo para garantir que tudo esteja acontecendo conforme o planejado.
- (vi) Análise dos dados: Métodos estatísticos são utilizados nesta etapa de modo que os resultados sejam objetivos e sem a influência de opiniões.
- (vii) Conclusões e recomendações: Deve-se obter conclusões práticas sobre os resultados encontrados na etapa anterior, além de realizar recomendações de ações. Acompanhamentos do processo e testes de confirmação devem ser realizados para validar as conclusões do experimento.

### 2.2.2 Experimentos Fatoriais

Montgomery, Runger e Hubele (2013) citam que experimentos fatoriais são utilizados com frequência em estudos com vários fatores em que é necessário entender os efeitos em conjunto destes sobre um produto de resposta. Além disso, este tipo de planejamento é utilizado largamente em trabalhos de pesquisa e fornecem uma base para outros planejamentos (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2013).

Para Montgomery (2017), um planejamento fatorial deve ser utilizado quando há variados fatores de interesse, onde estes variem juntos, e todas as combinações possíveis dos níveis são investigadas em cada replicação do experimento. Segundo o autor, um fator  $A$  com  $a$  níveis e um fator  $B$  com  $b$  níveis são replicados e, cada replicação, contém todas as  $ab$  combinações possíveis. O efeito de cada fator é determinado como a alteração na resposta produzida por uma mudança no nível do fator, denominado efeito principal (MONTGOMERY, 2017).

Toledo et al. (2017) abordam a condição de aleatorização de um planejamento experimental, onde determina-se, mediante sorteio, a ordem dos tratamentos com a finalidade de melhor avaliar a influência produzida na resposta por cada fator. Além disso, segundo Montgomery (2017), quando a diferença na resposta produzida entre os níveis de um fator não for a mesma entre os níveis dos outros fatores, tem-se uma interação entre fatores. Uma interação pode influenciar na real significância dos efeitos principais no resultado do experimento e, como solução, varia-se um fator por vez ao invés de variá-los simultaneamente (MONTGOMERY, 2017).

Montgomery, Runger e Hubele (2013) citam que o mais importante caso de experimentos fatoriais é o tipo  $k$  fatores, cada um com dois níveis, além de ser considerado o mais útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental. O tipo mais simples é o  $2^2$ , ou seja, dois níveis para cada um dos dois fatores (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2013).

O método utilizado para realizar a análise estatística de experimentos com dois fatores ( $2^k$ ) é denominado Análise de Variância (ANOVA).

Tabela 1 traz os dados típicos de um experimento fatorial com dois fatores, onde os fatores são  $A$  e  $B$ , os níveis dos fatores são  $a$  e  $b$ ,  $n$  é o número de repetições do experimento.

Tabela 1- Dados para um experimento de dois fatores

		Fator B			
		1	2	...	n
Fator A	1	Y <sub>111</sub> , Y <sub>112</sub> , ..., Y <sub>11n</sub>	Y <sub>121</sub> , Y <sub>122</sub> , ..., Y <sub>12n</sub>	...	Y <sub>1b1</sub> , Y <sub>1b2</sub> , ..., Y <sub>1bn</sub>
	2	Y <sub>211</sub> , Y <sub>212</sub> , ..., Y <sub>21n</sub>	Y <sub>221</sub> , Y <sub>222</sub> , ..., Y <sub>22n</sub>	...	Y <sub>2b1</sub> , Y <sub>2b2</sub> , ..., Y <sub>2bn</sub>
	:	:	:	:	:
	A	Y <sub>a11</sub> , Y <sub>a12</sub> , ..., Y <sub>a1n</sub>	Y <sub>a21</sub> , Y <sub>a22</sub> , ..., Y <sub>a2n</sub>	...	Y <sub>ab1</sub> , Y <sub>ab2</sub> , ..., Y <sub>abn</sub>

Fonte: Adaptação de Montgomery (2017)

\

Os modelos estatísticos para projetos fatoriais estão descritos na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta a ANOVA tipicamente utilizada para um modelo fatorial de dois fatores.

Tabela 2 - Modelos estatísticos

Equação		Variáveis
2 <sup>2</sup>	$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ <p>Para: i = 1, 2, ..., a; j = 1, 2, ..., b; k = 1, 2, ..., n.</p>	<p>Y<sub>ijk</sub> – valor da variável de resposta para cada tratamento;                      μ – média geral de todos os tratamentos;                      τ<sub>i</sub> – efeito do i-ésimo nível do fator A;                      β<sub>j</sub> – efeito do j-ésimo nível do fator B;                      (τβ)<sub>ij</sub> – efeito da interação entre os fatores A e B;                      ε<sub>ijk</sub> – erro aleatório associado a Y<sub>ijk</sub>;</p>
2 <sup>k</sup> para k ≥ 3	$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \dots + \varepsilon_{ijkl}$ <p>Para: i = 1, 2, ..., a; j = 1, 2, ..., b; k = 1, 2, ..., c; l = 1, 2, ..., n.</p>	<p>γ<sub>k</sub> – efeito do k-ésimo nível do fator C;                      (τγ)<sub>ik</sub> – efeito da interação entre os fatores A e C;                      (βγ)<sub>jk</sub> – efeito da interação entre os fatores B e C;                      (τβγ)<sub>ijk</sub> – efeito da interação entre os fatores A, B e C                      ε<sub>ijkl</sub> – erro aleatório associado a Y<sub>ijkl</sub>.</p>

Fonte: Adaptação de Montgomery (2017)

Tabela 3 – Tabela ANOVA para modelo fatorial de dois fatores

Fonte de variação	Soma de quadrados	GDL	Média quadrática	F <sub>0</sub>
A	$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{..}^2}{abn}$	a - 1	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$
B	$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{..}^2}{abn}$	b - 1	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$

Tabela 4 – Tabela ANOVA para modelo fatorial de dois fatores

(continuação)				
Fonte de variação	Soma de quadrados	GDL	Média quadrática	F <sub>0</sub>
Interação	$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{abn}$ $- SQ_A$ $- SQ_B$	$(a - 1)$ $(b - 1)$	$MQ_{AB}$ $= \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B$ $- SQ_{AB}$	$ab(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c (y_{ijk} - \frac{y_{...}}{abn})^2$	$abn - 1$		

Fonte: Adaptação de Montgomery (2017)

As somas quadradas, apresentadas na Tabela 3, é utilizada para conhecer a variabilidade total dos dados do experimento, já as médias quadráticas são usada para testar a ausência de efeito dos fatores de linha, dos fatores de coluna e interação através da divisão da média quadrática correspondente pela média quadrática do erro (MONTGOMERY, 2017). Cada uma dessas razões resultará em uma distribuição *F* que, se for maior do que o nível de significância apropriado, a hipótese é rejeitada ou, se for menor, a hipótese é aceita (MONTGOMERY, 2017).

Por fim, para realizar a análise dos resíduos de um planejamento experimental, faz-se a diferença entre as observações e as médias das celas correspondentes. A análise dos resíduos é importante para garantir a adequação do modelo, segundo Montgomery (2017).

### 2.2.3 Planejamento Fatorial 2<sup>k</sup>

Planejamento fatorial 2<sup>k</sup>, para Toledo (2017), é muito utilizado e útil para melhorias de processos. Este tipo de planejamento possui análise bastante simplificada e forma uma base para diversos planejamentos (MONTGOMERY, 2017).

O tipo mais simples de planejamento 2<sup>k</sup> é o 2<sup>2</sup>, onde há dois fatores (A e B) e, para cada fator, dois níveis, esses níveis são considerados, de forma geral, como níveis “baixos” ou “-“ e “altos” ou “+” do fator (MONTGOMERY, 2017). Além disso, segundo o autor, o planejamento 2<sup>2</sup> pode ser representado geometricamente por um quadrado, denomina matriz de teste ou matriz de planejamento, onde cada vértice é uma rodada do experimento. Os efeitos analisados neste

tipo de planejamento são os principais (A e B) e a interação entre eles (AB) (MONTGOMERY, 2017).

Outro tipo de planejamento é o  $2^k$  com  $k \geq 3$ , onde há mais de dois fatores e cada fator possui dois níveis, onde estes níveis seguem a mesma lógica de “alto” e “baixo” do planejamento  $2^2$  (TOLEDO et al., 2017). Para o autor, geometricamente, um planejamento  $2^3$  pode ser representado por um cubo, também denominado matriz de teste ou matriz de planejamento, onde cada vértice corresponde a uma rodada do experimento. Neste, três efeitos principais são verificados (A, B e C), além do efeito da interação entre eles (AB, AC, BC e ABC) (TOLEDO et al., 2017).

#### **2.2.4 Aplicações de planejamento experimental em manufatura aditiva**

Jahan e El-Mounayri (2018) propuseram uma metodologia para gerar configurações de *design* otimizadas de canais de resfriamento conformados, através da manufatura aditiva, em moldes de injeção. A finalidade do estudo foi encontrar o melhor desempenho com relação a resfriamento rápido e uniforme, estabilidade estrutural, tempo de ciclo reduzido e melhor qualidade da peça. A técnica de projeto de experimentos foi usada para estudar o efeito dos parâmetros críticos, bem como as geometrias de seção transversal dos canais. O estudo dos autores foi guiado pela metodologia de projeto de experimentos, onde o objetivo era a otimização termomecânica, para isso três valores diferentes da espessura das peças plásticas foram considerados. Uma série de experimentos foram realizados durante o estudo, os resultados mostraram que, para diferentes projetos de peças de plástico, diferentes configurações de canais fornecem soluções ótimas em termos de dimensões da seção transversal, tamanho da seção e distância do passo.

Palumbo et al. (2017) realizaram um estudo para avaliar o efeito de diferentes estratégias de exposição a laser nas propriedades físicas e mecânicas de peças AlSi10Mg produzidas por uma impressora tridimensional que funciona pelo princípio de Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS). Utilizaram de projetos de experimentos para guiar o estudo, ANOVA para avaliar os efeitos dos fatores controláveis e *Nested Effects Modeling* (NEM) como plano experimental. Os resultados encontrados pelos autores indicaram a possibilidade de ajuste dos parâmetros de exposição a laser, com a condição de que a densidade de energia seja adequadamente fornecida ao material. Além disso, foram encontrados dois ajustes ótimos, um bom desempenho do material e taxas de construção mais altas.

## 2.3 QUALIDADE E IMPRESSÃO 3D

Toledo et al. (2017) citam que existe pouco entendimento sobre o que é qualidade, apesar da palavra-chave ser uma das mais difundidas na sociedade e nas empresas. Garvin (2002) cita cinco principais abordagens relacionadas a qualidade: transcendente – trata da excelência inata e universalmente reconhecida, a qual independe das mudanças de gosto e estilo; baseada no produto – qualidade é mensurável e precisa, oriunda de atributos do produto; baseada no usuário – maior qualidade atende melhor os desejos e necessidades do consumidor; baseada na produção – qualidade é mensurável e precisa, oriunda do grau de conformidade do planejado com o executado; baseada no valor – qualidade é um produto com bom desempenho e conforme a um preço e custo aceitável.

Aplicado ao processo de impressão 3D, pode-se entender que a abordagem citada acima que mais se adequa ao resultado da qualidade entregue pelas impressoras 3D é a baseada no produto. Além disso, para Montgomery (2016) a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, ou seja, quanto menor a variabilidade geométrica e dimensional, melhor a qualidade da peça.

## 3 MÉTODOS

Nesta sessão é apresentado, primeiramente, o cenário e contexto onde a pesquisa foi aplicada. Na sequência, faz-se a identificação das etapas que foram seguidas para a execução do trabalho.

### 3.1 CENÁRIO

O presente trabalho foi aplicado no Laboratório de Soldagem e Microscopia Eletrônica, o qual faz parte do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria – RS. O laboratório é utilizado para pesquisa e desenvolvimento nas áreas de soldagem, fundição e tratamentos térmicos. Além de possuir diversos equipamentos, recentemente o local adquiriu dois modelos de impressora 3D, que também são disponibilizadas para pesquisa.

O foco deste trabalho foi analisar um dos modelos de impressora do laboratório. Esse equipamento, da marca Cliever (modelo CL<sub>2</sub> Pro Plus), funciona pelo princípio de *Fused*

*Deposition Modeling* (FDM). Esse modelo de impressora imprime peças de, no máximo, 230 mm de largura, 300 mm de comprimento e 450 mm de altura. O bico extrusor é de 0,40mm de diâmetro e o insumo utilizado pela impressora é o poliácido lático ou ácido polilático, mais conhecido como filamento PLA, o qual consiste em um fio com diâmetro de 1,75 mm e de cores variadas.

Para sua regulagem, a impressora possui onze parâmetros que podem ser ajustados: preenchimento interno, espessura das paredes, altura entre camadas, ângulo de ativação do suporte, velocidade de impressão, espessura de base, espessura de topo, temperatura do extrusor, temperatura da mesa para a camada inicial, temperatura da mesa para as demais camadas e posição de impressão na plataforma.

O preenchimento interno define a quão densa será a peça, este preenchimento é feito com formas hexagonais, onde o perímetro diminui à medida que aumenta a porcentagem deste parâmetro. As cinco variações são: 0%, 5%, 10%, 25 e 50%, onde a primeira é a opção menos densa e a última é a mais densa. A espessura das paredes é definida pelo número de perímetros da borda que serão impressos, quanto maior o número de perímetros, mais vezes o bico extrusor irá depositar uma camada ao lado da outra. As quatro variações são: 1 perímetro, 2 perímetros, 3 perímetros e 4 perímetros.

Já a altura entre camadas é definida pela quantidade de camadas verticais depositadas uma sobre a outra. As quatro variações são: 0,10mm, 0,15mm, 0,19mm e 0,25mm. O suporte para sustentação do material depositado só é necessário para peças que possuem um ângulo menor de 45° em relação a mesa de impressão. A escolha do ângulo de ativação do suporte tem sete variações: sem suporte, 5°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°. A velocidade de impressão é o quão veloz o bico extrusor anda sob a plataforma de impressão enquanto imprime a peça, sendo que a velocidade varia entre 10% a 100%.

A espessura da base define o número de camadas impressas na base da peça com 100% de preenchimento, podendo variar de 0 até 10 camadas. A espessura do topo, da mesma forma que o parâmetro anterior, define o número de camadas impressas com 100% de preenchimento na parte superior da peça, podendo variar de 0 até 10 camadas. A temperatura do bico extrusor pode variar de 0 a 250°C, já a temperatura da mesa para camada inicial e temperatura da mesa para as demais camadas pode variar de 0 a 130°C. Por fim, a posição de impressão da peça pode ser frontal, lateral esquerda ou direita, superior, traseira ou inferior.

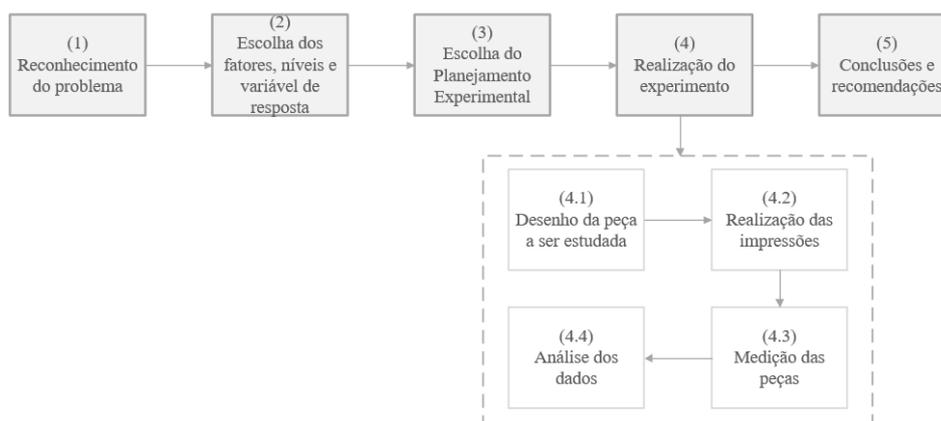
### 3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para Pereira (2016) o nível macro de uma pesquisa pode ser classificado como método quantitativo ou qualitativo. A presente pesquisa se classifica como quantitativa, já que utilizará métodos estatísticos para a análise dos dados, além disso, o trabalho empregará mensurações numéricas como forma de coleta dos dados. A pesquisa se classifica, quanto à natureza, como aplicada, pois será uma aplicação prática e dirigida a soluções de problemas específicos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Quanto aos objetivos, o trabalho se enquadra como exploratório, pois, segundo Gil (2010), este método oferece maior intimidade com o problema a fim de tornar possível a construção de hipóteses. Por fim, os procedimentos técnicos da pesquisa são classificados como experimentais, onde serão selecionadas e analisadas as variáveis que influenciam a impressão 3D e os efeitos destas na peça.

As etapas de pesquisa seguiram uma adaptação do roteiro para realização do experimento desenvolvido por Montgomery (2016), o qual foi detalhado na seção 2.2.1. Ao analisar as etapas, percebeu-se que algumas poderiam ser realizadas em conjunto, pois a realização de uma etapa não afetaria a outra, sendo assim, chegou-se nas 5 etapas apresentadas na Figura 1.

Figura 1: Etapas da pesquisa



Fonte: Autora (2019)

## 4 RESULTADOS

Os resultados são apresentados de acordo com as etapas da metodologia.

Na etapa 1 definiu-se o problema: variação dimensional e geométrica das peças produzidas em impressoras 3D. O relato do problema consistiu em não existir um conhecimento sobre a combinação ótima dos parâmetros da impressora, onde fosse possível imprimir as peças tanto com qualidade dimensional quanto geométrica.

Na segunda etapa definiu-se quais fatores foram mantidos constantes, essa decisão foi feita em conjunto com o técnico que opera a impressora. Definiu-se o ângulo de ativação do suporte como constante, pois a geometria da peça estudada, demonstrada no Apêndice C, não necessitou do suporte devido o ângulo entre a superfície de impressão e a peça ser igual a 90°. Os demais fatores mantidos constantes foram: matéria prima de impressão (filamento PLA), espessura da matéria prima (1,75 mm), diâmetro de 0,30mm do bico, 3 espessuras de base, 4 espessura de topo, temperatura do extrusor (185°C), temperatura da mesa para a camada inicial (50°C) e temperatura da mesa para as demais camadas (60°C). Segundo o técnico da impressora esses parâmetros são secundários, não apresentariam diferenças significativa no estudo e, por isso, foram mantidos constantes.

A posição de impressão na plataforma também foi mantida constante, pois é do conhecimento do operador a inviabilidade de imprimir a peça do estudo em diferentes posições, devido a sua geometria. Para imprimir os detalhes, a impressora utilizaria um suporte de impressão – impresso no mesmo material da peça, o qual precisaria ser retirado após a finalização do processo, sendo necessárias etapas de acabamento manuais. Sendo assim, além de não ser possível manter o fator ângulo de ativação constante, o resultado não seria somente o obtido pela impressora, mas sim o resultado da impressora em conjunto com o processo de acabamento, o que poderia interferir nos resultados da pesquisa.

Outro parâmetro de impressão mantido constante foi o preenchimento. O nível mais baixo imprime peças ocas, o que afeta a qualidade de impressão e gera peças deformadas. Já o maior preenchimento gera peças mais rígidas, porém consome mais material e tempo de impressão. Inicialmente, através da sugestão do técnico, definiu-se que o nível de preenchimento constante seria de 10%. Realizou-se a impressão de uma peça teste, entretanto verificou-se várias irregularidades na superfície externa da peça. Além disso, constatou-se espaços sem cobertura de PLA e excessos de rebarbas. Por isso, a partir desse teste inicial, decidiu-se manter o maior nível de preenchimento como constante.

Os fatores controláveis foram a altura entre camadas, com os níveis 0,10mm e 0,25mm, e espessura de paredes, com os níveis 1 e 4 perímetros. Esses foram determinados em conjunto com o técnico, o qual destacou que os níveis extremos trazem maiores informações sobre o processo. Já os níveis de velocidade de impressão, fator que também foi controlado na pesquisa, foram escolhidos partindo de um valor sugerido pelo *software* e que sempre foi utilizado em todas as impressões feitas nessa impressora – 100%. Para a realização do experimento, decidiu-se escolher a velocidade sugerida, 100%, e uma velocidade intermediária, 50%. Velocidades muito baixas tornariam o tempo de impressão muito elevado, o que levaria a um tempo de impressão inviável para a realização deste experimento.

Já os fatores de ruído presentes no processo foram: operador da impressora e as condições ambientais (temperatura e umidade). Finalizando a etapa 2 da pesquisa, definiu-se as variáveis de resposta: características geométricas da peça – cilindridade interna e externa, planeza, paralelismo e esfericidade – e características dimensionais – altura, largura, comprimento e raio.

A partir das definições da etapa anterior, iniciou-se a terceira etapa com a definição do planejamento experimental. Determinou-se, partindo do número de fatores e níveis, a utilização de um planejamento  $2^3$ , considerando três fatores onde cada fator possui dois níveis, resultando em 8 peças impressas. O tempo estimado para impressão de cada peça varia conforme a combinação dos parâmetros, de 17 a 24 horas, o que justifica o número reduzido de peças impressas no estudo e a não repetição do planejamento experimental.

Finalizando a etapa 3, realizou-se a aleatorização da sequência de impressões foi feita no *software* Excel® através da programação *Visual Basic for Applications* (VBA). O código utilizado está no Apêndice A e o resultado da sequência aleatorizada para realização do experimento está no Apêndice B.

Na etapa 4, tem-se o desenho da peça impressa, apresentado no Apêndice C. O projeto considerou o maior número de características geométricas e dimensionais possíveis. A peça foi projetada de forma a apresentar as características dimensionais e geométricas a serem analisadas.

Na sequência, a impressão foi realizada com o auxílio de dois colaboradores do laboratório. As medições geométricas das peças foram realizadas em uma máquina de medição por coordenadas, com resolução de 0,001mm, e as medições dimensionais foram feitas com um paquímetro digital, resolução 0,01mm. Para cada peça e cada característica geométrica foram realizadas três repetições da mesma medição, já para as medições dimensionais realizou-

se apenas uma medição. A Tabela com os dados coletados é apresentada no Apêndice D, onde seguiram a definição de nomenclatura das faces da peça conforme o Apêndice C.

Já a quinta etapa envolveu a análise de variância (ANOVA) dos dados do planejamento experimental  $2^3$ , com os fatores (A, B e C) em níveis fixos sem repetições para as variáveis de resposta investigadas. Para todas as variáveis esperou-se que o erro em cada uma delas fosse igual a zero.

As variáveis de resposta foram analisadas individualmente, uma vez que pretendeu-se identificar melhores ajustes para cada uma. Além desses, uma importante análise para a variável de resposta é a identificação de ajustes subótimos para a situação em que o fator C está no seu nível alto, uma vez que este produz tempos de impressão substancialmente menores, podendo chegar a horas.

A maioria dos dados resultou em uma interação tripla (ABC), o que tornou o ajuste gráfico inviável. Sendo assim, definiu-se uma nova estratégia de análise dos dados, no qual utilizou-se o Minitab® para realizar a análise da interferência da variabilidade das repetições de cada medição e quais os fatores são significativos e devem ser considerados para realização do estudo do ajuste ótimo.

A codificação dos fatores utilizados pelo Minitab®, que indica o intervalo de variação de cada fator estudado, possui, no caso do presente estudo, um intervalo de variação de [-1,1]. Já os dados referentes a informação dos fatores estão relacionados com a quantidade e quais níveis os fatores podem assumir, o Quadro 1 traz essas informações.

Quadro 1 – Informações dos fatores controláveis

<b>Fator</b>	<b>Níveis dos Fatores</b>	<b>Codificação</b>
Perímetro (A)	1	-1
	4	1
Altura entre Camadas (B)	0,10	-1
	0,25	1
Velocidade de impressão (C)	50%	-1
	100%	1

Fonte: Autora (2019)

#### 4.1 VARIÁVEIS DE RESPOSTA GEOMÉTRICAS

Inicialmente, o fator repetição de medição foi analisado para cada variável de resposta geométrica. A análise foi conduzida no Minitab®, opção ANOVA modelos lineares

generalizados. Analisou-se a possibilidade de as repetições das medições influenciarem no ajuste ótimo final. Verificou-se que para todas as variáveis de resposta isso não ocorreu, as repetições das medições foram não significativas considerando uma significância de 5%. Os dados referentes às VRs geométricas são apresentados do Apêndice E ao O.

Na sequência, para cada variável de resposta, os fatores foram modelados com o auxílio da função análise de regressão linear do Excel®, pois constatou-se interações entre dois e três fatores. Essa análise resultou na produção de um modelo de regressão para cada variável de resposta geométrica, o qual explica o fenômeno investigado com uma porcentagem de variação avaliada pelo R<sup>2</sup> ajustado dos modelos. Foram mantidos no modelo apenas fatores que apresentaram valor-p abaixo de 0,05, portanto, adotou-se um nível de significância estatística igual a 5%. Não foram testados termos quadráticos.

As variáveis de reposta esfericidade, paralelismo, cilindridade interna e externa e planeza da face “A” apresentaram fatores com valor-p abaixo de 0,05, entretanto, isso não ocorreu para planeza da face “C”, pois todas os fatores obtiveram valor-p acima de 0,05, concluindo que é indiferente a combinação dos fatores para se obter o ajuste ótimo e, nesse caso, qualquer ajuste trará o menor erro geométrico.

A Tabela 4 apresenta as variáveis de resposta, os modelos de regressão e seus respectivos R<sup>2</sup> ajustados. A variável “y” representa o erro estimado para cada uma das variáveis de resposta geométricas.

Tabela 4 – Modelos de regressão para VR geométrica

VR	R <sup>2</sup>	Equação
Esfericidade	0,92	$y = 0,092 - 0,018*A - 0,027*B + AB*0,021 - 0,032*C + 0,019*AC + 0,012*BC - 0,048*ABC$
Cilindridade Externa	0,89	$y = 0,092 + 0,010*A - 0,014*AB + 0,006*C - 0,016*AC + 0,017*BC + 0,025*ABC$
Cilindridade Interna	0,64	$y = 0,065 - 0,013*B + 0,015*AB - 0,013*C - 0,010*AC + 0,015*ABC$
Paralelismo	0,51	$y = 0,160 - 0,031*AB + 0,027*BC - 0,056*ABC$
Planeza da face “A”	0,27	$y = 0,072 - 0,012*A - 0,012*AB$

Fonte: Autora (2019)

Segundo Montgomery, Runger e Hubele (2013) o R<sup>2</sup> ajustado é a reflexão da proporção da variabilidade que explica um modelo de regressão. Possui um intervalo de variação entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo ao máximo, melhor o modelo explica o fenômeno. Para

essa pesquisa definiu-se que os modelos com  $R^2$  ajustado acima de 0,60 são adequados. Sendo assim, atendem a esse critério os modelos para as variáveis de resposta esfericidade (0,92), cilindricidade interna (0,64) e cilindricidade externa (0,89). Paralelismo e planeza da face A apresentam valores de  $R^2$  ajustado inferiores a 0,60 o que indica que os dados podem ter variabilidade excessiva, pois os modelos não são adequados. Após encontrados os modelos de regressão para cada variável de resposta, obteve-se os ajustes ótimos através da ferramenta *solver* de programação linear da planilha eletrônica.

Para todos os modelos gerados, a verificação das suposições se deu pela análise gráfica dos resíduos, do histograma e do gráfico de probabilidade normal.

A Tabela 5 apresenta os ajustes ótimos encontrados pelo *solver* com erro igual a zero ( $y = 0$ ). Encontrou-se, para esfericidade e cilindricidade interna, ajustes ótimos, entretanto, os valores dos fatores não correspondem aos ajustes utilizados nessa pesquisa, indicando a existência de níveis intermediários que apresentam ajuste ótimo. Atenta-se, porém, para a inflexibilidade dos fatores A e B, que possuem níveis predeterminados pelo *software* da impressora, o que impossibilita a realização de ajustes personalizados.

Para cilindricidade externa, paralelismo e planeza da face “A” o *solver* não encontrou ajustes que correspondessem ao erro igual a zero, concluindo que, para essas variáveis geométricas, a impressora tem variabilidade excessiva.

Tabela 5 – Ajuste ótimo fornecido pelo *solver*

VR	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
Esfericidade	-0,180	1	-1	-1	-1	-1	1
Cilindricidade Interna	-	1	1	1	0,983	-	-1
Cilindricidade Externa			O <i>solver</i> não encontrou uma solução viável				
Paralelismo			O <i>solver</i> não encontrou uma solução viável				
Planeza da face “A”			O <i>solver</i> não encontrou uma solução viável				

Fonte: Autora (2019)

De modo a uniformizar as análises, para todas as variáveis de resposta, utilizou-se o modelo de regressão obtido para estimar para cada cenário de “y” e, a partir da equação, identificou-se o cenário que apresentaram erro mais próximo de zero. A Tabela 6 traz o ajuste ótimo para cada uma das variáveis de resposta.

Tabela 6 – Ajuste ótimo das variáveis de resposta geométricas

VR	A	B	C	y
Esfericidade	1	1	1	0,020
Cilindricidade Interna	1	1	1	0,029
Cilindricidade Externa	-1	-1	-1	0,037
Paralelismo	-1	-1	1	0,045
Planeza da face “A”	1	1	1 ou -1	0,048

Fonte: Autora (2019)

Ao analisar os resultados de “y” para todas as VRs percebe-se que é possível arranjar os fatores de forma a determinar um único ajuste ótimo que atenda as três variáveis de resposta esfericidade, cilindricidade interna e planeza da face “A”. Ambos apresentaram a mesma combinação dos fatores (A, B e C = 1) que geram o menor erro geométrico na impressão. Para atender a essa combinação, deve-se ajustar no *software* da impressora o perímetro igual a 1, altura entre camadas igual a 0,10 e velocidade de impressão igual a 100%.

Não foi possível, entretanto, encontrar um ajuste ótimo que unificasse todas as VRs geométricas com todas em seu ajuste ótimo, pois cilindricidade externa e paralelismo apresentaram combinações dos fatores opostas as outras variáveis de resposta. Foi possível, porém, unificar todas as VRs com ajustes subótimos para paralelismo e cilindricidade externa, onde utilizou-se como critério usar o menor número de ajustes subótimos possíveis. As VRs paralelismo e cilindricidade externa foram ajustadas com todos os fatores em 1, onde o valor de “y” foram respectivamente iguais a 0,09mm e 0,12mm. O ajuste ótimo unificado para todas as variáveis de resposta geométrica foi igual a: perímetro de 4, altura entre camadas de 0,25 e velocidade de 100%.

Referente ao ajuste subótimo, onde o fator “C” encontra-se no seu nível alto (C = 1), difere apenas para a variável de resposta cilindricidade externa. O ajuste subótimo encontrado para cilindricidade externa é em AC (A = 1; B = -1; C = 1), gerando um erro de 0,064mm. Além disso, para a variável de resposta planeza da face “A” é indiferente o nível do fator C, pois o erro encontrado é o mesmo para ambos os casos.

Ressalta-se que as medições foram feitas para cilindricidade interna e externa e, fez-se a tentativa de analisá-las em conjunto, entretanto, o resultado gerado pelo Minitab® para o valor-p, ao considerar a análise simultânea, foi de 0,017 (valor abaixo de 0,05), caracterizando a significância entre os dados de cilindricidade interna e externa, o que significa que há diferença de ajuste ótimo entre as geometrias e que estas precisam ser estudadas separadamente.

Além disso, para geometrias iguais (cilindricidade), existe uma diferença considerável ao se analisar medidas internas e externas. O ajuste ótimo para cilindricidade interna difere em todos os fatores quando comparado aos fatores do ajuste ótimo para cilindricidade externa.

As medições de planeza foram feitas para as faces A, B, C e D e também se fez a tentativa de analisa-las em conjunto, entretanto o resultado gerado pelo Minitab® para o valor-p ao considerar a análise simultânea foi de 0 (abaixo de 0,05), caracterizando a significância entre os dados. Realizou-se, portanto, a análise separada das maiores faces da peça, pois acredita-se que em áreas maiores a irregularidade seja maior.

#### 4.2 VARIÁVEIS DE RESPOSTA DIMENSIONAIS

O procedimento de análise dos dados deu-se da mesma forma para as variáveis de resposta dimensionais. Excluiu-se, entretanto, a etapa da análise do valor-p para as repetições, pois realizou-se apenas uma medição por variável de resposta por peça.

Analisou-se os dados obtidos das medições para largura, comprimento, altura e raio. Os dados analisados das medições estão no Apêndice D e os dados das análises estão do Apêndice P ao X. Os valores dos erros das VRs foram calculados subtraindo o valor desejado da dimensão – valor projetado – do valor encontrado na medição com o paquímetro – valor real.

Por não haver repetições, não houve como calcular o valor-p para classificar como fator significativo ou não. A estratégia utilizada foi escolher fatores secundários e terciários com o menor QM para serem excluídos da análise e utilizados como erro.

Tabela 7 – Modelos de regressão para VR dimensional

VR	R <sup>2</sup>	Equação
Largura	0,99	$y = 0,35 + 0,045*A - 0,0875*B - 0,0425*AB - 0,095*C - 0,11*AC - 0,1025*ABC$
Altura	0,99	$y = 0,1425 - 0,04*A - 0,0325*AC - 0,0475*BC$
Comprimento	0,91	$y = 0,295 - 0,075*A - 0,0675*C - 0,0775*AC$
Raio	0,87	$y = 0,6112 + 0,0937*B + 0,0762*AB$

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 7 apresenta os dados de R<sup>2</sup> ajustado e os modelos de regressão encontrados para as variáveis de resposta dimensional. Conforme supracitado, para essa pesquisa definiu-se que os modelos com R<sup>2</sup> ajustado acima de 0,60 são adequados, sendo assim todas as VRs

dimensionais atenderam a esse critério, concluindo que os modelos representam bem os fenômenos.

Após obter os modelos de regressão, fez-se a tentativa de encontrar o ajuste igual a zero através do *solver* para as variáveis de resposta, entretanto encontrou-se esse ajuste apenas para a VR raio, o qual o ajuste dos fatores foi:  $A = -1$ ;  $B = 0,457$ ;  $AB = -1$ ;  $C = 1$ ,  $AC = -1$ ;  $ABC = 1$ . Valores intermediários também foram encontrados, sugerindo a existência de ajustes intermediários dos fatores que não foram considerados na presente pesquisa. Para as demais VRs, o *solver* não encontrou uma solução viável.

Seguindo o mesmo método utilizado para as VRs geométricas, utilizou-se o modelo de regressão para identificar os cenários que apresentam erros mais próximos de zero. A Tabela 8 apresenta esses ajustes ótimos.

Tabela 8 – Ajuste ótimo das variáveis de resposta dimensionais

VR	A	B	C	y
Comprimento	1	1 ou -1	1	0,075
Largura	-1	-1	1	0,042
Raio	1 ou -1	-1	1	0,441
Altura	1	1	1	0,022

Fonte: Autora (2019)

Analisando a Tabela 8 é possível observar que existe um ajuste comum para largura e raio, onde o perímetro deve ser igual a 4, velocidade de 100% e altura entre camadas igual a 0,10mm. Além disso, foi possível encontrar um ajuste unificado para altura e comprimento, o qual o perímetro deve ser igual a 4, velocidade 100% e altura entre camadas igual a 0,25mm. Por fim, outro ajuste comum pode ser realizado entre raio e comprimento, onde o perímetro deve ser de 4, velocidade de 100% e altura entre camadas de 0,10mm.

Realizou-se a unificação de um ajuste ótimo para todas as VRs dimensionais, onde foi utilizado como critério usar o menor número de ajustes subótimos possíveis, conforme feito com as VRs geométricas. Definiu-se, portanto, que o ajuste ótimo unificado possui os fatores ajustados com: perímetro de 4, altura entre camadas de 0,10mm e velocidade de 100%. Para isso, largura e altura tiveram ajustes subótimos, onde o “y” da combinação para cada VR foi de respectivamente igual a 0,642mm e 0,117mm.

Para o ajuste subótimo, onde o fator “C” encontra-se no seu nível alto ( $C = 1$ ), todas as VRs dimensionais apresentaram de imediato o ajuste ótimo com velocidade de 100%, não sendo necessária uma nova análise.

Ressalta-se, por fim, que a impressora Cliever CL2 Pro Plus utilizada na pesquisa possui no seu manual de informações técnicas uma tolerância dimensional especificada em 0,2 mm. Pôde-se concluir que, ao observar a Tabela 8, para comprimento, largura e altura a impressora atendeu ao que foi prometido no manual, entretanto, para a variável dimensional raio o valor de erro encontrado (0,441mm) é maior que o dobro do valor fornecido pela fabricante.

### 4.3 DISCUSSÃO

Algumas restrições físicas e operacionais dificultaram a realização do estudo, como a falta de controle da temperatura e umidade da sala onde a impressora estava operando, além de diferentes operadores utilizarem o equipamento. Houve também algumas restrições técnicas, o *software* da impressora apresentou poucas opções de ajuste para os fatores perímetro e altura entre camadas, ambos apresentaram a possibilidade de apenas quatro níveis de ajuste. Além disso, a impressora estragou duas vezes durante a realização do experimento, levando a atrasos no cronograma de realização do estudo.

Restrições financeiras também dificultaram a realização da pesquisa. Nenhuma repetição do experimento foi realizada, pois seria necessário imprimir um maior número de peças, o que demandaria a utilização de mais material e horas de impressão, o que se tornou inviável para o laboratório devido ao alto custo e disponibilidade do filamento e da impressora.

Além disso, concluiu-se que é inviável encontrar um ajuste ótimo considerando variáveis dimensionais e geométricas, pois para isso seria necessário comprometer os ajustes já encontrados e, caso fossem unificados, algumas VRs não permaneceriam com o seu ajuste ótimo ou subótimo, o que comprometeria o resultado final de minimizar os erros de impressão. Sugere-se, portanto, que o ajuste dos fatores seja feito conforme a peça que se deseja imprimir.

Por fim, com a finalidade de resumir e facilitar o ajuste dos fatores no *software* da impressora, criou-se a Tabela 9 com todas as VRs geométricas e dimensionais com os ajustes que geram erro mais próximo de zero.

Tabela 9 - Ajuste ótimo dos fatores para as VRs geométricas e dimensionais

<b>VR</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Altura entre camadas</b>	<b>Velocidade</b>
Efericidade	4	0,25	100%
Cilindricidade Interna	4	0,25	100%
Cilindricidade Externa	1	0,10	50%
Paralelismo	1	0,10	100%
Planeza da face "A"	4	0,25	50 ou 100%
Comprimento	4	0,10 ou 0,25	100%
Largura	1	0,10	100%
Raio	1 ou 4	0,10	100%
Altura	4	0,25	100%

Fonte: Autora (2019)

Como propostas futuras sugere-se o estudo de níveis intermediário dos fatores considerando as condições ambientas do local de impressão e dos diferentes operadores da impressora 3D.

## 5 CONCLUSÃO

A manufatura aditiva é uma tecnologia emergente e que pode revolucionar os processos de fabricação, além de possuir diferentes campos de aplicação. A impressão 3D, quando comparada a outros processos produtivos, possui uma tecnologia que gera menos desperdício de matéria prima e nenhuma atividade intermediária de *setup*. Dessa forma, à medida que essa tecnologia se desenvolve, torna-se importante investigar a qualidade dos resultados gerados pelo processo.

O problema da pesquisa consistiu em não existir um conhecimento sobre a combinação ótima dos parâmetros da impressora, onde fosse possível imprimir as peças tanto com qualidade dimensional quanto geométrica. O estudo, portanto, atingiu o objetivo de analisar a variabilidade geométrica e dimensional das peças fabricadas em uma impressora tridimensional, considerando que a peça de estudo foi desenhada para abranger a maior quantidade de dimensões geométricas e dimensionais possíveis. A metodologia de estudo aplicada foi um planejamento experimental  $2^3$ , com a análise dos dados feita através do Minitab®, análise de regressão, solver e planilhas eletrônicas.

Após analisar todas as variáveis de resposta, foi possível encontrar ajustes comuns para algumas VRs, entretanto não foi possível obter um ajuste ótimo em comum que abrangesse todas as variáveis geométricas e dimensionais. Além disso, verificou-se a presença de ajustes intermediários dos fatores que não foram considerados na pesquisa e, por isso, ajustes com “y” igual a zero não foram encontrados. Obteve-se, portanto, ajustes ótimos com erros próximos a zero para todas as variáveis de resposta estudadas, o qual foram consideradas as combinações mais adequadas para atingir a maior precisão de impressão possível.

Os ajustes encontrados foram: esfericidade, cilindridade interna e altura com perímetro igual a 4, altura entre camadas de 0,25mm e velocidade de 100%; cilindridade externa com perímetro igual a 4, altura entre camadas de 0,10mm e velocidade de 50%; paralelismo e largura com perímetro igual a 1, altura entre camadas de 0,10mm e velocidade de 100%; planeza da face “A” com perímetro igual a 4, altura entre camadas de 0,25mm e velocidade de 50% ou 100%; comprimento com perímetro de 4, altura entre camadas de 0,10mm ou 0,25mm e velocidade de 100%; raio com perímetro de 1 ou 4, altura entre camadas de 0,10mm e velocidade de 100%. Ademais, o ajuste dos fatores deverá ser feito conforme a necessidade da peça a qual se deseja imprimir, devido à grande variabilidade dos ajustes ótimos.

Por fim, houve algumas restrições técnicas e financeiras que dificultaram a realização do estudo, foram elas: falta de controle da temperatura e umidade da sala; diferentes operadores utilizando o equipamento, o *software* da impressora apresentou poucas opções de ajuste para alguns fatores; não foi possível realizar nenhuma repetição do experimento, devido a dificuldades financeiras.

## REFERÊNCIAS

- COLUMBUS, L. 7 Ways 3D printing is making manufacturing more competitive. In: **Forbes**, Estados Unidos, 24 abr. 2016. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/louisacolumbus/2016/04/24/7-ways-3d-printing-is-making-manufacturing-more-competitive/#4b0e80667dfd>>. Acesso em: 06 abr. 2019.
- GARVIN, D. A. **Gerenciando a Qualidade: a visão estratégica e competitiva**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- GIL, A. C. **Como elaborar projeto de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GIORDANO, C.M.; ZANCUL, E.S.; RODRIGUES, V.P. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Produção Online**. revista científica eletrônica de engenharia de produção, Associação Brasileira de Engenharia de Produção v.16, n.2, p.499-523, 2016. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1963/1397>>. Acesso em: 05 abr. 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900: 2015**. Additive manufacturing – General principles – Terminology. Geneva: ISO, 2015. Online Browsing Platform. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. Acesso em: 03 jun. 2019.
- JAHAN. S.A.; EL-MOUNAYRI. H. A Thermomechanical Analysis of Conformal Cooling Channels in 3D Printed Plastic Injection Molds. **Applied Sciences**. revista eletrônica, v.8, n.2, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2567/htm>> Acesso em: 24 jun 2019.
- MONTGOMERY, D. C. **Controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- PALUMBO, B. et al. Tensile Properties Characterization of AlSi10Mg Parts Produced by Direct Metal Laser Sintering via Nested Effects Modeling. **Materials**. revista eletrônica, v.10, n.2, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/10/2/144/htm>> Acesso em: 24 jun. 2019.
- PEREIRA, J. M. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2016.
- TOLETO, J. C. et al. **Qualidade: gestão e métodos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

WOODSON, T.; ALCANTARA, J.T.; NASCIMENTO, M.S. Is 3D printing an inclusive innovation?: An examination of 3D printing in Brazil. **Technovation**. revista eletrônica, v.80-81, p.54-62, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166497217302420>> Acesso em: 02 abr. 2019.

ZAPAROLLI, D. O avanço da impressão 3D. In: **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, fev. 2019. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2019/02/11/o-avanco-da-impressao-3d/>>. Acesso em: 06 abr. 2019.

## APÊNDICE A – CÓDIGO PARA ALEATORIZAR O EXPERIMENTO

*Sub sorteio()*

*Dim n As Integer*

*For a = 1 To 8*

*n = Application.WorksheetFunction.RandBetween(1, 8)*

*Cells(a, 5) = Cells(n, 3)*

*Cells(n, 3) = Cells(a, 3)*

*Next*

*End Sub*

## APÊNDICE B – QUADRO DA ALEATORIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

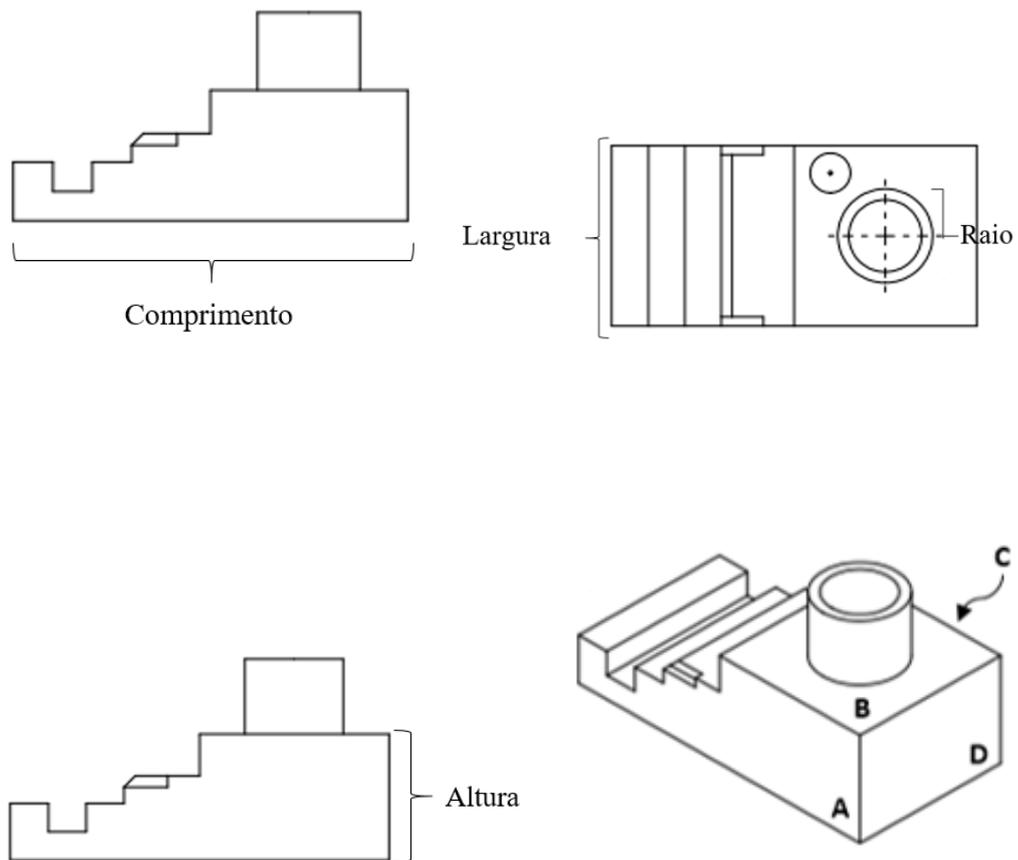
Quadro 2 - Dados da sequência do experimento

<b>Impressão</b>	<b>Perímetro - A</b>	<b>Altura entre camadas – B (mm)</b>	<b>Velocidade- C (%)</b>
1 <sup>a</sup>	1	0,10	100
2 <sup>a</sup>	4	0,25	100
3 <sup>a</sup>	1	0,10	50
4 <sup>a</sup>	4	0,10	100
5 <sup>a</sup>	1	0,25	100
6 <sup>a</sup>	4	0,10	50
7 <sup>a</sup>	1	0,25	50
8 <sup>a</sup>	4	0,25	50

Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE C – VISTAS DA PEÇA

Figura 3: Vistas da peça



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE D – DADOS DAS MEDIÇÕES

Quadro 3 – Dados das medições

<b>PEÇA 2A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,095mm	0,088mm	0,082mm
<b>B</b>	Esfera	0,028mm	0,057mm	0,055mm
	Planeza	0,141mm	0,112mm	0,078mm
	Cilindricidade interna	0,064mm	0,082mm	0,058mm
	Cilindricidade externa	0,084mm	0,110mm	0,102mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,077mm	0,078mm	0,054mm
	Planeza	0,084mm	0,061mm	0,083mm
<b>D</b>	Planeza	0,067mm	0,043mm	0,033mm
Comprimento		0,30mm		
Largura		0,30mm		
Altura		0,04mm		
Raio		0,43mm		
<b>PEÇA 3A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,073mm	0,047mm	0,072mm
<b>B</b>	Esfera	0,039mm	0,010mm	0,011mm
	Planeza	0,249mm	0,303mm	0,340mm
	Cilindricidade interna	0,015mm	0,046mm	0,048mm
	Cilindricidade externa	0,093mm	0,129mm	0,131mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,081mm	0,13mm	0,148mm
	Planeza	0,061mm	0,129mm	0,149mm
<b>D</b>	Planeza	0,113mm	0,127mm	0,127mm
Comprimento		0,03mm		
Largura		0,06mm		
Altura		0,18mm		
Raio		0,72mm		
<b>PEÇA 4A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,055mm	0,040mm	0,044mm
<b>B</b>	Esfera	0,315mm	0,245mm	0,244mm
	Planeza	0,090mm	0,109mm	0,151mm
	Cilindricidade interna	0,063mm	0,058mm	0,033mm
	Cilindricidade externa	0,035mm	0,018mm	0,063mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,142mm	0,180mm	0,155mm
	Planeza	0,082mm	0,044mm	0,049mm

Quadro 3 – Dados das medições

(continuação)

<b>PEÇA 4A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>D</b>	Planeza	0,081mm	0,078mm	0,115mm
Comprimento		0,47mm		
Largura		0,07mm		
Altura		0,66mm		
Raio		0,52mm		
<b>PEÇA 5A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,072mm	0,112mm	0,089mm
<b>B</b>	Esfera	0,068mm	0,072mm	0,073mm
	Planeza	0,117mm	0,114mm	0,173mm
	Cilindricidade interna	0,061mm	0,068mm	0,020mm
	Cilindricidade externa	0,098mm	0,113mm	0,115mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,193mm	0,456mm	0,364mm
	Planeza	0,048mm	0,041mm	0,048mm
<b>D</b>	Planeza	0,083mm	0,073mm	0,070mm
Comprimento		0,12mm		
Largura		0,13mm		
Altura		0,64mm		
Raio		0,56mm		
<b>PEÇA 6A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,069mm	0,058mm	0,117mm
<b>B</b>	Esfera	0,102mm	0,102mm	0,101mm
	Planeza	0,180mm	0,134mm	0,114mm
	Cilindricidade interna	0,032mm	0,053mm	0,081mm
	Cilindricidade externa	0,070mm	0,063mm	0,064mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,246mm	0,141mm	0,213mm
	Planeza	0,068mm	0,140mm	0,116mm
<b>D</b>	Planeza	0,156mm	0,089mm	0,109mm
Comprimento		0,46mm		
Largura		0,18mm		
Altura		0,16mm		
Raio		0,95mm		
<b>PEÇA 7A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,028mm	0,046mm	0,080mm
<b>B</b>	Esfera	0,018mm	0,077mm	0,073mm
	Planeza	0,167mm	0,191mm	0,135mm
	Cilindricidade interna	0,124mm	0,151mm	0,138mm

Quadro 3 – Dados das medições

(conclusão)

<b>PEÇA 7A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>B</b>	Cilindricidade externa	0,172mm	0,174mm	0,160mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,118mm	0,121mm	0,154mm
	Planeza	0,122mm	0,084mm	0,156mm
<b>D</b>	Planeza	0,070mm	0,106mm	0,180mm
Comprimento		0,38mm		
Largura		0,07mm		
Altura		0,41mm		
Raio		0,56mm		
<b>PEÇA 8A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,123mm	0,077mm	0,134mm
<b>B</b>	Esfera	0,037mm	0,061mm	0,061mm
	Planeza	0,121mm	0,109mm	0,180mm
	Cilindricidade interna	0,099mm	0,036mm	0,098mm
	Cilindricidade externa	0,075mm	0,095mm	0,075mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,062mm	0,164mm	0,051mm
	Planeza	0,113mm	0,399mm	0,059mm
<b>D</b>	Planeza	0,062mm	0,090mm	0,056mm
Comprimento		0,25mm		
Largura		0,18mm		
Altura		0,36mm		
Raio		0,47mm		
<b>PEÇA 9A</b>				
<b>Face</b>	<b>VR</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>
<b>A</b>	Planeza	0,066mm	0,037mm	0,025mm
<b>B</b>	Esfera	0,100mm	0,124mm	0,125mm
	Planeza	0,097mm	0,248mm	0,151mm
	Cilindricidade interna	0,045mm	0,032mm	0,060mm
	Cilindricidade externa	0,049mm	0,064mm	0,050mm
<b>C</b>	Paralelismo com A	0,209mm	0,126mm	0,165mm
	Planeza	0,172mm	0,122mm	0,163mm
<b>D</b>	Planeza	0,108mm	0,097mm	0,091mm
Comprimento		0,35mm		
Largura		0,15mm		
Altura		0,35mm		
Raio		0,68mm		

Fonte: Autora (2019)

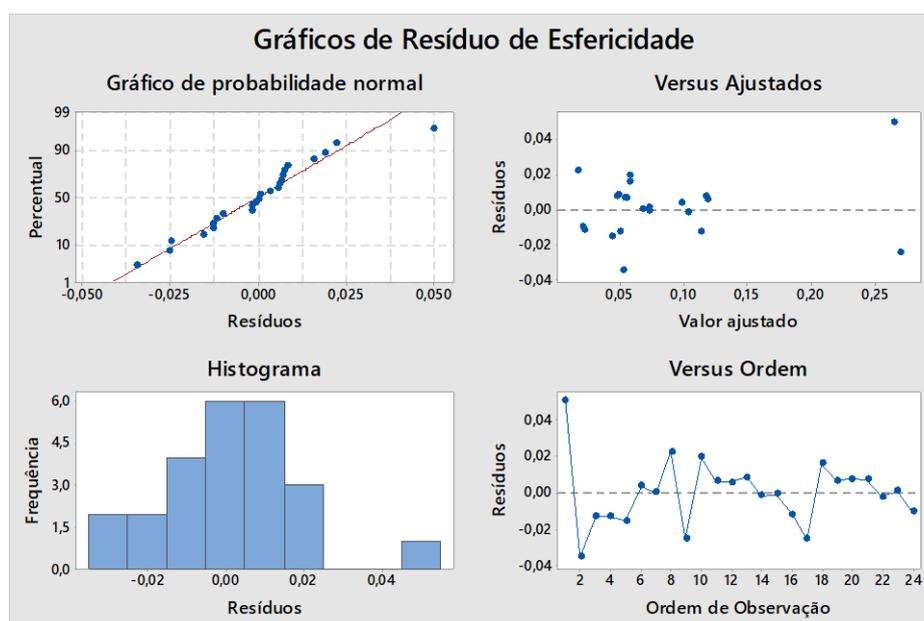
## APÊNDICE E – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA ESFERICIDADE

Quadro 4 – Análise da variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	1	0,007848	0,007848	15,2	0,002
B	1	0,016854	0,016854	32,64	0,000
AB	1	0,010753	0,010753	20,82	0,000
C	1	0,024194	0,024194	46,85	0,000
AC	1	0,00874	0,00874	16,93	0,001
BC	1	0,003553	0,003553	6,88	0,020
ABC	1	0,054531	0,054531	105,61	0,000
Repetições	2	0,000125	0,000063	0,12	0,887
Erro	14	0,007229	0,000516		
Total	23	0,133826			

Fonte: Autora (2019)

Figura 4: Gráficos de resíduo



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE F – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA ESFERICIDADE

Quadro 5 – Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,972
R-Quadrado	0,945
R-quadrado ajustado	0,921
Erro padrão	0,021
Observações	24

Fonte: Autora (2019)

Quadro 6 – Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,092	0,004	20,928	0,000
A	-0,018	0,004	-4,132	0,001
B	-0,027	0,004	-6,055	0,000
AB	0,021	0,004	4,837	0,000
C	-0,032	0,004	-7,255	0,000
AC	0,019	0,004	4,361	0,000
BC	0,012	0,004	2,780	0,013
ABC	-0,048	0,004	-10,892	0,000

Fonte: Autora (2019)

Quadro 7 - Erros de Esfericidade estimados das combinações de tratamento investigadas

<b>CT</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
<b>1</b>	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,268
<b>a</b>	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,056
<b>b</b>	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,053
<b>ab</b>	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,116
<b>c</b>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,047
<b>ac</b>	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,102
<b>bc</b>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,071
<b>abc</b>	1	1	1	1	1	1	1	0,020

Fonte: Autora (2019)

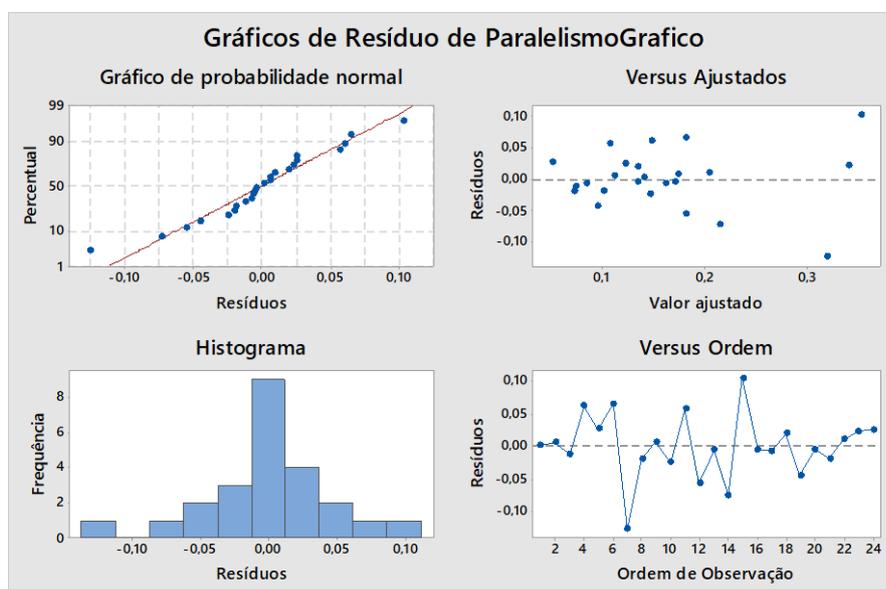
## APÊNDICE G – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA PARALELISMO

Quadro 8 - Análise de Variância

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
A	1	0,001	0,001	0,170	0,685
B	1	0,009	0,009	2,460	0,139
AB	1	0,023	0,023	6,080	0,027
C	1	0,012	0,012	3,180	0,096
AC	1	0,007	0,007	1,800	0,201
BC	1	0,018	0,018	4,800	0,046
ABC	1	0,076	0,076	20,390	0,000
Repetições	2	0,005	0,002	0,620	0,552

Fonte: Autora (2019)

Figura 5: Gráficos de resíduo



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE H – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA PARALELISMO

Quadro 9 - Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,760
R-Quadrado	0,578
R-quadrado ajustado	0,514
Erro padrão	0,065
Observações	24

Fonte: Autora (2019)

Quadro 10 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,160	0,013	11,959	0,000
AB	-0,031	0,013	-2,306	0,032
BC	0,027	0,013	2,049	0,054
ABC	-0,056	0,013	-4,224	0,000

Fonte: Autora (2019)

Quadro 11 - Erros de paralelismo estimados das combinações de tratamento investigadas

<b>CT</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
<b>1</b>	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,2124
<b>a</b>	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,1613
<b>b</b>	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,1066
<b>ab</b>	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,1578
<b>c</b>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,0451
<b>ac</b>	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,2193
<b>bc</b>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,2739
<b>abc</b>	1	1	1	1	1	1	1	0,0998

Fonte: Autora (2019)

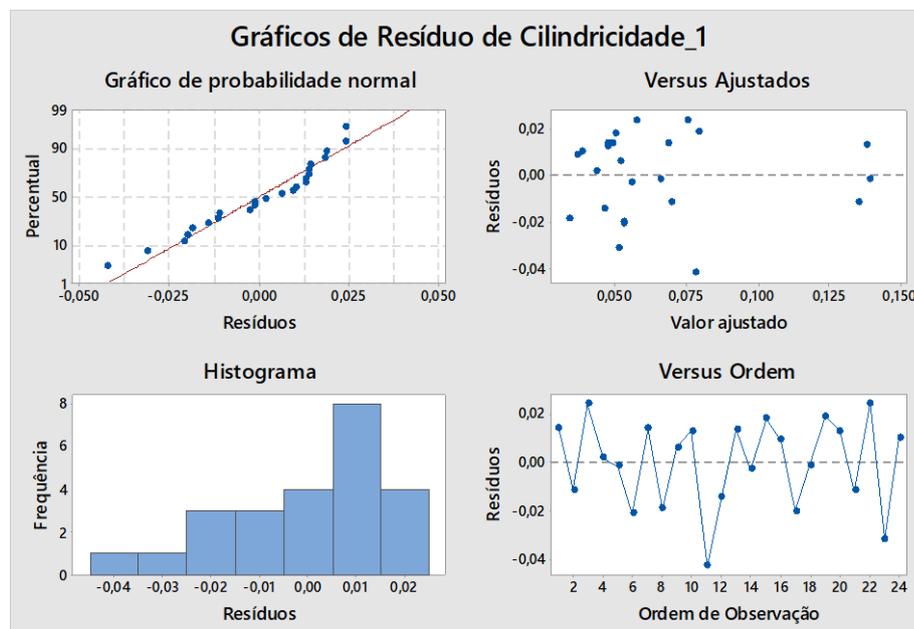
## APÊNDICE I – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA CILINDRICIDADE INTERNA

Quadro 12 - Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	1	0,000	0,000	0,570	0,462
B	1	0,004	0,004	7,570	0,016
AB	1	0,005	0,005	10,110	0,007
C	1	0,004	0,004	7,570	0,016
AC	1	0,002	0,002	4,610	0,050
BC	1	0,000	0,000	0,570	0,462
ABC	1	0,005	0,005	9,880	0,007
Repetições	2	0,000	0,000	0,070	0,934
Erro	14	0,007	0,001		
Total	23	0,029			

Fonte: Autora (2019)

Figura 6: Gráficos de resíduo



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE J – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA CILINDRICIDADE INTERNA

Quadro 13 - Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,850
R-Quadrado	0,722
R-quadrado ajustado	0,645
Erro padrão	0,021
Observações	24

Fonte: Autora (2019)

Quadro 14 - Dados da estatística de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,065	0,004	15,124	0,000
B	-0,013	0,004	-2,986	0,008
AB	-0,015	0,004	-3,450	0,003
C	-0,013	0,004	-2,986	0,008
AC	-0,010	0,004	-2,329	0,032
ABC	0,015	0,004	3,411	0,003

Fonte: Autora (2019)

Quadro 15 - Erros de cilindridade interna estimados das combinações de tratamento investigadas

<b>CT</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
<b>1</b>	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,0513
<b>a</b>	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,1306
<b>b</b>	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,0848
<b>ab</b>	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,0457
<b>c</b>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,0751
<b>ac</b>	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,0553
<b>bc</b>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,0497
<b>abc</b>	1	1	1	1	1	1	1	0,0293

Fonte: Autora (2019)

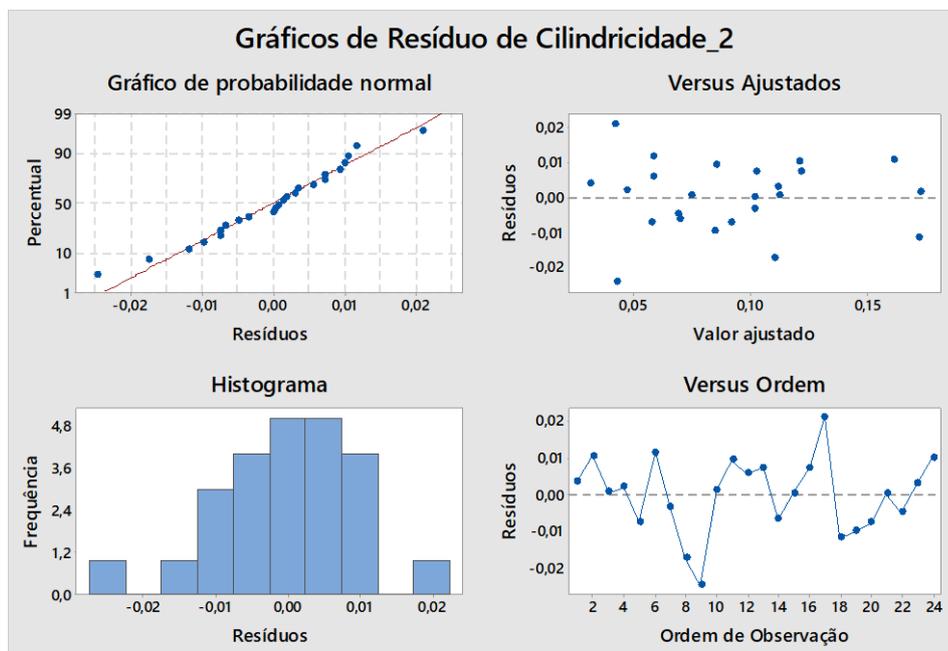
## APÊNDICE K – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA CILINDRICIDADE EXTERNA

Quadro 16 - Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	1	0,002	0,002	13,580	0,002
B	1	0,000	0,000	0,190	0,669
AB	1	0,005	0,005	29,190	0,000
C	1	0,001	0,001	4,920	0,044
AC	1	0,006	0,006	35,210	0,000
BC	1	0,007	0,007	39,010	0,000
ABC	1	0,015	0,015	87,200	0,000
Repetições	2	0,001	0,000	1,850	0,193
Erro	14	0,002	0,000		
Total	23	0,039			

Fonte: Autora (2019)

Figura 7: Gráficos de resíduo



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE L – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA CILINDRICIDADE EXTERNA

Quadro 17 - Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,960
R-Quadrado	0,921
R-quadrado ajustado	0,893
Erro padrão	0,013
Observações	24

Fonte: Autora (2019)

Quadro 18 - Dados da estatística de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,092	0,003	33,513	0,000
A	0,010	0,003	3,592	0,002
AB	-0,014	0,003	-5,266	0,000
C	0,006	0,003	2,161	0,045
AC	-0,016	0,003	-5,783	0,000
BC	0,017	0,003	6,088	0,000
ABC	0,025	0,003	9,101	0,000

Fonte: Autora (2019)

Quadro 19 - Erros de cilindridade externa estimados das combinações de tratamento investigadas

<b>CT</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
<b>1</b>	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,037
<b>a</b>	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,167
<b>b</b>	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,083
<b>ab</b>	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,055
<b>c</b>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,097
<b>ac</b>	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,064
<b>bc</b>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,110
<b>abc</b>	1	1	1	1	1	1	1	0,119

Fonte: Autora (2019)

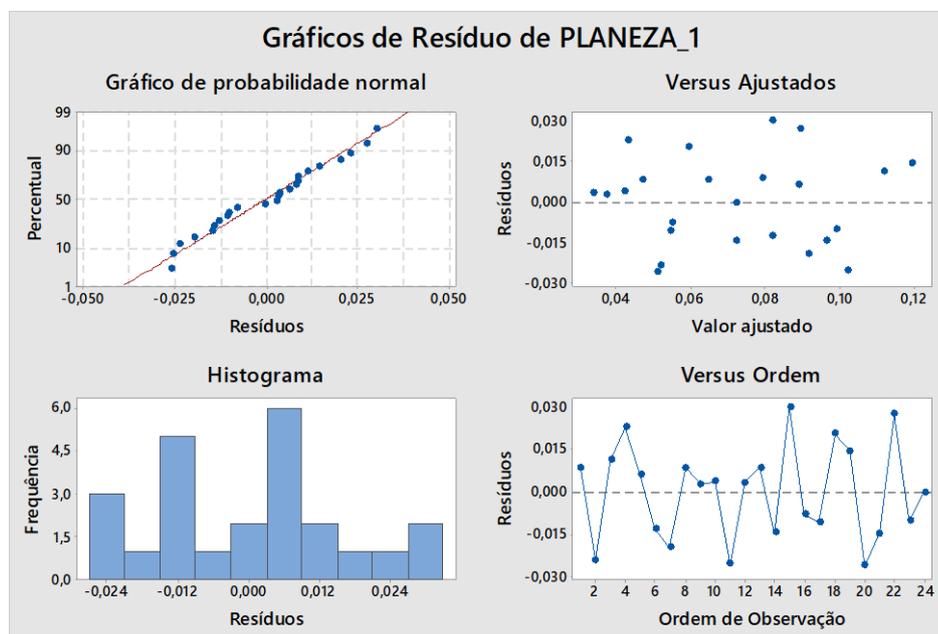
**APÊNDICE M – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO MINITAB STATISTICA SOFTWARE PARA PLANEZA DA FACE “A”**

Quadro 20 - Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	1	0,004	0,004	7,910	0,014
B	1	0,001	0,001	1,440	0,250
AB	1	0,003	0,003	7,270	0,017
C	1	0,002	0,002	4,420	0,054
AC	1	0,000	0,000	0,730	0,407
BC	1	0,002	0,002	4,180	0,060
ABC	1	0,001	0,001	2,390	0,145
Repetição	2	0,001	0,001	1,320	0,298
Erro	14	0,006	0,000		

Fonte: Autora (2019)

Figura 8: Gráficos de resíduo



Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE N – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA PLANEZA DA FACE “A”

Quadro 21 - Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,581
R-Quadrado	0,338
R-quadrado ajustado	0,274
Erro padrão	0,025
Observações	24

Fonte: Autora (2019)

Quadro 22 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,072	0,005	13,932	4,4E-12
A	-0,012	0,005	-2,360	0,02797
AB	-0,012	0,005	-2,264	0,03426

Fonte: Autora (2019)

Quadro 23 - Erros de planeza do lado “A” estimados das combinações de tratamento investigadas

<b>CT</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
<b>1</b>	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,073
<b>a</b>	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,072
<b>b</b>	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,096
<b>ab</b>	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,048
<b>c</b>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,073
<b>ac</b>	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,072
<b>bc</b>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,096
<b>abc</b>	1	1	1	1	1	1	1	0,048

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE O – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA PLANEZA DA FACE “C”**

Quadro 24 - Análise de Variância

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
A	1	0,006	0,006	1,080	0,315
B	1	0,007	0,007	1,360	0,264
AB	1	0,002	0,002	0,300	0,593
C	1	0,012	0,012	2,270	0,154
AC	1	0,002	0,002	0,400	0,538
BC	1	0,013	0,013	2,530	0,134
ABC	1	0,007	0,007	1,300	0,273
Repetição	2	0,005	0,002	0,460	0,640
Erro	14	0,074	0,005		
Total	23	0,128			

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE P – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA COMPRIMENTO**

Quadro 25 – Análise de variância

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>
A	1	0,045	0,045
B	1	0,00405	0,00405
AB	1	0,00045	0,00045
C	1	0,03645	0,03645
AC	1	0,04805	0,04805
BC	1	0,0128	0,0128
ABC	1	0,0242	0,0242
Erro	0	*	*
Total	7	0,171	

Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE Q – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA COMPRIMENTO

Quadro 26 – Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,98675
R-Quadrado	0,97368
R-quadrado ajustado	0,90789
Erro padrão	0,04743
Observações	8

Fonte: Autora (2019)

Quadro 27 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
<b>Interseção</b>	0,295	0,01677	17,5904	0,00322
<b>A</b>	-0,075	0,01677	-4,4721	0,04654
<b>C</b>	-0,0675	0,01677	-4,0249	0,05654
<b>AC</b>	-0,0775	0,01677	-4,6212	0,04377
<b>BC</b>	0,04	0,01677	2,38514	0,13983
<b>ABC</b>	-0,055	0,01677	-3,2796	0,08174

Fonte: Autora (2019)

Quadro 28 - Erros de comprimento estimados das combinações de tratamento investigadas

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
1	-1	-1	-1	1	1	-1	0,360
a	1	-1	-1	-1	1	1	0,365
b	-1	1	-1	1	-1	1	0,360
ab	1	1	-1	-1	-1	-1	0,365
c	-1	-1	1	-1	-1	1	0,380
ac	1	-1	1	1	-1	-1	0,075
bc	-1	1	1	-1	1	-1	0,380
abc	1	1	1	1	1	1	0,075

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE R – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA LARGURA**

Quadro 29 – Análise de variância

<b>Análise de Variância</b>			
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>
A	1	0,0162	0,0162
B	1	0,06125	0,06125
AB	1	0,01445	0,01445
C	1	0,0722	0,0722
AC	1	0,0968	0,0968
BC	1	0,00005	0,00005
ABC	1	0,08405	0,08405
Erro	0	*	*
Total	7	0,345	

Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE S– ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA LARGURA

Quadro 30 – Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,99993
R-Quadrado	0,99986
R-quadrado ajustado	0,99899
Erro padrão	0,00707
Observações	8

Fonte: Autora (2019)

Quadro 31 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
<b>Interseção</b>	0,35	0,0025	140	0,00455
<b>A</b>	0,045	0,0025	18	0,03533
<b>B</b>	-0,0875	0,0025	-35	0,01818
<b>AB</b>	-0,0425	0,0025	-17	0,03741
<b>C</b>	-0,095	0,0025	-38	0,01675
<b>AC</b>	0,11	0,0025	44	0,01447
<b>ABC</b>	-0,1025	0,0025	-41	0,01552

Fonte: Autora (2019)

Quadro 32 - Erros de largura estimados das combinações de tratamento investigadas

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
1	-1	-1	1	-1	1	-1	0,6575
a	1	-1	-1	-1	-1	1	0,4075
b	-1	1	-1	-1	1	1	0,3625
ab	1	1	1	-1	-1	-1	0,3525
c	-1	-1	1	1	-1	1	0,0425
ac	1	-1	-1	1	1	-1	0,6425
bc	-1	1	-1	1	-1	-1	0,1575
abc	1	1	1	1	1	1	0,1775

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE T – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA ALTURA**

Quadro 33 – Análise de variância

<b>Análise de Variância</b>			
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>
A	1	0,0128	0,0128
B	1	0	0
AB	1	0,00005	0,00005
C	1	0,005	0,005
AC	1	0,00845	0,00845
BC	1	0,01805	0,01805
ABC	1	0,0008	0,0008
Erro	0	*	*
Total	7	0,04515	

Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE U – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA ALTURA

Quadro 34 – Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,99945
R-Quadrado	0,99889
R-quadrado ajustado	0,99225
Erro padrão	0,007
Observações	8

Fonte: Autora (2019)

Quadro 35 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,1425	0,0025	57	0,011168
A	-0,04	0,0025	-16	0,039737
B	-7,6E-18	0,0025	-3E-15	1
C	0,025	0,0025	10	0,063451
AC	-0,0325	0,0025	-13	0,048875
BC	-0,0475	0,0025	-19	0,033475
ABC	0,01	0,0025	4	0,155958

Fonte: Autora (2019)

Quadro 36 - Erros de altura estimados das combinações de tratamento investigadas

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
l	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,1025
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,0875
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,1975
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,1825
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,2625
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,1175
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,1675
abc	1	1	1	1	1	1	1	0,0225

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE V – DADOS DA ANÁLISE EXTRAÍDOS DO *MINITAB STATISTICA SOFTWARE* PARA RAI0**

Quadro 37 – Análise de variância

<b>Análise de Variância</b>			
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>
A	1	0,00281	0,00281
B	1	0,07031	0,07031
AB	1	0,00451	0,00451
C	1	0,02311	0,02311
AC	1	0,01531	0,01531
BC	1	0,04651	0,04651
ABC	1	0,03511	0,03511
Erro	0	*	*
Total	7	0,19769	

Fonte: Autora (2019)

## APÊNDICE X – ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA RAI0

Quadro 38 – Dados da estatística de regressão

<b>Estatística de regressão</b>	
R múltiplo	0,9813
R-Quadrado	0,96295
R-quadrado ajustado	0,87031
Erro padrão	0,06052
Observações	8

Fonte: Autora (2019)

Quadro 39 - Dados da análise de regressão

	<b>Coefficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
Interseção	0,61125	0,0214	28,5677	0,00122
B	0,09375	0,0214	4,38155	0,04834
C	0,05375	0,0214	2,51209	0,1286
AC	-0,0438	0,0214	-2,0447	0,17755
BC	0,07625	0,0214	3,56366	0,07051
ABC	-0,0663	0,0214	-3,0963	0,09039

Fonte: Autora (2019)

Quadro 40 - Erros de raio estimados das combinações de tratamento investigadas

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>C</b>	<b>AC</b>	<b>BC</b>	<b>ABC</b>	<b>VR</b>
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,594
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,594
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,629
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,629
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,441
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,441
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,781
abc	1	1	1	1	1	1	1	0,781

Fonte: Autora (2019)