

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA  
AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO PROCESSO DE  
MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM) ATRAVÉS  
DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO

Adão José Spíndola Filho  
Brasília, setembro de 2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PPMEC – PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Faculdade de Tecnologia

PPMEC – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO  
METROLÓGICA DO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E  
DEPOSIÇÃO (FDM) ATRAVÉS DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL  
FRACIONÁRIO**

Adão José Spíndola Filho. 18/0154737

Orientador: Dr. Antônio Piratelli-Filho

**MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

Brasília, setembro de 2020

# **UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Faculdade de Tecnologia

PPMEC – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos

## **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM) ATRAVÉS DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO**

**ADÃO JOSÉ SPÍNDOLA FILHO**

Dissertação de Mestrado submetida ao PPMEC (Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos) do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia da UnB (Universidade de Brasília), como requisito para obtenção do grau de mestre em Sistemas Mecatrônicos.

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Antônio Piratelli-Filho  
ENM/FT/UnB (orientador)

---

Profa. Dra. Andréa Cristina dos Santos  
EPR/FT/UnB (examinadora interna)

---

Prof. Dr. Bruno Fagundes Ferreira  
PUC-GO (examinador externo)

Brasília-DF, setembro de 2020.

## FICHA CATALOGRÁFICA

J83d	José Spíndola Filho, Adão Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação Metroológica do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) Através de um Planejamento Fatorial Fracionário / Adão José Spíndola Filho; orientador Antônio Piratelli-Filho. -- Brasília, 2020. 130 p.
	Dissertação (Mestrado - Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) -- Universidade de Brasília, 2020.
	1. Manufatura Aditiva. 2. Metrologia. 3. Rugosidade. 4. Planejamento de Experimentos. 5. Avaliação de Desempenho. I. Piratelli-Filho, Antônio, orient. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JOSÉ SPÍNDOLA FILHO, Adão. (2020). Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação Metroológica do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) Através de um Planejamento Fatorial Fracionário. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 119p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Adão José Spíndola Filho

TÍTULO: Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação Metroológica do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) Através de um Planejamento Fatorial Fracionário.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à UnB (Universidade de Brasília) permissão para reproduzir cópias dessa dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Dedico essa dissertação a minha família, em especial à minha esposa, Mirian Rodrigues Spíndola, e ao meu filho, Ismael Rodrigues Spíndola, os quais sempre estiveram ao meu lado, mesmo nos momentos em que tive que abdicar do tempo em família para realização desse estudo. Ao meu pai, Adão José Spíndola (que a paz e as bênçãos de Allah estejam sobre ele) e a minha mãe, Vera Lúcia Gomes Ferreira, pela educação, proteção e amor incondicional.

Agradeço a Allah por essa conquista, Ele que é Onipotente, Oniuvinte e atende nossas súplicas. Aos professores do PPMEC, em especial ao professor Dr. Antônio Piratelli-Filho pela destreza em suas orientações, pelos ensinamentos, paciência e confiança. Agradeço ainda aos diretores José Hastenreiter da Conceição Filho e Eduardo Ferreira Caixeta por terem permitido a conciliação de trabalho e estudos durante essa jornada.

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM) ATRAVÉS DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO

Diante dos avanços tecnológicos nos últimos anos, surgiu a necessidade de se obter processos de fabricação cada vez mais precisos e confiáveis. Nesse contexto, a manufatura aditiva (AM) tem evoluído bastante em função de suas vantagens se comparada aos processos de fabricação tradicionais, tais como a possibilidade de confecção de peças com geometrias complexas e redução da perda de material. Na mesma comparação, uma das desvantagens do processo de AM, especificamente com tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição), está relacionada à precisão e exatidão. Impressoras 3D com tecnologia FDM geralmente oferecem precisão de 0,1 mm, enquanto um processo tradicional, como o torneamento, pode oferecer precisão em unidades de  $\mu\text{m}$ . Do mesmo modo, em ensaios de repetitividade, foi observado que máquinas de fabricação aditiva, com tecnologia FDM, proporcionam menor exatidão em relação a outros processos tradicionais, como retífica, torneamento etc. Com o objetivo de avaliar a precisão dimensional, geométrica e rugosidade superficial, este trabalho propõe a aplicação de uma metodologia para avaliar o desempenho de máquinas de fabricação aditiva. O método proposto envolve a aplicação de um planejamento fatorial fracionário  $2^{4-1}$  para avaliar quatro variáveis de processamento (densidade de enchimento, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e altura da camada) que mais influenciam os erros e a exatidão da máquina. Um padrão foi proposto para ser fabricado, contendo diferentes geometrias (cilindro, esfera, colunas e forma livre). A avaliação da máquina de fabricação aditiva foi feita através da medição dos desvios dimensionais, geométricos e da rugosidade da peça, após a fabricação, utilizando uma MMC (Máquina de Medir por Coordenadas) e um rugosímetro. Após a obtenção dos dados, foram calculados os efeitos principais de cada variável para análise através do gráfico normal de probabilidade dos efeitos e dos resíduos, além da ANOVA (Análise de Variância). De modo geral, foi verificado que as variáveis C (velocidade de impressão) e D (altura da camada) foram mais significativas em relação às variáveis A (densidade de enchimento) e B (temperatura de extrusão). A partir da metodologia proposta neste trabalho, foi verificado que o planejamento proporcionou resultados satisfatórios, podendo ser utilizado para otimização em processos de manufatura aditiva, ou até mesmo para realização de outros trabalhos, definindo parâmetros ótimos de operação através de uma metodologia de superfície de resposta.

**Palavras-chave:** Planejamento Fatorial. Manufatura Aditiva. Máquina de Medir por Coordenadas. Rugosidade. Desvios Dimensionais. Desvios Geométricos.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF A METODOLOGY FOR METROLOGICAL EVALUATION OF THE FUSION AND DEPOSITION MODELING PROCESS (FDM) THROUGH FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN

Recently, with technological advances, there has been a need to obtain increasingly accurate and reliable manufacturing processes. Thus, additive manufacturing (AM) had a great evolution due to its advantages compared to traditional manufacturing processes, such as the possibility of manufacturing parts with complex geometries and reducing material loss. However, precision and accuracy are factors that are associated with the disadvantages of the AM process with FDM (fusion and deposition modeling) technology, in the same comparison with traditional manufacturing processes. For example, 3D printers with FDM technology, generally offer 0.1 mm accuracy while a traditional process, such as turning, can provide precision in  $\mu\text{m}$  units. Furthermore, in repeatability tests, it was observed that AM machines with FDM technology are less accurate than other traditional processes, such as grinding, turning, etc. Thus, to evaluate dimensional, geometric precision and surface roughness, this work proposes the application of a methodology to evaluate the performance of AM machines. The proposed method involves the application of a DoE (Design of Experiments), through a  $2^{4-1}$  fractional factorial design to evaluate four processing variables (fill density, extrusion temperature, print speed and layer height) that most influence errors and the accuracy of machine. A reference part was proposed to be manufactured, containing different geometries (cylinder, sphere, columns and free form). The evaluation of the AM machine was done by measuring the dimensional, geometric deviations and the roughness of the part, after manufacture, using a MMC (Coordinate Measuring Machine) and a rugosimeter. After obtaining the data, the main effects of each variable were calculated for analysis using the NPP (Normal Probability Plot) of effects and residuals, in addition to the ANOVA (Analysis of Variance). In general, it was found that variables C (print speed) and D (layer height) were more significant in relation to variables A (fill density) and B (extrusion temperature). From the methodology proposed in this work, it was verified that the planning provided satisfactory results, which can be used for optimization in additive manufacturing processes, or even for other work, defining optimal parameters of operation through a response surface methodology.

**Keywords:** Factorial Design. Additive Manufacturing. Coordinate Measuring Machine. Roughness. Dimensional Deviations. Geometric Deviations.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Princípio do processo FDM.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Princípio do processo de fusão de leito de pó não metálico .....	12
<b>Figura 2.3:</b> Princípio do processo JET .....	14
<b>Figura 2.4:</b> Princípio do processo LOM .....	15
<b>Figura 2.5:</b> Princípio do processo SL.....	16
<b>Figura 2.6:</b> Repetitividade e exatidão em processo de medição .....	25
<b>Figura 2.7:</b> Representação da média aritmética dos valores de rugosidade $Ra$ .....	36
<b>Figura 2.8:</b> Representação dos parâmetros de rugosidade $Rt$ .....	37
<b>Figura 2.9:</b> Perfil $P$ com a linha média para o filtro do perfil ( $\lambda_s$ – cut-off).....	38
<b>Figura 2.10:</b> Perfil de rugosidade $R$ com a linha média.....	38
<b>Figura 2.11:</b> Linha média filtrada passa baixa do perfil primário e linha média para filtro de perfil $\lambda_f$ .....	39
<b>Figura 2.12:</b> Perfil de ondulação com linha média após filtragem passa alta com o filtro de perfil $\lambda_c$ .....	39
<b>Figura 2.13:</b> Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação	39
<b>Figura 2.14:</b> Representação do planejamento fatorial completo $2^2$ .....	43
<b>Figura 2.15:</b> Representação do planejamento fatorial completo $2^3$ .....	45
<b>Figura 2.16:</b> Diagrama de causa e efeito para avaliação de desempenho do processo de AM.....	57
<b>Figura 2.17:</b> Peça padrão para avaliação de desempenho de impressoras 3D. ....	58
<b>Figura 2.18:</b> Peça padrão desenvolvida para avaliação da impressora 3D Cloner ST. ....	58
<b>Figura 2.19:</b> Padrão utilizado para avaliação de desempenho de duas impressoras 3D.....	59
<b>Figura 3.1:</b> Peça padrão (a) desenvolvida em CAD e (b) após fabricação .....	62
<b>Figura 3.2:</b> Etapas do processo de manufatura aditiva.....	64
<b>Figura 3.3:</b> (a) MMC QM-353 e (b) apalpador de medição e esfera padrão .....	66
<b>Figura 3.4:</b> Elementos de medição no MCOSMOS.....	67
<b>Figura 3.5:</b> Rugosímetro SJ-201, Mitutoyo .....	68
<b>Figura 4.1:</b> Dimensões do comprimento (X, Y e Z) e diâmetro (interno e externo) do cilindro.....	70

<b>Figura 4.2:</b> Desvio dimensional (comprimento no eixo Z) – média e barras de erro.	71
<b>Figura 4.3:</b> Desvio dimensional (Eixo Z - 10 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. .....	72
<b>Figura 4.4:</b> Desvio dimensional (comprimento) – gráfico de efeitos. ....	72
<b>Figura 4.5:</b> Desvio dimensional (comprimento) – gráfico de interações.....	72
<b>Figura 4.6:</b> Comprimento no eixo Z (20 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos ..	73
<b>Figura 4.7:</b> Comprimento no eixo Z (30 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos ..	74
<b>Figura 4.8:</b> Desvio dimensional (comprimento no eixo X) – média e barras de erro	75
<b>Figura 4.9:</b> Comprimento no eixo X (28 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos ..	76
<b>Figura 4.10:</b> Comprimento no eixo X (64 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos	77
<b>Figura 4.11:</b> Desvio dimensional (comprimento no eixo Y) – média e barras de erro .....	78
<b>Figura 4.12:</b> Comprimento no eixo Y (28 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos	78
<b>Figura 4.13:</b> Comprimento no eixo Y (64 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos	79
<b>Figura 4.14:</b> Desvio dimensional (diâmetro) – média e barras de erro.....	80
<b>Figura 4.15:</b> Diâmetro (20 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	80
<b>Figura 4.16:</b> Diâmetro (30 mm) – NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	81
<b>Figura 4.17:</b> Desvio geométrico (forma) – média e barras de erro.....	82
<b>Figura 4.18:</b> Planeza - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	83
<b>Figura 4.19:</b> Esfericidade - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	84
<b>Figura 4.20:</b> Cilindricidade (interna) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	85
<b>Figura 4.21:</b> Cilindricidade (externa) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	86
<b>Figura 4.22:</b> Desvio geométrico (forma livre) – desvio médio e desvio máximo. ....	87
<b>Figura 4.23:</b> Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro. ....	88
<b>Figura 4.24:</b> Paralelismo (eixo X) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	88
<b>Figura 4.25:</b> Paralelismo (eixo Y) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	89
<b>Figura 4.26:</b> Paralelismo (eixo Z) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	90
<b>Figura 4.27:</b> Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro. ....	91
<b>Figura 4.28:</b> Perpendicularidade (XY) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	92
<b>Figura 4.29:</b> Perpendicularidade (XZ) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	93
<b>Figura 4.30:</b> Perpendicularidade (YZ) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	94
<b>Figura 4.31:</b> Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro. ....	95
<b>Figura 4.32:</b> Inclinação (30°) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	95
<b>Figura 4.33:</b> Inclinação (60°) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	96

<b>Figura 4.34:</b> Desvio geométrico (localização) – média e barras de erro. ....	97
<b>Figura 4.35:</b> Concentricidade/Coaxialidade - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ...	98
<b>Figura 4.36:</b> Rugosidade – média e barras de erro. ....	99
<b>Figura 4.37:</b> Rugosidade (eixo X) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	99
<b>Figura 4.38:</b> Rugosidade (eixo Y) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	100
<b>Figura 4.39:</b> Rugosidade (eixo Z) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.....	101
<b>Figura 4.40:</b> Tempo de impressão - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos. ....	102

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Principais tecnologias de impressão 3D.....	10
<b>Tabela 2.2:</b> Comparação entre medição convencional e por coordenadas.....	22
<b>Tabela 2.3:</b> Tipos de MMCs e suas principais características.....	23
<b>Tabela 2.4:</b> Simbologia e característica – tolerância geométrica de forma.....	31
<b>Tabela 2.5:</b> Simbologia e característica – tolerância geométrica de orientação.....	33
<b>Tabela 2.6:</b> Simbologia e característica – tolerância geométrica de localização.....	34
<b>Tabela 2.7:</b> Simbologia e descrição da representação de rugosidade.....	37
<b>Tabela 2.8:</b> Planejamento fatorial completo $2^2$ .....	42
<b>Tabela 2.9:</b> Matriz de planejamento fatorial completo $2^2$ .....	43
<b>Tabela 2.10:</b> Planejamento fatorial completo $2^3$ .....	44
<b>Tabela 2.11:</b> Matriz de planejamento fatorial completo $2^3$ .....	44
<b>Tabela 2.12:</b> Matriz de planejamento fatorial fracionário $2^{3-1}$ .....	46
<b>Tabela 2.13:</b> Tabela ANOVA para um planejamento fatorial $2^2$ .....	52
<b>Tabela 2.14:</b> Exemplo de aplicação do algoritmo de Yates.....	54
<b>Tabela 3.1:</b> Fatores e níveis do experimento.....	60
<b>Tabela 3.2:</b> Experimento fatorial fracionário $2^{4-1}$ .....	62
<b>Tabela 3.3:</b> Especificações técnicas – Impressora 3D (Ender 3).....	65
<b>Tabela 3.4:</b> Temperatura, umidade e tempo de impressão na fabricação das peças. .....	66
<b>Tabela 3.5:</b> Temperatura, umidade e tempo de execução na medição das peças. .	67
<b>Tabela 3.6:</b> ANOVA para o planejamento fatorial fracionário $2^{4-1}$ .....	69
<b>Tabela 4.1:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo Z (10 mm).....	73
<b>Tabela 4.2:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo Z (20 mm).....	74
<b>Tabela 4.3:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo Z (30 mm).....	74
<b>Tabela 4.4:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo X (28 mm).....	76
<b>Tabela 4.5:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo X (64 mm).....	77
<b>Tabela 4.6:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo Y (28 mm).....	79
<b>Tabela 4.7:</b> Análise de variância – Comprimento no eixo Y (64 mm).....	79
<b>Tabela 4.8:</b> Análise de variância – Diâmetro (20 mm).....	81
<b>Tabela 4.9:</b> Análise de variância – Diâmetro (30 mm).....	82
<b>Tabela 4.10:</b> Análise de variância – Planeza.....	83

<b>Tabela 4.11:</b> Análise de variância – Esfericidade.....	84
<b>Tabela 4.12:</b> Análise de variância – Cilindricidade (interna).....	85
<b>Tabela 4.13:</b> Análise de variância – Cilindricidade (externa).....	86
<b>Tabela 4.14:</b> Análise de variância – Paralelismo (eixo X). .....	89
<b>Tabela 4.15:</b> Análise de variância – Paralelismo (eixo Y).. .....	90
<b>Tabela 4.16:</b> Análise de variância – Paralelismo (eixo Z). .....	91
<b>Tabela 4.17:</b> Análise de variância – Perpendicularidade (XY). .....	92
<b>Tabela 4.18:</b> Análise de variância – Perpendicularidade (XZ).....	93
<b>Tabela 4.19:</b> Análise de variância – Perpendicularidade (YZ).....	94
<b>Tabela 4.20:</b> Análise de variância – Inclinação (30°). .....	96
<b>Tabela 4.21:</b> Análise de variância – Inclinação (60°). .....	97
<b>Tabela 4.22:</b> Análise de variância – Concentricidade/Coaxialidade.....	98
<b>Tabela 4.23:</b> Análise de variância – Rugosidade (eixo X).....	100
<b>Tabela 4.24:</b> Análise de variância – Rugosidade (eixo Y).....	101
<b>Tabela 4.25:</b> Análise de variância – Rugosidade (eixo Z).....	102
<b>Tabela 4.26:</b> Análise de variância – Tempo de impressão. ....	103
<b>Tabela 4.27:</b> Fatores e interações significantes na avaliação de desvios dimensionais, geométricos e rugosidade. Significante ( $\diamond$ ); Efeito negativo (-); Efeito positivo (+)..	104

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
1.1 Objetivos .....	6
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	6
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	6
1.2 Justificativa .....	6
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1 Manufatura Aditiva .....	7
2.1.1 <i>Terminologia e Princípios Básicos</i> .....	8
2.1.2 <i>Tecnologias de Impressão 3D</i> .....	9
2.1.3 <i>Efeitos e Aplicações da Impressão 3D</i> .....	16
2.1.4 <i>Conformidade dos Materiais</i> .....	19
2.2 Metrologia Dimensional .....	20
2.2.1 <i>Medição Tridimensional</i> .....	22
2.2.2 <i>Tolerância Dimensional e Geométrica</i> .....	30
2.2.3 <i>Rugosidade</i> .....	35
2.3 Planejamento de Experimentos .....	40
2.3.1 <i>Planejamento Fatorial</i> .....	42
2.3.2 <i>Planejamento Fatorial Fracionário</i> .....	45
2.4 Avaliação de Desempenho de Impressoras 3D .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>60</b>
3.1 Planejamento e Desenvolvimento da Peça Padrão .....	60
3.2 Equipamentos Utilizados .....	64
3.2.1 <i>Impressora 3D</i> .....	64
3.2.2 <i>Máquina de Medir por Coordenadas - MMC</i> .....	66
3.2.3 <i>Rugosímetro</i> .....	68
3.3 Análise dos Dados .....	68
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>70</b>
4.1 Desvio Dimensional .....	70
4.1.1 <i>Comprimento</i> .....	71
4.1.2 <i>Diâmetro</i> .....	80
4.2 Desvio Geométrico .....	82

4.2.1 Desvio de Forma.....	82
4.2.2 Desvio de Orientação.....	87
4.2.3 Desvio de Localização.....	97
4.3 Rugosidade.....	98
4.4 Tempo de Impressão.....	102
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde o princípio, o ser humano sempre buscou meios capazes de facilitar seu trabalho, reduzir o esforço físico, otimizar os processos, melhorar a qualidade dos produtos e aumentar a produtividade. Foi assim que o homem desenvolveu, por exemplo, as técnicas de talhamento, polimento, furação, forjamento, fundição etc. Conseqüentemente, com os avanços da humanidade, os processos de fabricação foram aperfeiçoados, com grandes progressos nas últimas décadas. Os processos de manufatura, por exemplo, passaram por muitas mudanças, com a busca contínua pela otimização, qualidade e confiabilidade dos produtos. Segundo Donatelli et al. (2005), a evolução tecnológica dos produtos tem gerado uma permanente redução das tolerâncias geométricas, acompanhada por uma diminuição da variabilidade nos desvios das peças fabricadas, bem como pela redução da incerteza com que pode ser realizada as medições.

Nesse contexto de evolução tecnológica, a Manufatura Aditiva – AM (*additive manufacturing*), também conhecida como impressão 3D, é uma das tecnologias que mais tem crescido atualmente. A AM possui vantagens quando comparada aos métodos tradicionais de fabricação, pois através da adição de material, existe a possibilidade de confeccionar peças com geometrias complexas, além de reduzir a perda de material (ZANETTI et al. 2016). Contudo, muitas das tecnologias de AM ainda precisam de ajustes para se conseguir fabricar uma peça dentro dos limites de tolerância aceitáveis, em casos que exigem, por exemplo, precisão dimensional e/ou geométrica, principalmente quando há intercambiabilidade de peças (possibilidade de montar um conjunto mecânico, sem ajuste posterior, de modo que o sistema cumpra a função para a qual foi projetada).

Partindo dessa explicação, nesse trabalho foi desenvolvido um método que consiste em analisar os fatores que podem interferir na precisão de fabricação de impressoras 3D, com tecnologia FDM, para avaliação metrológica através de um planejamento experimental. Foi utilizada uma peça de referência, de modo a responder se diante do crescimento da demanda e de suas aplicações, esse processo está de fato atendendo aos requisitos dimensionais, geométricos e perfil de rugosidade das peças fabricadas. Foi verificado ainda se o processo garante a confiabilidade do produto e quais os fatores/variáveis que interferem significativamente na fabricação, e conseqüentemente, na qualidade final da peça.

Ademais, foi verificado quais demandas podem ser atendidas, atualmente, por esse processo e qual a perspectiva para o futuro. O método proposto, bem como a peça de referência, foram avaliados com o intuito de responder se possuem os requisitos necessários para avaliação do processo e se podem ser replicados em outras tecnologias de AM.

Estudos recentes demonstraram que o planejamento fatorial é eficiente para avaliação de processos de fabricação, abrangendo tanto os métodos de fabricação tradicionais como a AM. Farshid e Muhammad (2017) investigaram o efeito de três fatores (tensão, capacitância e velocidade de rotação) em dois tipos de eletrodos, em um processo de usinagem por micro descargas elétricas (micro-EDM). Os autores aplicaram o planejamento fatorial completo  $3^3$ , utilizando a Análise de Variância – ANOVA (*Analysis of Variance*), e a Análise Multivariada da Variância – MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*) para análise dos dados e definição dos fatores significativos frente às respostas obtidas no experimento.

Durão et al. (2019) avaliaram seis fatores (largura da camada, temperatura de extrusão, altura da camada, velocidade de impressão, densidade de enchimento e número de contornos) com o intuito de definir um modelo ótimo de operação, utilizando a metodologia de superfície de resposta – RSM (*Response Surface Methodology*). Avaliaram a precisão dimensional, tempo de fabricação e consumo de material, com base em um planejamento fatorial fracionário  $2^{6-2}$ . Os autores utilizaram uma impressora 3D, modelo Cloner ST (resolução máxima de 0,05 mm) e polímero ABS (acrilonitrila butadieno estireno).

Alves et al. (2019) desenvolveram um planejamento fatorial fracionário  $2^{5-1}$  para análise da precisão de uma impressora 3D, modelo DaVinci 1.0 Pro, com tecnologia FDM. Foi utilizado o filamento ABS com diâmetro nominal de 1,75 mm. Os autores consideraram cinco fatores (velocidade de impressão, altura da camada, temperatura de extrusão, densidade de enchimento e quantidade de camadas) para análise dimensional e geométrica das peças fabricadas, utilizando um paquímetro analógico com resolução de 0,05 mm.

Piratelli et al. (2018), usaram uma impressora 3D, com tecnologia FDM, para realizar testes de compensação de circularidade de barras cilíndricas. As peças foram fabricadas para analisar o ângulo de inclinação, o diâmetro e a altura dos cilindros. Os autores utilizaram o polímero ABS e parametrizaram a velocidade de impressão em

60 mm/s. Os desvios de circularidade foram compensados no modelo CAD e a peça final teve redução nos desvios de circularidade.

Fernandes (2016) adotou um planejamento para avaliação de quatro fatores no processo de manufatura aditiva: densidade de enchimento, temperatura de extrusão, orientação das estruturas de enchimento e espessura da camada. Foram aplicados dois níveis para cada fator, exceto para a densidade de enchimento, que assumiu três níveis. O experimento foi realizado com 24 execuções e replicado três vezes, totalizando 72 execuções. Foram realizados ensaios de tração, impacto, compressão e absorção de água, utilizando uma impressora 3D Ultimaker 2, com tecnologia FDM, e material PLA – Ácido Polilático, ou *Polylactic Acid*.

Mahmood et al. (2016) investigaram os efeitos de treze fatores (tamanho do componente, local da impressão, temperatura da extrusora, orientação de impressão, velocidade de deslocamento, velocidade de extrusão, temperatura da plataforma, temperatura de descolamento, espessura da camada, densidade de preenchimento, número de contornos, padrão de preenchimento e espaçamento da camada de preenchimento), com três níveis cada. Através de uma matriz ortogonal, os autores avaliaram desvios dimensionais e geométricos em 27 peças, fabricadas em uma impressora 3D *Makerbot*, com tecnologia FDM, utilizando o filamento ABS. Os autores utilizaram uma MMC – Máquina de Medir por Coordenadas, ou *CMM – Coordinate Measuring Machine*, com precisão de menos de 2  $\mu\text{m}$  para medição das peças.

Griffiths et al. (2016) também utilizaram uma impressora *Makerbot* em um planejamento fatorial completo  $2^4$  para avaliação de desempenho da máquina. Foi utilizado o material PLA para fabricação das peças. Galantucci et al. (2015) realizaram um experimento fatorial completo  $2^3$  em dois modelos de impressora 3D (*Stratasys FDM 3000* e *Fab@Home Model 1*) para análise de desvios dimensionais. Os autores utilizaram o material ABS para impressão das peças.

Com base nessas observações, este trabalho busca subsídios dentro do contexto da manufatura aditiva, metrologia dimensional e planejamento experimental para avaliar a qualidade das peças fabricadas pelas tecnologias de AM. O planejamento, com base no método proposto, deve possibilitar uma avaliação metrológica das peças fabricadas, considerando os desvios dimensionais e geométricos, além da rugosidade superficial, de acordo com as normas e especificações técnicas vigentes.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo nesse trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação metrológica de impressoras 3D, com tecnologia FDM. O método proposto envolve a fabricação de uma peça padronizada para medição e análise dos desvios dimensionais, geométricos e rugosidade superficial.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Através da metodologia proposta neste trabalho, do planejamento experimental elaborado e da peça de referência impressa, deve ser possível:

- avaliar o efeito das variáveis de processamento como altura da camada, densidade de enchimento, temperatura de extrusão e velocidade de impressão, nos erros na fabricação;
- verificar aspectos relativos à aplicação de planejamento de experimentos na avaliação de máquinas de AM para determinação dos fatores significativos;
- investigar e comparar as geometrias e o projeto de peças modelo, ou padrão, para a realização de testes em máquinas de AM;
- qualificar a máquina utilizada e discutir a aplicação em máquinas com outra tecnologia.

## 1.2 Justificativa

Em processos de manufatura, a necessidade de se obter peças com elevada precisão dimensional e geométrica é cada vez mais importante. A confiabilidade e a qualidade são aspectos altamente exigidos, seja qual for o método de fabricação, e estão relacionadas aos erros causados pelo processo. Portanto, a metodologia para avaliação metrológica do processo FDM é muito importante pois pode ser utilizada para avaliar a precisão e repetitividade das máquinas de fabricação aditiva, bem como verificar se atendem aos requisitos dimensionais e geométricos exigidos das peças a serem fabricadas. Ademais, conclusões podem ser extraídas acerca da crescente demanda e analisar se, atualmente ou em um futuro breve, o processo de fabricação com filamento fundido pode substituir em partes outros processos de manufatura tradicionais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo são apresentados aspectos teóricos e definições sobre a manufatura aditiva. São abordados conceitos técnicos de impressoras 3D, os diferentes tipos de tecnologia e equipamentos disponíveis no mercado, bem como as principais aplicações. Partindo para a importância do controle metrológico dos processos industriais, uma abordagem é feita sobre MMC e rugosímetro. Ademais, são vistos conceitos sobre erro e incerteza de medição, sistemas e estratégias de medição. São apresentadas algumas técnicas de planejamento experimental, abordando tópicos sobre inferência estatística, planejamento fatorial e análise de variância. Por fim é feita uma revisão sobre os avanços e métodos que têm sido aplicados para avaliação de desempenho de máquinas e tecnologias de fabricação aditiva, bem como a descrição dos padrões utilizados.

### 2.1 Manufatura Aditiva

Segundo Volpato et al. (2017), manufatura aditiva ou “impressão 3D” é o processo de criação de objetos tridimensionais sólidos de praticamente qualquer forma geométrica baseada em um modelo digital. A impressão 3D é baseada no conceito de construção de um objeto por camadas sucessivamente aplicadas que exibem os contornos do modelo. Desse modo, a manufatura aditiva é exatamente o oposto dos métodos tradicionais de produção e processamentos mecânicos, como fresagem ou corte, na qual o produto é formado pela remoção de material, ou seja, através da “produção subtrativa”.

Embora a tecnologia de impressão 3D tenha aparecido nos anos 80 do século XX, esses equipamentos foram amplamente comercializados apenas no início de 2010. A primeira impressora 3D foi criada por Charles Hull, um dos fundadores da *3D Systems Corporation*. No início do século XXI, houve um aumento significativo nas vendas, o que levou a uma queda acentuada no custo dos dispositivos. As tecnologias de impressão 3D são usadas para prototipagem e produção em arquitetura, construção, design industrial, automotivo, aeroespacial, engenharia e indústrias médicas, bioengenharia (para criar tecidos artificiais), produção de roupas e calçados, joias e muitas outras áreas (VOLPATO et al. 2017).

### 2.1.1 Terminologia e Princípios Básicos

Conforme a NBR 52900 (2018), o termo “manufatura aditiva” refere-se à tecnologia para criar objetos aplicando camadas sucessivas de material. Modelos feitos pelo método aditivo podem ser usados em qualquer estágio de produção, tanto para a fabricação de protótipos (prototipagem rápida) quanto para os próprios produtos acabados (produção rápida). A Manufatura Aditiva – AM pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D.

Para Dilberoglu et al. (2017), a facilidade de automatização é uma característica importante da AM, pois minimiza-se consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. A necessidade do operador ocorre, praticamente, na preparação do equipamento (definindo os parâmetros da máquina e com a alimentação de materiais) e ao final do processo (removendo e efetuando a limpeza da peça).

Segundo Volpato et al. (2017), objetos fabricados em todos os processos de AM devem ser representados de forma tridimensional (3D). Nas tecnologias atuais, o formato *STereoLithography (STL)* é o mais utilizado, porém existem outras representações que podem ser empregadas (*common layer interface – CLI*, *additive manufacturing format – AMF* e outros). As geometrias são geradas, principalmente, a partir da modelagem em sistemas CAD (*computer-aided design*) 3D, mas também é possível obtê-las a partir de scanners 3D, microtomografia, ultrassonografia 3D, fotogrametria, ressonância magnética, tomografia computadorizada etc. Nesses casos, para corrigir falhas em superfícies e possibilitar o uso nas tecnologias de AM, os modelos 3D resultantes são retrabalhados nos sistemas CAD 3D. Entretanto, investe-se muito tempo na correção dos arquivos no formato STL, e nem todos os sistemas de CAD 3D têm as ferramentas adequadas para agilizar esse processo, sendo necessárias ferramentas computacionais específicas para esse fim.

Desse modo, durante a impressão, a impressora lê o arquivo impresso em 3D (geralmente no formato STL) contendo os dados de um modelo tridimensional e aplica sucessivas camadas de líquido, pó, papel ou material em folha, construindo um modelo tridimensional a partir de uma série de seções transversais. Essas camadas, que correspondem a seções transversais virtuais no modelo CAD, são mescladas ou fundidas para criar um objeto de uma determinada forma. A principal vantagem deste

método é a capacidade de criar formas geométricas de complexidade quase ilimitada (VOLPATO et al., 2017).

A resolução da impressora significa a espessura das camadas aplicadas (eixo Z) e a precisão do posicionamento da cabeça de impressão no plano horizontal (ao longo dos eixos X e Y). A resolução é medida em DPI (pontos por polegada) ou micrômetros. A espessura típica da camada é de 100  $\mu\text{m}$  (250 DPI), embora algumas impressoras, como a *Objet Connex (Stratasys)* e a *3D ProJet (3D Systems)*, sejam capazes de imprimir em camadas de espessura de 16  $\mu\text{m}$  (1600 DPI).

Segundo Cordeiro (2014), construir um modelo usando tecnologia moderna leva de várias horas a vários dias, dependendo do método usado, bem como do tamanho e complexidade do modelo. Os sistemas aditivos industriais podem, como regra, reduzir o tempo para várias horas, mas tudo depende do tipo de instalação, bem como do tamanho e do número de modelos fabricados simultaneamente. Os métodos tradicionais de fabricação, como moldagem por injeção, podem ser mais baratos para produzir grandes quantidades de produtos poliméricos, mas as tecnologias aditivas têm vantagens na produção em pequena escala, permitindo maior taxa de produção e flexibilidade de design. Além disso, as impressoras 3D desktop permitem que designers e desenvolvedores criem modelos conceituais e protótipos, sem sair do escritório.

### **2.1.2 Tecnologias de Impressão 3D**

Desde o final dos anos 70, vários métodos de impressão 3D surgiram. As primeiras impressoras foram distinguidas pelo tamanho grande, alto custo e recursos muito limitados. Uma ampla gama de métodos de manufatura aditiva está atualmente disponível. As principais diferenças estão no método de aplicação de camadas e consumíveis usados.

Segundo Volpato et al. (2017), alguns métodos são baseados em materiais de fusão para criar camadas: isso inclui sinterização seletiva a laser (SLS), fusão seletiva a laser (SLM), sinterização direta de metais (DMLS) e modelagem por fusão e deposição (FDM). Outro método desenvolvido foi a produção de modelos sólidos através da polimerização de materiais líquidos, conhecida como estereolitografia (SLA). No caso de materiais laminados (LOM), camadas finas de material são cortadas no contorno desejado, seguido por junção. Como materiais para LOM, papel, polímeros e metais podem ser usados. Cada um desses métodos tem suas vantagens

e desvantagens e, portanto, algumas empresas oferecem a escolha de consumíveis para a construção de um modelo - polímero ou pó. Impressoras que fabricam modelos metálicos de alta qualidade são bastante caras, mas dispositivos mais baratos podem ser usados para produzir moldes com subsequente fundição de peças metálicas. Na Tabela 2.1 são apresentados os principais métodos de fabricação aditiva:

**Tabela 2.1:** Principais tecnologias de impressão 3D  
Fonte: Volpato et al., 2017

Método	Tecnologia	Materiais Utilizados
Extrusão	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Termoplásticos (Polilactídeo - PLA, Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS etc.)
Pó	Sinterização direta a laser de metais (DMLS)	Praticamente todas as ligas metálicas
	Fusão de feixe de elétrons (EBM)	Ligas de titânio
	Derretimento Seletivo a Laser (SLM)	Ligas de titânio, ligas de cromo-cobalto, aço inoxidável, alumínio
	Sinterização seletiva por calor (SHS)	Termoplásticos em pó
	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Termoplásticos, pós metálicos, pós cerâmicos
Jet	Impressão 3D a jato de tinta (3DP)	Gesso, plásticos, pós metálicos, misturas de areia
Laminação	Produção de objetos pelo método de laminação (LOM)	Papel, folha de metal, filme plástico
Polimerização	Estereolitografia (SLA)	Fotopolímeros

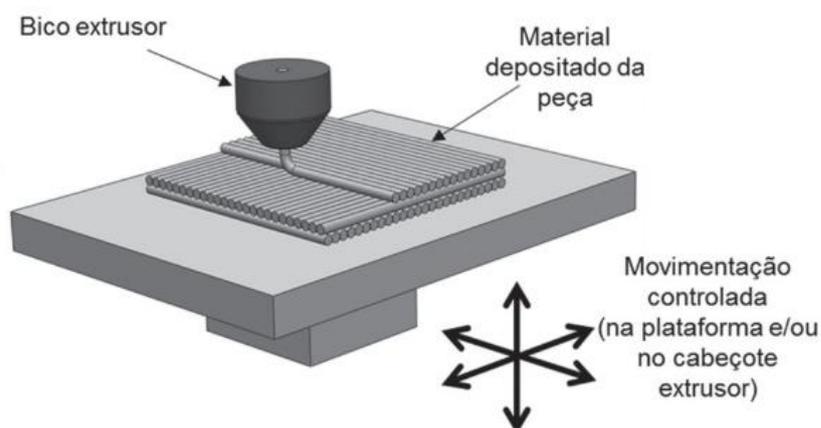
### 2.1.2.1 Extrusão

A modelagem por deposição de material fundido (FDM) foi desenvolvida por Scott Trump no final da década de 1980 e tornou-se comercialmente disponível em 1990 pela *Stratasys*, cujos fundadores incluem o próprio Trump. Devido à expiração da patente, há uma grande comunidade de desenvolvedores de impressoras 3D de código aberto, bem como organizações comerciais que usam essa tecnologia. Como resultado, o custo dos dispositivos diminuiu em duas ordens de grandeza desde a invenção da tecnologia.

Essa tecnologia cresceu bastante nos últimos anos através do projeto aberto, denominado *RepRap*. As impressoras 3D desenvolvidas nesse projeto têm como fundamento a fundição plástica e deposição em camadas. O funcionamento das

impressoras 3D é semelhante a uma máquina com comando numérico computadorizado (CNC) de usinagem, exceto pelo fato de que a impressora 3D é um extrusor plástico, que deposita material, enquanto no processo de usinagem a peça é esculpida a partir de um bloco. A impressora é então composta por uma mesa que desliza sobre um eixo Y, e um bico extrusor que desliza sobre um eixo X e pode também ter sua altura regulada ao longo de um terceiro eixo Z. Esses eixos são movimentados por motores de passo, que são controlados por um cilindro eletrônico integrado, assim como a temperatura da mesa e do bico (AZEVEDO, 2013).

Para Volpato et al. (2017), o processo de impressão por fundição envolve a criação de camadas devido à extrusão de um material de fixação rápida na forma de microgotas ou jatos finos, conforme detalhado na Figura 2.1. O consumível é fornecido na forma de bobinas, das quais o material é alimentado em uma cabeça de impressão (bico extrusor). A extrusora aquece o material até a temperatura de fusão seguida pela extrusão da massa fundida através de um bocal. A própria extrusora é acionada por motores de passo ou servomotores que garantem o posicionamento da cabeça de impressão em três planos. O movimento da extrusora é controlado pelo software de produção (CAM) ligado ao microcontrolador.



**Figura 2.1:** Princípio do processo FDM  
Fonte: Volpato et al. (2017)

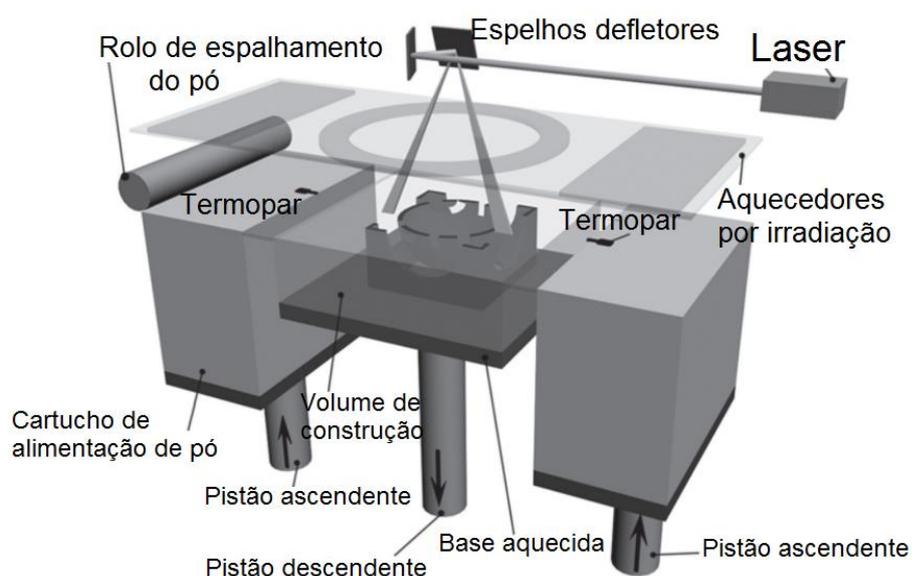
Vários polímeros são usados como consumíveis, incluindo acrilonitrila butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polilactídeo (PLA), polietileno de alta pressão (HDPE), policarbonato e misturas plásticas ABS na forma de um enchimento feito de plástico puro. Em comunidades de impressão 3D, há vários projetos voltados para a reciclagem de plástico usado em materiais de impressão 3D. Os projetos são

baseados no desenvolvimento de consumíveis com a ajuda de fragmentadores e dispositivos de refusão.

No entanto, segundo Volpato et al. (2017), a tecnologia FDM possui certas limitações na complexidade das formas geométricas criadas. A complexidade e o tamanho do objeto estão relacionados diretamente ao tempo de impressão, ou seja, quanto maior, mais demorado é o processo. Peças fabricadas através do processo FDM podem apresentar linhas de camadas, sendo necessário um acabamento na peça após a impressão. Esse tratamento pode proporcionar uma superfície uniforme ao objeto fabricado.

### 2.1.2.2 Pó

Segundo Volpato et al. (2017), um dos métodos de fabricação aditiva é a sinterização seletiva de materiais em pó. Conforme ilustrado na Figura 2.2, as camadas do modelo são desenhadas (sinterizadas) em uma fina camada de material em pó, em um sistema composto por uma fonte geradora de laser, que penetra na câmara de processamento. A varredura ocorre sobre o leito em que foi depositado previamente o material, formando uma fina camada que é preaquecida por uma fonte irradiadora de calor. Em seguida, a plataforma de trabalho é rebaixada e uma nova camada de pó é aplicada. O processo é repetido para obter um modelo sólido. O material não gasto permanece na câmara de trabalho e serve para suportar camadas salientes, sem requerer a criação de suportes especiais.



**Figura 2.2:** Princípio do processo de fusão de leito de pó não metálico  
Fonte: Volpato et al. (2017)

Cordeiro (2014) afirmou que os métodos mais comuns de fabricação em leito de pó são baseados em sinterização a laser: sinterização seletiva a laser (SLS) para trabalhar com metais e polímeros (por exemplo, poliamida (PA), poliamida reforçada com fibra de vidro (PA-GF), fibra de vidro (GF), poliestireno (PS), alumínio, poliamida, fibra de carbono reforçada (Carbonmide) e sinterização direta a laser de metais (DMLS). O método de sinterização seletiva a laser (SLS) foi desenvolvido e patenteado por Karl Deckard e Joseph Beaman, da Universidade do Texas, em Austin, em meados dos anos 80, sob os auspícios da Agência de Pesquisa Avançada de Ciência de Defesa dos EUA (DARPA). É uma técnica de impressão 3D que usa lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência para fundir partículas.

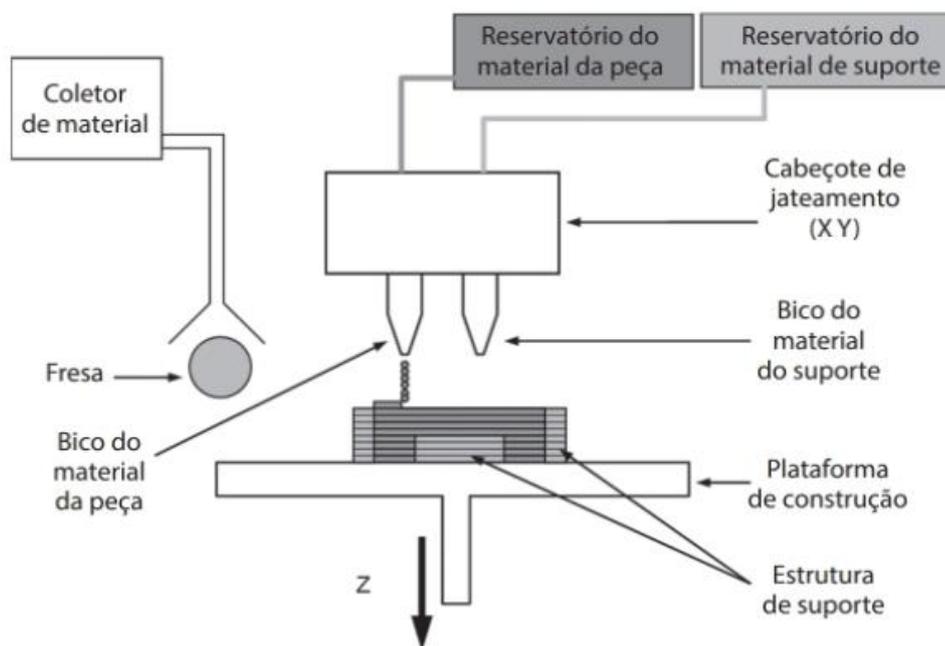
Já a fusão a laser seletiva (SLM) é diferente porque funde o pó nos pontos de contato com um poderoso feixe de laser, permitindo criar materiais de alta densidade que são semelhantes em termos de características mecânicas aos produtos feitos usando métodos tradicionais. A fusão por feixe de elétrons (EBM) é um método similar de fabricação aditiva de peças de metal, mas usando feixes de elétrons em vez de lasers. O processo EBM baseia-se na fusão de pós metálicos, camada por camada, numa câmara de vácuo (VOLPATO et al. 2017).

Há ainda um método de impressão a jato de tinta 3D, no qual um material aglutinante é aplicado a finas camadas de pó (gesso ou plástico) de acordo com os contornos das camadas sucessivas do modelo digital. O processo é repetido até que o modelo seja finalizado. A tecnologia fornece uma ampla gama de aplicações, como por exemplo a criação de modelos com cores. O design dos modelos pode ser melhorado por impregnação subsequente com cera ou polímeros.

### 2.1.2.3 *Jet*

Volpato et al. (2017) afirmaram que a tecnologia multi jato de tinta combina os recursos dos métodos de impressão 3D, como a impressão a jato de tinta tridimensional (3DP), modelagem por fusão e deposição (FDM) e estereolitografia (SLA). As camadas são construídas usando uma cabeça de impressão especial, equipada com uma variedade de bicos. O número de bicos em modelos existentes de impressoras varia de 96 a 448. Conforme mostra a Figura 2.3, a impressão é feita com termoplásticos, ceras e resinas fotopoliméricas. Nos dois primeiros casos, os materiais endurecem devido ao resfriamento gradual. No caso da impressão com fotopolímeros,

cada camada aplicada é tratada com um emissor UV (radiação ultravioleta) para polimerização (solidificação).

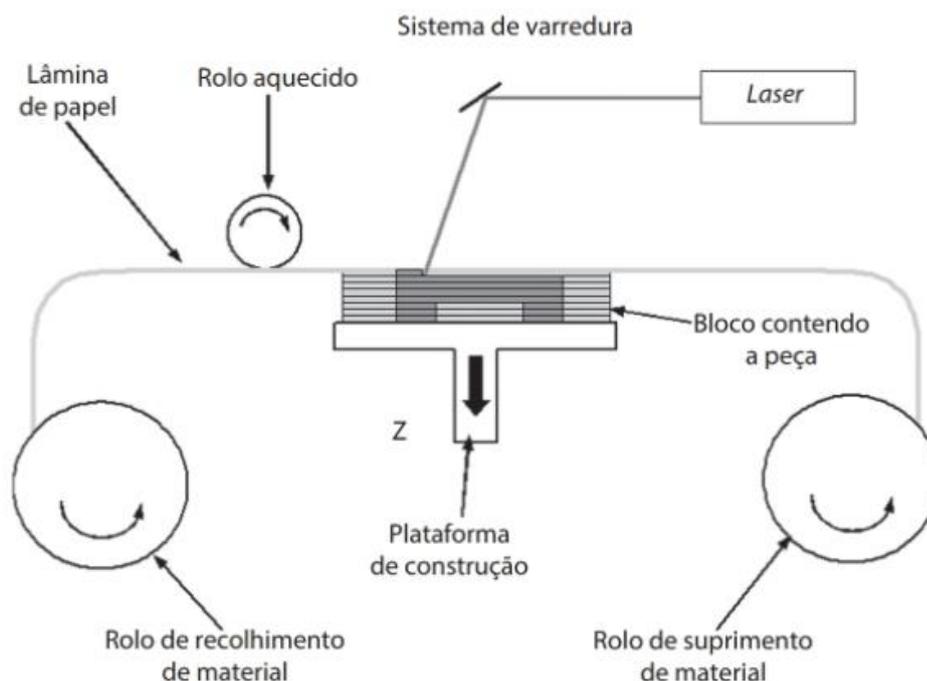


**Figura 2.3:** Princípio do processo JET  
Fonte: Volpato et al. (2017)

A tecnologia permite atingir taxas de precisão extremamente altas, comparáveis à estereolitografia a laser (SLA). A espessura mínima da camada aplicada pode ser de 16 microns e a resolução de impressão no plano horizontal alcança 750x750x1600 DPI.

#### 2.1.2.4 Laminação

Para Volpato et al. (2017), a fabricação de objetos laminados (LOM) é um sistema de prototipagem rápida que funciona através da fusão ou laminação de camadas de plástico ou papel usando calor e pressão. Conforme ilustrado na Figura 2.4, uma lâmina ou laser controlado por computador corta o objeto na forma desejada. Quando cada camada impressa é concluída, a plataforma desce aproximadamente 1/16 de polegada, pronta para a próxima camada. A impressora puxa uma nova folha de material pelo substrato, onde é colada por um rolo aquecido. Esse processo básico continua repetidamente até que a peça 3D seja concluída.

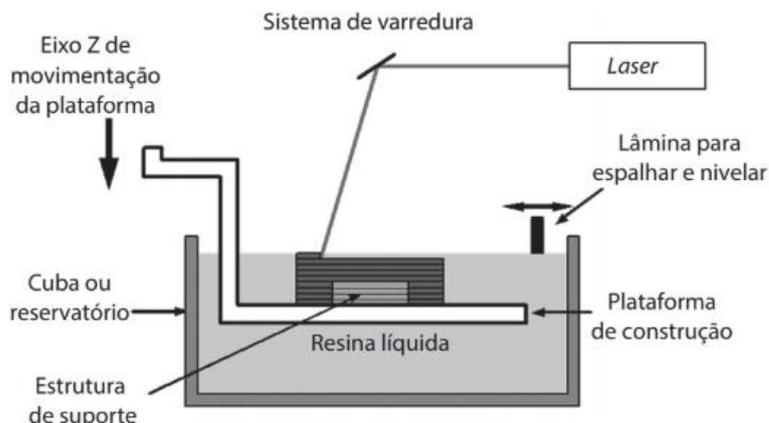


**Figura 2.4:** Princípio do processo LOM  
Fonte: Volpato et al. (2017)

#### 2.1.2.5 Fotopolimerização

A tecnologia de estereolitografia (SLA) foi patenteada por Charles Hall em 1986, sendo utilizada principalmente para criar objetos sólidos a partir de materiais líquidos. Este é um processo de impressão 3D que é popular por seus detalhes e exatidão, possibilitando a produção de protótipos exclusivos (CORDEIRO, 2014).

O procedimento é realizado com a conversão dos fotopolímeros líquidos (um tipo especial de plástico), camada por camada, em elementos 3D sólidos. O plástico é aquecido, transformando-se em semilíquido, e então endurece ao contato. Cada uma das camadas é construída através de um laser ultravioleta, direcionado por espelhos de varredura X e Y. Uma lâmina de revestimento se move, antes de cada ciclo de impressão, pela superfície para garantir que cada camada fina de resina se espalhe de maneira uniforme pelo objeto, com o ciclo de impressão criando objetos 3D de baixo para cima, conforme mostra a Figura 2.5. Após a conclusão, o objeto fabricado é retirado da impressora e recebe um banho químico para remover o excesso de resina que, normalmente, fica na peça (VOLPATO et al. 2017).



**Figura 2.5:** Princípio do processo SL  
 Fonte: Volpato et al. (2017)

### 2.1.3 Efeitos e Aplicações da Impressão 3D

A impressão tridimensional permite equalizar o custo de produção, o que pode se tornar uma ameaça para algumas economias. O efeito da impressão 3D pode ser semelhante à implementação de uma manufatura. Na década de 1750, ninguém poderia prever as consequências de uma máquina a vapor, e os transistores da década de 1950 pareciam uma inovação curiosa. Mas a tecnologia continua a evoluir e é provável que tenha impacto em todos os setores científicos e industriais com os quais entra em contato (AZEVEDO, 2013).

Para Lieneke (2016), melhorar a tecnologia de produção aditiva leva à sua distribuição em vários campos da ciência e da indústria. A produção de peças anteriormente disponíveis apenas através de usinagem é agora possível através de métodos aditivos, e a um preço mais favorável. As aplicações incluem prototipagem, arquitetura, educação, cartografia, saúde, varejo etc. A produção de aditivos exige flexibilidade das empresas de manufatura e melhoria contínua das tecnologias disponíveis para manter a competitividade. Defensores da manufatura aditiva preveem um aumento na oposição à impressão 3D e à globalização, já que a produção doméstica irá barrar o comércio de bens entre consumidores e grandes fabricantes. Entretanto, a integração de tecnologias aditivas na produção comercial deve servir como um complemento aos métodos tradicionais de subtração, em vez de uma substituição completa do último.

Em 2012, a empresa americana Defense Distributed publicou planos para criar um design de armas plásticas funcionais, disponível para download e reprodução por qualquer usuário com acesso a uma impressora 3D. Entretanto, pouco depois que a

*Defense Distributed* criou os primeiros desenhos de trabalho para a produção de armas plásticas em maio de 2013, o Departamento de Estado dos EUA exigiu que as instruções fossem removidas do site da empresa. A distribuição de desenhos feita pela empresa *Defense Distressed* alimentou uma discussão sobre o possível efeito dos dispositivos de impressão 3D e processamento digital na eficácia do controle do tráfico de armas. No entanto, a luta contra a proliferação de modelos de armas digitais enfrentará inevitavelmente os mesmos problemas que as tentativas de impedir o tráfico de conteúdo pirateado (LIENEKE, 2016).

### 2.1.3.1 Impressoras 3D para Uso Doméstico

Segundo Villamil et al. (2018) O desenvolvimento de impressoras 3D para uso doméstico está sendo realizado por um número crescente de empresas e entusiastas. A maior parte do trabalho é feita por amadores para as necessidades próprias e públicas, principalmente com a ajuda da comunidade acadêmica. Atualmente, a impressão 3D doméstica atrai principalmente a atenção de entusiastas e amadores, enquanto o uso prático é bastante limitado. A impressão 3D também é usada em medicina veterinária e zoologia amadora. O projeto aberto Fab@Home é voltado para o desenvolvimento de impressoras domésticas de uso geral. Os dispositivos são testados em condições de pesquisa para o uso das mais recentes tecnologias de impressão 3D para a produção de compostos químicos. Entretanto, o projeto mais antigo e duradouro na categoria de impressoras 3D para desktop é o RepRap. O projeto RepRap tem como objetivo criar impressoras 3D de fonte aberta e código aberto (FOSH), fornecidas sob a GNU (General Public License). Os dispositivos RepRap são capazes de imprimir componentes de plástico de seu próprio projeto, que podem ser usados para construir clones do dispositivo original.

A ampla disponibilidade de designs de código aberto apenas contribui para o surgimento de opções. Por outro lado, há uma variação significativa no nível de qualidade e complexidade dos próprios projetos e dos dispositivos fabricados com base neles. O rápido desenvolvimento de impressoras 3D de código aberto leva a um aumento na popularidade e na educação de portais públicos e comerciais, oferecendo vários designs para impressão 3D. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia contribui para o desenvolvimento sustentável das economias locais devido à possibilidade de usar materiais disponíveis localmente para a produção de impressoras. O custo das impressoras 3D tem decaído a um ritmo significativo nos

últimos anos. Impressoras que custavam até R\$ 80.000, atualmente custam R\$ 4.000 ou menos. Muitas empresas e desenvolvedores individuais já oferecem kits para a montagem do RepRap por menos de R\$ 2000. À medida que os custos caem, as impressoras 3D estão se tornando mais atraentes para a produção doméstica. Além disso, o uso doméstico da tecnologia de impressão 3D pode reduzir os danos ambientais causados pela indústria, reduzindo a quantidade de materiais consumíveis e os custos de energia e combustível para o transporte de materiais e mercadorias.

### *2.1.3.2 Aplicação Industrial*

Segundo Villamil et al. (2018), impressoras 3D industriais têm sido usadas para prototipagem rápida e pesquisa desde o início dos anos 80. Como regra geral, são instalações bastante grandes que usam metais em pó, misturas de areia, plásticos e papel. Essas impressoras são frequentemente usadas por universidades e empresas comerciais. Os avanços na prototipagem rápida levaram à criação de materiais adequados para a fabricação de produtos, o que contribuiu para o desenvolvimento da produção 3D de produtos acabados como uma alternativa aos métodos tradicionais, sendo uma das vantagens da prototipagem rápida o custo relativamente baixo de fabricar pequenos lotes. Contudo, a prototipagem rápida ainda é um método relativamente novo, cujas capacidades ainda não foram totalmente exploradas. Muitos especialistas estão inclinados a considerar a prototipagem rápida como uma tecnologia de um nível qualitativamente novo. A sinterização seletiva a laser (SLS) e a sinterização direta de metais (DMLS) estão entre as áreas mais promissoras de prototipagem rápida.

### *2.1.3.3 Outras Aplicações e Pesquisas de Impressão 3D*

Atualmente, pesquisas estão sendo conduzidas no campo da impressão 3D por empresas de biotecnologia e instituições acadêmicas. Os estudos visam estudar a possibilidade de usar a impressão jato de tinta na engenharia de tecidos para criar órgãos artificiais. A tecnologia é baseada na aplicação de camadas de células vivas em um substrato de gel, com gradual acúmulo de camada por camada para criar estruturas tridimensionais, incluindo sistemas vasculares.

O primeiro sistema de produção para impressão 3D de tecidos baseado na tecnologia de bioimpressão NovoGen foi introduzido em 2009. Vários termos são usados para descrever esta área de pesquisa: impressão de órgãos, bioprinting,

engenharia de tecidos de computador etc. Uma das pioneiras da impressão 3D, a empresa de pesquisa Organovo, realiza pesquisas de laboratório e desenvolve a produção de amostras funcionais de tecido humano tridimensional para uso em pesquisas médicas e terapêuticas. Para bioprinting, a empresa usa a impressora NovoGen MMX 3D. A Organovo acredita que a bioimpressão deve acelerar o teste de novos medicamentos antes dos ensaios clínicos, o que economizará tempo e dinheiro investidos no desenvolvimento de medicamentos. A longo prazo, a Organovo espera adaptar a tecnologia de bioprinting para criar enxertos e usar em cirurgia. Outras aplicações com impressoras 3D incluem:

- **Impressão 3D de implantes e dispositivos médicos:**

A impressão 3D é usada para criar implantes e dispositivos usados na medicina. Operações bem-sucedidas incluem exemplos como implantes pélvicos e maxilares de titânio, além de talas traqueais plásticas. Em março de 2014, cirurgiões de Swansea usaram a impressão 3D para reconstruir o rosto de um motociclista que ficou gravemente ferido em um acidente.

- **Serviços de impressão 3D**

Algumas empresas oferecem serviços de impressão 3D online que estão disponíveis para clientes individuais e empresas industriais. O cliente precisa apenas efetuar o upload do design 3D no site, para que o modelo seja impresso usando as instalações do prestador de serviços. Após a fabricação, o produto é enviado ao destinatário (cliente).

#### **2.1.4 Conformidade dos Materiais**

Para Zanetti (2016), produzir componentes técnicos de grande complexidade e com elevado número de especificações exige meios de controle que permitam realizar a avaliação da conformidade. Neste contexto de evolução da manufatura aditiva, a metrologia revela-se um importante recurso para apoio aos processos de inovação e desenvolvimento, permitindo acompanhar o progresso tecnológico.

A confiabilidade do processo produtivo é muito importante na indústria. Portanto, deve-se possuir meios de garantir a conformidade dos componentes técnicos, que exige recursos cada vez mais sofisticados da metrologia. As MMCs (máquina de medir por coordenadas) podem ser utilizadas de acordo com a necessidade de garantir conformidade das especificações dimensionais e geométricas das peças fabricadas, pois têm capacidade de gerar um grande volume

de dados, promovendo controles rápidos e facilitando a interação com o processo produtivo. Nesse sentido, a metrologia tridimensional entra como grande aliada para que os processos de manufatura aditiva possam ser devidamente avaliados, a fim de se obter resultados que possam ser utilizados para avaliar a qualidade das peças fabricadas.

## **2.2 Metrologia Dimensional**

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM (2012), metrologia é a ciência da medição e suas aplicações, englobando todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação. Segundo Lira (2014), a metrologia lida com a medição de quantidades físicas que caracterizam todos os tipos de objetos, processos ou fenômenos materiais. Medir é comparar duas grandezas de mesma espécie. Assim, pode-se por exemplo conhecer o comprimento de uma barra comparando-a com um comprimento conhecido, tomado como padrão. Medida, por sua vez, pode ser definida como a execução de atividades planejadas para uma declaração quantitativa sobre um mensurando em comparação com uma unidade.

Para Albertazzi (2018), o objetivo de uma medição é obter um resultado como uma declaração confiável sobre um tamanho desconhecido de um objeto. As atividades de medição são predominantemente práticas (experimentais), mas incluem também considerações teóricas e cálculos. Desse modo, há uma diferença entre medir e medida. Medir é o procedimento (centímetro, metro, quilômetro ou até mesmo um objeto qualquer) que se usa para determinar uma grandeza física, que é uma grandeza a ser medida, ou seja, é determinar o valor, por comparação, a uma unidade estabelecida como padrão. Medida é o valor obtido no instante da leitura, por exemplo: 30 centímetros, 2 metros, 3 quilômetros etc.

No Brasil, o sistema adotado pelo governo, desde 1873, é o métrico, isto é, que tem por base o metro. Criaram-se, em seguida, os seus submúltiplos para medidas pequenas e os múltiplos para medidas maiores. Devido ao avanço da mecânica, o milímetro tornou-se uma medida grande, sendo necessária sua divisão em décimos, centésimos e milésimos. Contudo, embora o sistema métrico seja oficial no território brasileiro, inúmeras organizações estrangeiras adotam o sistema inglês. Quando se torna necessário adaptar determinada peça de uma procedência a outra diversa, é necessário converter a unidade de medida (SANTOS, 2015).

De acordo com o VIM (2012), a resolução é a menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente. Para Albertazzi (2018), cada instrumento utilizado na metrologia possui resolução e exatidão. A resolução é a menor variação indicada por um instrumento. As trenas, por exemplo, podem indicar medidas em até décimos de cm. Os micrômetros podem indicar medidas em até milésimos de mm. A exatidão é o grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro, de modo que a leitura pode ter maior ou menor grau de exatidão. A exatidão do instrumento é a aptidão para dar respostas próximas do valor verdadeiro, ou seja, é um conceito qualitativo. Desse modo, pode-se dizer que a qualidade principal de um instrumento de medição é a de medir, com o menor erro possível. Para garantir isso, existem três operações básicas de qualificação de um instrumento, que são:

- **Calibração:** é um procedimento no qual controla-se as condições e verifica se a medida obtida pelo instrumento é a mesma de um padrão conhecido. Para isso, deve-se utilizar procedimentos adequados, recomendados por normas;
- **Ajustagem:** é um procedimento de acerto da estrutura dos elementos de um instrumento, para que ele desempenhe sua função;
- **Regulagem:** é uma operação executada usando somente os recursos disponíveis no próprio instrumento. No micrômetro, por exemplo, um dos processos de regulagem é o de zerar a escala da bainha.

Os certificados de calibração são emitidos somente por laboratórios credenciados pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), que através da calibração, pode indicar correções nas leituras, que as medidas podem ou não ser feitas a determinadas temperaturas. Todos os resultados da calibração são registrados em um documento (certificado ou relatório de calibração). Existem ainda normas de calibração e a rastreabilidade, que servem para garantir a qualidade dessas calibrações. O ideal é que essas normas sejam globais, pois há a vantagem de se unificar os critérios, padrões etc. No Brasil, as normas da série NBR ISO 9000 dão as diretrizes e os padrões para se atingir uma qualidade adequada. Elas abrangem todas as etapas, desde o marketing, a pesquisa de mercado, a engenharia de projeto, a produção, a manutenção etc.

Diante do avanço tecnológico e da importância da metrologia em manter a confiabilidade dos processos, a automação de máquinas operatrizes criou a necessidade de um meio de medição mais rápido e flexível. Este requisito resultou em

uma nova indústria de máquinas de medição tridimensionais (CONEJERO, 2005). Em tempos mais recentes, a ênfase no Controle Estatístico de Processo (CEP) para melhoria da qualidade acelerou a demanda por medições mais rápidas e mais precisas. Nesse contexto, as máquinas de medição por coordenadas (MMCs) tornaram-se eficientes em atender a essas demandas crescentes.

### 2.2.1 Medição Tridimensional

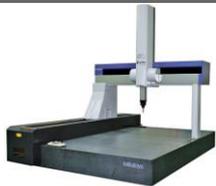
Segundo Hocken (2012), para se medir uma peça com diferentes geometrias são necessários vários instrumentos: paquímetro, micrômetro, blocos-padrão etc. Porém, em muitos casos, a utilização de uma máquina tridimensional é a melhor maneira de realizar medições de uma peça com várias geometrias. Com uma MMC é possível obter alturas, diâmetros, distâncias entre os planos, ângulos, concentricidade, alinhamento etc. Desse modo, a máquina tridimensional dispensa o uso de diversos instrumentos, além dos erros normais do processo que se acumulam para cada instrumento de medição. Na metrologia convencional, os elementos geométricos são em sua maioria medidos independentemente uns dos outros, em diferentes instrumentos de medição, com diferentes configurações e com diferentes sistemas de referência. Já na metrologia coordenada, os elementos geométricos são comparados aos modelos matemáticos numéricos. Uma comparação entre metrologia convencional e metrologia por coordenadas é apresentada na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Comparação entre medição convencional e por coordenadas.  
Fonte: Adaptado de Hocken, 2012.

Metrologia Convencional	Metrologia por Coordenadas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alinhamento manual e demorado do corpo de prova;</li> <li>▪ Instrumentos de medição de único propósito, dificultando a adaptação a mudanças nas tarefas de medição;</li> <li>▪ Comparação de medições com medidas de material, ou seja, blocos de calibre ou padrões cinemáticos;</li> <li>▪ Determinação separada de tamanho, forma, localização e orientação com diferentes máquinas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alinhamento do corpo de prova não é necessário;</li> <li>▪ Adaptação simples às tarefas de medição por software;</li> <li>▪ Comparação de medições com modelos matemáticos ou numéricos;</li> <li>▪ Determinação do tamanho, forma, localização e orientação em uma configuração usando um sistema de referência.</li> </ul>

Portanto, é frequente a utilização de MMCs para analisar de forma detalhada a complexidade da geometria dos componentes técnicos produzidos, o que implica a análise de grande quantidade de dados que distinguem a característica dimensional ou geométrica de um componente. A MMC pode ser controlada por um computador ou um operador e consiste em 3 eixos (X, Y e Z), que pode ser mecânico, óptico ou laser. Existem quatro tipos de MMCs: Ponte, Cantilever, Braço Articulado e Pórtico. A Tabela 2.3 ilustra cada uma delas com suas principais características.

**Tabela 2.3:** Tipos de MMCs e suas principais características.  
Fonte: Mitutoyo.

Tipo de MMC		Características
	Ponte ( <i>Bridge</i> )	Precisão alta Flexibilidade moderada Para componentes de tamanho médio
	Cantilever ( <i>Cantilever</i> )	Precisão muito alta Flexibilidade baixa Para componentes de tamanho pequeno
	Braço Horizontal ( <i>Horizontal Arm</i> )	Precisão baixa Flexibilidade alta Para componentes muito grandes
	Pórtico ( <i>Gantry</i> )	Precisão alta Flexibilidade moderada Para componentes grandes

Segundo Hocken (2012), as medições em MMCs são realizadas com apalpadores (*probes*) que podem ser: sonda de acionamento por toque, sondas de medição de deslocamento e sondas de proximidade (sem contato). Ou seja, o apalpador pode ser mecânico, óptico ou laser. Os apalpadores são transdutores que convertem medições físicas em sinais elétricos usando vários sistemas de medição na estrutura da sonda. A sonda de acionamento por toque é mais comum. Como o nome sugere, o apalpador literalmente toca a superfície da peça. Após o contato, um sinal é enviado com as coordenadas do ponto para a MMC. A sonda é então movida

para o próximo local, onde o processo é repetido. A sonda de medição de deslocamento (varredura) também é básica. À medida que a sonda passa pela superfície do objeto, ela transmite um fluxo contínuo de informações ao sistema de medição. A sonda de contato de varredura pode usar um transdutor para medição de deslocamento linear (*Linear Variable Differential Transformer - LVDT*) ou detecção de posição optoeletrônica. A sonda de proximidade, ou sem contato, funciona de maneira semelhante à sonda de deslocamento. A diferença é que a sonda de proximidade usa tecnologia de medição a laser, capacitiva ou de vídeo.

#### 2.2.1.1 Erro e Incerteza de Medição

Segundo Albertazzi (2018) é importante não confundir "erro" e "incerteza" de medição. Erro é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro do mensurando. A incerteza é uma quantificação da dúvida sobre o resultado da medição. Toda medição executada pode apresentar erro, por diversas razões. Por exemplo, toda peça tem um valor verdadeiro (*VV*), porém ao fazer a leitura de uma medição, pode-se obter um valor diferente. Entretanto, é desejável que esse valor se aproxime, o máximo possível, do valor verdadeiro. Desse modo, o erro é a diferença entre a medida e o valor verdadeiro, conforme equação 2.1:

$$E = M - VV \quad (2.1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} E &= \text{Erro} \\ M &= \text{Medida} \\ VV &= \text{Valor Verdadeiro} \end{aligned}$$

Os erros de medição são classificados em erros aleatórios (erros naturais que são esperados em qualquer processo de medição) e erros sistemáticos (ex.: causados por um instrumento mal calibrado que afeta todas as medições).

- **Erro sistemático:** é a diferença da média das medições menos o valor verdadeiro, ou seja, é o erro que ocorre sistematicamente;
- **Erro aleatório:** é a diferença de uma medição menos o erro sistemático, comparada ao valor verdadeiro da peça.

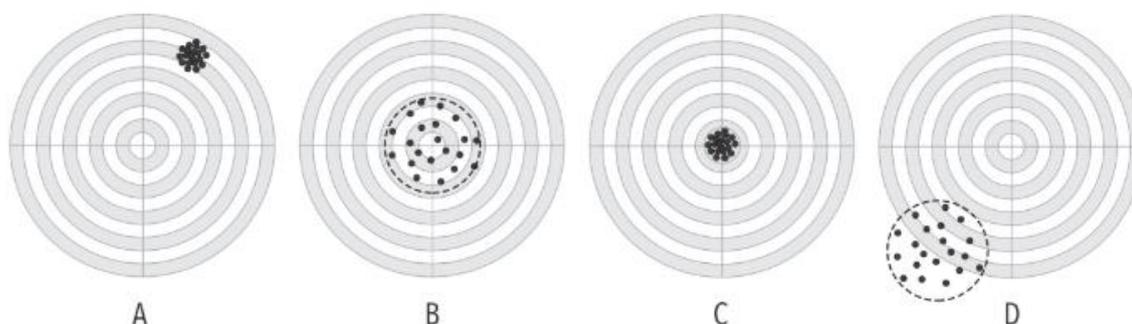
Sob as mesmas condições de medição, a repetibilidade demonstra a intensidade com que operam os erros aleatórios em repetidas medições do

mensurando. Como o erro aleatório é imprevisível, a estatística é utilizada para determinar uma faixa dentro da qual, com uma dada probabilidade, espera-se encontrar o erro aleatório de um sistema de medição ou de um dos seus módulos, conforme a equação 2.2:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

Desse modo, obtendo o valor verdadeiro, o erro sistemático e o erro aleatório, é possível prever os erros do processo de medição para, então, compensá-los. Existe ainda outro tipo de erro: o erro grosseiro. Esse erro ocorre quando se faz mau uso do instrumento de medição, há o posicionamento inadequado da peça, leitura malfeita, falha no sistema de medição ou instrumento etc.

Segundo Albertazzi (2018), pode-se atrelar o erro aleatório à repetitividade e o erro sistemático à exatidão. Portanto, quando se tem alta repetitividade, mas pouca exatidão, os erros aleatórios são baixos e os erros sistemáticos são altos, conforme ilustrado na Figura 2.6(a). Quando se tem exatidão e baixa repetitividade, os erros sistemáticos são baixos e os erros aleatórios são altos, conforme mostrado na Figura 2.6(b). Entretanto, quando um determinado processo de medição apresenta alta repetitividade e exatidão, os erros aleatórios e sistemáticos são baixos, conforme Figura 2.6(c). Por fim, a Figura 2.6(d) ilustra um exemplo em que se tem baixa repetitividade e pouca exatidão, obtendo erros aleatórios e sistemáticos altos.



**Figura 2.6:** Repetitividade e exatidão em processo de medição  
Fonte: Albertazzi, 2016

Além dos erros aleatórios e sistemáticos, existem ainda o erro de histerese. Nos instrumentos em que existe a transmissão por engrenagens, como é o caso do

relógio comparador, ocorre um ciclo de carregamento e descarregamento, ou seja, o instrumento mede nos dois sentidos. Às vezes, por causa do atrito das partes internas, o ponteiro do relógio comparador tende a se atrasar, mostrando indicações diferentes para um mesmo ponto de contato. Esse tipo de erro é conhecido como histerese.

Para obter resultados confiáveis de medições, é necessário tomar alguns cuidados. A forma mais segura é manter estáveis e controladas as condições ambientais que têm maior influência sobre o processo de medição, pois sem dúvida, a temperatura é o fator ambiental com maior influência sobre os sistemas mecânicos que medem comprimentos. Com base nesse conceito que todas as dimensões indicadas em desenhos técnicos se referem às dimensões que a peça apresentará a 20°C. Isto é válido para comprimentos, diâmetros, ângulos, espessuras etc.

Segundo Lira (2015), para minimizar os erros no processo de medição é necessário verificar as causas, ou seja, deve-se conhecer as fontes dos erros. Um erro pode ser causado por falha do operador, falhas no sistema de medição, variações de temperatura, vibrações mecânicas, umidade excessiva do ar etc. O sistema de medição é bastante influenciado por fatores externos, como a temperatura, que provoca a dilatação das escalas dos instrumentos de medição e até mesmo da peça a ser medida. Entretanto, os erros de medição podem ser compensados. A compensação do erro sistemático, por exemplo, é chamada de correção. Para realizar a correção, deve-se acrescentar um fator de correção sempre que uma leitura for executada, conforme equação 2.3. Desse modo:

$$L_c = L + C \quad (2.3)$$

Onde:

$$\begin{aligned} L_c &= \textit{Leitura correta} \\ L &= \textit{Leitura obtida} \\ C &= \textit{Correção} \end{aligned}$$

Entretanto, não é possível corrigir totalmente o erro de medição. Segundo Arencibia et al. (2019), mesmo após a correção do erro sistemático, obtêm-se apenas uma estimativa do valor do mensurando, em função da incerteza de medição. Albertazzi e Sousa (2018) afirmaram que fonte de incerteza é qualquer fator que dá

origem a dúvidas no resultado de um processo de medição. Desse modo, as condições ambientais em que as medições são efetuadas podem afetar o resultado da medição. Alterações de temperatura, por exemplo, podem modificar o mensurando, pois a dilatação térmica pode mudar o valor do comprimento a ser medido. Considerando a incerteza de medição, o resultado da medição pode ser definido pela equação 2.4:

$$RM = L_c \pm \text{Incerteza} \quad (2.4)$$

A incerteza de medição está sempre associada a alguma probabilidade, entretanto não é possível definir, com 100% de probabilidade, que o valor real esteja dentro do intervalo de incerteza. A incerteza de medição deve ser expressa nas mesmas unidades que o mensurando.

Existem dois métodos básicos para avaliar incertezas, que são: incerteza do tipo A (avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações) e incerteza do tipo B (avaliação da incerteza por outros meios). A incerteza padrão do tipo A pode ser baseada em qualquer método estatístico válido para o tratamento de dados, como por exemplo o cálculo do desvio padrão da média de uma série de observações independentes, conforme a equação 2.5:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.5)$$

Pode-se ainda utilizar o método dos mínimos quadrados para ajustar uma curva aos dados, a fim de estimar os parâmetros da curva, e seu desvio padrão. Pode-se também utilizar a análise de variância (ANOVA), a fim de identificar e quantificar efeitos aleatórios em certos tipos de medições. A incerteza do tipo A pode ser definida apenas quando há dispersão nos ensaios de repetibilidade. Às vezes, medidas repetidas podem ser idênticas, pois o aparelho de medição pode não ser sensível o suficiente para exibir dispersão nas leituras. Quando medições repetidas são idênticas, os dados devem ser tratados como uma única leitura e devem ser considerada a incerteza do tipo B. A incerteza padrão do tipo B é geralmente baseada em julgamento científico, usando todas as informações relevantes disponíveis, que

podem incluir: dados de uma única leitura digital ou analógica, experiência anterior em medição ou conhecimento geral do comportamento e propriedade de materiais e instrumentos relevantes, especificações do fabricante, dados fornecidos na calibração e outros relatórios, incertezas atribuídas aos dados de referência retirados dos manuais etc.

Todas as incertezas contribuintes devem ser expressas no mesmo nível de confiança, convertendo-as em incertezas padrão. Uma incerteza padrão geralmente é mostrada pelo símbolo  $u$ . A incerteza padrão é um parâmetro que caracteriza o intervalo de valores dentro do qual o valor real do mensurando pode estar em um nível especificado de confiança. O nível de confiança em um resultado é aumentado multiplicando a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) por uma constante ou fator de abrangência, ( $k$ ), que resulta na incerteza expandida ( $U$ ), conforme equação 2.6:

$$U = k \cdot u_c \quad (2.6)$$

Portanto, para uma incerteza expandida de  $2u$ , a probabilidade de o valor real estar dentro da faixa de incerteza aumenta para 95%, e para uma incerteza expandida de  $3u$ , há uma probabilidade de 99% de que o valor verdadeiro do mensurando esteja dentro dessa faixa de incerteza expandida.

### 2.2.1.2 Sistema de Medição

Segundo Albertazzi (2018), o meio pelo qual as medições são efetuadas é denominado sistema de medição, e é construído de forma que permita a comparação do mensurando com a unidade de medição, indicando o número de vezes mais a fração da unidade de medição que está contida dentro do mensurando. A técnica de medição trata de dispositivos e métodos para a medição de grandezas físicas como comprimento, massa, força, pressão, corrente elétrica, temperatura ou tempo. Outras áreas importantes da metrologia incluem o desenvolvimento de sistemas de medição e métodos de medição, bem como a aquisição, modelagem e redução de desvios de medição e influências indesejáveis, compreendendo ajustes e calibração de instrumentos de medição.

A medição, incluindo o sistema de medição e as condições sob as quais ela é realizada, pode modificar o fenômeno, o corpo ou a substância, de modo que a grandeza que está sendo medida pode diferir do mensurando como ele foi definido.

Neste caso, é necessária uma correção adequada. Com relação aos métodos de medição, podem ser qualificados em método de medição direta ou indireta.

#### *2.2.1.3 Medição Direta e Indireta*

Para Toledo (2014), as medições diretas são verificadas usando um sistema ou ferramenta para ler diretamente o comprimento, a altura, ou qualquer outro aspecto de um mensurando para determinar sua medição. O conceito de medição direta permite que uma determinada medida de um mensurando seja conhecida, no entanto, erros podem ocorrer durante a medição. São exemplos de medições diretas: a medição de um diâmetro pelo micrômetro, da temperatura de um ambiente pelo termômetro, da velocidade de um veículo pelo seu velocímetro etc. De modo geral, no método de medição direta, a variável medida é comparada diretamente com uma escala ou objeto padrão.

As medições indiretas, por sua vez, ocorrem quando se mede um mensurando e o valor é calculado a partir de operações matemáticas efetuadas envolvendo duas ou mais medidas associadas a diferentes características do mensurando. Sistemas de medição e métodos de medição indiretos possibilitam a mensuração quando os meios não são diretamente acessíveis. Mede-se outra variável e determina a variável medida, se houver uma relação clara e conhecida entre os dois com base em um princípio de medição.

#### *2.2.1.4 Calibração de Sistemas de Medição*

Calibração é uma comparação entre uma medida conhecida (o padrão) e a medida usando um instrumento. Normalmente, a precisão do padrão deve ser dez vezes a precisão do dispositivo de medição sendo testado. A calibração dos instrumentos de medição tem dois objetivos: verificar a precisão do instrumento e determinar a rastreabilidade da medição (ALBERTAZZI, 2018).

A precisão de todos os dispositivos de medição diminui com o tempo. Isso geralmente é causado pelo desgaste natural do equipamento. No entanto, alterações na precisão também podem ser causadas por choque elétrico ou mecânico ou por condições do ambiente. Dependendo do tipo de instrumento e do ambiente em que está sendo usado, ele pode se degradar rapidamente. De modo geral, a calibração melhora a precisão do dispositivo de medição e, conseqüentemente, dispositivos de medição precisos melhoram a qualidade do produto.

Para Silva Neto (2012), um dispositivo de medição deve ser calibrado de acordo com a recomendação do fabricante, após qualquer choque mecânico ou elétrico e com periodicidade (anualmente, trimestralmente, mensalmente etc.). Os custos e riscos associados ao dispositivo de medição não calibrado podem ser muito mais altos que o custo da calibração. Portanto, recomenda-se que os instrumentos de medição sejam calibrados regularmente para garantir que os erros associados às medições estejam dentro de uma faixa aceitável.

#### *2.2.1.5 Estratégia de Medição*

A estratégia de medição é parte fundamental do processo, pois decisões erradas no planejamento da medição podem resultar em erros que estão muito além dos erros intrínsecos do equipamento. Donatelli et al. (2005), afirmaram que uma estratégia de medição adequada é resultado de um processo intelectual no qual são analisadas informações de diversas fontes, tais como:

- Destino da informação a ser gerada por medição (P&D ou produção);
- Especificações geométricas (se as houver) e/ou função da peça;
- Características do processo de fabricação (capacidade, desvios de forma predominantes, rugosidade, defeitos locais etc.);
- Restrições associadas ao local e frequência de medição; e
- Capacidades da MMC e suas peculiaridades metrológicas e operacionais.

#### **2.2.2 Tolerância Dimensional e Geométrica**

De modo geral, existem duas abordagens de tolerâncias em desenhos técnicos: tolerância dimensional e tolerância geométrica. Na tolerância dimensional regula-se o tamanho de cada dimensão da peça, enquanto na tolerância geométrica regula-se a forma, orientação e posição. Diferentes instrumentos e métodos de inspeção são usados para medição dos desvios dimensionais e geométricos.

A tolerância dimensional é definida pelas dimensões limite (a dimensão máxima e a dimensão mínima). A diferença entre os dois resulta na tolerância dimensional. O desvio dimensional, por sua vez, é definido como a variação da dimensão efetiva em relação a dimensão nominal. Uma peça que atenda às especificações dimensionais definidas no projeto, não necessariamente atenderá os requisitos geométricos (NBR 6158). Por exemplo, pode-se realizar medições em um eixo utilizando um paquímetro ou micrômetro (medidas de dois pontos) e obter resultados para análise das

especificações de tolerância dimensional. Para a tolerância geométrica, no entanto, é necessário um instrumento que faça medições de circularidade ou uma MMC, pois o centro do eixo é levado em consideração. Isso significa que algumas peças podem atender aos requisitos de tolerância dimensional, mas não atendem às especificações de tolerância geométrica. As tolerâncias geométricas podem ser: de forma, orientação e localização.

### 2.2.2.1 Tolerância Geométrica de Forma

Segundo a NBR 6409, as tolerâncias de forma podem ser definidas por seis tipos de tolerância.: retilineidade, planicidade, circularidade e cilindridade, forma de uma linha qualquer e forma de uma superfície qualquer, conforme ilustrado na Tabela 2.4. As tolerâncias de forma aplicam-se a elementos isolados (exceto a forma de linha qualquer e forma de superfície qualquer, que também podem ser aplicados para elementos associados), determinando o formato da peça.

**Tabela 2.4:** Simbologia e característica – tolerância geométrica de forma  
Fonte: Adaptado da NBR 6409

Símbolo	Característica	Descrição
—	Retilineidade	A retitude é aplicada a linhas, sendo usada para indicar a tolerância à deformação de objetos longos
	Planeza	A planeza especifica a uniformidade de uma superfície
	Circularidade	Especifica o quão perfeito um círculo deve ser (ex.: seção transversal circular de um eixo, furo, cone etc.)
	Cilindridade	Especifica a precisão com que um cilindro é circular e reto, representando qualquer distorção
	Perfil de linha	Descreve uma zona de tolerância em torno de qualquer linha em qualquer recurso, geralmente de forma curva
	Perfil de superfície	O perfil de superfície indica se a curvatura (superfície) de uma peça projetada é feita em seu desenho

Segundo Agostinho (2019), a retilineidade é uma tolerância bidimensional usada para garantir que uma peça seja uniforme em uma superfície. A retidão pode ser aplicada a um recurso plano, como a superfície de um bloco, ou a uma superfície de um cilindro na direção axial. A forma de retidão que controla o eixo central de uma peça às vezes é chamada de retilínea axial e especifica o quão reto o eixo de uma peça é (geralmente um cilindro). Por definição, a retidão do eixo é na verdade uma

tolerância 3D que restringe o eixo central da peça, impedindo que ela se dobre ou torça demais.

A planeza define como uma superfície é plana, independentemente de quaisquer outros elementos. A tolerância de planeza faz referência a dois planos paralelos que definem uma zona de tolerância em que toda a superfície de referência deve estar. A tolerância à planicidade é sempre menor que a tolerância dimensional associada a ela.

A tolerância de circularidade é usada para definir o quão próximo uma peça deve estar de um círculo verdadeiro. A circularidade é uma tolerância bidimensional que controla a forma geral de um círculo, independentemente de qualquer elemento de referência e é sempre menor que a tolerância dimensional do diâmetro da peça. A circularidade faz essencialmente uma seção transversal de uma característica cilíndrica ou redonda e determina se o círculo formado nessa seção transversal é redondo.

A cilindridade é uma tolerância tridimensional que controla a forma geral de um elemento cilíndrico para garantir que ele seja suficientemente redondo e reto ao longo de seu eixo, independentemente de qualquer elemento de referência; sua tolerância precisa ser menor que a tolerância dimensional do diâmetro da peça. A cilindridade forma essencialmente um limite cilíndrico perfeito ao redor do objeto no qual toda a parte tridimensional deve estar.

O perfil de uma linha descreve uma zona de tolerância em torno de qualquer linha em qualquer elemento, geralmente de forma curva. O perfil de uma linha é um intervalo de tolerância bidimensional que pode ser aplicado a qualquer tolerância linear. Se aplicada em uma superfície, como um raio em uma peça, o perfil de uma linha especificará o quanto essa seção transversal pode variar em relação a um raio curvado real. O perfil de uma linha faz uma seção transversal em qualquer ponto da superfície e define uma zona de tolerância em ambos os lados do perfil.

O perfil de uma superfície descreve uma zona de tolerância tridimensional em torno de uma superfície, geralmente uma curva ou forma avançada. Se aplicada em uma superfície curva, como um filete em uma peça soldada, toda a superfície onde o raio está deverá cair dentro da zona de tolerância. O perfil controla todos os pontos ao longo da superfície dentro de uma faixa de tolerância que imita diretamente o perfil projetado.

### 2.2.2.2 Tolerância Geométrica de Orientação

As tolerâncias de orientação controlam a orientação dos elementos em um plano ou eixo de referência e podem ser definidas por três tipos de tolerância: paralelismo ( $0^\circ$ ), perpendicularidade ( $90^\circ$ ) e inclinação (angularidade). As tolerâncias de orientação são aplicadas para elementos associados. A Tabela 2.5 ilustra seus símbolos e características geométricas (NBR 6409).

**Tabela 2.5:** Simbologia e característica – tolerância geométrica de orientação  
Fonte: Adaptado da NBR 6409

Símbolo	Característica	Descrição
//	Paralelismo	O paralelismo especifica que duas linhas ou planos são paralelos.
⊥	Perpendicularidade	Especifica a precisão do quanto um elemento é perpendicular a um plano ou linha de referência
∠	Inclinação	A inclinação/angularidade especifica a precisão de um ângulo em relação a um plano ou linha de referência

Segundo Agostinho (2019), o paralelismo descreve uma orientação paralela de um elemento referenciado a uma superfície ou linha de referência. Essa tolerância pode fazer referência a uma linha 2D referenciada a outro elemento, mas mais comumente relaciona a orientação de um plano de superfície paralelo a outro plano de referência em uma zona de tolerância tridimensional. A tolerância controla indiretamente o ângulo de  $0^\circ$  entre as partes, controlando onde a superfície pode ficar com base nos dados.

A tolerância de perpendicularidade requer que a superfície ou linha referenciada seja perpendicular ( $90^\circ$ ) a partir de uma superfície ou linha de referência. A perpendicularidade pode fazer referência a uma linha 2D, mas mais comumente descreve a orientação de um plano de superfície perpendicular a outro plano de referência. A tolerância de perpendicularidade controla indiretamente o ângulo de  $90^\circ$  entre os elementos, controlando o local onde as superfícies devem ficar. Quando é aplicada em um recurso circular, utiliza-se o símbolo de diâmetro ( $\varnothing$ ). Nesse caso, a perpendicularidade do eixo pode ser aplicada a um elemento positivo (pino/saliência) ou a um elemento negativo (um furo). Quando a perpendicularidade é aplicada para controle axial de um elemento, o símbolo especifica um limite cilíndrico no qual o eixo do recurso referenciado deve estar. O limite cilíndrico é formado tomando uma linha diretamente perpendicular ao elemento de referência.

A inclinação (angularidade) define a orientação específica de um elemento para outro em um ângulo referenciado. Essa tolerância pode fazer referência a uma linha 2D referenciada a outro elemento 2D, mas mais comumente relaciona a orientação de um plano de superfície em relação a outro plano de referência em uma zona de tolerância tridimensional. A tolerância não controla diretamente a variação do ângulo e não deve ser confundida com uma tolerância de dimensão angular. Nesse caso, o ângulo torna-se uma dimensão básica, pois é controlado por sua tolerância geométrica, que controla indiretamente o ângulo.

### 2.2.2.3 Tolerância Geométrica de Localização

Segundo Agostinho (2019), as tolerâncias de localização determinam a posição de um elemento em relação a uma referência. Podem ser definidas por três tipos de tolerância: posição, coaxialidade/concentricidade e simetria. As tolerâncias de localização são aplicadas para elementos associados. A Tabela 2.6 mostra suas simbologias e características geométricas.

**Tabela 2.6:** Simbologia e característica – tolerância geométrica de localização  
Fonte: Adaptado da NBR 6409

Símbolo	Descrição	Característica
	Posição	Especifica a precisão da posição em relação a um plano ou linha de referência
	Coaxialidade	Especifica a coaxialidade dos eixos de dois cilindros (sem desvio do eixo central)
	Concentricidade	Especifica a precisão da concentricidade dos eixos de dois cilindros (sem desvio do centro). Diferentemente da coaxialidade, o dado é o ponto central (plano).
	Simetria	A simetria especifica a precisão de quão simétrico um elemento é para um plano de referência

A tolerância de posição refere-se à coordenada exata ou o local definido pelas dimensões básicas ou outros meios que representam o valor nominal. Em outras palavras, a tolerância de posição é a distância em que a localização dos recursos pode variar da sua “posição verdadeira”. Dependendo de como é aplicada, a posição pode ter mais de um significado: pode ser usada com condição máxima de material, condição de mínimo material, tolerâncias projetadas e planos tangentes (NBR 6409).

Segundo Alves (1996), a tolerância de coaxialidade/concentricidade é uma tolerância que controla o eixo central do elemento referenciado a um eixo de

referência. É a tolerância de quão próximo o eixo de um cilindro está de outro (ex.: um eixo com dois diâmetros, ou dois furos, localizados em lados opostos). Nos dois casos, espera-se que o centro de um elemento esteja no mesmo eixo do segundo elemento. Como cada elemento está sendo avaliado como um eixo, a coaxialidade é uma medida 3D. Um caso especial de coaxialidade ocorre quando uma peça é medida no mesmo plano de seção transversal, tornando-a uma medida 2D. Esse caso especial é chamado concentricidade.

A simetria é uma tolerância tridimensional usada para garantir que dois elementos de uma peça sejam uniformes em um plano de referência. A simetria não é aplicada com muita frequência, pois possui usos funcionais muito limitados e a verificação e a medição da simetria podem ser difíceis.

Existe ainda a tolerância de batimento, que pode ser radial ou axial, e que deve ser aplicada para elementos associados. O batimento é caracterizado pelo desvio que um elemento pode aceitar em relação ao seu eixo, quando a peça é girada 360° em torno do seu próprio eixo. O batimento axial é delimitado por dois planos paralelos entre si e perpendiculares ao eixo de rotação do elemento, enquanto o batimento radial é delimitado por um plano perpendicular ao eixo de giro.

### **2.2.3 Rugosidade**

A rugosidade da superfície de componentes mecânicos é um parâmetro importante usado para determinar a adequação de uma superfície para uma finalidade específica, e melhorar o desempenho dos produtos manufaturados. As irregularidades em uma superfície usinada afetam a qualidade e o desempenho dessa superfície e o desempenho do produto. As superfícies mais ásperas geralmente desgastam mais rapidamente do que as superfícies mais lisas e são mais vulneráveis à corrosão e rachaduras.

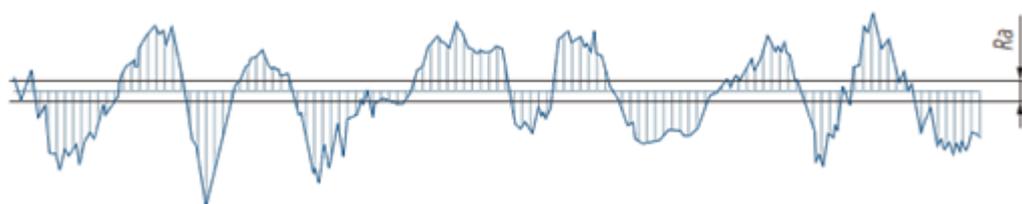
Para verificar a rugosidade da superfície é utilizado o rugosímetro (também conhecido como testador ou medidor de rugosidade), que é um dispositivo portátil usado para medir de maneira fácil e rápida o acabamento da superfície de uma peça/objeto. Os rugosímetros fornecem uma medição linear da rugosidade, traçando uma ponta mecânica em uma superfície para medir a rugosidade ao longo de uma linha arbitrária, entretanto, aparelhos mais sofisticados fornecem uma medição de rugosidade que mede uma área da superfície usando métodos sem contato (ex.: laser, óptico etc.). Normalmente, utiliza-se o parâmetro  $Ra$  (que é o desvio médio absoluto

de uma linha central de uma superfície) e  $Rq$  (quadrado médio da raiz do desvio) para representar os valores de rugosidade. Para a maioria das aplicações, os parâmetros  $Ra$  e  $Rq$  fornecem resultados adequados. Para superfícies especialmente projetadas, outros parâmetros podem ser mais apropriados.

### 2.2.3.1 Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade, que são as saliências e reentrâncias que se apresentam na superfície da peça, pode ser avaliada com diferentes parâmetros de rugosidade. Durante muito tempo, apenas o parâmetro  $Ra$  (média da rugosidade) era conhecido e utilizado. Depois vieram os parâmetros  $RMS$  ou  $Rq$ ,  $Rz$  e  $Rmax$ , e mais tarde muitos outros parâmetros. Atualmente, parâmetros de perfil são definidos em diversos padrões internacionais que às vezes apresentam variações locais devido ao padrão nacional ou do próprio setor.

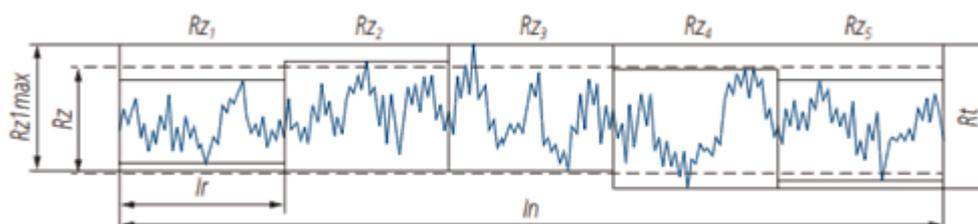
Conforme a NBR 8404, os parâmetros do perfil são separados em três grupos, dependendo do tipo de perfil do qual são calculados: Os parâmetros  $P$  são calculados no perfil primário, os parâmetros  $R$  são calculados no perfil de rugosidade e os parâmetros  $W$  são calculados no perfil de ondulação. O parâmetro  $Ra$ , por exemplo, representa a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil em relação à linha média do perfil de rugosidade, conforme exemplificado na Figura 2.7. É o parâmetro de medição mais utilizado e, portanto, podendo ser aplicado em vários processos de fabricação. Uma de suas vantagens é que os riscos superficiais próprios do processo, não alteram muito o valor do “ $Ra$ ”. Entretanto, como esse parâmetro indica a média de rugosidade, uma das desvantagens é que possíveis picos e/ou vales podem não afetar a média, ocultando um defeito.



**Figura 2.7:** Representação da média aritmética dos valores de rugosidade  $Ra$   
Fonte: Mitutoyo

Conforme apresentado na Figura 2.8, existem outros parâmetros de rugosidade. Por exemplo, o parâmetro  $Rt$  é definido pela distância entre o vale mais profundo e o pico mais alto. Já o parâmetro  $Rz1max$  é caracterizado pela diferença

entre os maiores valores de rugosidade (pico e vale), entretanto essa análise ocorre dentro de cada comprimento de avaliação  $l_r$ , observados no comprimento  $l_n$ . De forma semelhante, o parâmetro  $Rz$  é definido como a média aritmética dos cinco valores de rugosidade analisados em cada comprimento de avaliação  $l_r$ , observados no comprimento  $l_n$ .



**Figura 2.8:** Representação dos parâmetros de rugosidade  $Rt$   
Fonte: Mitutoyo

Os parâmetros de rugosidade são selecionados de acordo com a aplicação. Por exemplo, o parâmetro  $Rz1máx$  é preferencialmente utilizado para análise de superfícies nas quais os desvios individuais têm uma influência significativa na função da superfície. O parâmetro  $Rz$  é utilizado, como regra, para todas as outras superfícies. O parâmetro  $Ra$  dificilmente será afetado por picos ou vales individuais, pois é o valor médio de todo o perfil.

Existem ainda os símbolos para representação da rugosidade. A simbologia básica, bem como suas descrições, são ilustrados na Tabela 2.7.

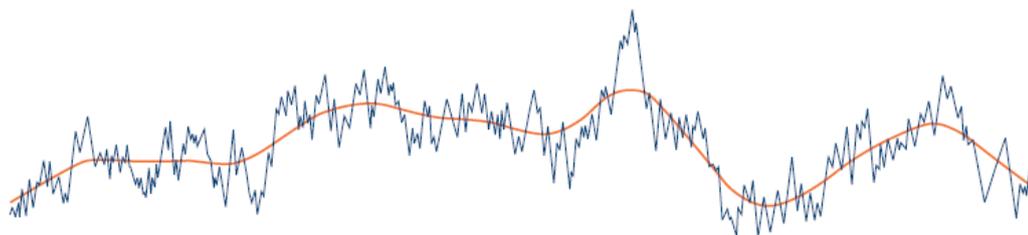
**Tabela 2.7:** Simbologia e descrição da representação de rugosidade  
Fonte: Adaptado da NBR 8404

Símbolo	Descrição
✓	Simbologia básica: deve ser complementado por uma indicação
✓	Superfície usinada: remoção de material necessária
✓	Remoção de material não permitida: a superfície deve permanecer no estado resultante do processo de fabricação
✓	Mesmo acabamento para todas as superfícies

### 2.2.3.2 Perfis de Rugosidade

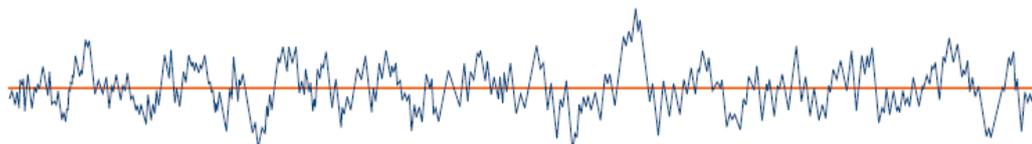
Segundo a NBR 8404, o perfil real é o perfil resultante da interseção da superfície da peça de trabalho e de um plano normal a essa superfície e em uma direção que maximize o valor da rugosidade da superfície, normalmente em ângulo

reto. O perfil medido é o perfil resultante da varredura do perfil real com uma sonda que filtra mecanicamente esse perfil devido ao raio da ponta da sonda. Imperfeições na superfície, como rachaduras e arranhões, não fazem parte do perfil e, portanto, não devem ser inclusos. Conforme ilustrado na Figura 2.9, o perfil primário é o perfil resultante da filtragem eletrônica passa baixa do perfil medido com um *cut-off* (corte) de comprimento de onda  $\lambda_s$ . Esse processo remove os componentes de menor comprimento de onda que não são relevantes para uma medição de rugosidade. Os parâmetros são designados  $P$  e avaliados dentro dos comprimentos de amostragem, ou seja, no comprimento da avaliação  $l_n$ , que é o comprimento total registrado do perfil da superfície.



**Figura 2.9:** Perfil  $P$  com a linha média para o filtro do perfil ( $\lambda_s$  – cut-off)  
Fonte: Mitutoyo

O perfil de rugosidade  $R$  é o perfil resultante da filtragem eletrônica passa alta do perfil primário com um *cut-off* de comprimento de onda  $\lambda_c$ . Esse processo remove os componentes de comprimento de onda mais longo, conforme ilustrado na Figura 2.10. Os parâmetros são designados  $R$  e avaliados dentro do comprimento de avaliação  $l_n$ , que geralmente consiste em cinco comprimentos de amostra  $l_r$ . O comprimento da amostra corresponde ao *cut-off* de comprimento de onda  $\lambda_c$  do filtro do perfil (NBR 8404).



**Figura 2.10:** Perfil de rugosidade  $R$  com a linha média  
Fonte: Mitutoyo

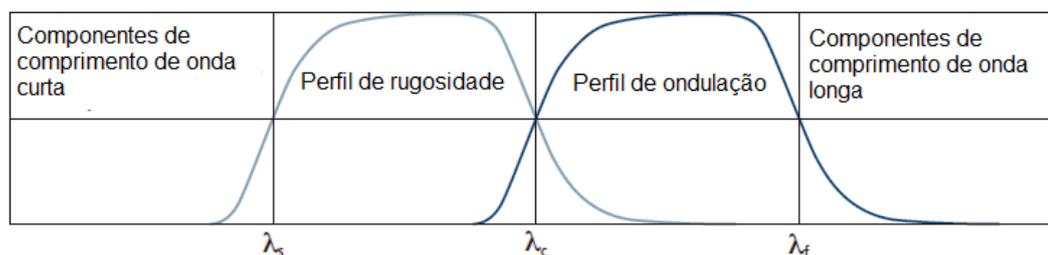
O perfil de ondulação  $W$  é o perfil resultante da filtragem eletrônica passa baixa do perfil primário com o *cut-off* de comprimento de onda  $\lambda_c$  (Figura 2.11), seguido da filtragem passa alta com o *cut-off* de comprimento de onda  $\lambda_f$ , como mostrado na Figura 2.12. Os parâmetros são designados  $W$  e avaliados ao longo do comprimento de avaliação  $l_n$ , consistindo em vários comprimentos de amostragem  $l_w$ . O comprimento de amostragem  $l_w$  corresponde ao comprimento de onda de corte  $\lambda_f$  do filtro passa alto. No entanto, essa quantidade não é padronizada e deve ser estipulada no desenho, devendo ficar entre cinco a dez vezes  $\lambda_f$  (NBR 8404). A Figura 2.13 ilustra as características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação.



**Figura 2.11:** Linha média filtrada passa baixa do perfil primário e linha média para filtro de perfil  $\lambda_f$   
Fonte: Mitutoyo



**Figura 2.12:** Perfil de ondulação com linha média após filtragem passa alta com o filtro de perfil  $\lambda_c$   
Fonte: Mitutoyo



**Figura 2.13:** Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação  
Fonte: Adaptado de Souza, 2011

## 2.3 Planejamento de Experimentos

Segundo Montgomery (2017), um experimento é uma série de testes realizados de maneira sistemática para aumentar a compreensão de um processo existente ou explorar um novo produto ou processo. O planejamento de experimentos (também conhecido como *Design of Experiments – DoE*) é a ferramenta para desenvolver uma estratégia de experimentação usando o mínimo de recursos. O *DoE* é amplamente utilizado em muitos campos com ampla aplicação em todas as ciências naturais e sociais. É amplamente utilizado por engenheiros e cientistas envolvidos na melhoria dos processos de fabricação para maximizar o rendimento e diminuir a variabilidade. Frequentemente, os engenheiros também trabalham em produtos ou processos onde nenhuma teoria ou princípio científico é diretamente aplicável. Técnicas de *design* experimental tornam-se extremamente importantes nesses estudos para desenvolver novos produtos e processos de maneira econômica e confiável.

Com os modernos avanços tecnológicos, produtos e processos estão se tornando cada vez mais complexos. À medida que o custo da experimentação aumenta rapidamente, torna-se cada vez mais difícil para o analista, que já está limitado por recursos e tempo, investigar os inúmeros fatores que afetam esses processos usando métodos de tentativa e erro. Em vez disso, é necessária uma técnica que identifique os fatores significativos de maneira eficiente e, em seguida, direcione o processo para sua melhor configuração para atender à demanda cada vez maior por melhor qualidade e maior produtividade. As técnicas de *DoE* fornecem métodos poderosos e eficientes para atingir esses objetivos.

Para Box (2005), o planejamento de experimentos é muito mais eficiente do que os experimentos em que se analisa um fator isoladamente, ou seja, aqueles em que se altera um fator de cada vez para estudar o efeito do fator no produto ou processo. Embora os experimentos de um fator sejam fáceis de entender, eles não permitem a análise de como um fator afeta um produto ou processo na presença de outros fatores. Uma interação é a relação na qual o efeito que um determinado fator tem sobre o produto ou processo é alterado devido à presença de outro(s) fator(es). Muitas vezes, os efeitos de interação são mais importantes que o efeito de fatores individuais. Isso ocorre porque o ambiente de aplicação do produto ou processo inclui a presença de muitos fatores, em vez de ocorrências isoladas de um dos fatores em momentos diferentes.

O planejamento de experimentos garante que todos os fatores e suas interações sejam sistematicamente analisados. Portanto, as informações obtidas em um planejamento de experimentos são muito mais confiáveis e completas do que os resultados de experimentos de um fator isolado que ignoram as interações e, portanto, podem levar a conclusões incorretas.

De modo geral, o objetivo do planejamento e análise do experimento é estabelecer uma relação de causa e efeito entre as variáveis independentes e dependentes. A variável dependente, no contexto do *DoE*, é chamada de resposta, e as variáveis independentes são chamadas de fatores. Os planejamentos são realizados com diferentes valores para o fator, chamados níveis. Cada execução de um experimento envolve uma combinação dos níveis dos fatores investigados, e cada uma das combinações é chamada de tratamento. As observações repetidas em um determinado tratamento são chamadas de réplicas.

Segundo Box (2005), o número de tratamentos de um experimento é determinado com base no número de níveis de fatores que estão sendo investigados. Por exemplo, se um experimento com dois fatores deve ser realizado, com o primeiro fator tendo  $m$  níveis e o segundo tendo  $n$  níveis, então  $m \cdot n$  combinações de tratamento podem ser executadas e o experimento é um planejamento fatorial  $m \cdot n$ . Se todas as combinações  $m \cdot n$  forem executadas, o experimento é um fatorial completo. Se apenas algumas das combinações de tratamento  $m \cdot n$  forem realizadas, o experimento é um fatorial fracionário. Em experimentos fatoriais completos, todos os fatores e suas interações podem ser investigados, enquanto em experimentos fatoriais fracionários, algumas interações não são consideradas porque alguns tratamentos não são realizados.

Pode-se observar que o tamanho de um experimento aumenta rapidamente à medida que o número de fatores, ou o número de níveis dos fatores, aumenta. Por exemplo, se forem usados 2 fatores em 3 níveis cada, 9 ( $3 \cdot 3 = 9$ ) tratamentos diferentes são necessários para um experimento fatorial completo. Se um terceiro fator com 3 níveis for adicionado, 27 ( $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ ) tratamentos são necessários e 81 ( $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 81$ ) tratamentos serão necessários se um quarto fator com três níveis for adicionado. Se apenas dois níveis forem usados para cada fator, no caso de quatro fatores, 16 ( $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$ ) tratamentos são necessários. Por esse motivo, muitos experimentos estão restritos a dois níveis. Além disso, o uso de um planejamento fatorial fracionário reduz ainda mais o número de tratamentos necessários.

### 2.3.1 Planejamento Fatorial

Os experimentos fatoriais, nos quais todas as combinações dos níveis das variáveis são executadas, são denominados planejamentos fatoriais completos. Experimentos de dois níveis também são chamados de delineamentos, onde denota o número de fatores sendo investigados no experimento. Um planejamento fatorial completo de dois níveis com  $k$  fatores requer  $2^k$  execuções para uma réplica. Desse modo, um experimento de dois níveis com três fatores exigirá  $2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3 = 8$  execuções. Os dois níveis de cada variável no planejamento fatorial  $2^k$  são geralmente representados como  $-1$  (para o nível baixo) e  $1$  (para o nível alto), ou simplesmente pelos sinais  $-$  (menos) e  $+$  (mais), respectivamente (MONTGOMERY, 2017).

Segundo Box (2005), o experimento fatorial de dois níveis mais simples é o planejamento  $2^2$ , onde dois fatores ( $A$  e  $B$ , por exemplo) são investigados em dois níveis. Uma única réplica desse experimento exigirá quatro execuções ( $2^2 = 2 \cdot 2 = 4$ ). Os efeitos investigados nesse planejamento são os dois efeitos principais,  $A$  e  $B$  e o efeito de interação  $AB$ . Os tratamentos para esse planejamento são exemplificados na Tabela 2.8, onde as letras são usadas para representar os tratamentos. A presença de uma letra indica o nível alto do fator correspondente e a ausência indica o nível baixo. Por exemplo,  $(1)$  representa a combinação de tratamento em que todos os fatores envolvidos estão no nível baixo, ou seja, no nível representado por  $-1$ ;  $a$  representa a combinação de tratamento em que o fator  $A$  está no nível alto ou no nível  $1$ , enquanto os fatores restantes (neste caso, fator  $B$ ) estão no nível baixo ou no nível  $-1$ . Da mesma forma,  $b$  representa a combinação de tratamento em que o fator  $B$  está no nível alto ou no nível  $1$ , enquanto o fator  $A$  está no nível baixo e  $ab$  representa a combinação de tratamento no qual os fatores  $A$  e  $B$  estão no nível alto.

**Tabela 2.8:** Planejamento fatorial completo  $2^2$   
Fonte: Adaptado de Montgomery

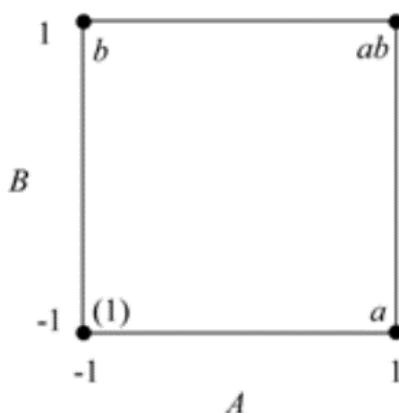
Tratamento	Fatores	
	$A$	$B$
$(1)$	$-1$	$-1$
$a$	$1$	$-1$
$b$	$-1$	$1$
$ab$	$1$	$1$

A matriz do planejamento  $2^2$  é apresentada na Tabela 2.9. Pode-se notar que a soma dos termos resultantes do produto de quaisquer duas colunas da matriz do planejamento é zero. Como resultado, o planejamento  $2^2$  é ortogonal, assim como todos os planejamentos  $2^2$ . Essa propriedade dos planejamentos  $2^k$  oferece uma grande vantagem na análise devido às simplificações resultantes da ortogonalidade.

**Tabela 2.9:** Matriz de planejamento fatorial completo  $2^2$   
Fonte: Adaptado de Montgomery

	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>
1	1	-1	-1	1
1	1	1	-1	-1
1	-1	1	1	-1
1	-1	-1	1	1

Segundo Montgomery (2017), o planejamento  $2^2$  também pode ser representado geometricamente usando um quadrado com as quatro combinações de tratamento nos quatro cantos, conforme apresentado na Figura 2.14.

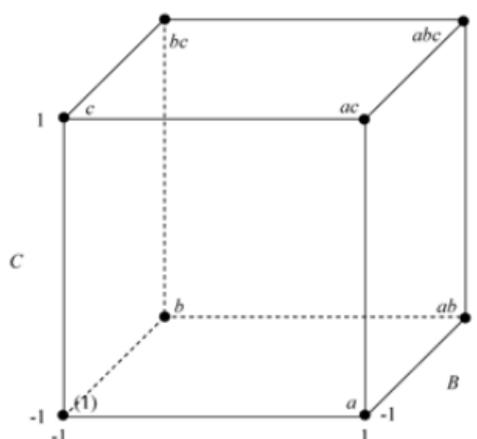


**Figura 2.14:** Representação do planejamento fatorial completo  $2^2$   
Fonte: Montgomery

Segue-se a mesma lógica ao aumentar a quantidade de fatores no planejamento experimental. O planejamento  $2^3$ , por exemplo, é um experimento fatorial de dois níveis com três fatores (*A*, *B* e *C*). Esse planejamento testa três ( $k = 3$ ) efeitos principais, *A*, *B* e *C*; três  $\binom{k}{2} = \binom{3}{2}$  efeitos de interação de dois fatores, *AB*, *BC*, *AC*; e um  $\binom{k}{3} = \binom{3}{3}$  efeito de interação de três fatores, *ABC*. O planejamento



Segundo Montgomery (2017), o planejamento  $2^3$  também pode ser representado geometricamente usando um cubo com as oito combinações de tratamento nos oito cantos, conforme exemplificado na Figura 2.15.



**Figura 2.15:** Representação do planejamento fatorial completo  $2^3$   
Fonte: Montgomery

À medida que o número de fatores em um planejamento fatorial de dois níveis aumenta, o número de execuções para uma réplica do planejamento  $2^k$  se torna muito grande. Por exemplo, uma réplica de um experimento de oito fatores e dois níveis exigiria 256 execuções. Planejamentos fatoriais fracionários podem ser usados nesses casos para tirar conclusões com menos execuções.

### 2.3.2 Planejamento Fatorial Fracionário

Os planejamentos fatoriais fracionários partem do princípio que, na maioria das vezes, as respostas são afetadas por um pequeno número de efeitos principais e interações de ordem inferior, enquanto as interações de ordem superior são relativamente sem importância. Em muitos casos, os planejamentos fatoriais fracionários são usados como experimentos de triagem durante os estágios iniciais do experimento. Nessas etapas, muitos fatores precisam ser investigados e o foco está nos efeitos principais e nas interações de dois fatores. Nesses planejamentos é possível obter informações sobre os efeitos principais e interações de ordem inferior com menos execuções experimentais, confundindo esses efeitos com interações sem importância de ordem superior (MONTGOMERY, 2017).

Por exemplo, um planejamento  $2^8$  requer 256 execuções. Esse planejamento permite a análise de 8 efeitos principais e 28 interações de dois fatores. No entanto, 219 graus de liberdade são dedicados a interações de três fatores ou de ordem

superior. Esse planejamento fatorial completo pode ser muito ineficiente se as interações de ordem superior não forem importantes. Com isso, um planejamento fatorial fracionário pode ser usado para identificar os fatores importantes que podem ser investigados mais detalhadamente em experimentos subsequentes.

Uma fração do planejamento  $2^k$  envolve a execução de apenas metade dos tratamentos do planejamento fatorial completo. Por exemplo, um planejamento  $2^3$  requer oito execuções ao todo, conforme visto anteriormente. Utilizando uma fração no planejamento, apenas quatro dos oito tratamentos são executados. A fração é denotada como  $2^{3-1}$  com o "-1" no índice que denota uma meia fração. Considerando que os tratamentos escolhidos para o planejamento de meia fração sejam aqueles em que a interação  $ABC$  esteja no nível alto, serão escolhidas somente as linhas em que a coluna  $ABC$  possui entradas 1. O planejamento  $2^{3-1}$  resulta, portanto, na matriz apresentada na Tabela 2.12. Nesse planejamento, como a interação  $ABC$  está sempre no mesmo nível, não é possível analisar o efeito dessa interação. Desse modo, o efeito  $ABC$  é chamado de gerador do planejamento. Pode-se notar ainda que a coluna correspondente à interceptação  $I$  e a coluna correspondente à interação  $ABC$  são idênticas. As colunas idênticas são apresentadas como  $I = ABC$  e essa equação é chamada de relação definidora do planejamento (MONTGOMERY, 2017).

**Tabela 2.12:** Matriz de planejamento fatorial fracionário  $2^{3-1}$   
Fonte: Adaptado de Montgomery

$I$	$A$	$B$	$AB$	$C$	$AC$	$BC$	$ABC$
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

Executando um planejamento  $2^{3-1}$ , os efeitos principais podem ser calculados conforme equações 2.7, 2.8 e 2.9, onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $abc$  são os tratamentos incluídos no planejamento:

$$A = \frac{(a + abc)}{2} - \frac{(b + c)}{2} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (2.7)$$

$$B = \frac{(b + abc)}{2} - \frac{(a + c)}{2} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (2.8)$$

$$C = \frac{(c + abc)}{2} - \frac{(a + b)}{2} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (2.9)$$

Da mesma forma, as interações de dois fatores também podem ser obtidas a partir das equações 2.10, 2.11 e 2.12:

$$AB = \frac{(c + abc)}{2} - \frac{(a + b)}{2} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (2.10)$$

$$BC = \frac{(a + abc)}{2} - \frac{(b + c)}{2} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (2.11)$$

$$AC = \frac{(b + abc)}{2} - \frac{(a + c)}{2} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (2.12)$$

Observa-se, portanto, que as equações para o fator  $A$  e para a interação  $BC$  resultam nos mesmos valores de efeito, mostrando que os efeitos  $A$  e  $BC$  são confundidos no planejamento  $2^{3-1}$ . Dessa forma,  $\frac{1}{2}(a - b - c + abc)$  estima  $A + BC$  e os efeitos de  $A$  e  $BC$  são chamados de aliases, pois estão associados entre si. Observando as demais equações, verifica-se que os outros pseudônimos para esse planejamento são  $B$  e  $AC$ , e  $C$  e  $AB$ . Portanto, as equações 2.13, 2.14 e 2.15 podem ser utilizadas para calcular os efeitos do planejamento  $2^{3-1}$ , conforme abaixo:

$$A + BC = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (2.13)$$

$$B + AC = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (2.14)$$

$$C + AB = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (2.15)$$

Segundo Box (2005), aliases podem ser obtidos usando a relação que define o planejamento fatorial fracionário. A relação de definição para o planejamento  $2^{3-1}$  é  $I = ABC$ . Multiplicando os dois lados da equação pelo efeito principal ( $A$ ), obtém-se o efeito aliases de  $A$ , conforme equação 2.16:

$$\begin{aligned} A \cdot I &= A \cdot ABC \\ A &= A^2BC \\ A &= BC \end{aligned} \quad (2.16)$$

No cálculo dos efeitos de aliases, qualquer efeito multiplicado por  $I$  permanece o mesmo ( $A \cdot I = A$ ), enquanto um efeito multiplicado por si só resulta em  $I$  ( $A^2 = I$ ). Da mesma forma, os aliases de  $B$  e  $C$ , também podem ser calculados conforme as equações 2.17 e 2.18, respectivamente:

$$\begin{aligned} B \cdot I &= B \cdot ABC \\ B &= AB^2C \\ B &= AC \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned} C \cdot I &= C \cdot ABC \\ C &= ABC^2 \\ C &= AB \end{aligned} \tag{2.18}$$

### 2.3.2.1 Resolução do Planejamento

Segundo Montgomery (2017), a resolução de um planejamento fatorial fracionário é definida como o número de fatores no efeito de menor ordem na relação de definição. Por exemplo, na relação de definição  $I = ABCD = AD = BC$  de um planejamento  $2^{4-2}$ , o efeito de menor ordem é  $AD$  ou  $BC$ , cada um contendo dois fatores. Portanto, a resolução desse planejamento é igual a dois. A resolução de um planejamento fatorial fracionário é representada usando algarismos romanos. Por exemplo, um planejamento  $2^{4-2}$  com resolução  $II$  pode ser representado como  $2^{4-2}_{II}$ . A resolução fornece informações sobre o padrão de confundimento no planejamento.

- **Planejamentos de resolução III:** nesses planejamentos, o efeito de menor ordem na relação de definição tem três fatores (por exemplo, um planejamento  $2^{5-2}$  com a relação de definição  $I = ABD = ACE = BCDE$ ). Nos planejamentos de resolução  $III$ , nenhum efeito principal é relacionado com outros efeitos principais, mas efeitos principais são relacionados com interações de dois fatores. Além disso, interações de dois fatores estão associadas entre si.
- **Planejamentos de resolução IV:** nesses planejamentos, o efeito de menor ordem na relação de definição tem quatro fatores (por exemplo, um planejamento  $2^{4-1}$  com a relação de definição  $I = ABCD$ ). Nos planejamentos de resolução  $IV$ , nenhum efeito principal é associado a outros efeitos principais ou interações de dois fatores. No entanto, efeitos principais são relacionados

com interações de três fatores e as interações de dois fatores são associadas entre si.

- **Planejamentos de resolução V:** nesses planejamentos, o efeito de menor ordem na relação de definição tem cinco fatores (por exemplo, um planejamento  $2^{5-1}$  com a relação de definição  $I = ABCDE$ ). Nos planejamentos de resolução  $V$ , nenhum efeito principal ou interação de dois fatores são associados a outros efeitos principais ou interação de dois fatores. No entanto, efeitos principais são associados com interações de quatro fatores e as interações de dois fatores são relacionadas com interações de três fatores.

### 2.3.2.2 Análise de Variância

Segundo Vieira (2014), a análise de variância (ANOVA) é um método estatístico usado para testar diferenças entre duas ou mais médias. É utilizada para determinar a influência que variáveis independentes exercem sobre a variável dependente (variável resposta). Os métodos de teste  $t$  e  $z$ , desenvolvidos no século XX, foram utilizados para análise estatística até 1918, quando Ronald Fisher criou o método de análise de variância. A ANOVA também é chamada de análise de variância de Fisher e é uma extensão dos testes  $t$  e  $z$ . O termo tornou-se conhecido em 1925, depois de aparecer no livro de Fisher, "Métodos Estatísticos para Pesquisadores".

Em um experimento fatorial no qual os efeitos de dois fatores,  $A$  e  $B$ , estão sendo analisados, existem níveis  $n_a$  do fator  $A$  e níveis  $n_b$  do fator  $B$ . O modelo ANOVA para este experimento pode ser declarado conforme a equação 2.19:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \delta_j + (\tau\delta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.19)$$

Onde:

$\mu$  representa o efeito médio geral

$\tau_i$  é o efeito do  $i$ ésimo nível do fator  $A$  ( $i = 1, 2, \dots, n_a$ )

$\delta_j$  é o efeito do  $j$ ésimo nível do fator  $B$  ( $i = 1, 2, \dots, n_b$ )

$(\tau\delta)_{ij}$  representa o efeito da interação entre  $A$  e  $B$

$\epsilon_{ijk}$  representa os termos do erro aleatório

$k$  denota as  $m$  replicações ( $k = 1, 2, \dots, m$ )

Para verificar se cada um dos fatores analisados no experimento é significativo ou não, são utilizados os testes de hipótese. Para o exemplo anterior, com dois fatores,  $A$  e  $B$ , e sua interação  $AB$ , os testes de hipóteses podem ser formulados conforme abaixo:

- $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_{n_a} = 0$  (efeito principal do fator  $A$  está ausente)  
 $H_1: \tau_i \neq 0$  em pelo menos um  $i$
- $H_0: \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_{n_b} = 0$  (efeito principal do fator  $B$  está ausente)  
 $H_1: \delta_j \neq 0$  em pelo menos um  $j$
- $H_0: \tau\delta_{11} = \tau\delta_{12} = \dots = \tau\delta_{n_a n_b} = 0$  (interação  $AB$  está ausente)  
 $H_1: \tau\delta_i \neq 0$  em pelo menos um  $ij$

Segundo Vieira (2014), as estatísticas  $F$  são obtidas a partir das equações 2.20, 2.21 e 2.22, conforme abaixo:

$$(F_0)_A = \frac{QM_A}{QM_E} \quad (2.20)$$

Onde  $QM_A$  é o quadrado médio do fator  $A$  e  $QM_E$  é o quadrado médio do erro.

$$(F_0)_B = \frac{QM_B}{QM_E} \quad (2.21)$$

Onde  $QM_B$  é o quadrado médio do fator  $B$  e  $QM_E$  é o quadrado médio do erro.

$$(F_0)_{AB} = \frac{QM_{AB}}{QM_E} \quad (2.22)$$

Onde  $QM_{AB}$  é o quadrado médio da interação  $AB$  e  $QM_E$  é o quadrado médio do erro.

Montgomery (2017) afirma que a soma dos quadrados  $SQ$  é a soma do quadrado da variação, em que a variação é definida como a diferença entre cada valor individual e a média. Para determinar a soma dos quadrados, a diferença de cada

valor é elevada ao quadrado e depois somada. Desse modo, a soma de quadrados do modelo pode ser obtida a partir da equação 2.23:

$$SQ = \sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.23)$$

Onde:

$X_i$  representa o  $i$ ésimo valor

$\bar{X}$  representa a média dos dados

$X_i - \bar{X}$  representa o desvio de cada valor em relação a média

Portanto, a soma de quadrados do modelo pode ser obtida através da equação 2.24:

$$SQ_T = SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} \quad (2.24)$$

Onde  $SQ_T$  representa a soma dos quadrados do modelo,  $SQ_A$  representa a soma de quadrados do fator  $A$ ,  $SQ_B$  representa a soma de quadrados do fator  $B$  e  $SQ_{AB}$  representa a soma dos quadrados da interação  $AB$ . Os quadrados médios são obtidos dividindo a soma dos quadrados pelos graus de liberdade ( $gl$ ). A estatística  $F$  pode ser calculada a partir dos quadrados médios. Por exemplo, a estatística  $F$  para testar a significância do fator  $A$  (ou da hipótese  $H_0: \tau_i = 0$ ) pode ser definida através da equação 2.25:

$$(F_0)_A = \frac{QM_A}{QM_E} = \frac{\frac{SQ_A}{gl(SQ_A)}}{\frac{SQ_E}{gl(SQ_E)}} \quad (2.25)$$

Da mesma forma, a estatística  $F$  para testar a significância do fator  $B$  e da interação  $AB$  pode ser calculada a partir das equações 2.26 e 2.27:

$$(F_0)_B = \frac{QM_B}{QM_E} = \frac{SQ_B/gl(SQ_B)}{SQ_E/gl(SQ_E)} \quad (2.26)$$

$$(F_0)_{AB} = \frac{QM_{AB}}{QM_E} = \frac{SQ_{AB}/gl(SQ_{AB})}{SQ_E/gl(SQ_E)} \quad (2.27)$$

A Tabela 2.13 apresenta todas as equações ordenadas para exemplificar uma tabela ANOVA:

**Tabela 2.13:** Tabela ANOVA para um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>  
Fonte: Adaptado de Montgomery

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	Estatística F
Tratamento A	$a - 1$	$SQ_A$	$QM_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{QM_A}{QM_E}$
Tratamento B	$b - 1$	$SQ_B$	$QM_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{QM_B}{QM_E}$
Interação AB	$(a - 1)(b - 1)$	$SQ_{AB}$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{QM_{AB}}{QM_E}$
Erro	$ab(n - 1)$	$SQ_E$	$QM_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	
Total	$abn - 1$	$SQ_T$		

### 2.3.2.3 Análise de Resíduos

Segundo Box (2005), gráficos de resíduos ( $e_{ij}$ ) são usados para garantir que as suposições associadas ao modelo ANOVA não sejam violadas. O modelo ANOVA assume que os termos de erro aleatório ( $\epsilon_{ij}$ ) são normalmente e independentemente distribuídos com a mesma variação para cada tratamento. A suposição de normalidade pode ser verificada através da obtenção de um gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

A igualdade de variância é verificada pela plotagem de resíduos em relação aos tratamentos e às médias do tratamento,  $\bar{y}_i$  (também chamados de valores ajustados) e pela inspeção do *spread* nos resíduos. Se um padrão for visto nessas plotagens, isso indica a necessidade de usar uma transformação adequada na resposta que garantirá a igualdade de variação. Para verificar a independência dos termos do erro aleatório, os resíduos são plotados contra o tempo ou a ordem de execução para garantir que um padrão não exista nessas plotagens.

#### 2.3.2.4 Planejamento $2^k$ sem Réplica

Segundo Montgomery (2017), se um experimento fatorial é realizado com apenas uma réplica, não é possível testar hipóteses sobre os principais efeitos e interações, pois a soma dos quadrados dos erros não pode ser obtida. Isso ocorre porque o número de observações em uma réplica é igual ao número de termos no modelo ANOVA. Portanto, o modelo se ajusta perfeitamente aos dados, e não há graus de liberdade disponíveis para obter a soma dos quadrados dos erros. No entanto, às vezes só é possível executar uma réplica de um experimento  $2^k$  devido às restrições de recursos e tempo. Na ausência da soma dos quadrados dos erros, testes de hipóteses para identificar fatores significativos não podem ser realizados. Entretanto, outros métodos de análise podem ser utilizados no planejamento  $2^k$  sem réplica: pode-se agrupar interações de ordem superior, usar o gráfico de probabilidade normal dos efeitos ou incluir réplicas de ponto central no planejamento.

Uma das maneiras de lidar com planejamentos  $2^k$  sem réplica é usar a soma dos quadrados de algumas das interações de ordem superior como a soma dos quadrados dos erros, desde que essas interações de ordem superior possam ser consideradas insignificantes. Ao eliminar algumas das interações de ordem superior do modelo, os graus de liberdade correspondentes a essas interações podem ser usados para estimar o quadrado médio do erro. Uma vez conhecido o quadrado médio do erro, as estatísticas de teste para realizar testes de hipótese sobre os fatores podem ser calculadas.

Outra forma de usar o planejamento  $2^k$  sem réplica para identificar efeitos significativos é construir o gráfico de probabilidade normal dos efeitos. O erro padrão para todos os coeficientes de efeitos nos planejamentos  $2^k$  é o mesmo. Portanto, em um gráfico de probabilidade normal de coeficiente de efeitos (também conhecido como NPP – *Normal Probability Plot*), todos os coeficientes de efeitos não significativos (com  $\beta = 0$ ) devem ficar ao longo de uma linha reta, que representa a distribuição normal,  $N(0, \sigma^2 / (2^k \cdot m))$ . Desse modo, os coeficientes de efeitos que se apresentam fora dessa linha (com grandes desvios) serão significativos, pois não provêm dessa distribuição normal. Da mesma forma, como efeitos equivalem a  $2x$  os coeficientes de efeito, todos os efeitos não significativos também seguirão uma linha reta no gráfico de probabilidade normal dos efeitos (MONTGOMERY, 2017).

### 2.3.2.5 Algoritmo de Yates

Segundo Box (2005), o algoritmo de Yates foi criado por Frank Yates em 1937, sendo um processo usado para calcular as estimativas dos efeitos principais e das interações em um experimento fatorial. Por exemplo, um experimento fatorial com  $n$  fatores, cada um com dois níveis, é denotado por  $2^n$ . Os fatores são indicados por letras maiúsculas. Utiliza-se uma letra minúscula para o nível alto do fator e omite-se a letra para o nível baixo. Quando todos os fatores estão no nível baixo, usa-se o símbolo (1).

O algoritmo é apresentado em uma tabela. Primeiro, define-se todas as combinações dos níveis dos fatores em uma ordem padrão na coluna 1. A coluna 2 deve conter as observações de todas as combinações. Na terceira coluna, a primeira metade da coluna é obtida somando os pares adjacentes da coluna anterior e, na segunda metade, muda-se o sinal do primeiro valor dos pares e adicionam-se os valores dos pares adjacentes. Para as  $n$  colunas subsequentes, o procedimento é o mesmo, porém leva-se em consideração que a coluna resposta é sempre a coluna anterior (BOX, 2005). Para um planejamento  $2^2$ , por exemplo, os cálculos são exemplificados na Tabela 2.14. O valor dos efeitos é definido pela equação  $(C(k+2))/p \cdot 2^{k-1}$  e a soma dos quadrados pela equação  $(C(k+2))/p \cdot 2^k$ .

**Tabela 2.14:** Exemplo de aplicação do algoritmo de Yates  
Fonte: Adaptado de Box, 2005

Ensaio	Resposta	Coluna 3	Coluna 4	Efeitos		SQ
(1)	150	$150 + 147 = 297$	$297 + 308 = 605$	<i>T</i>	302,5	36,75
<i>a</i>	147	$155 + 153 = 308$	$-3 + (-2) = -5$	<i>A</i>	-2,5	6,25
<i>b</i>	155	$-150 + 147 = -3$	$-297 + 308 = 11$	<i>B</i>	5,5	30,25
<i>ab</i>	153	$-155 + 153 = -2$	$-(-3) + (-2) = 1$	<i>AB</i>	0,5	0,25

## 2.4 Avaliação de Desempenho de Impressoras 3D

Segundo Francischini (2017), processos de fabricação, de modo geral, podem ser avaliados quanto ao desempenho através de métricas de fabricação, que são medidas definidas para monitorar, analisar e otimizar os processos de produção em relação à quantidade, qualidade e diferentes aspectos de custo, podendo fornecer aos fabricantes informações valiosas sobre os negócios para atingir seus objetivos organizacionais.

Para Volpato et. al (2017), em processos de manufatura aditiva, deve-se descobrir constantemente maneiras de otimizar as operações para reduzir custos e aumentar a produtividade, sempre mantendo a qualidade do produto. Independentemente do setor de atuação, o objetivo é produzir mais por menos, e entender os processos de fabricação é o primeiro passo para melhorá-los. Ter uma imagem clara dos indicadores de desempenho de fabricação fornece uma visão geral da eficiência com que a produção é realizada em um formato direto e fácil de entender.

O objetivo dos indicadores de desempenho é obter uma ampla visão geral da produção, incluindo produção diária, custos de produção, custo de manutenção por máquina, ciclos de produção etc. O número diferente de maneiras possíveis de obter respostas significa que é possível combinar diferentes métricas para obter informações mais relevantes (SMITH, 2017). Dentre os indicadores de desempenho mais importantes, alguns são aplicadas com maior frequência em processos de fabricação aditiva, tais como: volume de produção, custos de produção, densidade de defeito e taxa de retorno.

Segundo Francischini (2017), no volume de produção deve-se avaliar as quantidades que determinado processo é capaz de produzir ao longo do tempo. Na manufatura aditiva, essa métrica é importante porque, após a definição de parâmetros para fabricação de uma determinada peça, é possível conhecer a capacidade de produção da máquina e, conseqüentemente, entender se o volume de produção é capaz de atender a demanda estipulada. Como o volume de produção é medido durante um período estabelecido, é possível comparar facilmente um momento específico com um *benchmark*. Para medir o volume de produção, é necessário selecionar o período que deve ser monitorado. Após estabelecer o prazo correto, é necessário coletar dados gerais de produção de cada produto fabricado e combiná-los para formar um valor agregado.

Outra métrica importante na fabricação aditiva são os custos de produção por produto, que deve especificar quanto custa cada componente e quanto representa para o produto acabado. Para Francischini (2017), a avaliação dos custos gerais por unidade durante um ciclo de produção é necessária para verificar se o produto é lucrativo em relação ao preço de venda definido. Os custos de produção referem-se a todas as despesas que devem incorrer ao fabricar uma unidade do produto. Isso inclui os vários componentes que entram em produção, como mão de obra, matérias-primas, suprimentos e outras despesas gerais de negócios. Geralmente, também

inclui os custos adicionados por impostos e outras taxas, como *royalties* devidos. Compreender os custos encontrados pela empresa para produzir uma única unidade é vital para melhorar as operações e reduzir as despesas gerais.

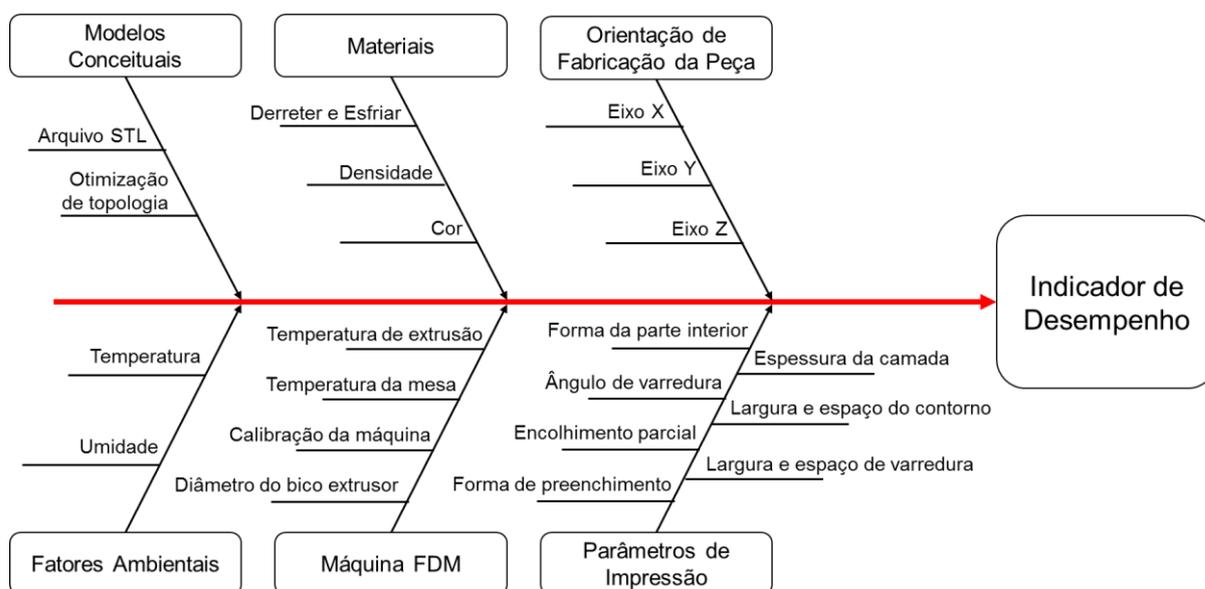
Para Smith (2017), avaliar a densidade de defeito também é uma tarefa importante no ambiente de fabricação aditiva. Este é um indicador chave de qualidade fácil de avaliar. A densidade do defeito identifica o número de produtos defeituosos dividido pelo número total de produtos produzidos. Uma métrica de fabricação como essa permite comparar a qualidade de diferentes produtos. É útil na identificação de áreas onde ocorrem problemas e permite a tomada de medidas necessárias para o que deve ser corrigido. Deve-se manter a densidade de defeitos com o menor índice possível, podendo comparar com os *benchmarks* do setor, ou seja, com outros processos de *AM* aprimorados que sirvam como referência.

Os lucros de fabricação exigem mais do que grandes quantidades de um produto. Os produtos defeituosos não apenas resultam em atrasos, mas também causam *recalls* caros, menor rentabilidade, e prejudicam permanentemente a reputação. Além disso, produtos com defeitos consistentes podem se tornar um dreno nas receitas de longo prazo. O rastreamento da densidade de defeitos com análises de fabricação pode ajudar a entender quais produtos estão com defeito, além de indicar o motivo e com que frequência esses defeitos ocorrem. Mais importante, eles podem servir como uma métrica importante de qualidade e padrões ao longo do tempo, pois podem destacar melhorias ou regressões nos defeitos do produto (SMITH, 2017).

Ao avaliar a produção em máquinas de fabricação aditiva, deve-se avaliar sua qualidade. Francischini (2017) afirmou que produzir em quantidade é vantajoso somente se mantiver a qualidade dos produtos. Monitorar a qualidade da produção é outra grande preocupação em processos de *AM*. A medição da taxa de retorno é crucial para avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos quando se trata de produzir um item sem nenhum defeito. Medir essa proporção tem o objetivo de reduzi-la o máximo possível, melhorando o processo de produção. Para reduzir a taxa de retorno, é necessário encontrar os motivos, que podem ser durante a produção. É necessário encontrar a causa raiz, onde e quando aconteceu no processo.

Narang et. al (2017), sugerem um modelo de diagrama de causa e efeito (também conhecido como diagrama de Ishikawa) para aplicação em processos de manufatura aditiva, de modo a obter resultados para avaliação de desempenho de

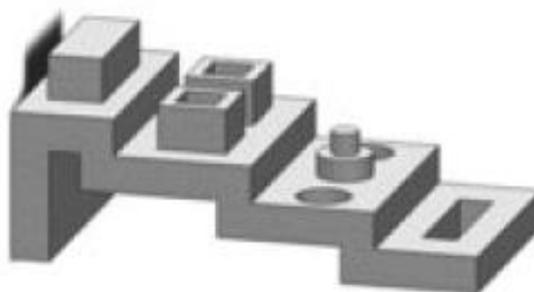
máquinas de fabricação aditiva, conforme Figura 2.16. Segundo os autores, com a manipulação dos diversos fatores existentes no processo é possível avaliar, através dos resultados obtidos, o desempenho da máquina e determinar técnicas de otimização do processo para fabricação de novos produtos. Utilizando o diagrama de causa e efeito, os autores verificaram que reduzindo a espessura da camada, por exemplo, é possível obter melhor precisão dimensional e maior qualidade no acabamento superficial da peça fabricada. Verificaram que a máxima resistência à tração pode ser obtida com 100% de preenchimento da peça. Constataram ainda que a orientação de impressão e o ângulo de varredura não afetam significativamente o acabamento superficial da peça, mas a otimização da orientação de fabricação reduz o tempo de impressão.



**Figura 2.16:** Diagrama de causa e efeito para avaliação de desempenho do processo de AM.  
Fonte: Adaptado de Narang et. al (2017).

Para avaliar o desempenho de máquinas de fabricação aditiva, geralmente são utilizados padrões com características diferentes, desenvolvidos com foco nas características de desempenho a serem analisadas. Roberson et. al (2013) desenvolveram um padrão (Figura 2.17) para fabricação em cinco modelos de impressoras 3D, com diferentes tecnologias de AM, de modo que após a análise de desempenho dos itens fabricados fosse possível montar um *ranking* a partir dos critérios de fabricação. A avaliação de desempenho teve foco na precisão dimensional e acabamento da superfície das peças fabricadas. Para elaboração do ranking, foi

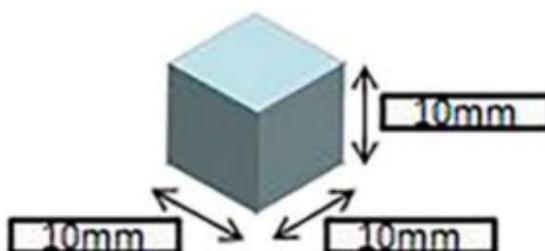
levado em consideração o tempo para fabricação de uma peça e várias peças, do consumo de material e do custo de fabricação.



**Figura 2.17:** Peça padrão para avaliação de desempenho de impressoras 3D.  
Fonte: Roberson et. al (2013).

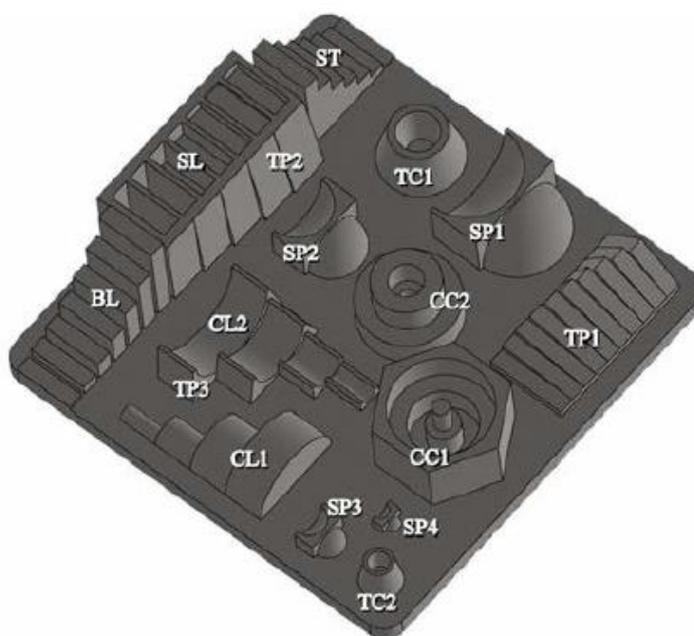
A precisão dimensional foi avaliada através da média de cinco medições em cada peça, comparada ao desenho *CAD*. Na avaliação de desempenho realizada pelos autores, o modelo *uPrint Plus* apresentou os melhores resultados, seguida dos modelos *SD 300 Pro*, *3D Touch*, *Replicator* e por último, o modelo *V-Flash*. Os autores avaliaram também a rugosidade superficial das peças e identificaram que os modelos *SD300 Pro* e *V-Flash* apresentaram os menores valores de rugosidade. Os modelos *Replicator* e *3D Touch* apresentaram os maiores valores de rugosidade. O modelo *uPrint* apresentou a menor variação nos dados apurados com o rugosímetro.

Durão et. al (2019) desenvolveram um padrão (figura 2.18) com o intuito de investigar e definir parâmetros ótimos para consumo de material, tempo de fabricação e precisão dimensional, utilizando uma impressora *3D Cloner ST*, com tecnologia FDM. Através de um planejamento de experimentos, os resultados indicaram que a velocidade de impressão e o número de contornos são os fatores mais importantes para a qualidade da peça fabricada.



**Figura 2.18:** Peça padrão desenvolvida para avaliação da impressora 3D Cloner ST.  
Fonte: Durão et. al (2019).

A partir de várias geometrias, Minetola et. al (2016) desenvolveram uma peça de referência para avaliação do desempenho de duas impressoras 3D, com base no *benchmark* de máquinas de alto custo, que por sua vez tendem a oferecer melhores recursos e resultados na fabricação dos produtos. O padrão foi projetado para caber no volume de construção da maioria das máquinas FDM de baixo custo, contendo planos, cilindros, esferas e cones, conforme Figura 2.19. As medições foram realizadas com uma MMC e, posteriormente, os resultados foram comparados às dimensões do desenho *CAD*.



**Figura 2.19:** Padrão utilizado para avaliação de desempenho de duas impressoras 3D.  
Fonte: Minetola et. al (2016)

Na avaliação de desempenho das duas máquinas, foi verificado que a máquina de alto custo (*Dimensional Elite*) obteve uma precisão dimensional melhor, se comparada à máquina de baixo custo (*3D Touch*). Foi verificado também que quanto menor a dimensão avaliada, menor a precisão das máquinas. Entretanto, essa diferença foi mais incisiva na impressora de baixo custo. Ademais, foi feita uma avaliação de diferentes geometrias (planeza, paralelismo e coaxialidade). Em todas as análises, a máquina de alto custo obteve resultados mais precisos e menor variabilidade nos dados.

Com base nos estudos realizados sobre manufatura aditiva, metrologia, planejamento de experimentos e avaliação de desempenho, foi proposto uma metodologia para avaliação metrológica de uma impressora Ender 3.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo trata dos materiais e métodos utilizados na verificação dos desvios dimensionais, geométricos e rugosidade superficial das peças fabricadas em uma impressora 3D, modelo Ender 3, com tecnologia FFF (Fabricação por Filamento Fundido). São apresentadas as características da peça padrão, os equipamentos utilizados para medição, as hipóteses e a estratégia adotada para análise dos dados.

A proposta de metodologia desse trabalho está relacionada a uma pesquisa experimental, na qual foi desenvolvido um artefato padrão em CAD, no software SolidEdge (versão estudante), de modo que fosse possível avaliar várias dimensões e geometrias nas peças fabricadas. A peça padrão foi fabricada no Laboratório Aberto de Brasília - LAB, com a manipulação de variáveis relacionadas ao objeto de estudo. As medições foram realizadas em uma Máquina de Medir por Coordenadas – MMC e um rugosímetro, no Laboratório de Metrologia da UnB.

#### 3.1 Planejamento e Desenvolvimento da Peça Padrão

As medições e análise dos dados contemplaram o foco principal do trabalho, pois os resultados foram utilizados para avaliar a precisão do processo de fabricação *FDM*, além de servir como referência para avaliação de outros modelos de impressoras, com a mesma tecnologia de impressão. A partir de um cuidadoso estudo do processo de *FDM* junto aos integrantes do LAB, que são especialistas em impressão 3D, foram definidas as variáveis do experimento com dois níveis, conforme Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Fatores e níveis do experimento

Fatores	<b>A:</b> densidade de enchimento <b>B:</b> temperatura de extrusão <b>C:</b> velocidade de impressão <b>D:</b> altura da camada
Níveis	10% ( <b>A-</b> ); 30% ( <b>A+</b> ) 225 °C ( <b>B-</b> ); 240 °C ( <b>B+</b> ) 40 mm/s ( <b>C-</b> ); 60 mm/s ( <b>C+</b> ) 0,20 mm ( <b>D-</b> ); 0,40 mm ( <b>D+</b> )

Conforme estudo realizado junto aos integrantes do LAB e de informações verificadas a partir de experiências dos usuários do Projeto RepRap, utilizando a impressora Ender 3, foi observado que em relação a densidade de enchimento, o indicado é que se utilize de 5 a 10% de enchimento para impressões decorativas e de 20 a 60% para peças funcionais, que exigem mais resistência e durabilidade. Entretanto, algumas peças podem requerer 100% de preenchimento, dependendo da finalidade de utilização.

Com relação a temperatura de extrusão, utilizando o material ABS, o ideal é que se utilize 230 °C, mas esse parâmetro pode variar de 220 a 250 °C. Para definição da temperatura da base (mesa) de impressão, foi levado em consideração o trabalho desenvolvido por Azevedo (2013). No projeto de melhoria em máquinas de impressão 3D, Azevedo afirmou que a temperatura de operação escolhida para a mesa tem grande influência não só sobre o funcionamento correto da impressora, mas também para uma melhor qualidade das peças. Foi verificado no estudo que as temperaturas acima de 90° apresentaram menor índice de falhas, portanto, para melhor aderência à mesa, foi utilizado a temperatura de 100 °C.

Ainda com base nas experiências dos usuários do LAB e do Projeto RepRap, foi verificado que para obter melhores resultados, a velocidade de impressão (utilizando a impressora Ender 3) deve estar compreendida entre 40 a 65 mm/s. Quanto à altura da camada, não há um ajuste ideal, pois esse parâmetro está mais relacionado ao propósito da impressão, assim como a densidade de enchimento. Contudo, para realizar impressões com detalhe fino e grosso, indica-se 0,12 mm e 0,20 mm de altura de camada, respectivamente. Os demais parâmetros de impressão não foram alterados, ou seja, foram utilizados conforme o padrão indicado pelo software Ultimaker Cura 4.5.

Desse modo, através de um planejamento fatorial fracionário do tipo  $2^{(k-p)} = 2^{(4-1)}$ , ou seja, um experimento com fração de  $\frac{1}{2}$  e resolução IV, foram fabricadas oito peças em ordem aleatória. O planejamento foi fracionado em função do tempo despendido para fabricação das peças, medição e análise dos dados. Ademais, nos planejamentos fatoriais, geralmente as interações de três ou mais fatores não são significativas. Portanto, com a fração do planejamento, foi possível otimizar o tempo para avaliação do processo *FDM* sem perda de informações relevantes para análise



Para medir o comprimento no eixo Z, foram realizadas medições na base das colunas 1, 2 e 3, para definição de um plano a partir de dez pontos próximos a cada coluna. Em seguida, foram realizadas medições de mais cinco pontos na superfície de cada uma dessas colunas para observar o comprimento (altura) no eixo Z. No eixo Y (28 e 64 mm), foi definido um plano a partir de dez pontos, tendo como referência a parte interna da coluna 3. Em seguida, foi realizada a medição de mais cinco pontos distribuídos na parte interna da coluna 1 para o comprimento de 64 mm, e mais cinco pontos distribuídos na parte interna da coluna 2 para o comprimento de 28 mm. Do mesmo modo foram realizadas as medições dos comprimentos no eixo X, porém utilizando as colunas 4 e 5 para os comprimentos de 28 e 64 mm, respectivamente. O procedimento para análise dos desvios foi repetido 5 vezes, de modo que fosse possível calcular a média, tendência, desvio padrão e erro padrão.

No cilindro, foram realizadas medições de 10 pontos distribuídos em cada diâmetro (20 e 30 mm) para análise dos desvios dimensionais (diâmetro interno e externo) e desvios geométricos (concentricidade/coaxialidade e cilindridade interna/externa). O desvio de planeza foi observado a partir de 20 pontos distribuídos sobre a base de cada peça. Para cálculo da esfericidade, foram realizadas medições de 10 pontos em cada peça. Para analisar os desvios de forma livre, foram verificados 40 pontos em cada função  $X = -Y^2$ , nos eixos X e Y. Assim como na análise dos demais desvios, o procedimento foi repetido 5 vezes.

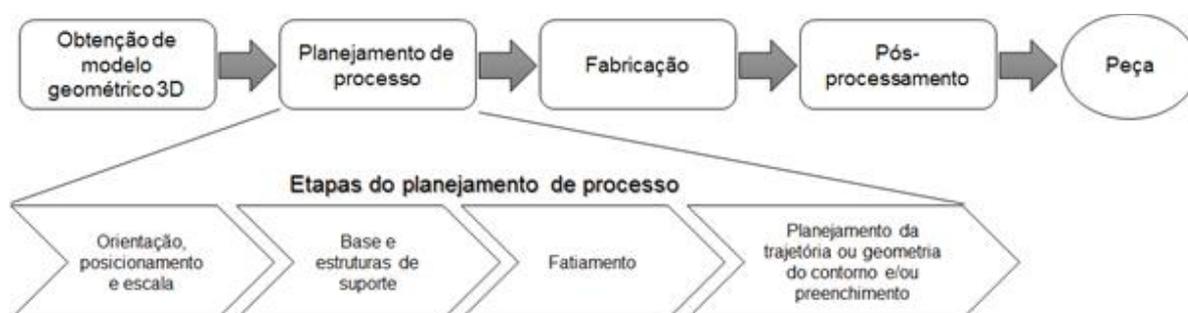
Os desvios de paralelismo foram analisados nos eixos X, Y e Z. Nos eixos X e Y, foram utilizados planos de referência para cada eixo, a partir de 10 pontos, na parte interna da coluna 3. Em seguida, foram definidos mais cinco planos (também a partir de 10 pontos) na parte interna das colunas 1 (para o eixo Y) e 5 (para o eixo X). No eixo Z, foi utilizada a base da coluna 5 como referência, com mais cinco medições de plano (10 pontos) na superfície da mesma coluna.

Para os desvios de perpendicularidade nos planos XY, XZ e YZ, a coluna 5 foi utilizada como referência. Nos planos XY e XZ, foi definido um plano a partir de 10 pontos na parte externa da coluna (eixo X), e então foram definidos outros planos com cinco repetições nos eixos Y (parte interna da coluna) e Z (superfície da coluna). Para analisar os desvios no plano YZ, foi definido um plano na parte interna do eixo Y e mais cinco planos na superfície da coluna, posteriormente.

O ângulo de 30° foi verificado na coluna 1, enquanto o ângulo de 60° foi analisado na coluna 5. A partir da obtenção de 10 pontos, foram definidos 5 planos na

superfície de cada inclinação. Outros 10 pontos foram medidos para definição do plano de referência na base das colunas 1 e 5, para análise dos desvios de angularidade de 30° e 60°, respectivamente. A rugosidade das peças foi analisada a partir de 5 medições em cada eixo de coordenadas. As medições para análise de rugosidade nos eixos X e Y foram verificadas na base da peça, enquanto a rugosidade no eixo Z foi verificada na parte interna da coluna 5.

Visando obter os melhores resultados no experimento, foram utilizados parâmetros e técnicas de impressão já relatados em outras pesquisas, tais como temperatura ideal da mesa e do bico extrusor, altura da camada, preenchimento da peça, velocidade do cabeçote, redução/eliminação das estruturas de suporte etc., que tem como foco a qualidade de impressão da peça. A Figura 3.2 mostra as etapas do processo de manufatura aditiva, no qual há o desdobramento do planejamento de processo. Nessa etapa, foi utilizado o software Ultimaker Cura 4.5. Os parâmetros do processo foram manipulados com o intuito de melhorar o resultado em termos de precisão dimensional e acabamento superficial das peças, bem como redução do tempo de impressão e custo de fabricação.



**Figura 3.2:** Etapas do processo de manufatura aditiva  
Fonte: Volpato et al. (2017)

## 3.2 Equipamentos Utilizados

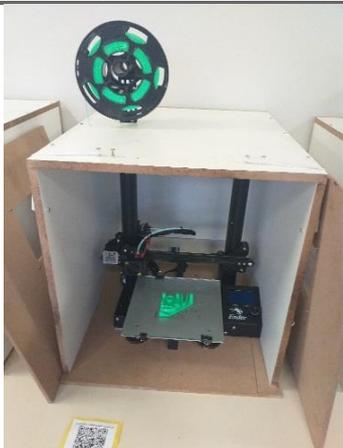
Durante a execução desse trabalho, foram utilizados três equipamentos: uma impressora 3D, no Laboratório Aberto de Brasília, além de uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) e um rugosímetro, disponíveis no Laboratório de Metrologia – UnB.

### 3.2.1 Impressora 3D

Após o desenvolvimento da peça padrão em CAD, no software SolidEdge, e a definição dos parâmetros do processo no Ultimaker Cura, as peças foram fabricadas

em uma impressora 3D, modelo Ender 3, com tecnologia FFF, alterando apenas as variáveis independentes (densidade de enchimento, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e altura da camada), conforme definido no planejamento fatorial fracionário. A impressora, que faz parte do Projeto RepRap (iniciativa com o objetivo de disponibilizar impressoras para prototipagem rápida com capacidade de autorreplicação), foi montada pelos próprios integrantes do Laboratório Aberto de Brasília. A Tabela 3.3 mostra uma imagem da impressora Ender com suas especificações técnicas.

**Tabela 3.3:** Especificações técnicas – Impressora 3D (Ender 3)

Impressora 3D	Especificações Técnicas
	<p>Tecnologia: FDM            Área de impressão: 220 x 220 x 250 mm            Bico de impressão: 0,4 mm            Filamento: PLA, ABS, TPU de 1,75 mm            Máx. velocidade de impressão: 200 mm/s            Máx. resolução de camada: 0,1 mm            Precisão da impressão: +/-0,1 mm            Mesa aquecida: sim            Conectividade: cartão SD, USB            Tela LCD: sim</p>

Na etapa de fabricação das peças, foi realizado o nivelamento da mesa com o bico extrusor. Para fixação da peça, de modo que houvesse uma boa aderência entre as peças fabricadas e a mesa de impressão, foi utilizada cola bastão (adesivo fixador). Ainda durante a fabricação das peças, foram observados os valores de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e tempo de impressão, conforme detalhado na Tabela 3.4. A menor temperatura foi observada na fabricação da Peça 3 (execução 5) e a maior temperatura na Peça 5 (execução 2), com diferença de temperatura de 7 °C. Ademais, a Peça 5 foi fabricada com a menor umidade de ar observada (44%) enquanto na fabricação da Peça 3 foi observado o maior valor de umidade (56%). Todo o processo de fabricação foi executado em 17 h 27 min.

**Tabela 3.4:** Temperatura, umidade e tempo de impressão na fabricação das peças.

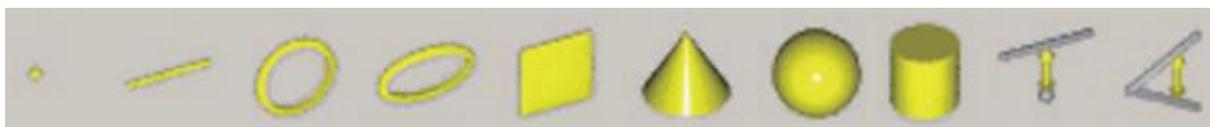
Execuções (Ordem)	Temperatura (°C)	Umidade do Ar (%)	Tempo de Impressão
1 (4)	28,0	47	3 h 03 min
2 (5)	29,0	44	1 h 47 min
3 (8)	28,0	46	1 h 42 min
4 (7)	24,0	54	3 h 12 min
5 (3)	22,0	56	1 h 25 min
6 (1)	27,0	47	2 h 35 min
7 (6)	26,0	49	2 h 21 min
8 (2)	26,0	54	1 h 22 min

### 3.2.2 Máquina de Medir por Coordenadas - MMC

Foi utilizada uma MMC, modelo Cantilever QM-353 (Figura 3.3), fabricada pela Mitutoyo. Conforme certificado de calibração (ANEXO I), o equipamento tem erro de apalpamento de 3,2  $\mu\text{m}$  e incerteza expandida de medição (95%) de  $U = 1,2 + L/600$  mm, sendo  $L$  o comprimento medido em mm. A máquina possui ainda capacidade de trabalho de 300 x 500 x 300 mm nos eixos X, Y e Z, respectivamente, e uma resolução de escala de 0,0005 mm em cada eixo de coordenadas. A calibração do apalpador da MMC foi realizada com uma esfera padrão, com diâmetro nominal de 2 mm. Foi utilizado massa de modelar para fixação das peças na MMC, evitando deslocamentos com o toque do apalpador durante as medições.

**Figura 3.3:** (a) MMC QM-353 e (b) apalpador de medição e esfera padrão

O software MCOSMOS V3.0 foi utilizado para obter as coordenadas dos pontos X, Y e Z. A Figura 3.4 mostra alguns elementos disponíveis (da esquerda para a direita): ponto, linha, círculo, elipse, plano, cone, esfera, cilindro, distância e ângulo.



**Figura 3.4:** Elementos de medição no MCOSMOS

Fonte: Mitutoyo

Para efetuar as medições na MMC, foi utilizada cola epóxi para fixação da peça. Na etapa de medição, a temperatura ambiente e a umidade do ar foram observadas a fim de reduzir os erros provenientes dos fatores ambientais no processo. Para o controle de temperatura foi utilizado um termômetro de líquido em vidro com sensor termorresistivo. De acordo com o certificado de calibração (ANEXO II), o termômetro possui resolução de 0,1°C e incerteza de 0,06°C.

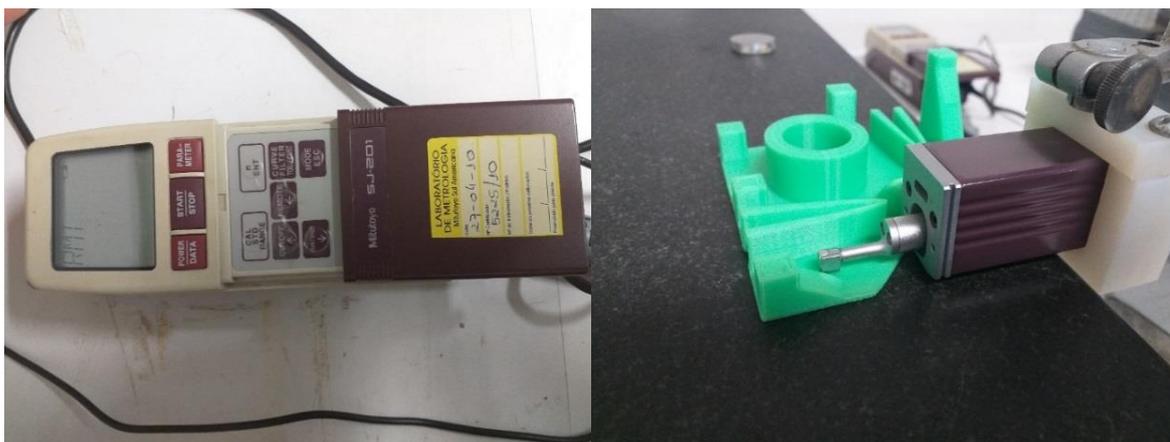
A Tabela 3.5 mostra os valores observados durante as medições, com a temperatura ambiente mínima de 22,3°C (Peça 7) e máxima de 23,1 °C (Peça 3). A umidade relativa do ar ficou entre 32% e 34%. Foi observado ainda que todo o processo de medição foi realizado em 14 h 14 min, contudo o tempo de atividade pode sofrer variações conforme a habilidade do operador em manusear a MMC e o rugosímetro. Adicionando o tempo de impressão das peças, todo o processo foi executado em 31 h 41 min.

**Tabela 3.5:** Temperatura, umidade e tempo de execução na medição das peças.

Execuções (Ordem)	Temperatura (°C)	Umidade do Ar (%)	Tempo de Medição
1 (4)	23,0	34	1 h 57 min
2 (5)	22,5	34	1 h 50 min
3 (8)	22,8	33	1 h 53 min
4 (7)	22,3	33	1 h 48 min
5 (3)	23,1	32	1 h 47 min
6 (1)	22,9	32	1 h 42 min
7 (6)	22,9	33	1 h 38 min
8 (2)	22,4	33	1 h 39 min

### 3.2.3 Rugosímetro

Para avaliar a rugosidade das peças, foi utilizado o rugosímetro SJ-201, do fabricante Mitutoyo (Figura 3.5). De acordo com informações do fabricante, esse equipamento possui faixa de medição ampla de 350  $\mu\text{m}$  (-200  $\mu\text{m}$  a +150  $\mu\text{m}$ ) e parâmetros de rugosidade compatíveis com ISO, DIN, ANSI e JIS. São fornecidos 19 parâmetros de análise, incluindo os parâmetros básicos:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$  e  $R_y$ .



**Figura 3.5:** Rugosímetro SJ-201, Mitutoyo

A transferência de dados, do rugosímetro para o computador, foi feita através da interface RS-232C. Nesse experimento foi utilizado o padrão ISO 97 e filtro PC75. Utilizando o software SurfTest SJ-201P Ver.3005, da Mitutoyo, foi definido um *cut-off* de 2,5 (máximo disponível no software) e  $n=3$ , definindo uma distância de 7,5 mm em cada medição de rugosidade.

### 3.3 Análise dos Dados

O desempenho da impressora 3D foi verificado através dos ensaios propostos. Os dados foram analisados através do cálculo de efeitos principais, utilizando o algoritmo de Yates, e através da análise de variância (Tabela 3.6), tendo em vista que o experimento foi constituído de quatro variáveis independentes (densidade de enchimento, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e altura da camada). A variável dependente  $Y$  representa a resposta (desvio dimensional, desvio geométrico, rugosidade e tempo de impressão).

**Tabela 3.6:** ANOVA para o planejamento fatorial fracionário  $2^{4-1}$ 

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor de F
<i>A (BCD)</i>	$a - 1$	$SQ_A$	$QM_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{QM_A}{QM_E}$
<i>B (ACD)</i>	$b - 1$	$SQ_B$	$QM_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{QM_B}{QM_E}$
<i>C (ABD)</i>	$c - 1$	$SQ_C$	$QM_C = \frac{SQ_C}{c - 1}$	$\frac{QM_C}{QM_E}$
<i>D (ABC)</i>	$d - 1$	$SQ_D$	$QM_D = \frac{SQ_C}{d - 1}$	$\frac{QM_D}{QM_E}$
<i>AB (CD)</i>	$(a - 1)(b - 1)$	$SQ_{AB}$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{QM_{AB}}{QM_E}$
<i>AC (BD)</i>	$(a - 1)(c - 1)$	$SQ_{AC}$	$QM_{AC} = \frac{SQ_{AC}}{(a - 1)(c - 1)}$	$\frac{QM_{AC}}{QM_E}$
<i>BC (AD)</i>	$(b - 1)(c - 1)$	$SQ_{BC}$	$QM_{BC} = \frac{SQ_{BC}}{(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{QM_{BC}}{QM_E}$
<i>Erro</i>	$abcd(n - 1)$	$SQ_E$	$QM_E = \frac{SQ_E}{abcd(n - 1)}$	
<i>Total</i>	$abcdn - 1$	$SQ_T$		

Nessa análise, houve a pretensão de avaliar os dados e chegar em conclusões que pudessem responder às seguintes perguntas:

1. Quais os efeitos das variáveis independentes?
2. Existe interação entre as variáveis independentes?
3. Quais variáveis independentes são significativas?

Todas essas questões estão relacionadas ao foco desse trabalho, que é a avaliação do desempenho de impressoras 3D através da análise dos desvios das peças fabricadas em processo de manufatura aditiva.

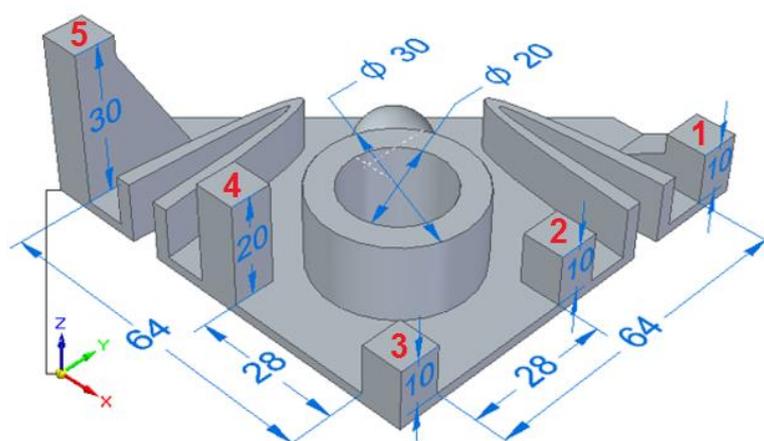
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Partindo da metodologia proposta no capítulo anterior, foram realizadas medições das oito peças fabricadas na impressora 3D, modelo Ender 3, com tecnologia FDM. Todas as medições foram executadas em um mesmo elemento geométrico, exceto o comprimento das colunas de 10 mm, no eixo Z, que foi executada em três colunas retangulares diferentes de mesma medida. Foram realizadas cinco medições de cada parâmetro  $y$ , em cada ensaio do planejamento experimental, a fim de obter a média amostral, a tendência, o desvio padrão e o erro padrão para análise posterior dos desvios dimensionais, desvios geométricos e rugosidade. As barras de erro foram calculadas a partir da tabela t de Student, adotando um nível de significância de 0,05 (IC de 95%) com quatro graus de liberdade.

Para o cálculo dos efeitos principais, a partir da tendência amostral, foi aplicado o algoritmo de Yates e posteriormente foram traçados os gráficos de probabilidade normal (NPP) dos efeitos e dos resíduos, gráfico de efeitos principais, gráfico de interações, além da análise de variância para validação dos dados. Com os resultados obtidos, foi possível constatar as variáveis significativas para cada resposta.

### 4.1 Desvio Dimensional

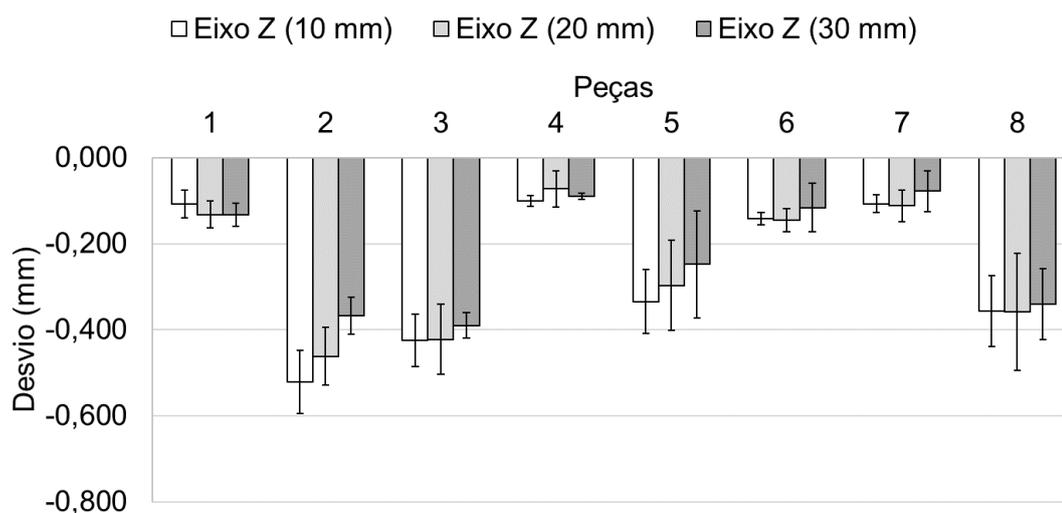
Os desvios dimensionais analisados foram: comprimento (eixos X, Y e Z) e os diâmetros (interno e externo) do cilindro. Os eixos X e Y foram analisados em dois comprimentos (28 e 64 mm), o Eixo Z em três comprimentos (10, 20 e 30 mm) e o diâmetro em duas medidas (20 e 30 mm), conforme Figura 4.1.



**Figura 4.1:** Dimensões do comprimento (X, Y e Z) e diâmetro (interno e externo) do cilindro

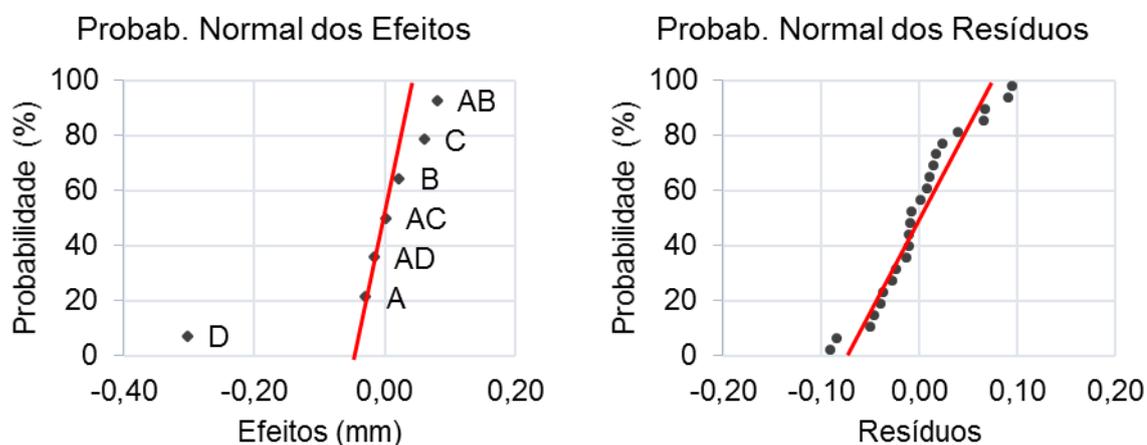
### 4.1.1 Comprimento

Analisando o eixo Z (medições realizadas da base à superfície das colunas 1, 2, 3, 4 e 5, conforme detalhado na Figura 4.1), foi verificado que os mensurandos 2, 3, 5 e 8 apresentaram os maiores desvios dimensionais, bem como a maior variabilidade dos dados em todos os comprimentos, conforme Figura 4.2. Verificando a tabela do planejamento fatorial fracionário, foi percebido que os maiores desvios foram notados nas peças fabricadas com a variável D (altura da camada) no nível alto.



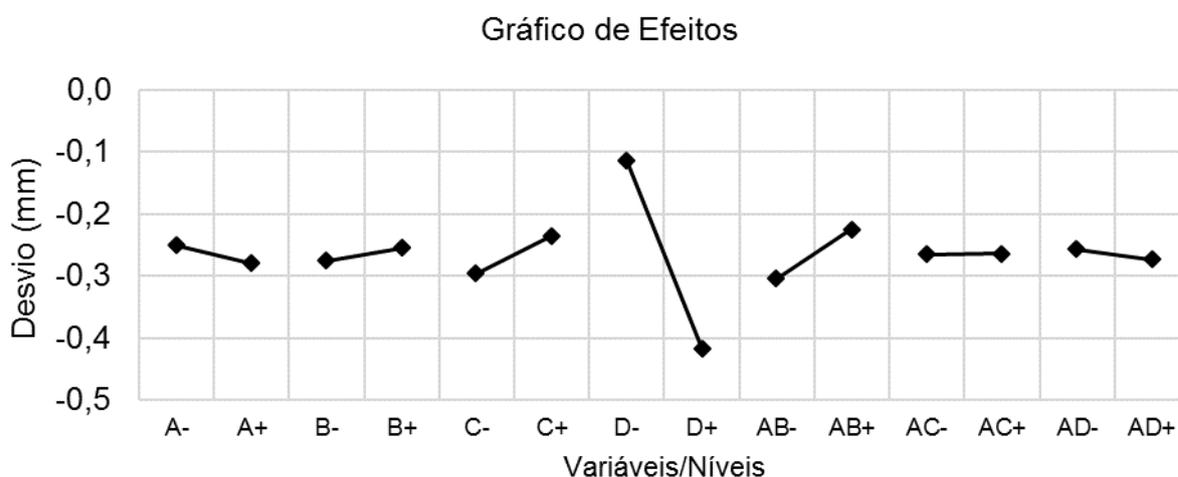
**Figura 4.2:** Desvio dimensional (comprimento no eixo Z) – média e barras de erro.

Para certificar essa análise, foram plotados os gráficos de probabilidade normal dos efeitos e dos resíduos. Foi verificado que as variáveis C (velocidade de impressão) e D (altura da camada), além da interação AB (densidade de enchimento e temperatura de extrusão) foram significativas, conforme Figura 4.3(a). Através da análise de resíduos, na Figura 4.3(b), foi verificado que a normalidade dos dados não pode ser rejeitada.

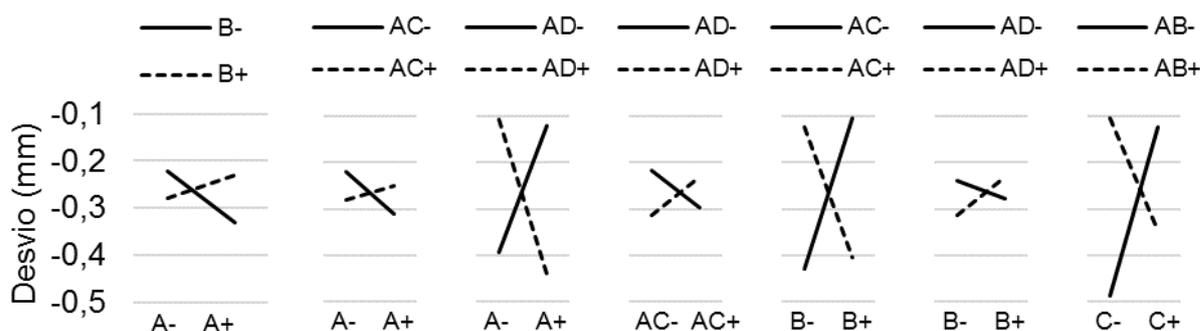


**Figura 4.3:** Desvio dimensional (Eixo Z - 10 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Através do gráfico de efeitos (Figura 4.4), foi constatado que ao elevar o nível da variável C (que está confundida com a interação ABD), a resposta aumenta 0,06 mm. Algo semelhante ocorre ao se elevar o nível da interação AB (CD), que aumenta a resposta em 0,08 mm. Entretanto, a variável D (ABC), teve um efeito contrário, ou seja, ao elevar o nível da altura da camada, a resposta reduziu 0,30 mm. Foi verificado ainda sete interações entre as variáveis de resposta, conforme Figura 4.5.



**Figura 4.4:** Desvio dimensional (comprimento) – gráfico de efeitos.



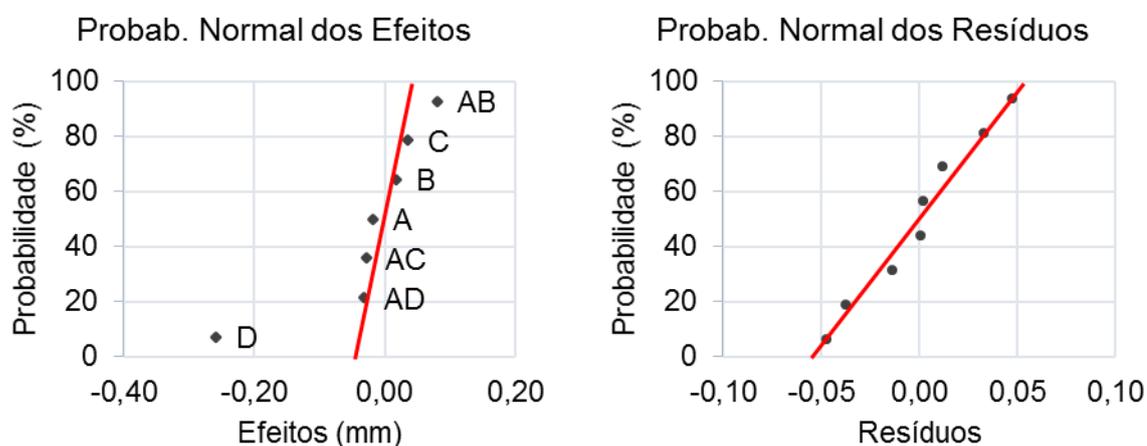
**Figura 4.5:** Desvio dimensional (comprimento) – gráfico de interações.

Para concluir, foi feita a análise de variância para confirmação dos efeitos observados no gráfico de probabilidade normal. De fato, as variáveis C (velocidade de impressão) e D (altura da camada), juntamente com a interação AB foram significativas com intervalo de confiança de 95%, conforme Tabela 4.1. Foi observado que as três variáveis respondem 91,94% da variação dos dados e que o modelo ( $R^2$ ) responde 93,40% da variabilidade na resposta.

**Tabela 4.1:** Análise de variância – Comprimento no eixo Z (10 mm)

Fator	GL	Análise de Variância				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,005245	0,79%	0,005245	1,921465	0,184711
B	1	0,002843	0,43%	0,002843	1,041386	0,322683
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,022034</b>	<b>3,33%</b>	<b>0,022034</b>	<b>8,071850</b>	<b>0,011796</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,547224</b>	<b>82,71%</b>	<b>0,547224</b>	<b>200,466465</b>	<b>0,000000</b>
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>0,039043</b>	<b>5,90%</b>	<b>0,039043</b>	<b>14,302635</b>	<b>0,001634</b>
AC	1	0,000013	0,00%	0,000013	0,004946	0,944807
AD	1	0,001517	0,23%	0,001517	0,555677	0,466818
Erro	16	0,043676	6,60%	0,002730		
Total	23	0,661595	100,00%	0,028765		

Os demais comprimentos foram analisados seguindo a mesma metodologia. No comprimento de 20 mm, no eixo Z, foi verificado que a variável D e a interação AB (CD) foram significativas, conforme observado na Figura 4.6(a). Ao elevar o nível da variável D, a resposta reduz 0,26 mm e ao elevar o nível da interação AB, a resposta aumenta 0,08 mm. O gráfico de probabilidade dos resíduos demonstrou que não é possível rejeitar a normalidade dos dados, conforme Figura 4.6(b).

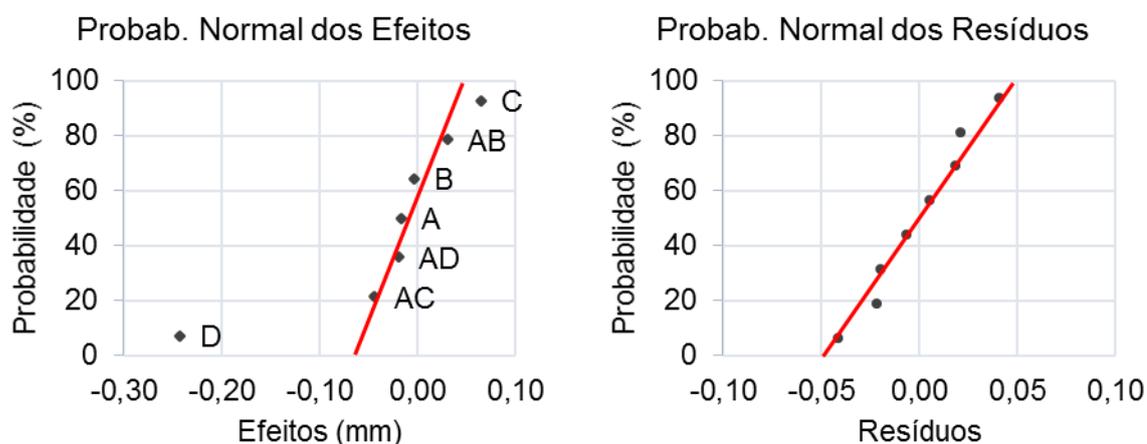
**Figura 4.6:** Comprimento no eixo Z (20 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos

Através da análise de variância, na Tabela 4.2, foi observado mais uma vez que, de fato, a variável D (ABC) e a interação AB (CD) foram significativas para um nível de significância de 0,05. Ademais, foi observado que as variáveis resposta D e AB respondem 95,30% da variação dos dados.

**Tabela 4.2:** Análise de variância – Comprimento no eixo Z (20 mm)

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
C	1	0,002346	1,52%	0,002346	2,425642	0,217238
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,134525</b>	<b>86,97%</b>	<b>0,134525</b>	<b>139,084259</b>	<b>0,001310</b>
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>0,012880</b>	<b>8,33%</b>	<b>0,012880</b>	<b>13,316668</b>	<b>0,035512</b>
AD	1	0,002029	1,31%	0,002029	2,097608	0,243364
Erro	3	0,002902	1,88%	0,000967		
Total	7	0,154682	100,00%			

Na avaliação do comprimento de 30 mm, no eixo Z (vertical), foi verificado que as variáveis C e D foram significativas. Ao elevar o nível, a variável C (velocidade de impressão) aumenta a resposta em 0,06 mm, enquanto a variável D reduz a resposta em 0,24 mm, conforme apresentado na Figura 4.7(a). Através da Figura 4.7(b), foi verificado que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.

**Figura 4.7:** Comprimento no eixo Z (30 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos

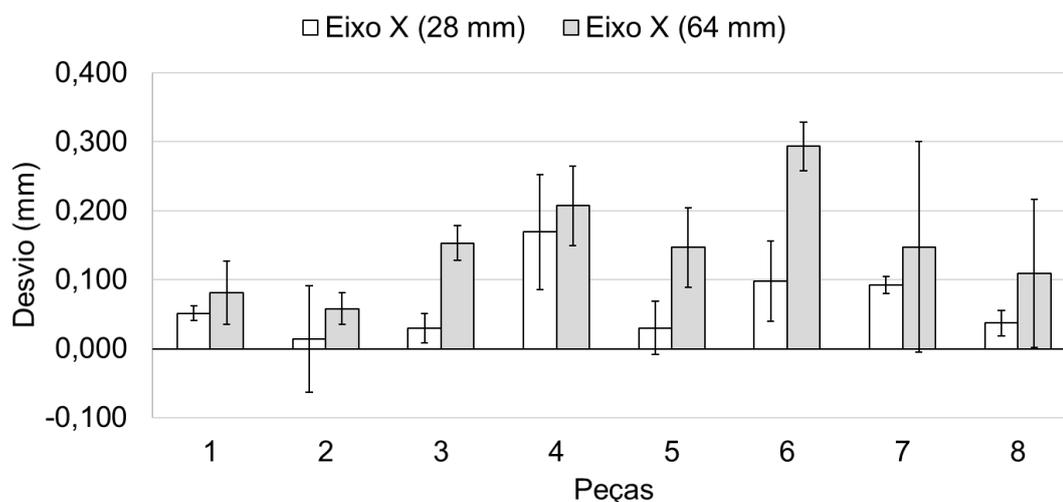
A Tabela 4.3 apresenta a análise de variância, na qual foi observado que o modelo proposto responde 94,79% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.3:** Análise de variância – Comprimento no eixo Z (30 mm)

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,008308</b>	<b>6,26%</b>	<b>0,008308</b>	<b>19,428828</b>	<b>0,021660</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,117564</b>	<b>88,54%</b>	<b>0,117564</b>	<b>274,944565</b>	<b>0,000477</b>
AB	1	0,001818	1,37%	0,001818	4,251825	0,131245
AC	1	0,003811	2,87%	0,003811	8,911879	0,058350
Erro	3	0,001283	0,97%	0,000428		
Total	7	0,132783	100,00%			

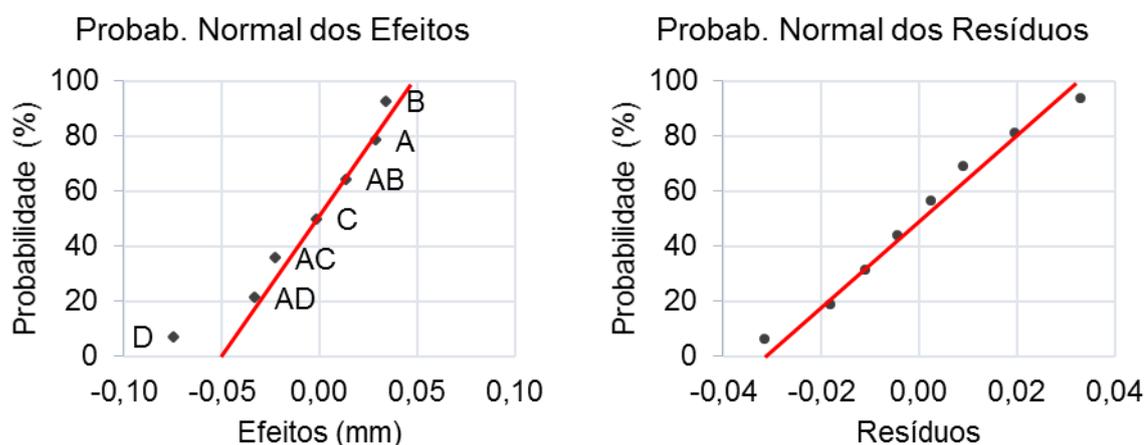
Foram observados dois comprimentos no eixo X, conforme Figura 4.8. No comprimento de 28 mm, os maiores desvios foram observados nas peças 1, 4, 6 e 7, as quais foram fabricadas com a variável D (altura da camada) no nível baixo. Entretanto, as maiores variabilidades dos dados foram observadas nas peças 2, 4 e 6. No comprimento de 64 mm, os maiores desvios foram verificados nas peças 3, 4, 5 e 6, que foram fabricadas com a interação AD (densidade de enchimento e altura da camada) no nível baixo. As maiores variabilidades foram observadas nas peças 7 e 8.

Foi observado ainda que o comprimento de 64 mm obteve os maiores desvios em todas as peças. Para o comprimento de 28 mm, o desvio médio foi de 0,07 mm, com desvio mais acentuado na peça 4 (0,17 mm), enquanto para o comprimento de 64 mm o desvio médio foi de 0,15 mm, tendo o desvio mais acentuado na peça 6 (0,29 mm). Ou seja, o comprimento de 64 mm obteve um acréscimo de 130% no desvio se comparado ao desvio de 28 mm.



**Figura 4.8:** Desvio dimensional (comprimento no eixo X) – média e barras de erro

A Figura 4.9(a) demonstra, através do gráfico de probabilidade normal dos efeitos, que para o comprimento de 28 mm, no eixo X, apenas a variável D (altura da camada) foi significativa. Elevando o nível da variável D (altura da camada), a reposta reduz 0,07 mm. As demais variáveis não foram significativas. A Figura 4.9(b) demonstra, através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



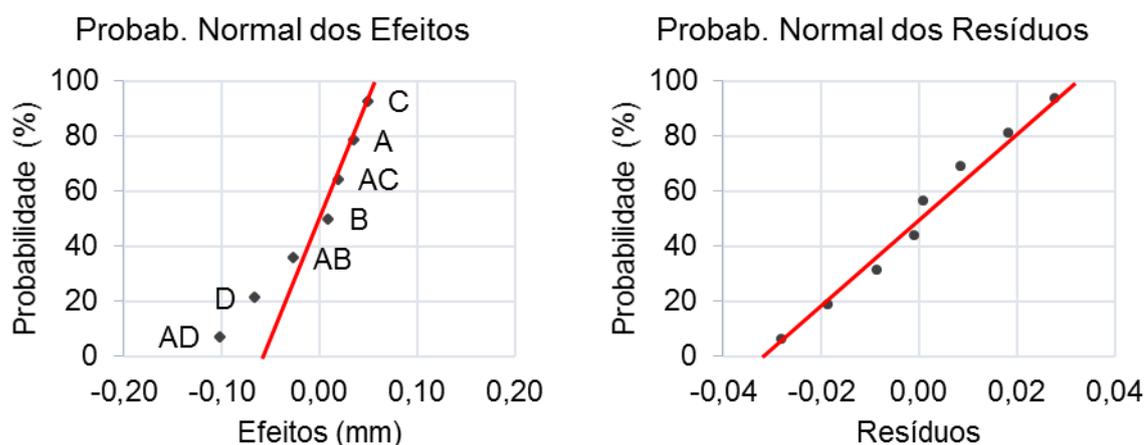
**Figura 4.9:** Comprimento no eixo X (28 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos

A análise de variância (Tabela 4.4) confirmou que apenas a variável D (altura da camada) foi significativa e que responde 59,82% da variação dos dados.

**Tabela 4.4:** Análise de variância – Comprimento no eixo X (28 mm)

Fator	GL	Análise de Variância				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,001659	8,89%	0,001659	3,660694	0,151634
B	1	0,002312	12,39%	0,002312	5,101951	0,109052
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,011160</b>	<b>59,82%</b>	<b>0,011160</b>	<b>24,627460</b>	<b>0,015712</b>
AD	1	0,002165	11,60%	0,002165	4,777165	0,116727
Erro	3	0,001359	7,29%	0,000453		
Total	7	0,018655	100,00%			

A Figura 4.10(a) demonstra que a variável D (ABC) e a interação AD (BC) foram significativas para o comprimento de 64 mm. Aumentando o nível da variável D (altura da camada), a resposta reduz 0,07 mm e aumentando o nível da interação AD (densidade de enchimento e altura da camada), a resposta reduz 0,10 mm. As demais variáveis não foram significativas. A Figura 4.10(b) demonstra, ainda, que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.



**Figura 4.10:** Comprimento no eixo X (64 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos

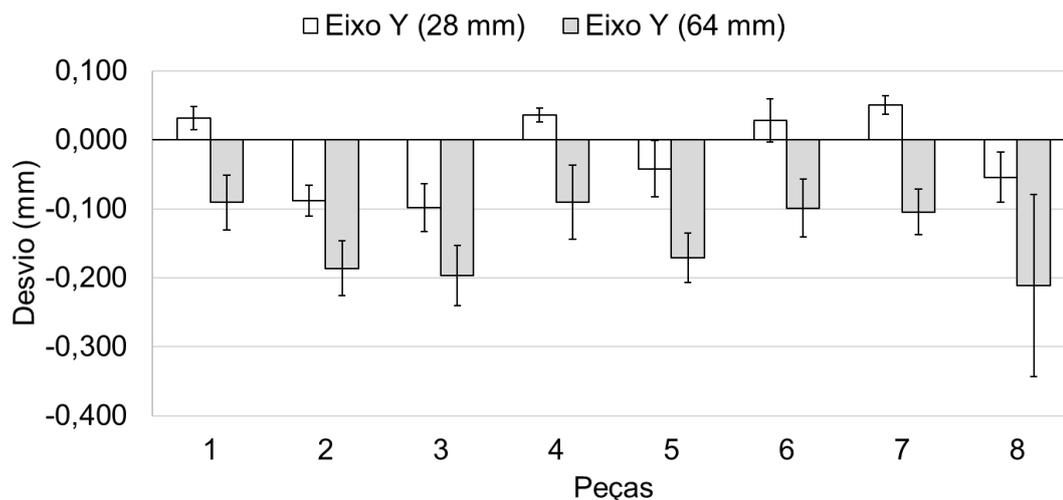
Na Tabela 4.5 é possível confirmar a significância da variável D (altura da camada) e da interação AD (densidade de enchimento e altura da camada). Juntas, representam 75,04% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.5:** Análise de variância – Comprimento no eixo X (64 mm)

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,002415	6,24%	0,002415	3,044205	0,179371
C	1	0,004871	12,58%	0,004871	6,139579	0,089443
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,008594</b>	<b>22,19%</b>	<b>0,008594</b>	<b>10,832025</b>	<b>0,046036</b>
<b>AD</b>	<b>1</b>	<b>0,020463</b>	<b>52,84%</b>	<b>0,020463</b>	<b>25,792654</b>	<b>0,014747</b>
Erro	2	0,000927	2,40%	0,000464		
Total	7	0,038722	100,00%			

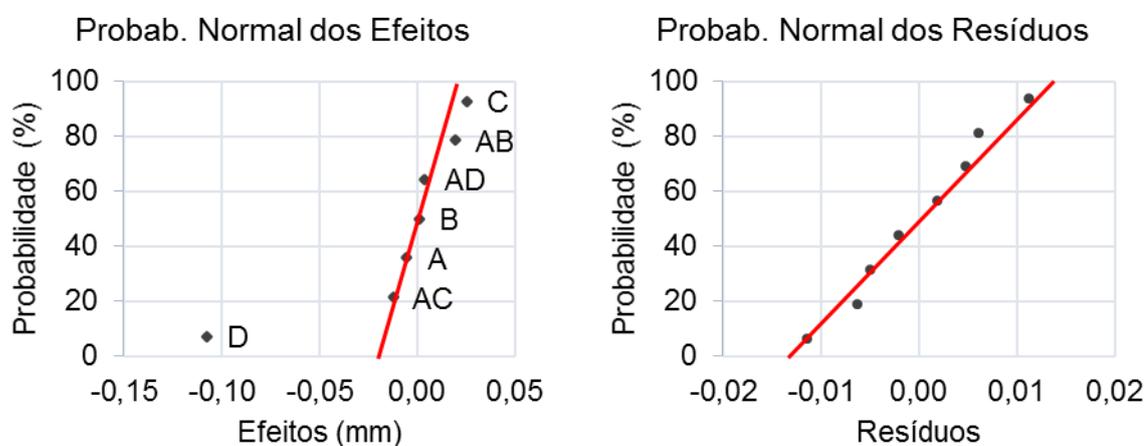
No eixo Y também foram observados dois comprimentos: 28 e 64 mm, conforme Figura 4.11. Foi observado desvios positivos nas peças 1, 4, 6 e 7, no comprimento de 28 mm, enquanto as demais apresentaram desvios negativos. Por outro lado, o comprimento de 64 mm apresentou desvios negativos em todas as peças, com desvios mais acentuados nas peças 2, 3, 5 e 8, as quais foram fabricadas com a variável D (altura da camada) no nível alto.

Foi observado também que o maior comprimento obteve os maiores desvios em todas as peças. O comprimento de 28 mm apresentou um desvio médio de -0,02 mm enquanto o comprimento de 64 mm apresentou um desvio médio -0,14 mm.



**Figura 4.11:** Desvio dimensional (comprimento no eixo Y) – média e barras de erro

A Figura 4.12(a) demonstra que para o comprimento de 28 mm, no eixo Y, a variável D (altura da camada) foi significativa. Aumentando o nível de D, a resposta diminui 0,11 mm. As demais variáveis não foram significativas. Através da Figura 4.12(b), foi verificado que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.



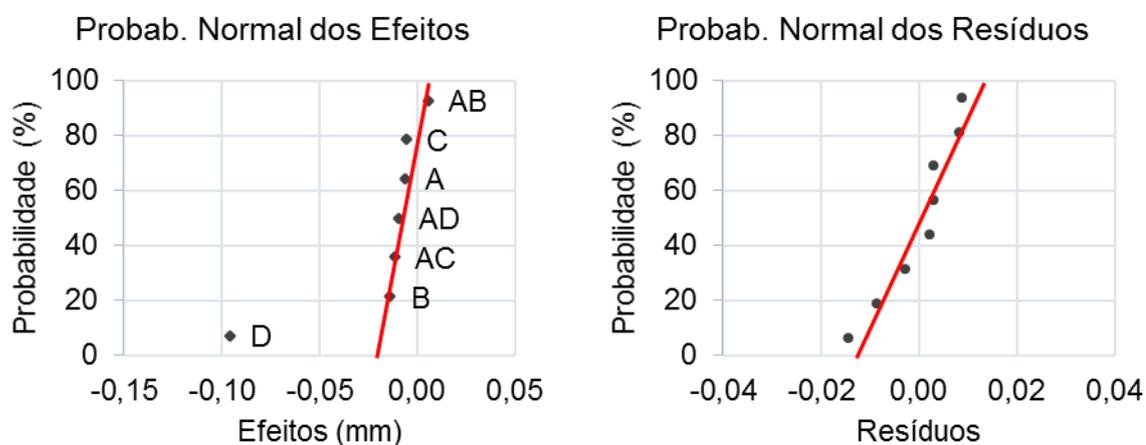
**Figura 4.12:** Comprimento no eixo Y (28 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos

A análise de variância (Tabela 4.6) confirma que a variável D é a única variável significativa para o comprimento de 28 mm, no eixo Y. Apenas essa variável responde 90,45% da variação dos dados do modelo. A variável C (velocidade de impressão), apesar de não ser significativa, responde 5,03% da variação dos dados.

**Tabela 4.6:** Análise de variância – Comprimento no eixo Y (28 mm)

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000057	0,22%	0,000057	0,157501	0,718014
B	1	0,000002	0,01%	0,000002	0,006760	0,939653
C	1	0,001280	5,03%	0,001280	3,521073	0,157246
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,023021</b>	<b>90,45%</b>	<b>0,023021</b>	<b>63,339598</b>	<b>0,004138</b>
Erro	3	0,001090	4,28%	0,000363		
Total	7	0,025451	100,00%			

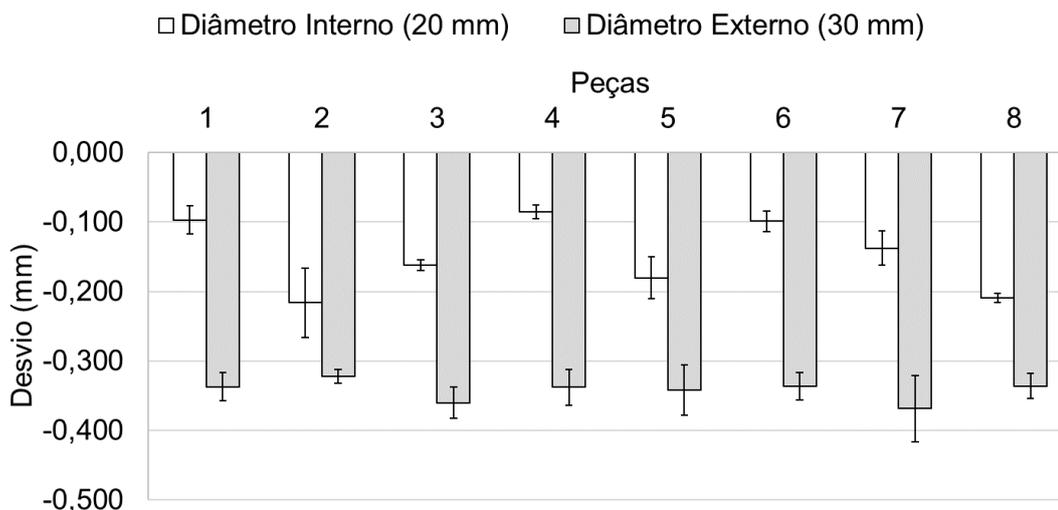
O comprimento de 64 mm também apresentou somente a variável D (altura da camada) como significativa, conforme Figura 4.13(a). Aumentando seu nível, a resposta reduz 0,10 mm. A Figura 4.13(b) demonstra que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Através da análise de variância, na Tabela 4.7, foi confirmado que apenas a variável D foi significativa. Sozinha, essa variável responde 94,77% da variação dos dados.

**Figura 4.13:** Comprimento no eixo Y (64 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos**Tabela 4.7:** Análise de variância – Comprimento no eixo Y (64 mm)

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000074	0,39%	0,000074	0,453118	0,549074
B	1	0,000378	1,97%	0,000378	2,317236	0,225311
C	1	0,000060	0,31%	0,000060	0,368379	0,586743
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,018185</b>	<b>94,77%</b>	<b>0,018185</b>	<b>111,340260</b>	<b>0,001818</b>
Erro	3	0,000490	2,55%	0,000163		
Total	7	0,019188	100,00%			

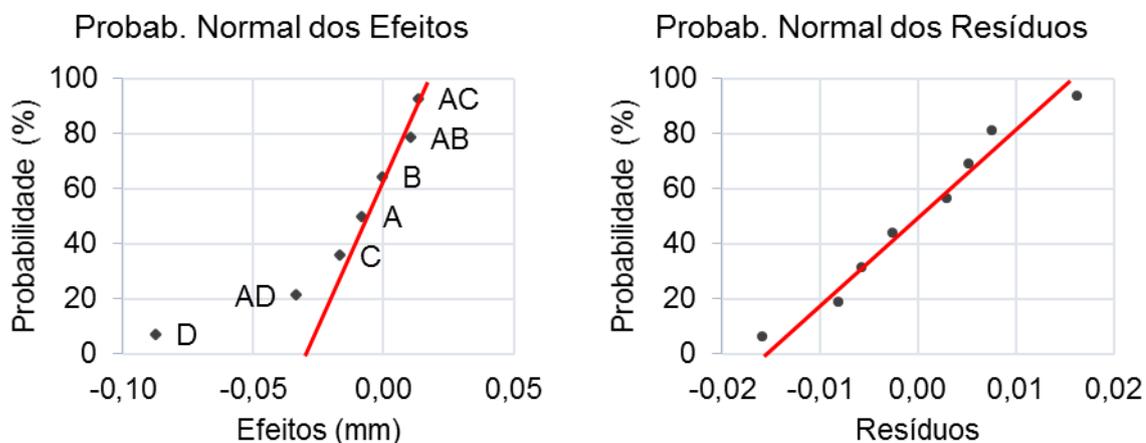
### 4.1.2 Diâmetro

Foram realizadas medições do diâmetro interno e externo do cilindro, com valores nominais de 20 e 30 mm (Figura 4.14), respectivamente. Em todas as peças, o diâmetro externo (desvio médio de -0,34 mm) apresentou desvios maiores se comparado ao diâmetro interno (desvio médio de -0,15 mm).



**Figura 4.14:** Desvio dimensional (diâmetro) – média e barras de erro.

Analisando o diâmetro interno, foi verificado que a variável D (ABC) e a interação AD (BC) são significativas, conforme Figura 4.15(a). Aumentando os níveis da interação AD (densidade de enchimento e altura da camada) e da variável D, a resposta reduz 0,03 mm e 0,09 mm, respectivamente. Na Figura 4.15(b) foi verificado que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.



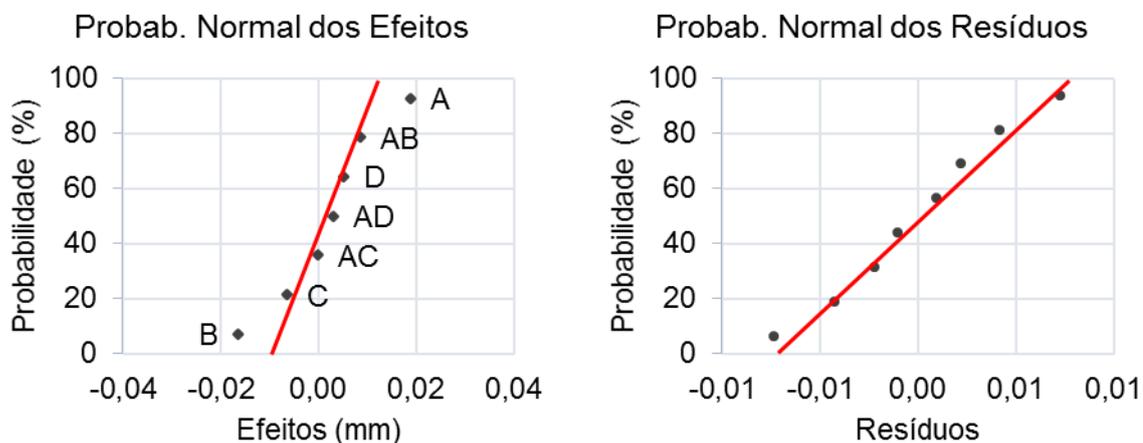
**Figura 4.15:** Diâmetro (20 mm) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A Tabela 4.8 mostra a análise de variância dos dados referentes ao diâmetro interno (20 mm). Foi confirmado que a variável D e a interação AD são significativas e que respondem 93,29% da variação dos dados.

**Tabela 4.8:** Análise de variância – Diâmetro (20 mm).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000134	0,72%	0,000134	0,697004	0,465055
C	1	0,000545	2,90%	0,000545	2,822121	0,191565
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,015243</b>	<b>81,32%</b>	<b>0,015243</b>	<b>79,001659</b>	<b>0,003003</b>
<b>AD</b>	<b>1</b>	<b>0,002245</b>	<b>11,97%</b>	<b>0,002245</b>	<b>11,633150</b>	<b>0,042128</b>
Erro	3	0,000579	3,09%	0,000193		
Total	7	0,018745	100,00%			

Já o diâmetro externo apresentou duas variáveis significativas: a densidade de enchimento (A) e a temperatura de extrusão (B), conforme Figura 4.16(a). Aumentando o nível da variável A, a resposta aumenta 0,019 mm e elevando o nível da variável B, a resposta reduz 0,016 mm. A Figura 4.16(b) demonstra, através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



**Figura 4.16:** Diâmetro (30 mm) – NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Através da análise de variância (Tabela 4.9), foi confirmado que as variáveis A e B são significativas e que, em conjunto, respondem 80,52% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.9:** Análise de variância – Diâmetro (30 mm).

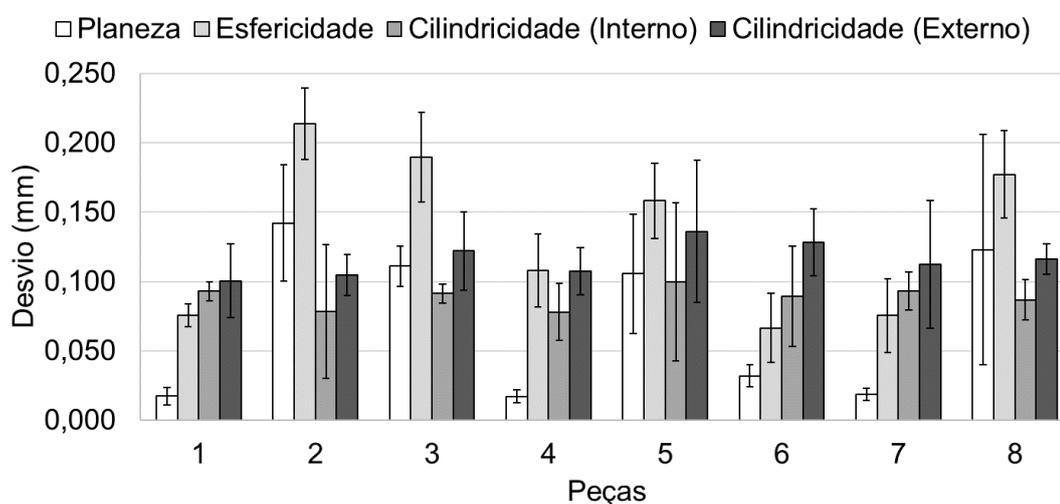
Fator	GL	Análise de Variância				Valor F	Valor-p
		SQ	Contribuição	QM			
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>0,000711</b>	<b>46,19%</b>	<b>0,000711</b>	<b>71,601511</b>	<b>0,013680</b>	
<b>B</b>	<b>1</b>	<b>0,000528</b>	<b>34,33%</b>	<b>0,000528</b>	<b>53,211587</b>	<b>0,018279</b>	
C	1	0,000081	5,24%	0,000081	8,125441	0,104189	
D	1	0,000053	3,45%	0,000053	5,344584	0,146952	
AB	1	0,000146	9,50%	0,000146	14,730982	0,061671	
Erro	2	0,000020	1,29%	0,000010			
Total	7	0,001539	100,00%				

## 4.2 Desvio Geométrico

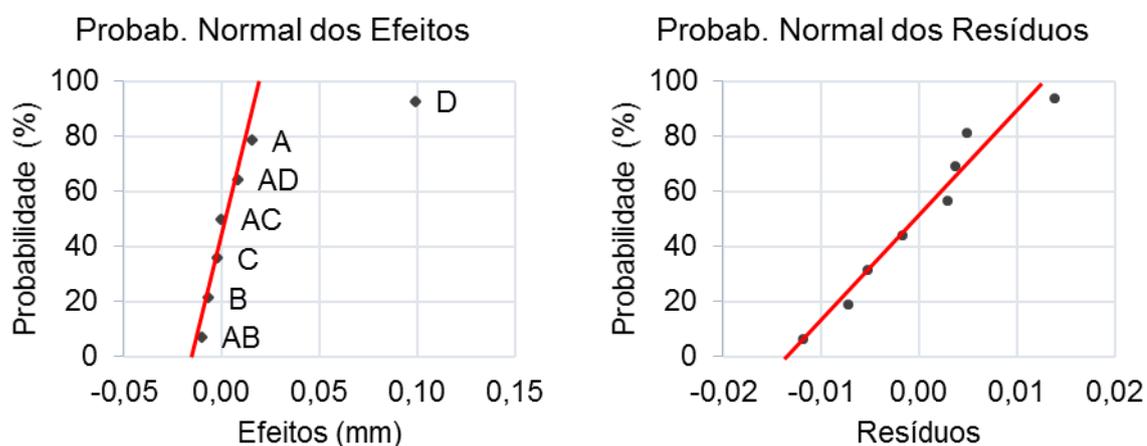
Ainda na escala de erros macrogeométricos, foram realizadas medições para avaliação dos desvios geométricos de elementos isolados (forma) e associados (orientação e localização). Foram analisados desvios de planeza, circularidade, cilindridade, forma livre, paralelismo, perpendicularidade, inclinação e concentricidade/coaxialidade.

### 4.2.1 Desvio de Forma

Iniciando a análise pelos elementos isolados, foi verificado na Figura 4.17 que os desvios de planeza e esfericidade, bem como o erro padrão, foram mais acentuados nas peças 2, 3, 5 e 8, as quais foram fabricadas com a variável D (altura da camada) no nível alto. Observando os desvios de cilindridade (interno e externo), não é possível perceber com clareza uma tendência em função do planejamento fatorial.

**Figura 4.17:** Desvio geométrico (forma) – média e barras de erro.

Através da Figura 4.18(a), foi observado que para o desvio de planeza, apenas a variável D (altura da camada) foi significativa. Nesse caso, elevando o nível da variável, a resposta aumenta 0,10 mm. Foi verificado na Figura 4.18(b) que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.



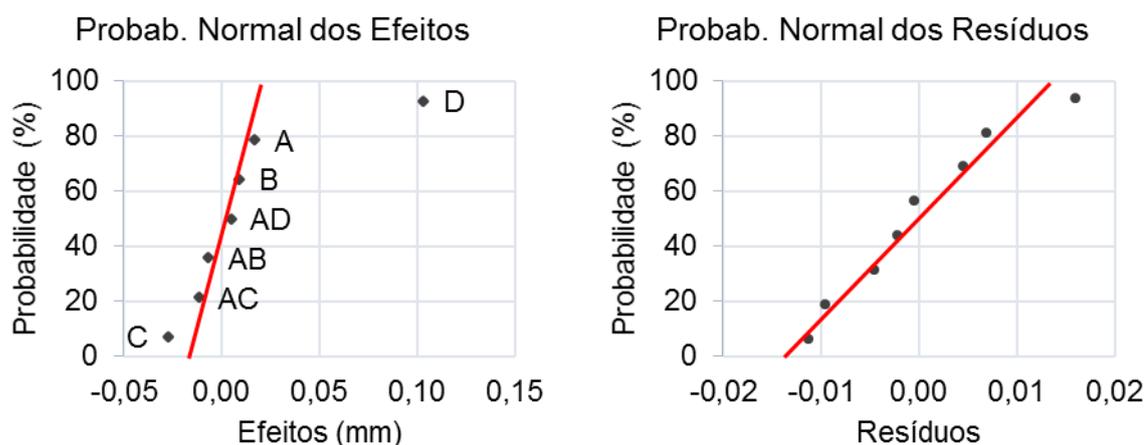
**Figura 4.18:** Planeza - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância, na Tabela 4.10, confirma a significância da variável D (altura da camada), além de demonstrar que a altura da camada responde por 95,46% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.10:** Análise de variância – Planeza.

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000475	2,31%	0,000475	3,987814	0,139738
B	1	0,000091	0,44%	0,000091	0,763505	0,446546
C	1	0,000009	0,05%	0,000009	0,078662	0,797348
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,019640</b>	<b>95,46%</b>	<b>0,019640</b>	<b>164,797757</b>	<b>0,001020</b>
Erro	3	0,000358	1,74%	0,000119		
Total	7	0,020573	100,00%			

Observando a Figura 4.19(a), foi notado que para os desvios de esfericidade, as variáveis C (ABD) e D (ABC) foram significativas. Com efeito negativo, a variável C (tempo de impressão) reduz a resposta em 0,027 mm ao elevar seu nível de 40 para 60 mm/s. Por outro lado, ao elevar o nível da variável D (altura da camada), a resposta aumenta em 0,103 mm. Através da Figura 4.19(b), foi verificado que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



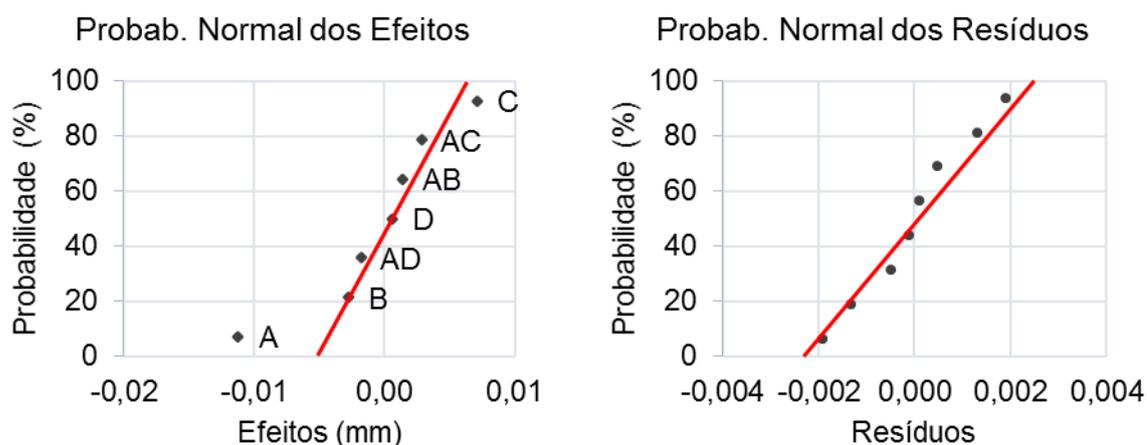
**Figura 4.19:** Esfericidade - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância confirma, através da Tabela 4.11, que as variáveis C (velocidade de impressão) e D (altura da camada) são significativas e respondem 95,31% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.11:** Análise de variância – Esfericidade.

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000557	2,32%	0,000557	4,144419	0,134592
B	1	0,000163	0,68%	0,000163	1,215872	0,350689
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,001483</b>	<b>6,18%</b>	<b>0,001483</b>	<b>11,031798</b>	<b>0,045007</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,021375</b>	<b>89,13%</b>	<b>0,021375</b>	<b>159,009870</b>	<b>0,001075</b>
Erro	3	0,000403	1,68%	0,000134		
Total	7	0,023982	100,00%			

Analisando os desvios de cilindricidade (interno) na Figura 4.20(a), foi observado que apenas a variável A (BCD) foi significativa. Aumentando o nível dessa variável, a resposta reduz 0,011 mm. Com nível de significância de 0,05, a variável C (velocidade de impressão) não foi significativa ( $p = 0,084$ ), no entanto, elevando o nível dessa variável, a resposta aumenta 0,007 mm. As demais variáveis e interações não foram significativas. Foi observado também, na Figura 4.20(b), através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não se pode rejeitar a normalidade dos dados.



**Figura 4.20:** Cilindricidade (interna) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

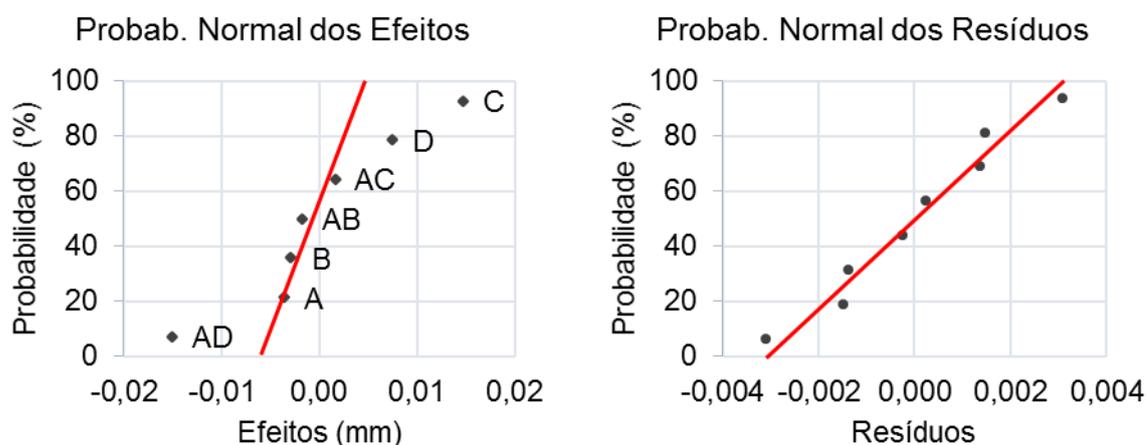
A Tabela 4.12 confirma os dados plotados no gráfico de probabilidade normal dos efeitos e determina que, para um nível de significância de 0,05, apenas a variável A (densidade de enchimento) foi significativa. Essa variável responde 63,46% da variação dos dados.

**Tabela 4.12:** Análise de variância – Cilindricidade (interna).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>0,000250</b>	<b>63,46%</b>	<b>0,000250</b>	<b>25,640184</b>	<b>0,036858</b>
C	1	0,000101	25,68%	0,000101	10,375259	0,084365
D	1	0,000001	0,18%	0,000001	0,072558	0,812894
AC	1	0,000016	4,08%	0,000016	1,647234	0,327959
AD	1	0,000007	1,65%	0,000007	0,667734	0,499700
Erro	2	0,000020	4,95%	0,000010		
Total	7	0,000394	100,00%			

Os desvios de cilindridade (externo) apresentaram duas variáveis (C e D) e uma interação (AD) significativa. Conforme observado na Figura 4.21(a), as variáveis C (tempo de impressão) e D (altura da camada) tiveram efeito positivo, aumentando a resposta em 0,015 e 0,008 mm, respectivamente, quando têm seu nível elevado.

Por outro lado, a interação AD (densidade de enchimento e altura da camada), que está confundida com a interação BC (temperatura de extrusão e velocidade de impressão), reduz a resposta em 0,015 mm quando tem seu nível elevado. Através da análise de resíduos, na Figura 4.21(b), foi observado que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



**Figura 4.21:** Cilindricidade (externa) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância, na Tabela 4.13, confirma com 95% de probabilidade que as variáveis C e D, além da interação AD, são significativas. Em conjunto, essas variáveis e interação respondem 94,87% da variabilidade dos dados.

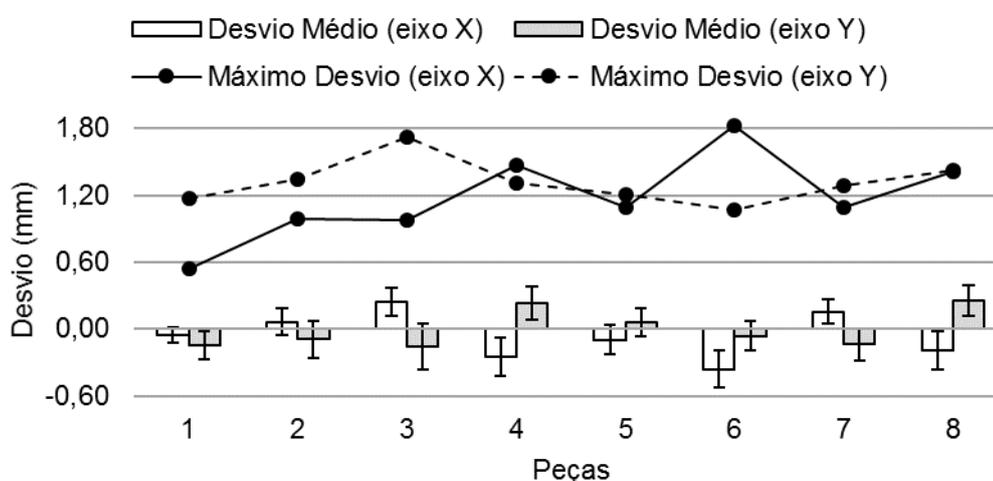
**Tabela 4.13:** Análise de variância – Cilindricidade (externa).

Fator	GL	Análise de Variância				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000026	2,51%	0,000026	4,708340	0,162227
B	1	0,000016	1,56%	0,000016	2,920546	0,229584
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,000429</b>	<b>40,92%</b>	<b>0,000429</b>	<b>76,847649</b>	<b>0,012764</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,000113</b>	<b>10,77%</b>	<b>0,000113</b>	<b>20,235307</b>	<b>0,046033</b>
<b>AD</b>	<b>1</b>	<b>0,000453</b>	<b>43,18%</b>	<b>0,000453</b>	<b>81,102869</b>	<b>0,012107</b>
Erro	2	0,000011	1,06%	0,000006		
Total	7	0,001048	100,00%			

Os desvios de forma livre foram verificados através da função teórica  $Y = -X^2$ . Foram obtidos 25 pontos em cada função na MMC, sendo ajustados por regressão polinomial. Para efeito de comparação, foram traçadas duas curvas: uma curva teórica, que equivale à função real, e outra curva ajustada por regressão. Foi verificado que a regressão polinomial ajustada (cor vermelha) esteve muito próxima da função real (cor azul) em todas as peças, em ambos os eixos, conforme APÊNDICE A. Apesar disso, foram obtidos alguns pontos fora da curva, com desvio maior que 1 mm em todas as formas, exceto nas peças 2 e 3, ambas no eixo X.

Através da média do desvio dos pontos observados, foi verificado na Figura 4.22 que o eixo X apresentou o menor desvio na peça 1 (-0,055 mm) e o eixo Y na

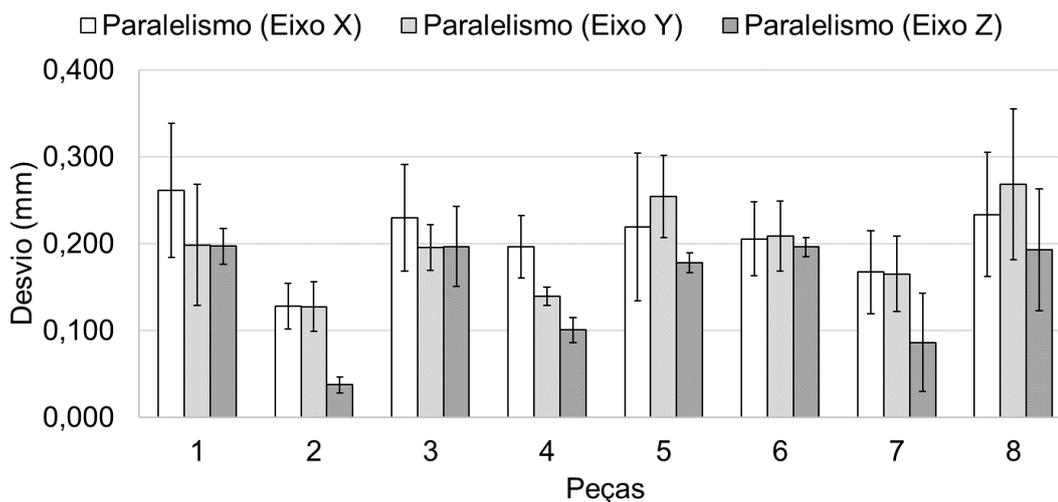
peça 5 (0,061 mm). Ainda sobre o desvio médio, no eixo X foi verificado o maior desvio na peça 6 (-0,358 mm) e no eixo Y na peça 8 (0,253 mm). Por outro lado, considerando a média de todas as peças, o eixo X apresentou um desvio de -0,061 mm, enquanto o eixo Y apresentou desvio médio de -0,005 mm. No entanto, apesar do eixo Y apresentar desvio médio inferior ao eixo X, foi verificado que o eixo Y apresentou resultados maiores para o erro padrão, com 95% de probabilidade. Por fim, foi verificado ainda o maior desvio, no eixo X, na peça 6 (1,824 mm). No eixo Y, o maior desvio foi observado na peça 3 (1,727 mm).



**Figura 4.22:** Desvio geométrico (forma livre) – desvio médio e desvio máximo.

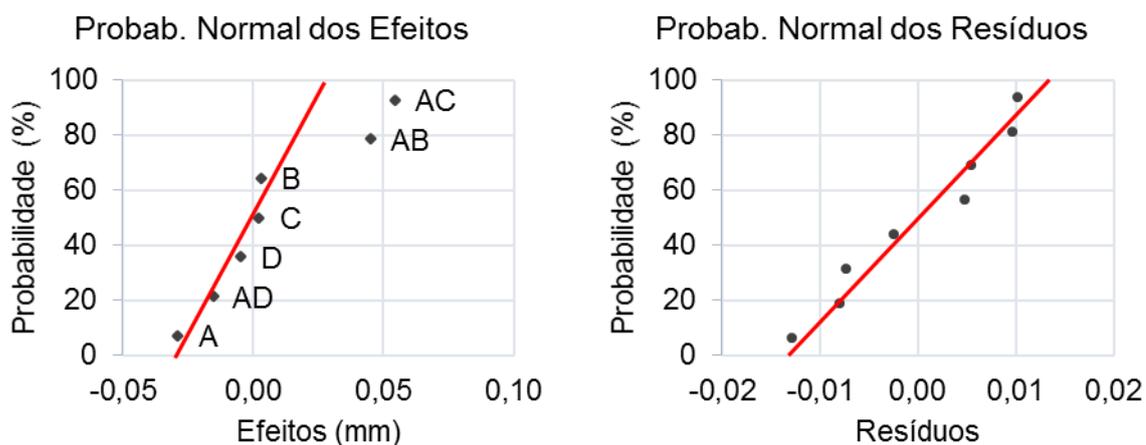
#### 4.2.2 Desvio de Orientação

Os desvios de orientação foram verificados quanto ao paralelismo (eixo X, Y e Z), perpendicularidade (eixos XY, XZ e YZ), além da inclinação (angularidade). Foi observado na Figura 4.23 que, analisando os desvios de paralelismo, o eixo Z obteve os menores desvios, bem como a menor variabilidade dos dados, se comparado aos eixos X e Y. De modo geral, os menores desvios foram observados na peça 2. Os maiores desvios foram verificados nas peças 1, 3, 5, 6 e 8, não sendo possível notar alguma tendência, com base na matriz do planejamento fatorial fracionário.



**Figura 4.23:** Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro.

Através da Figura 4.24(a), foi verificado no gráfico de probabilidade normal que as interações AB (CD) e AC (BD) apresentaram efeitos positivo ao avaliar os desvios de paralelismo no eixo X. Desse modo, elevando o nível de AB (densidade de enchimento e temperatura de extrusão), a resposta aumenta 0,045 mm e elevando o nível de AC (densidade de enchimento e velocidade de impressão), a resposta aumenta 0,055 mm. As demais variáveis e interação não foram significativas. Através da Figura 4.24(b), observa que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



**Figura 4.24:** Paralelismo (eixo X) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

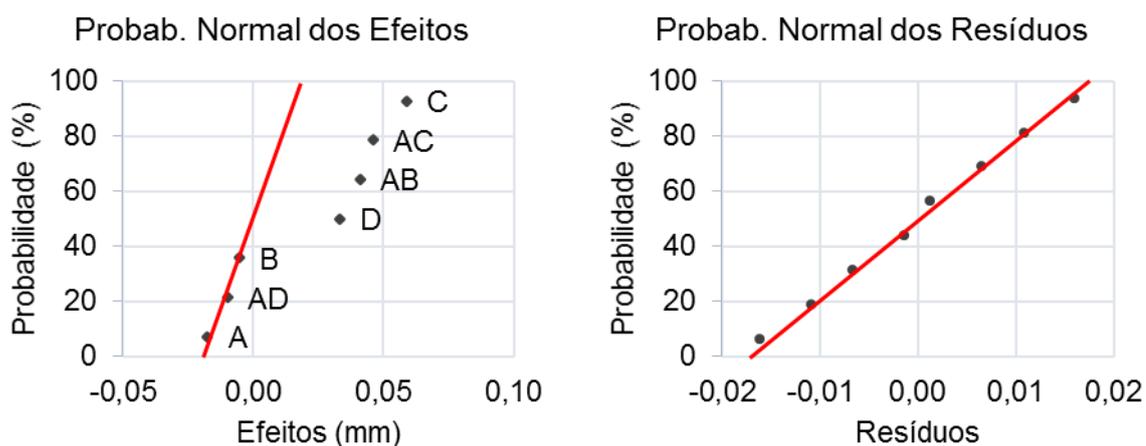
A análise de variância confirmou, através da Tabela 4.14, que as interações AB e AC são significativas. Com 95% de probabilidade, as duas interações respondem

82,16% da variabilidade dos dados. Apesar de não ser significativa, a variável A responde 13,44% da variação dos dados.

**Tabela 4.14:** Análise de variância – Paralelismo (eixo X).

Fator	GL	ANOVA				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,001642	13,44%	0,001642	136,746772	0,054308
B	1	0,000019	0,15%	0,000019	1,549771	0,430824
D	1	0,000047	0,39%	0,000047	3,918784	0,297787
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>0,004041</b>	<b>33,08%</b>	<b>0,004041</b>	<b>336,610162</b>	<b>0,034665</b>
<b>AC</b>	<b>1</b>	<b>0,005995</b>	<b>49,08%</b>	<b>0,005995</b>	<b>499,385673</b>	<b>0,028469</b>
AD	1	0,000459	3,76%	0,000459	38,237818	0,102068
Erro	1	0,000012	0,10%	0,000012		
Total	7	0,012214	100,00%			

Analisando o paralelismo no eixo Y, foi constatado através da Figura 4.25(a) que as variáveis C (ABD) e D (ABC), além das interações AB (CD) e AC (BD) foram significativas, todas com efeito positivo. Elevando o nível da variável C, a resposta aumenta 0,059 mm, enquanto na variável D aumenta 0,034 mm. Aumentando o nível das interações AB e AC, a resposta aumenta 0,041 e 0,046 mm, respectivamente. A Figura 4.25(b) demonstra ainda que houve um bom comportamento dos resíduos e que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



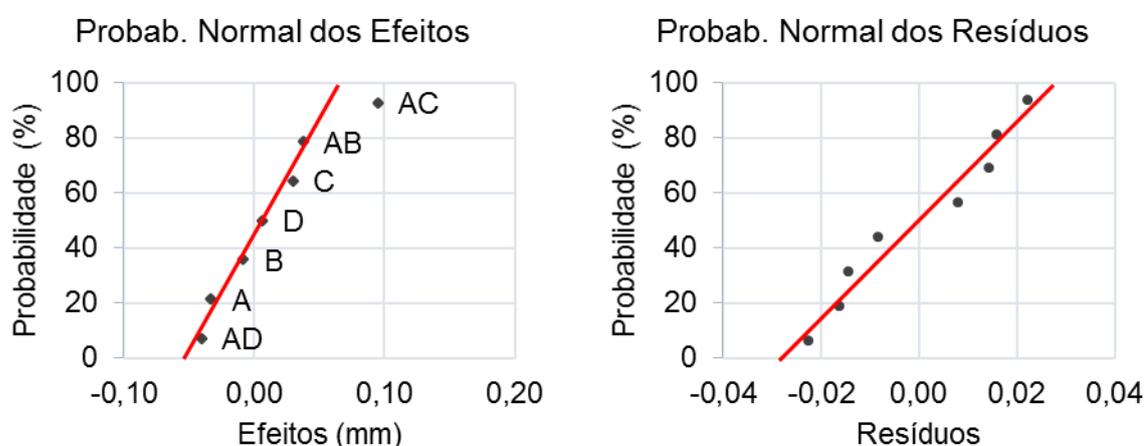
**Figura 4.25:** Paralelismo (eixo Y) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Confirmando os dados com a análise de variância, foi observado na Tabela 4.15 que as variáveis e interações significativas respondem, em conjunto, 95,23% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.15:** Análise de variância – Paralelismo (eixo Y).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000606	3,43%	0,000606	5,162588	0,151017
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,006938</b>	<b>39,34%</b>	<b>0,006938</b>	<b>59,156109</b>	<b>0,016488</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,002245</b>	<b>12,73%</b>	<b>0,002245</b>	<b>19,136329</b>	<b>0,048487</b>
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>0,003362</b>	<b>19,06%</b>	<b>0,003362</b>	<b>28,663995</b>	<b>0,033161</b>
<b>AC</b>	<b>1</b>	<b>0,004250</b>	<b>24,10%</b>	<b>0,004250</b>	<b>36,238554</b>	<b>0,026503</b>
Erro	2	0,000235	1,33%	0,000117		
Total	7	0,017635	100,00%			

No eixo Z, foi verificado que apenas a interação AC (BD) foi significativa. Aumentando o nível da interação (densidade de enchimento e velocidade de impressão), a resposta aumenta 0,095 mm, conforme Figura 4.26(a). As demais variáveis e interações não foram significativas. Através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, na Figura 4.26(b), foi observado que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.

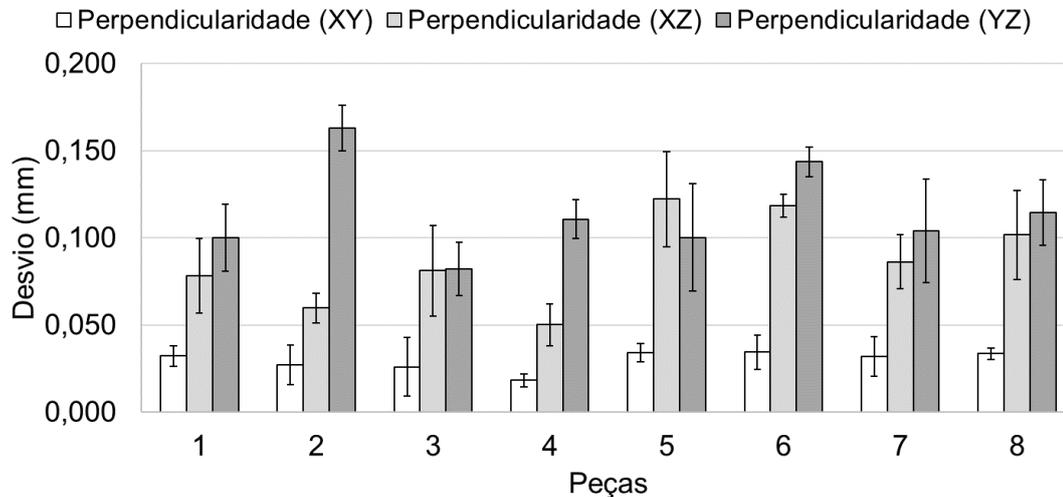
**Figura 4.26:** Paralelismo (eixo Z) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância comprovou, através da Tabela 4.16, que apenas a interação AC (BD) foi significativa para um nível de significância de 0,05. Sozinha, a interação responde 63,97% da variabilidade dos dados. Apesar de não serem significativas, as variáveis A (BCD) e C (ABD), bem como as interações AB (CD) e AD (BC), respondem por 14,13% e 21,18% da variação dos dados, respectivamente. As variáveis C (ABD) e D (ABC), que tiveram menor significância, respondem apenas 0,73% da variabilidade dos dados.

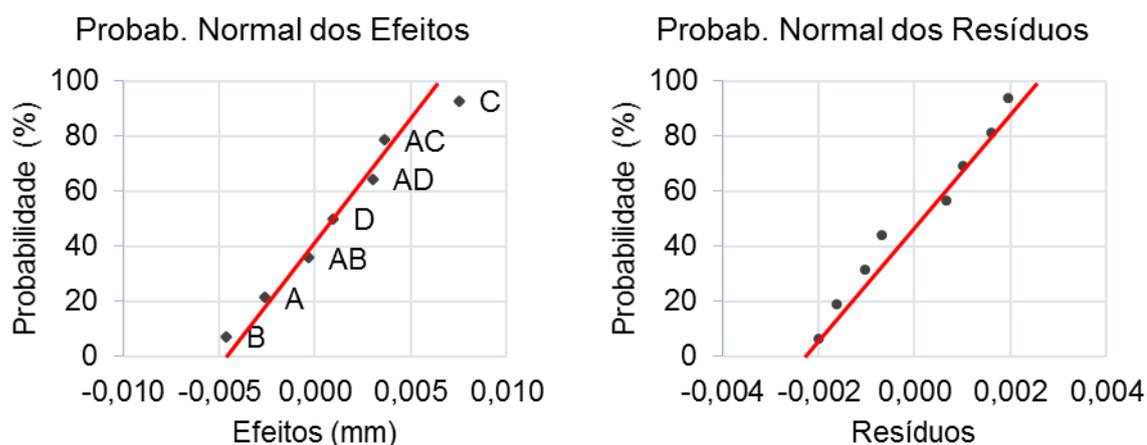
**Tabela 4.16:** Análise de variância – Paralelismo (eixo Z).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,002	7,58%	0,002	27,45760	0,12005
B	1	0,000	0,45%	0,000	1,61798	0,42415
C	1	0,002	6,55%	0,002	23,73638	0,12888
AB	1	0,003	10,18%	0,003	36,86918	0,10391
<b>AC</b>	<b>1</b>	<b>0,018</b>	<b>63,97%</b>	<b>0,018</b>	<b>231,77018</b>	<b>0,04176</b>
AD	1	0,003	11,00%	0,003	39,84134	0,10003
Erro	1	0,000	0,28%	0,000		
Total	7	0,028	100,00%			

Analisando os desvios de perpendicularidade na Figura 4.27, foi observado facilmente que os menores desvios foram verificados na orientação XY. A orientação XZ obteve menores desvios se comparado à orientação YZ, exceto na peça 5. Entretanto, não é fácil notar alguma tendência relacionada ao planejamento fatorial fracionário, sendo necessário, portanto, a análise dos efeitos para verificar a significância das variáveis/interações.

**Figura 4.27:** Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro.

Na Figura 4.28(a), foi verificado que para os desvios de perpendicularidade na orientação XY, apenas a variável C (ABD) foi significativa. Com 95% de probabilidade, a variável apresentou efeito positivo, desse modo, elevando seu nível, a resposta aumenta 0,008 mm. Foi observado ainda através da Figura 4.28(b), no gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



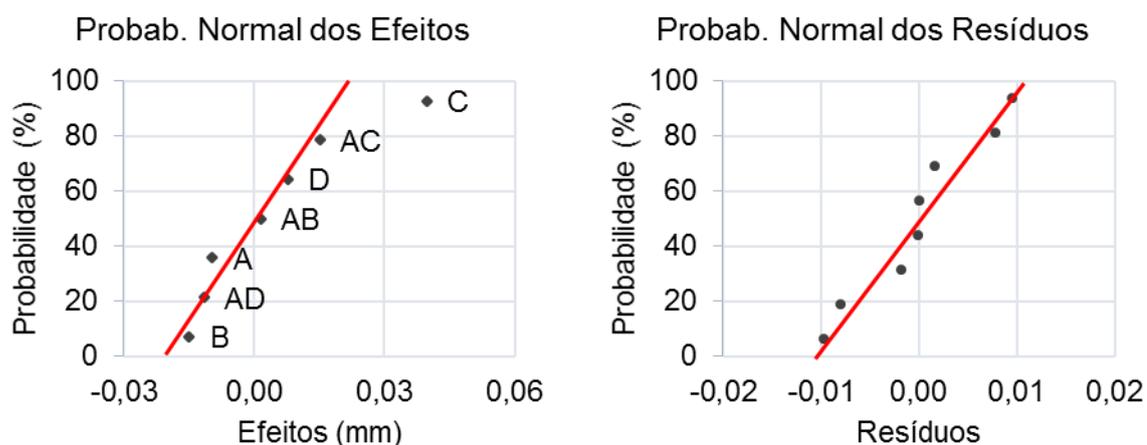
**Figura 4.28:** Perpendicularidade (XY) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Através da análise de variância, na Tabela 4.17, foi confirmado que a variável C é significativa, com nível de significância de 0,05. Essa variável responde 52,15% da variabilidade dos dados. Não obstante, a variável B (temperatura de extrusão) e as interações AC e AD não foram significativas, mas respondem (em conjunto) 40,48% da variação dos dados. A parcela do erro, composta pelas variáveis A e D, além da interação AB, responde os demais 7,36% de variação.

**Tabela 4.17:** Análise de variância – Perpendicularidade (XY).

Fator	GL	Análise de Variância				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
B	1	0,000043	19,78%	0,000043	8,060578	0,065694
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,000114</b>	<b>52,15%</b>	<b>0,000114</b>	<b>21,249767</b>	<b>0,019202</b>
AC	1	0,000027	12,19%	0,000027	4,966449	0,112147
AD	1	0,000019	8,51%	0,000019	3,467847	0,159479
Erro	3	0,000016	7,36%	0,000005		
Total	7	0,000219	100,00%			

Na orientação XZ, foi verificado também que a variável C é significativa. Conforme Figura 4.29(a), elevando o nível dessa variável, a resposta aumenta 0,040 mm. As demais variáveis, bem como as interações não foram significativas. Foi observado ainda na Figura 4.29(b) que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



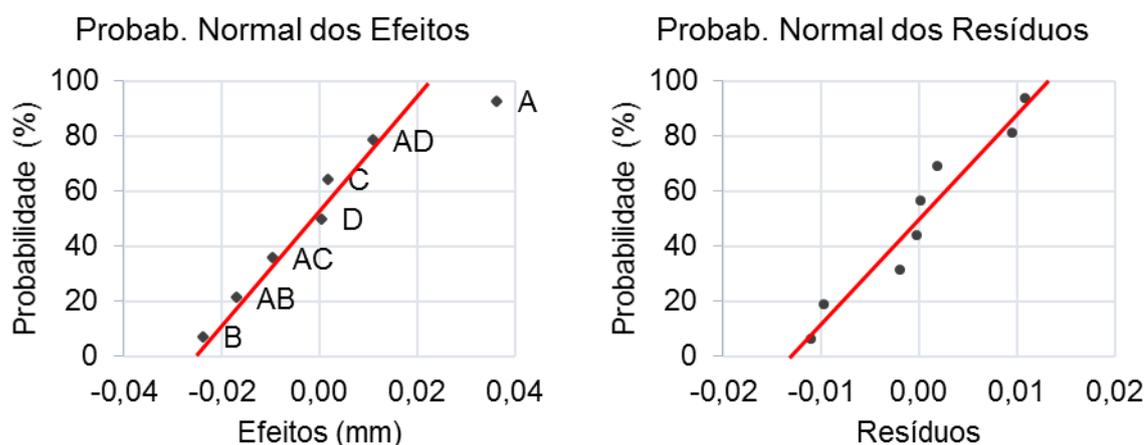
**Figura 4.29:** Perpendicularidade (XZ) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Na Tabela 4.18, foi confirmado através da ANOVA que apenas a velocidade de impressão (C) é significativa para um nível de significância de 0,05. A variável B (temperatura de extrusão) e a interação AC, apesar de não serem significativas, respondem 9,47% e 9,98% da variação dos dados, respectivamente.

**Tabela 4.18:** Análise de variância – Perpendicularidade (XZ).

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000182	3,91%	0,000182	29,780408	0,115378
B	1	0,000441	9,47%	0,000441	72,007347	0,074678
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,003176</b>	<b>68,16%</b>	<b>0,003176</b>	<b>518,537959</b>	<b>0,027939</b>
D	1	0,000126	2,71%	0,000126	20,637551	0,137937
AC	1	0,000465	9,98%	0,000465	75,938776	0,072737
AD	1	0,000262	5,63%	0,000262	42,808980	0,096553
Erro	1	0,000006	0,13%	0,000006		
Total	7	0,004659	100,00%			

Diferente do que ocorreu nas orientações XY e XZ, que tiveram a variável C (velocidade de impressão) como significativa, os desvios de perpendicularidade na orientação YZ não apresentaram a variável A (densidade de enchimento) como significativa. Com efeito positivo, ao elevar o nível da variável A, a resposta aumenta 0,036 mm, conforme Figura 4.30(a). Com 95% de probabilidade, as demais variáveis e interações não foram significativas. Através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, na Figura 4.30(b), foi verificado que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



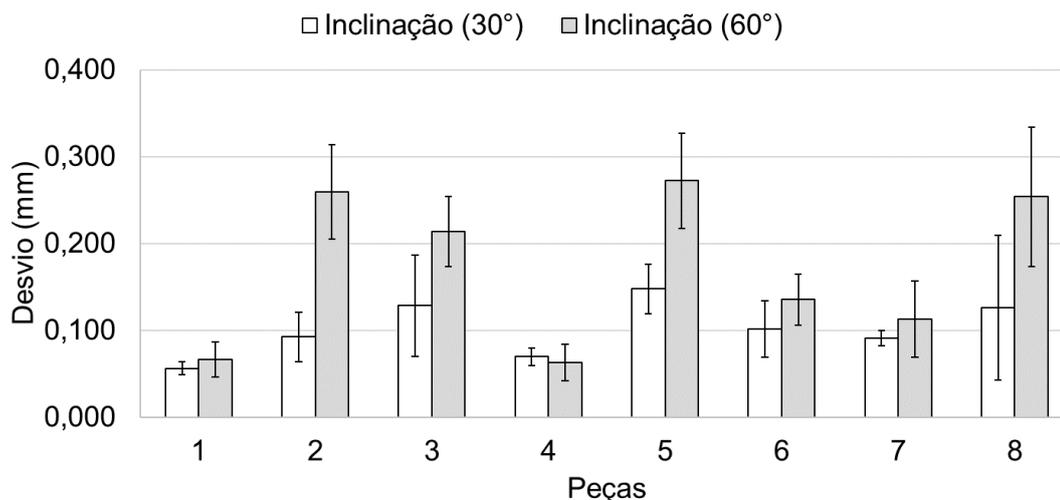
**Figura 4.30:** Perpendicularidade (YZ) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Através da análise de variância, na Tabela 4.19, foi comprovado que a variável A é realmente significativa e que responde 55,26% da variabilidade na resposta. A variável B e a interação AB respondem juntas 35,74% da variabilidade dos dados, porém não foram significativas para um nível de significância de 0,05.

**Tabela 4.19:** Análise de variância – Perpendicularidade (YZ).

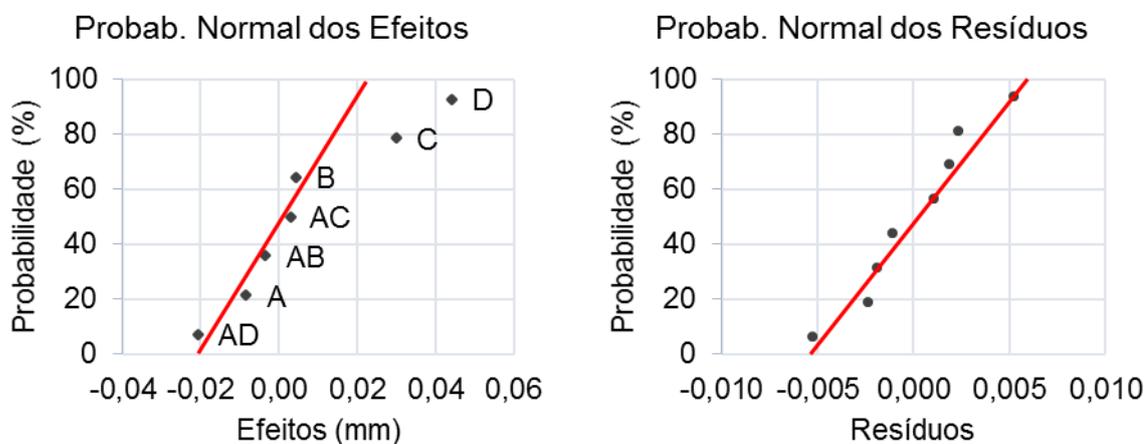
Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>0,002635</b>	<b>55,26%</b>	<b>0,002635</b>	<b>28,880877</b>	<b>0,032925</b>
B	1	0,001133	23,76%	0,001133	12,415123	0,071961
D	1	0,000000	0,01%	0,000000	0,003507	0,958163
AB	1	0,000571	11,98%	0,000571	6,259945	0,129444
AD	1	0,000246	5,17%	0,000246	2,700493	0,242034
Erro	2	0,000183	3,83%	0,000091		
Total	7	0,004769	100,00%			

Os desvios de inclinação foram verificados em ângulos de 30° e 60°. Através da Figura 4.31, foi verificado que os desvios do ângulo de 60° foram maiores em todas as peças (exceto na peça 4), se comparado ao ângulo de 30°. O menor desvio do ângulo de 30° foi verificado na peça 1 (0,056 mm) e o maior desvio na peça 5 (0,148 mm). No ângulo de 60°, o menor desvio foi observado na peça 4 (0,063 mm) e o maior desvio na peça 5 (0,272 mm). Foi observado, ainda, um aumento do desvio de angularidade nas peças 2, 3, 5 e 8. Analisando o planejamento fatorial fracionário, foi percebida a semelhança dessas peças terem sido fabricadas com a variável D (ABC) no nível alto.



**Figura 4.31:** Desvio geométrico (orientação) – média e barras de erro.

Através do gráfico de probabilidade normal dos efeitos, observou na Figura 4.32(a) que, para o ângulo de 30°, as variáveis C (velocidade de impressão) e D (altura da camada) foram significativas, ambas com efeito positivo. Elevando o nível dessas variáveis, a resposta aumenta 0,030 e 0,044 mm, respectivamente. A Figura 4.32(b) demonstra que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



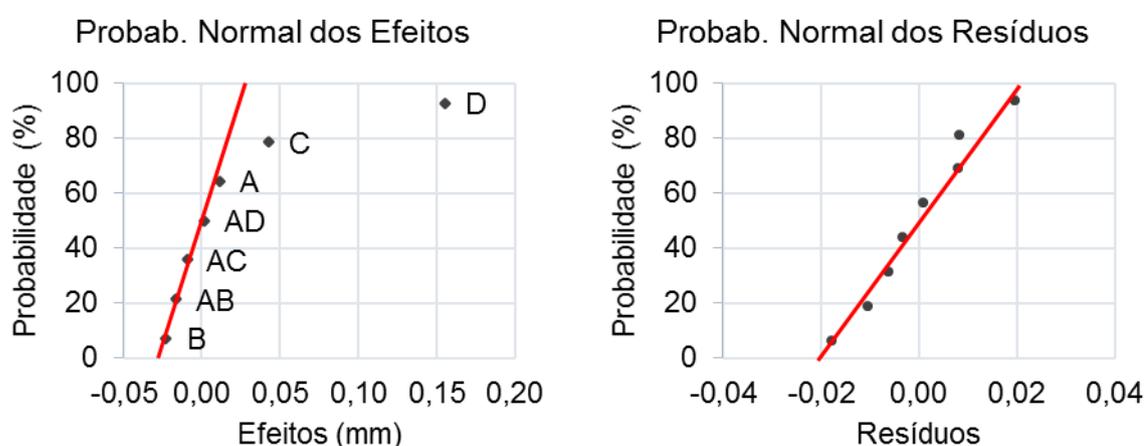
**Figura 4.32:** Inclinação (30°) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância confirmou a significância das variáveis C e D, através da Tabela 4.20. As duas variáveis respondem 84,31% da variabilidade na resposta. A interação AD (densidade de enchimento e altura da camada) contribuiu com 12,48% na variação da resposta, porém não foi significativa com 95% de probabilidade.

**Tabela 4.20:** Análise de variância – Inclinação (30°).

<i>Análise de Variância</i>						
<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>Contribuição</i>	<i>QM</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor-p</i>
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,001788</b>	<b>26,55%</b>	<b>0,001788</b>	<b>20,272336</b>	<b>0,045955</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,003890</b>	<b>57,76%</b>	<b>0,003890</b>	<b>44,100000</b>	<b>0,021932</b>
AB	1	0,000023	0,34%	0,000023	0,262132	0,659591
AC	1	0,000017	0,25%	0,000017	0,190703	0,704956
AD	1	0,000840	12,48%	0,000840	9,529478	0,090862
Erro	2	0,000176	2,62%	0,000088		
Total	7	0,006734	100,00%			

Analisando o ângulo de 60°, foi observado na Figura 4.33(a) que as variáveis C (ABD) e D (ABC) também foram significativas, assim como no ângulo de 30°. Entretanto, foi verificado que em ambas as variáveis, os desvios foram maiores no ângulo de 60°. Com efeito positivo, ao elevar o nível da variável C (velocidade de impressão), a resposta aumenta 0,043 mm, enquanto a resposta da variável D (altura da camada) aumenta 0,155 mm. As demais variáveis, assim como as interações, não foram significativas com 95% de probabilidade. A Figura 4.33(b) demonstra que não possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.

**Figura 4.33:** Inclinação (60°) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

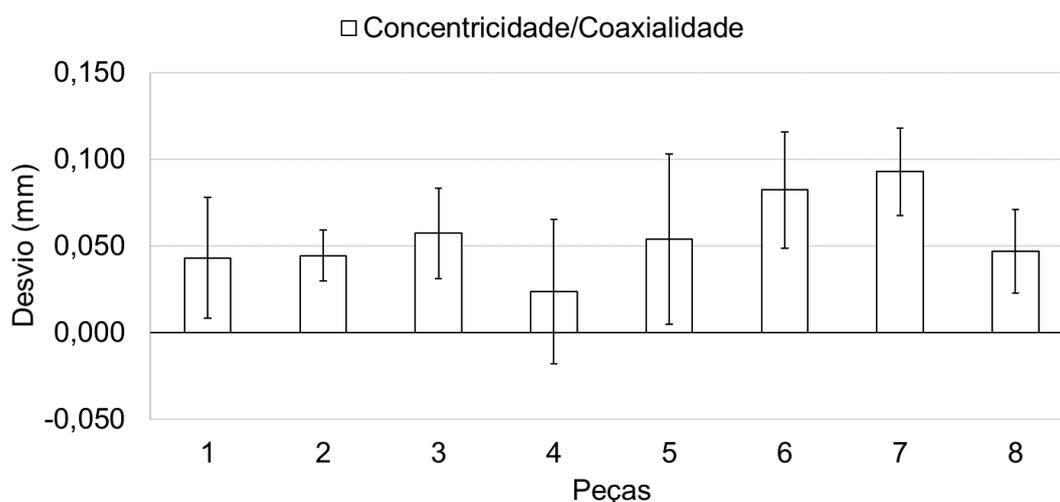
Através da Tabela 4.21, foi confirmado com a análise de variância que as variáveis C (ABD) e D (ABC) são significativas. Em conjunto, essas variáveis respondem 96,27% da variação na resposta. O erro, composto pela variável A e interações AC e AD, responde apenas 0,83% da variabilidade dos dados.

**Tabela 4.21:** Análise de variância – Inclinação (60°).

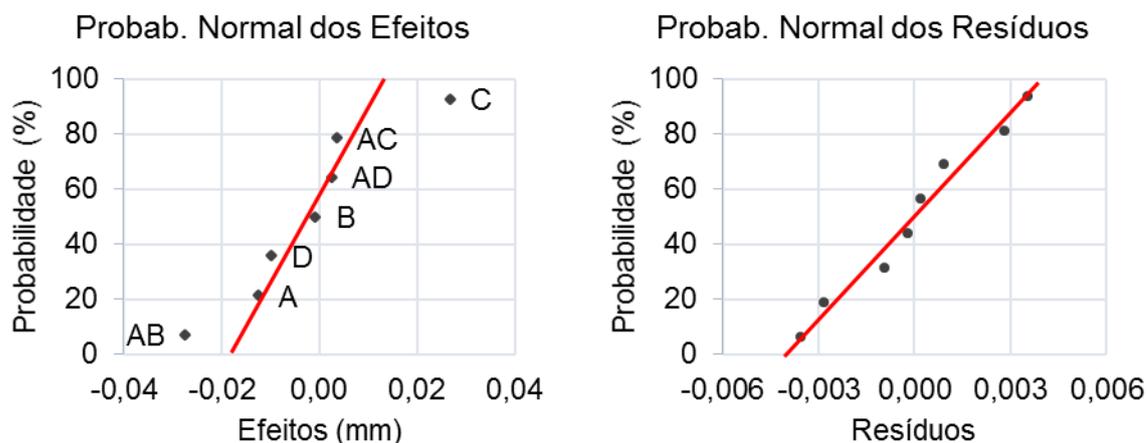
Fator	GL	Análise de Variância				
		SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
B	1	0,001022	1,89%	0,001022	6,879231	0,078809
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,003681</b>	<b>6,82%</b>	<b>0,003681</b>	<b>24,787779</b>	<b>0,015573</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>0,048298</b>	<b>89,45%</b>	<b>0,048298</b>	<b>325,255814</b>	<b>0,000372</b>
AB	1	0,000551	1,02%	0,000551	3,711412	0,149679
Erro	3	0,000445	0,83%	0,000148		
Total	7	0,053997	100,00%			

### 4.2.3 Desvio de Localização

O último desvio geométrico a ser verificado foi a concentricidade/coaxialidade. Conforme observado na Figura 4.34, não se pode definir uma tendência relacionada a uma variável isolada, apesar das peças 3, 5, 6 e 7 apresentarem os maiores desvios. É necessário, portanto, a plotagem do gráfico de probabilidade normal dos efeitos para se determinar se há alguma variável e/ou interação significativa.

**Figura 4.34:** Desvio geométrico (localização) – média e barras de erro.

A Figura 4.35(a) demonstra que a variável C (velocidade de impressão) e a interação AB (densidade de enchimento e temperatura de extrusão) foram significativas, porém com efeitos opostos. Desse modo, aumentando a velocidade de impressão, a resposta também aumenta (0,027 mm). Por outro lado, aumentando o nível da interação AB, que está confundida com CD, a resposta diminui (0,027 mm). Através da Figura 4.35(b), foi verificado que a hipótese de normalidade dos dados não pode ser rejeitada.



**Figura 4.35:** Concentricidade/Coaxialidade - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Para confirmar os dados, foi realizada a ANOVA, conforme Tabela 4.22. Foi observado que com 95% de probabilidade, a variável C e a interação AB foram significativas e, sozinhas, respondem 84,39% da variabilidade dos dados.

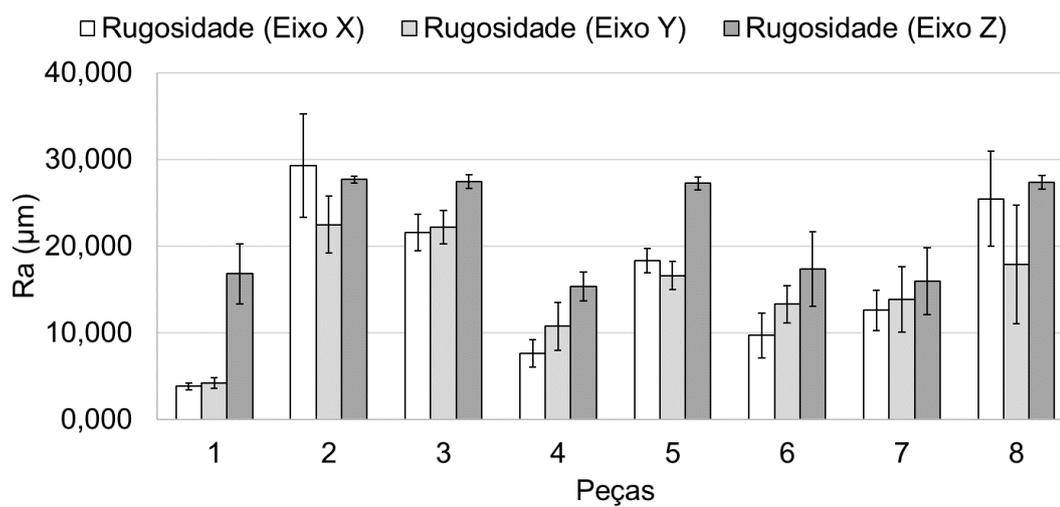
**Tabela 4.22:** Análise de variância – Concentricidade/Coaxialidade.

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,000309	8,89%	0,000309	14,868416	0,061152
B	1	0,000001	0,03%	0,000001	0,050623	0,842880
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0,001439</b>	<b>41,42%</b>	<b>0,001439</b>	<b>69,302895</b>	<b>0,014124</b>
D	1	0,000191	5,50%	0,000191	9,202492	0,093651
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>0,001493</b>	<b>42,97%</b>	<b>0,001493</b>	<b>71,910492</b>	<b>0,013623</b>
Erro	2	0,000042	1,20%	0,000021		
Total	7	0,003475	100,00%			

### 4.3 Rugosidade

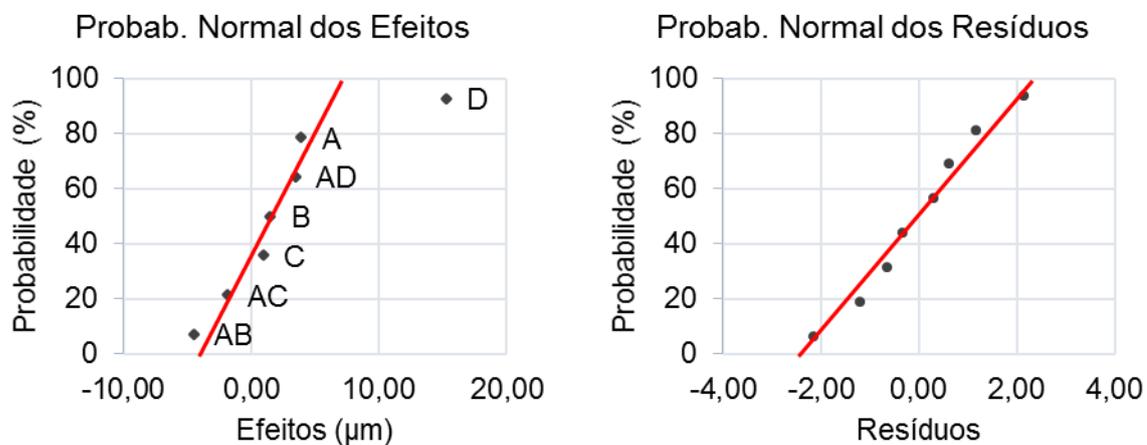
Além da verificação dos desvios macro geométricos, na MMC, foi verificada também a rugosidade superficial das peças, em escala micro geométrica. Utilizando um rugosímetro, modelo SJ-201, fabricado pela Mitutoyo, foi verificado o parâmetro de rugosidade  $R_a$  nos eixos X, Y e Z. Foi utilizado um *cut-off* de 2,5 mm com 3 execuções, ou seja,  $n = 3$  e filtro PC75. Utilizando os mesmos parâmetros, a medição foi realizada cinco vezes na base de cada peça. Foi verificado que os perfis obtidos nos eixos X e Y foram semelhantes, porém o eixo Z demonstrou uma característica diferente, em função da deposição de camadas. Os resultados são apresentados no APÊNDICE B.

Conforme Figura 4.36, altos valores de rugosidade superficial foram observados, principalmente no eixo Z. Os menores valores de rugosidade, nos eixos X e Y, foram obtidos na peça 1, a qual foi fabricada com todas as variáveis no nível baixo. No eixo Z, o menor valor de rugosidade foi verificado na peça 4, a qual foi fabricada com as variáveis A e B no nível alto. Foi verificado ainda que os maiores valores de rugosidade foram observados nas peças 2, 3, 5 e 8.



**Figura 4.36:** Rugosidade – média e barras de erro.

No eixo X, foi verificado que a variável D (altura da camada) é significativa. A Figura 4.37(a) mostra que ao elevar o nível dessa variável, a resposta aumenta 15,235 μm. A Figura 4.37(b) mostra através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



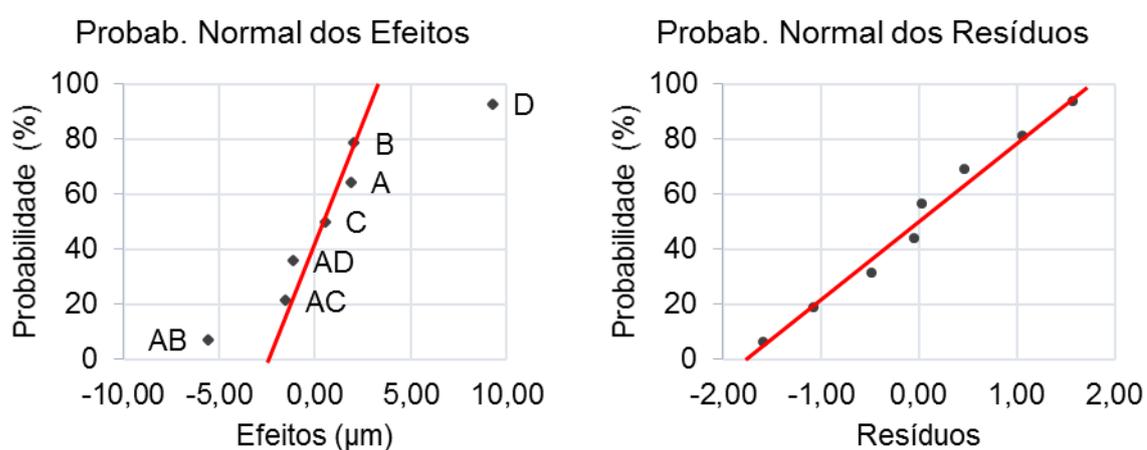
**Figura 4.37:** Rugosidade (eixo X) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância comprova, através da Tabela 4.23, a significância da variável D (altura da camada). Com 95% de probabilidade, essa variável responde 81,07% da variabilidade na resposta.

**Tabela 4.23:** Análise de variância – Rugosidade (eixo X).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	30,764168	5,37%	30,764168	7,318132	0,113792
B	1	4,590450	0,80%	4,590450	1,091969	0,405725
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>464,210450</b>	<b>81,07%</b>	<b>464,210450</b>	<b>110,425653</b>	<b>0,008935</b>
AB	1	40,266338	7,03%	40,266338	9,578493	0,090458
AD	1	24,346242	4,25%	24,346242	5,791446	0,137847
Erro	2	8,407656	1,47%	4,203828		
Total	7	572,585304	100,00%			

Assim como verificado no eixo X, a variável D (ABC) também foi significativa na análise de rugosidade no eixo Y. Com efeito positivo, ao elevar o nível da variável D (altura da camada), de 0,2 mm para 0,4 mm, a resposta aumenta 9,254  $\mu\text{m}$ . Além disso, a interação AB (CD) também foi significativa, porém com efeito negativo. Elevando o nível dessa interação, a resposta reduz 5,600  $\mu\text{m}$ , conforme observado na Figura 4.38(a). Foi verificado ainda, através da Figura 4.38(b), que os dados são distribuídos normalmente.



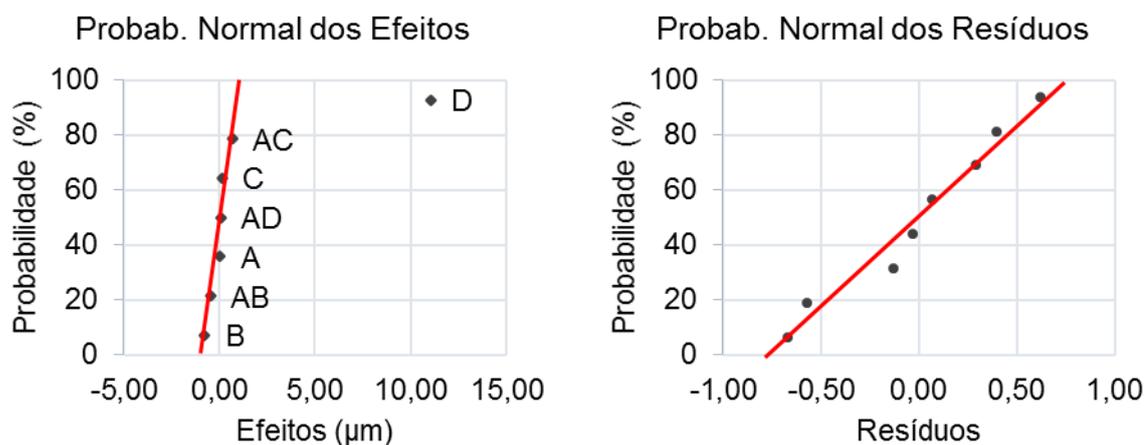
**Figura 4.38:** Rugosidade (eixo Y) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

Foi confirmado na Tabela 4.24, com a análise de variância, que a variável D (ABC) e a interação AB (CD) são significativas. Elas respondem, em conjunto, 91,07% da variação na resposta.

**Tabela 4.24:** Análise de variância – Rugosidade (eixo Y).

Análise de Variância						
Fator	GL	SQ	Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	7,065041	2,75%	7,065041	2,695096	0,242357
B	1	8,189104	3,19%	8,189104	3,123892	0,219185
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>171,254525</b>	<b>66,66%</b>	<b>171,254525</b>	<b>65,328354</b>	<b>0,014965</b>
<b>AB</b>	<b>1</b>	<b>62,708801</b>	<b>24,41%</b>	<b>62,708801</b>	<b>23,921486</b>	<b>0,039352</b>
AD	1	2,453112	0,95%	2,453112	0,935787	0,435419
Erro	2	5,242885	2,04%	2,621442		
Total	7	256,913468	100,00%			

O eixo Z apresentou apenas a variável D (ABC) como significativa, conforme Figura 4.39(a). Com efeito positivo, ao elevar o nível dessa variável, a resposta aumenta 11,052  $\mu\text{m}$ . As demais variáveis e interações não foram significativas. Foi verificado ainda, através da Figura 4.39(b), que não é possível rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.



**Figura 4.39:** Rugosidade (eixo Z) - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

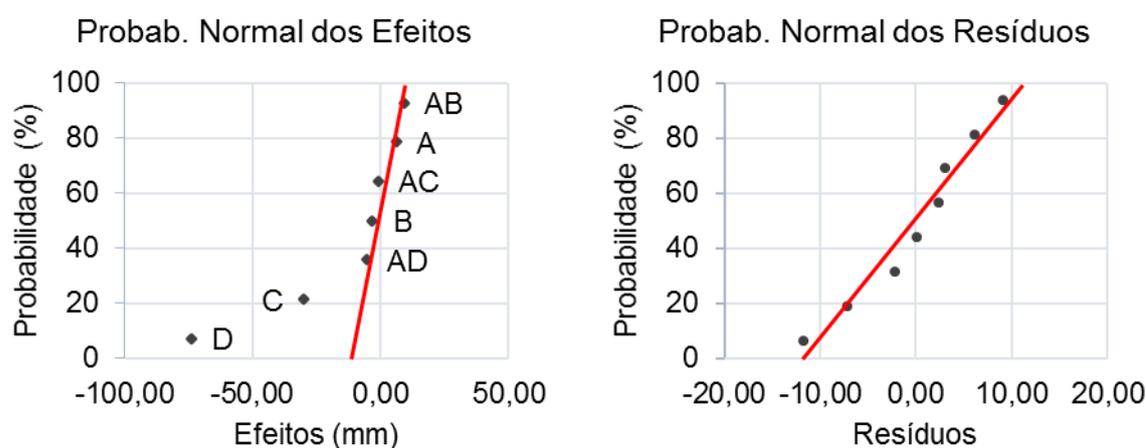
Foi confirmado, ainda, através da análise de variância, na Tabela 4.25, que a variável D é significativa e que, sozinha, responde por 98,96% da variação na resposta.

**Tabela 4.25:** Análise de variância – Rugosidade (eixo Z).

Fator	GL	SQ	Análise de Variância			
			Contribuição	QM	Valor F	Valor-p
A	1	0,007813	0,00%	0,007813	0,017128	0,904159
B	1	1,129505	0,46%	1,129505	2,476242	0,213640
C	1	0,052165	0,02%	0,052165	0,114362	0,757515
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>244,271305</b>	<b>98,96%</b>	<b>244,271305</b>	<b>535,522381</b>	<b>0,000177</b>
Erro	3	1,368410	0,55%	0,456137		
Total	7	246,829196	100,00%			

#### 4.4 Tempo de Impressão

O tempo de impressão foi observado (Tabela 3.4) durante a etapa de fabricação das peças e ficou evidente que os fatores C (velocidade de impressão) e D (altura da camada) foram significativos, totalizando 17 h 27 min de impressão. Foi observado na Figura 4.40(a) que para ambas as variáveis, o nível e a resposta são inversamente proporcionais, ou seja, elevando o nível de cada variável, a resposta é reduzida. Elevando o nível da velocidade de impressão (de 40 mm/s para 60 mm/s), por exemplo, a resposta reduz 30 minutos. Aumentando o nível da altura da camada (de 0,2 mm para 0,4 mm), a resposta reduz 74 minutos. Os demais fatores, bem como as interações, não foram significativos. A Figura 4.40(b) demonstra ainda, através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que não é possível rejeitar a normalidade dos dados.

**Figura 4.40:** Tempo de impressão - NPP dos (a) efeitos e (b) resíduos.

A análise de variância foi realizada para comprovar a significância dos dados. Foi observado que apenas as variáveis C e D respondem 97,49% da variabilidade dos dados, conforme Tabela 4.27.

**Tabela 4.26:** Análise de variância – Tempo de impressão.

<i>Análise de Variância</i>						
<i>Fator</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>Contribuição</i>	<i>QM</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor-p</i>
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>1830,125000</b>	<b>14,04%</b>	<b>1830,125000</b>	<b>47,077170</b>	<b>0,002363</b>
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>10878,125000</b>	<b>83,45%</b>	<b>10878,125000</b>	<b>279,823151</b>	<b>0,000075</b>
AB	1	171,125000	1,31%	171,125000	4,401929	0,103879
Erro	4	155,500000	1,19%	38,875000		
Total	7	13034,875000	100,00%			

De forma resumida, foi informado na Tabela 4.26 todas as variáveis e interações significativas em relação às características analisadas no experimento: desvio dimensional, desvio geométrico e rugosidade superficial. A significância foi marcada com o símbolo  $\diamond$ , seguido pelo sinal de + ou – para efeito positivo ou negativo, respectivamente.

**Tabela 4.27:** Fatores e interações significantes na avaliação de desvios dimensionais, geométricos e rugosidade. Significante ( $\diamond$ ); Efeito negativo (-); Efeito positivo (+)

Característica Geométrica	Tolerância	Fatores/Interações Significativos						
		A=BCD	B=ACD	C=ABD	D=ABC	AB=CD	AC=BD	AD=BC
Comprimento – Eixo Z (10 mm)	Dimensional			$\diamond+$	$\diamond-$	$\diamond+$		
Comprimento – Eixo Z (20 mm)					$\diamond-$	$\diamond+$		
Comprimento – Eixo Z (30 mm)				$\diamond+$	$\diamond-$			
Comprimento – Eixo X (28 mm)					$\diamond-$			
Comprimento – Eixo X (64 mm)					$\diamond-$			$\diamond-$
Comprimento – Eixo Y (28 mm)					$\diamond-$			
Comprimento – Eixo Y (64 mm)					$\diamond-$			
Diâmetro Interno (20 mm)					$\diamond-$			$\diamond-$
Diâmetro Externo (30 mm)			$\diamond+$	$\diamond-$				
Planeza		Forma				$\diamond+$		
Cilindricidade (Interno)			$\diamond-$					
Cilindricidade (Externo)				$\diamond+$	$\diamond+$			$\diamond-$
Esfericidade				$\diamond-$	$\diamond+$			
Paralelismo (Eixo X)	Orientação					$\diamond+$	$\diamond+$	
Paralelismo (Eixo Y)			$\diamond+$	$\diamond+$	$\diamond+$	$\diamond+$	$\diamond+$	
Paralelismo (Eixo Z)							$\diamond+$	
Perpendicularidade (Eixos XY)				$\diamond+$				
Perpendicularidade (Eixos XZ)				$\diamond+$				
Perpendicularidade (Eixos YZ)			$\diamond+$					
Inclinação (30°)				$\diamond+$	$\diamond+$			
Inclinação (60°)				$\diamond+$	$\diamond+$			
Concentricidade/Coaxialidade	Localização			$\diamond+$		$\diamond-$		
Rugosidade (Eixo X)				$\diamond+$				
Rugosidade (Eixo Y)				$\diamond+$	$\diamond-$			
Rugosidade (Eixo Z)				$\diamond+$				

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida para avaliação metrológica dos processos de AM contribuiu na resolução do problema proposto, pois permitiu avaliar o desempenho da impressora 3D, modelo Ender 3, com tecnologia FDM. Além disso, através do planejamento fatorial fracionário  $2^{4-1}$  e das medições realizadas na MMC (Cantilever QM-353) e no rugosímetro (SJ-201), foi possível determinar os fatores e interações significativos com base no cálculo dos efeitos principais e nos gráficos de probabilidade normal dos efeitos e resíduos. Com o método proposto foi possível mensurar as peças, avaliando o desempenho dimensional, geométrico e de rugosidade superficial da impressora, por meio das peças fabricadas.

O desempenho da impressora 3D foi então estabelecido para cada parâmetro medido (variável  $y$ ), através da metodologia proposta, calculando o efeito de cada variável estudada, através do planejamento fatorial fracionário. Esses efeitos foram determinados a partir dos desvios verificados para cada parâmetro  $y$ , pela diferença entre os valores medidos e projetados (modelo CAD).

De modo geral, foi verificado que os fatores  $D$  (altura da camada) e  $C$  (velocidade de impressão) foram os que mais influenciaram os desvios nessa impressora 3D, com efeito significativo em 17 e 10 das 25 observações, respectivamente. Dentre as interações,  $AB$  (que está confundida com a interação  $CD$ ) foi a mais expressiva, com efeito significativo em 6 variáveis dependentes. O fator  $A$  (densidade de enchimento) e as interações  $AC$  ( $BD$ ) e  $AD$  ( $BC$ ) tiveram efeito significativo em 3 observações, cada. O fator  $B$  (temperatura de extrusão) foi o menos expressivo, com apenas um efeito significativo.

Analisando os desvios dimensionais, foi verificado que o fator  $D$  apresentou efeito negativo (reduzindo o valor da dimensão produzida quando do aumento do nível deste fator) em todas as observações, exceto no diâmetro externo (30 mm). Foi verificado, portanto, que ao elevar o nível da altura da camada, de 0,2 mm para 0,4 mm, a resposta é reduzida. Diferente dos resultados obtidos na avaliação dos desvios dimensionais, o fator  $D$  apresentou efeito positivo nas demais análises: desvio geométrico de forma, orientação, localização e rugosidade superficial. Desse modo, elevando o nível de  $D$ , foram obtidos maiores desvios geométricos e de rugosidade. O fator  $C$  foi expressivo na avaliação dos desvios geométricos, com efeito significativo em 8 das 13 observações (não foi significativo apenas nos desvios de planeza,

cilindricidade interna, paralelismo nos eixos X e Z e perpendicularidade no plano YZ). Todos os efeitos foram positivos, exceto na avaliação da esfericidade, que teve efeito negativo. Contudo, deve ser considerado que o fator  $C$  está confundido com a interação  $ABD$  e que esse efeito pode não estar relacionado somente a velocidade de impressão.

Nas observações onde a altura da camada tende a ser menos expressiva, como por exemplo nos desvios dimensionais nos eixos X e Y, no diâmetro e na cilindridade, foi verificado que quanto maior a dimensão do objeto, maiores são os desvios. Nos desvios de perpendicularidade, foi observado que os planos XZ e YZ obtiveram maiores desvios se comparados ao plano XY. Isso se deve ao fato da altura da camada ser mais expressiva no eixo Z. Ademais, foi observado que o plano YZ obteve maiores desvios se comparado ao plano XZ. Isso pode estar relacionado ao fato de que no plano YZ houve uma menor aderência entre as camadas, devido ao cumprimento da linha de *raster*, que está ligado diretamente ao tempo de resfriamento e fundição entre as camadas.

Com relação à rugosidade das peças, de acordo com a NBR 8404:1984, que indica o estado de superfícies em desenhos técnicos, os resultados obtidos indicam que o processo de AM deve ser classificado no grupo de rugosidade N12, para valores de rugosidade máxima em  $Ra$  de até 50  $\mu\text{m}$ . Entretanto, na peça fabricada com todos os fatores no nível baixo (sinal  $-$ ), o processo de AM teria sua classificação alterada para N11, na qual os valores máximos de rugosidade em  $Ra$  são de até 25  $\mu\text{m}$ .

Desse modo, foi verificado que o processo de AM, mais especificamente com a tecnologia FDM, pode ser ajustado para melhorar o desempenho e a confiabilidade metrológica dos itens fabricados, especialmente nos projetos onde há intercambialidade de peças. Apesar disso, muitas demandas podem ser atendidas por esse processo de fabricação, principalmente as que não exigem tolerâncias dimensionais e/ou geométricas com alto rigor técnico. A peça 1, fabricada com todos os fatores no nível baixo, demonstrou que é possível fabricar peças com desvios menores que 0,100 mm, com a possibilidade de diminuir ainda mais os desvios, reduzindo a altura da camada e a velocidade de impressão. Entretanto, essas alterações resultam em maior tempo de impressão, que pode ser um fator determinante para a execução de determinado projeto (nesse planejamento, por exemplo, ao reduzir o nível das variáveis  $C$  e  $D$ , o tempo de impressão teve um acréscimo de 30 e 74 minutos, respectivamente).

Foi verificado como limitação da pesquisa o fato de ter avaliado o desempenho de um modelo de impressora (Ender 3) com tecnologia FDM. Outros modelos de impressora, bem como as demais tecnologias de impressão, são importantes para o desenvolvimento da AM, porém não foram objeto de estudo nesse trabalho. Entretanto, o método proposto pode ser utilizado para avaliação do desempenho de outros equipamentos.

Como sugestão de trabalhos futuros, a metodologia desenvolvida nesse trabalho pode ser utilizada como referência para avaliação de outras máquinas de fabricação aditiva e tecnologias de AM. As dimensões do padrão projetado permitem a replicação para avaliação de desempenho de outras impressoras 3D pois foi desenvolvida com dimensões inferiores à área de impressão de diversos modelos de impressoras. Podem ser definidas outras variáveis para avaliação do processo, com possibilidade de acrescentar ou reduzir a quantidade de variáveis independentes. Por exemplo, podem ser analisadas apenas as variáveis mais significativas, nesse caso  $C$  (velocidade de impressão) e  $D$  (altura da camada), com o incremento de um terceiro nível a fim de se obter resultados mais consistentes. Uma análise utilizando a metodologia de superfície de resposta pode ser aplicada para determinação dos parâmetros ótimos de operação em processos de AM. Ainda, outro campo de aplicação da AM são as peças de formato complexo, que por sua vez, são mais difíceis de serem executadas nos processos de fabricação tradicionais. Com uma perspectiva de futuro, foi percebido que tanto o processo FDM, assim como outras tecnologias de AM, podem suprir muitas demandas de fabricação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT NBR 6158. Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, 1995.
2. ABNT NBR 6409. Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento: Generalidades, símbolos, definições e indicações em desempenho. Rio de Janeiro, 1997.
3. ABNT NBR 8404: Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos: Procedimento. 1984.
4. ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura Aditiva: Princípios Gerais. Terminologia elaborada pela Comissão de Estudo Especial de Manufatura Aditiva. 2018.
5. AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos; LIRANI, João: Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões. São Paulo: Blucher, 2019.
6. ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André Roberto De. Fundamentos de metrologia científica e industrial. 2 ed. Barueri, SP: Editora Manole, 2018.
7. ALVES, Artur Soares. Metrologia geométrica. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1996.
8. ALVES, T. C.; OLIVEIRA, A. C. A.; SANTOS, A. C.: Dimensional Accuracy for Additive Manufacturing. ABCM – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2019.
9. ARENCIBIA, Rosenda; PIRATELLI, Antônio.: Incerteza de Medição: Metodologia de Cálculo, Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.
10. AZEVEDO, Fábio Mariotto de: Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D. Monografia de Graduação. São Carlos, 2013.
11. BOX, George E. P.; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, Willian G.: Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, 2005.
12. CONEJERO, Antonio Sergio. A importância da metrologia. O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial, Brasília, p. 45-52, jan./dez. 2005.
13. CORDEIRO, Miguel José de Ervideira. Análise e otimização dos parâmetros processuais e dos sistemas funcionais de uma impressora 3D, que se baseia na técnica Deposição de Plástico Fundido (FDM). Dissertação de Mestrado. Lisboa, 2014.

14. D. A. Roberson; D. Espalin; R. B. Wicker: 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. *Virtual and Physical Prototyping*, 2013, Vol. 8, 201-212. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2013.830939>
15. DILBEROGLU, U. M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M.: The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0, *Procedia Manufacturing*, 2017, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
16. DONATELLI, G. D. et al. Metrologia geométrica na indústria: tendências e desafios. O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial. Brasília, p. 9-28, 2005.
17. DURÃO, L. F. C. S.; BARKOCZY, R.; ZANCUL, E.; HO, L. L.; BONNARD, R.: Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 2019, 291-313. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00075-9>
18. FARSHID, Avali; MUHAMMAD, Janan: Optimization of process parameters in micro-EDM of Ti-6Al-4V based on full factorial design, Springer, 2017, 167-187. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0103-x>
19. FRANCISCHINI, A. S. N.; FRANCISCHINI, P. G.: Indicadores de Desempenho: dos objetivos à ação – métodos para elaborar KPIs e obter resultados. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017
20. GALANTUCCI, L. M.; BODI, I.; KACANI, J.; LAVECCHIA, F.: Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique, *Procedia CIRP*, 28, 2015, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.014>
21. GRIFFITHS, C. A.; HOWARTH, J.; ROWBOTHAM, G. A.; REES, A.: Effect of build parameters on processing efficiency and material performance in fused deposition modeling, *Procedia CIRP*, 49, 2016, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.024>
22. HOCKEN, Robert J.; PEREIRA, Paulo H.: *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2nd ed. Wakefield: CRC Press, 2012.
23. LIENEKE, T.; DENZER, V.; ADAM, G. A. O.; Zimmer, D.: Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling, *Procedia CIRP*, 43, 2016, 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.361>

24. LIRA, Francisco Adval De. Metrologia dimensional: Técnicas de Medição e Instrumentos para Controle e Fabricação Industrial. 1 ed. São Paulo: Érica, 2015.
25. LIRA, Francisco Adval De. Metrologia: Conceitos e práticas de instrumentação. 1 ed. São Paulo: Érica, 2014.
26. MAHMOOD, S.; TALAMONA, D.; GOH, K. L.; QURESHI, A. J.: Fast Deviation Simulation for Fused Deposition Modeling Process, Procedia CIRP, 43, 2016, 327-332. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.004>
27. MINETOLA, Paolo; IULIANO, Luca; MARCHIANDI, Giovanni: Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades, Procedia CIRP 41, 2016, 1027-1032. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.075>
28. MONTGOMERY, D. C.: Design and analysis of experiments, Wiley, 9th edition, Hoboken, NJ, 2017.
29. NARANG, R.; CHHABRA, D.: Analysis of Process Parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) Technique, International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering, Volume 3, 2017, 41-48.
30. PIRATELLI-FILHO, A.; SILVA-JUNIOR, J.; ANWER, N.; MEHDI-SOUZANI, C.; ARENCIBIA, R. V.; VIANNA, D. M.: Circularity Compensation by CAD Modeling in Rapid Prototyping of Cylindrical Parts. Computer-Aided Design and Applications, 16, 2018, 1063-1069. <https://doi.org/10.14733/cadconfP.2018.392-396>
31. SANTOS, Josiane Oliveira Dos. Metrologia e normalização. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.
32. SILVA NETO, João Cirilo da: Metrologia e Controle Dimensional. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
33. SMITH, Bernie: KPI Checklists, Metric Press, Revised 1st, version 1.3, Sheffield, England, 2017.
34. TOLEDO, José Carlos De. Sistemas de medição e metrologia. 1 ed. Curitiba: InterSaberes, 2014.
35. VIEIRA, Sonia: Estatística para a Qualidade. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
36. VILLAMIL, C.; NYLANDER, J.; HALLSTEDT, S. I.; SCHULTE, J.; WATZ, M.: Additive manufacturing from a strategy sustainability perspective, International Design Conference – Design 2018. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0353>
37. VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Rio de Janeiro, 2012.

- 38.** VOLPATO, N. et al. Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2017.
- 39.** ZANETTI, V.; CAVALIERI, S.; PEZZOTTA, Z.: Additive manufacturing and PSS: a solution life-cycle perspective, IFAC-PapersOnLine, 2016, 1573-1578.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.804>

## ANEXO I – MODELO E CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MMC

   		 <p>SAPHIRWERK INDUSTRIEPRODUKTE AG        ENLENSTRASSE 46        CH-2595 BRÜGG, SWITZERLAND        Tel: +41 (0)32 374 29 86 E-mail: info@saphirwerk.com        Fax: +41 (0)32 374 29 95 Internet: www.saphirwerk.com</p>	
<b>Proprietary certificate according to ISO 17025</b>			
Order no:	1037542	Date:	29.01.2008
Identification no:	H0275	Material:	Al2O3
Object:	1 calibration ball		
<b>Roundness and diameter measurement:</b> The measuring equipments and the references used to calibrate our equipment are periodically checked by the Metas (Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation).			
<b>Diameter in mm:</b>	<b>19.9834</b>	<b>Roundness in <math>\mu\text{m}</math>:</b>	<b>0.036</b>
Uncertainty of measurement	$\pm 0.3\mu\text{m}$	Uncertainty of measurement	$< 0.08 \mu\text{m}$
Both values, diameter and roundness, describe the equator of the calibration ball which is perpendicular to the stem's axis.			
For measurements:	K.Hänzi, Measurement laboratory		
		QS-FO-03,01-33	
<small>To determine the diameter of the ball we took care of the thermal expansion.          The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor <math>k=2</math>, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.</small>			



Mitutoyo Sul Americana Ltda.



## LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO  
Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO  
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031



### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Pag.: 1 / 4

**Cliente :** Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

**Endereço :** UNB - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF.

**Local da calibração:** UNB - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF.

**Ordem de Serviço :** 024.012/001

#### I. Identificação do Equipamento Calibrado :

Máquina Tridimensional de Medição por Coordenadas

Fabricante : Mitutoyo

MMC Modelo : QM-353

No de Série : .0072807 / Código : 198-314

Identif. do Cliente : N/C

Faixa Nominal : 300 x 500 x 300 mm

Contador Digital / Controlador

Modelo : UD1-VC

No Série : N/C

Resolução : 0,0005 mm

Cabeçote

Modelo : MH20

No Série : 5L7792

Probe

Modelo : TP20-SF

No Série : 7K0621

Rack

Modelo : -

No Série : -

Programa de Medição

Programa : MCOsmos-Manual

Versão : V3.0R16

Dongle No. : 10-10248519

#### II. Notas:

1. A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k=2,1$ , para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
2. Erro = Valor indicado - Valor Verdadeiro Convencional.
3. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
4. A máquina foi verificada conforme Procedimento PML-0030 na sua versão 1/2.
5. Condição ambiental: Temperatura :  $20,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$

#### III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado

No Série : 9211320

Certificado No : 2824/08

Emitido em : 5/4/2008

Validade : 10/2008

Termohigrômetro

No Série : T1F7008

Certificado No : LV9362/06

Emitido em : 8/9/2006

Validade : 09/2008

Esfera Padrão

No Série : D2455

Certificado No : 2909/07

Emitido em : 13/4/2007

Validade : 04/2009

**Data da Calibração :** 8/8/2008

Carlos Kazuo Suetake  
Chefe Laboratório de Metrologia  
Emissão: 19/08/08

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

## LABORATÓRIO DE METROLOGIA

### REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO  
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

Pag.: 2 / 4

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

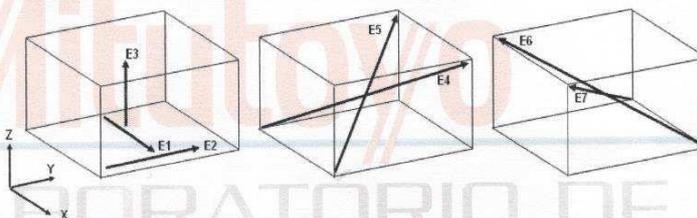
Cliente : Laboratorio de Metrologia - LM - UNB.

#### IV. Resultado das Medições :

##### 4.1. Verificações iniciais do equipamento :

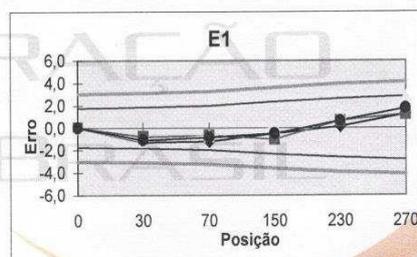
- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfícies de ref. : OK

##### 4.2. Verificação do equipamento:



##### 4.2.1. Exatidão de medição Posição E1 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-1,3	-0,8	-1,2	-1,1
70	-1,2	-0,7	-0,7	-0,9
150	-0,5	-1,0	0,0	-0,5
230	0,1	0,6	1,2	0,6
270	1,2	1,2	2,8	1,7

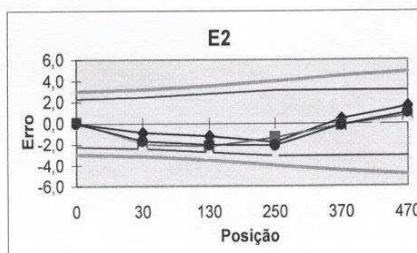


$$U = 1,2 + L/900 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

##### 4.2.2. Exatidão de medição Posição E2 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,9	-2,0	-2,1	-1,7
130	-1,2	-2,2	-2,8	-2,1
250	-1,8	-1,4	-3,1	-2,1
370	0,4	-0,2	-0,7	-0,2
470	1,6	0,7	0,6	1,0



$$U = 1,2 + L/800 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

## LABORATÓRIO DE METROLOGIA

### REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO  
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

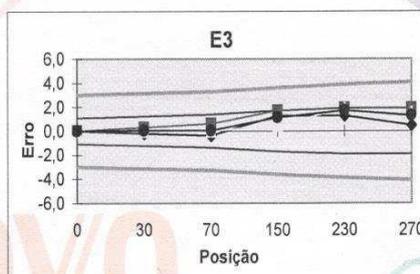
Pag.: 3 / 4

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

##### 4.2.3. Exatidão de medição Posição E3 - unidade : $\mu\text{m}$

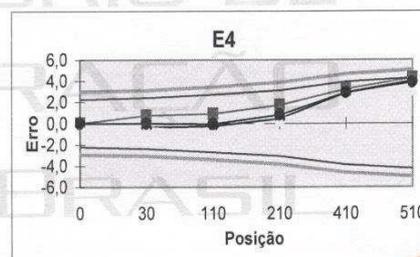
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,2	0,3	0,0	0,0
70	-0,4	0,6	0,0	0,1
150	1,3	1,7	0,5	1,2
230	1,3	1,9	1,9	1,7
270	0,5	1,9	1,5	1,3



$$U = 1,2 + L/700 \quad \mu\text{m} \quad , \text{ onde: } L = \text{posição em " mm " .}$$

##### 4.2.4. Exatidão de medição Posição E4 - unidade : $\mu\text{m}$

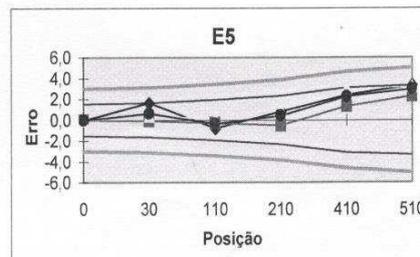
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,4	0,7	-0,4	0,0
110	-0,3	0,9	-0,8	-0,1
210	0,4	1,7	0,3	0,8
410	2,9	3,2	2,5	2,9
510	4,0	4,3	3,2	3,8



$$U = 1,2 + L/600 \quad \mu\text{m} \quad , \text{ onde: } L = \text{posição em " mm " .}$$

##### 4.2.5. Exatidão de medição Posição E5 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,6	-0,1	0,4	0,6
110	-0,8	-0,3	0,1	-0,3
210	0,8	-0,5	1,0	0,4
410	2,4	1,3	3,0	2,2
510	3,3	2,3	3,2	2,9



$$U = 1,2 + L/700 \quad \mu\text{m} \quad , \text{ onde: } L = \text{posição em " mm " .}$$

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

## LABORATÓRIO DE METROLOGIA

### REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO  
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

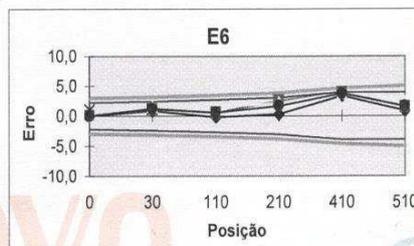
Pag.: 4 / 4

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

##### 4.2.6. Exatidão de medição Posição E6 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,8	1,1	1,6	1,2
110	-0,2	0,6	1,2	0,5
210	0,3	2,5	2,2	1,7
410	3,3	3,9	3,8	3,7
510	0,8	1,5	2,3	1,5

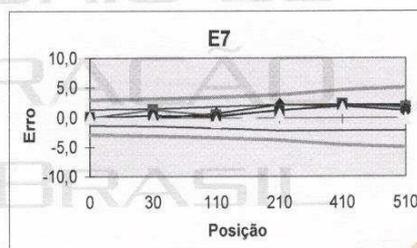


$$U = 1,2 + L/700 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

##### 4.2.7. Exatidão de medição Posição E7 - unidade : $\mu\text{m}$

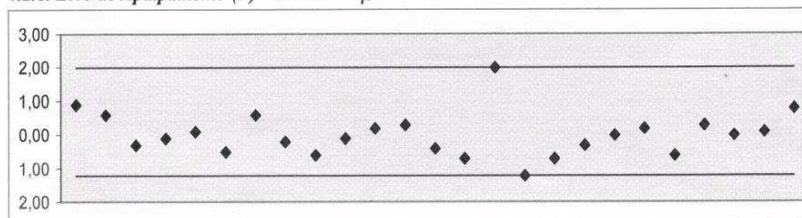
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,1	1,3	-0,1	0,4
110	0,7	0,3	-0,7	0,1
210	2,2	1,2	0,5	1,3
410	2,0	2,2	1,6	1,9
510	1,9	1,6	-0,1	1,1



$$U = 1,2 + L/700 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

##### 4.2.8. Erro de Apalamento (P) - unidade : $\mu\text{m}$



Erro de Apalamento ( $\mu\text{m}$ )	3,2
---	-----

V. Observações Gerais :

# ANEXO II – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO



Laboratório de  
TEMPERATURA E UMIDADE  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



## Certificado de Calibração

Data da Calibração: 26/04/07

n. 1580/07

Data da Emissão: 26/04/07

Página: 1 de 2

1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS  
Av. L3 Norte - Campus da UNB, - Brasília - DF

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. TERMÔMETRO DE LÍQUIDO EM VIDRO CALIBRADO (SMC):

n. Série (fabricante): 1804

Fabricante: Não Consta

n. Identif. (solicitante): 02

Tipo de Imersão: Total

Faixa de Indicação: [15,2 a 26,4]°C

Tipo de Escala: Interna

Faixa de Calibração: [18 a 22]°C

Líquido Termométrico: Mercúrio

Valor de Uma Divisão [de Escala]: 0,2°C

Resolução Adotada: 0,1°C

4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

5. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

4.1 TERM. DIGITAL COM SENSOR TERMORRESISTIVO

PC-268, revisão 008

n. Registro (CERTI): 002352

Incerteza: [0,06]°C

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 2230/06, de 26/05/06, válido até 05/07.

O termômetro a calibrar (SMC) foi montado junto ao termômetro padrão (SMP), em um meio termicamente controlado. Após o sistema atingir a temperatura desejada foram aguardados 10 minutos para garantir a estabilidade térmica do sistema e então iniciada a calibração. Foram realizados, pelo menos, 6 ciclos de medição com intervalos de 1 minuto entre cada ciclo.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.



Laboratório de  
TEMPERATURA E UMIDADE  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



## Certificado de Calibração

Data da Calibração: 26/04/07

n. 1580/07

Data da Emissão: 26/04/07

Página: 2 de 2

### 6. OBSERVAÇÕES:

6.1 A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k$ , o qual para uma distribuição  $t$  com graus de liberdade efetivos ( $v_{eff}$ ) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de  $k$  e  $v_{eff}$  são apresentados na tabela de resultados.

6.2 Condições ambientais durante a calibração: Temperatura Ambiente: [23 +/- 5] °C ; Umidade Relativa do Ar: [60 +/- 20] %ur

6.3 Correção = [Média das Indicações no SMP - Média das Indicações no SMC]. O valor da correção deverá sempre ser somado algebricamente à indicação do SMC.

6.4 Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 - ITS 90.

### 7. RESULTADOS

TABELA DE RESULTADOS

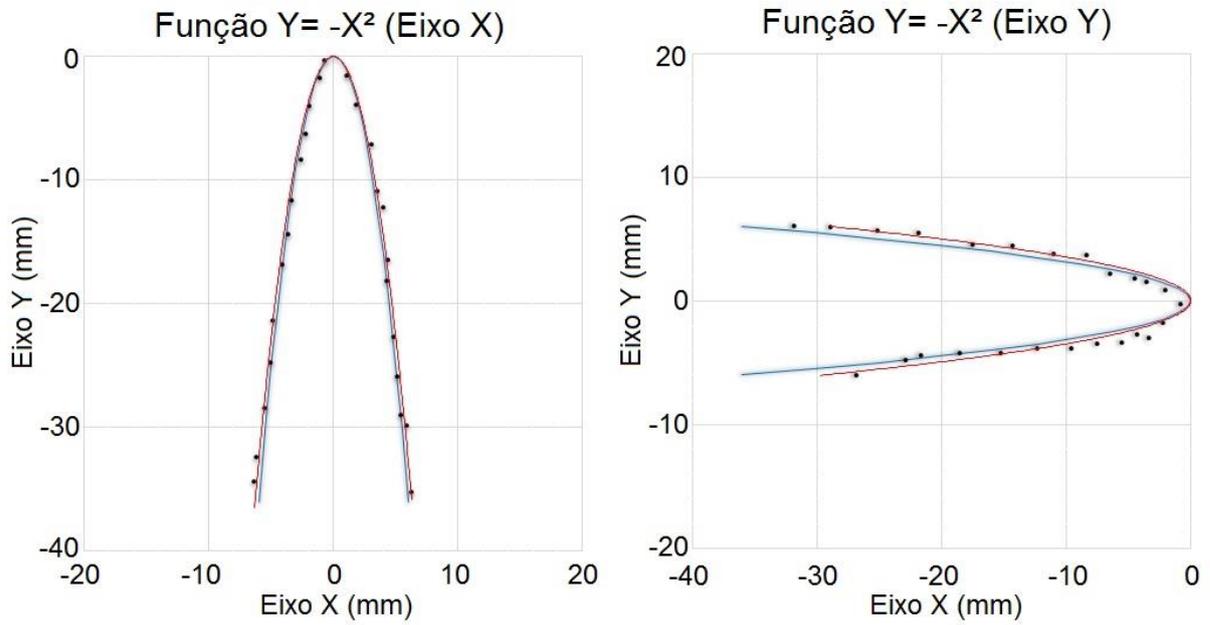
Média das Indic. no SMP [°C]	Média das Indic. no SMC [°C]	Correção [°C]	Incerteza U [°C]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade $v_{eff}$
18,0	16,2	1,8	0,1	2,00	Infinito
20,0	18,2	1,8	0,1	2,00	Infinito
22,0	20,4	1,6	0,1	2,00	Infinito

Indianara Elisio Ribeiro Achar  
Signatária Autorizada

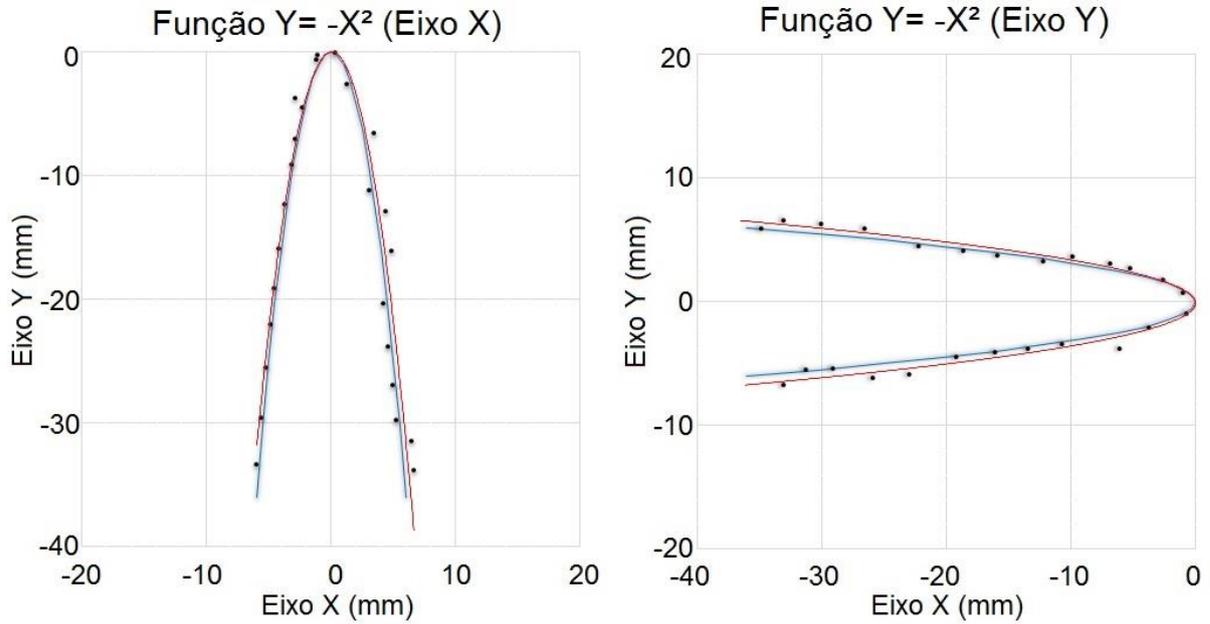
Indianara Elisio Ribeiro Achar  
Responsável pela Calibração

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

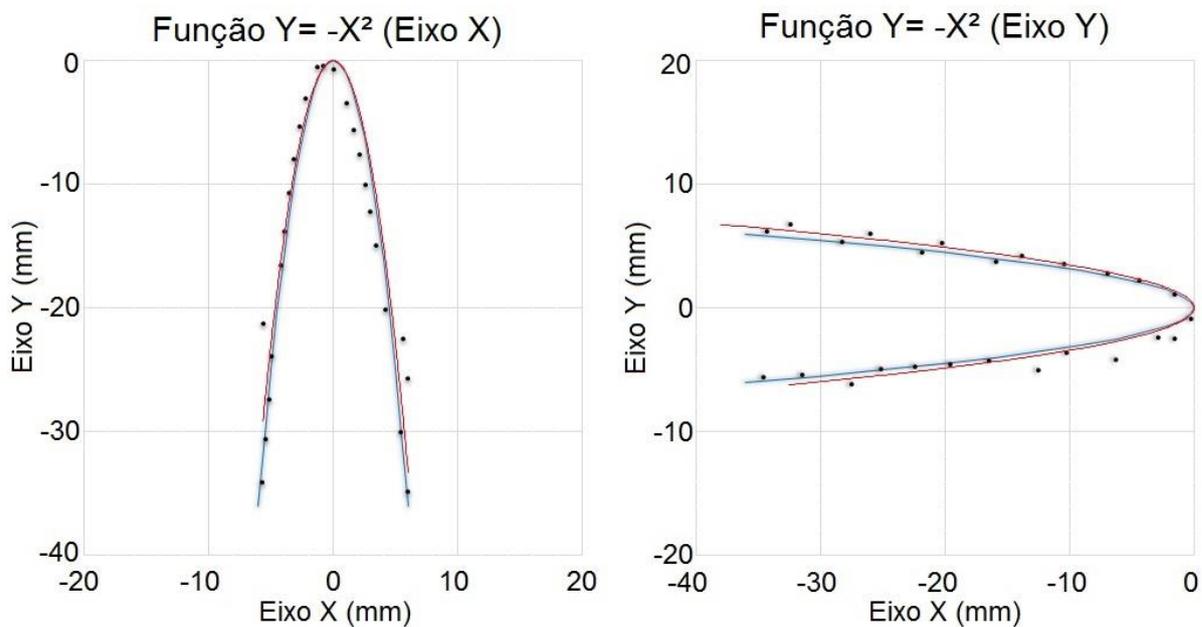
## APÊNDICE A – Análise qualitativa da função $Y = -X^2$



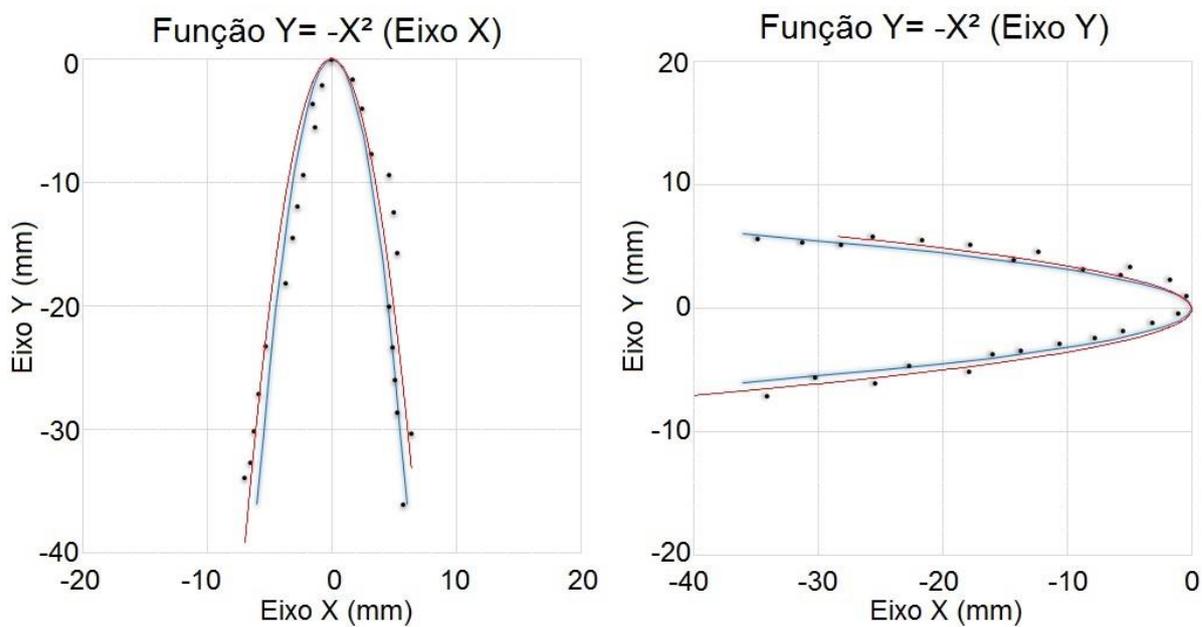
**Figura A-1:** Desvio de forma livre (Peça 1).



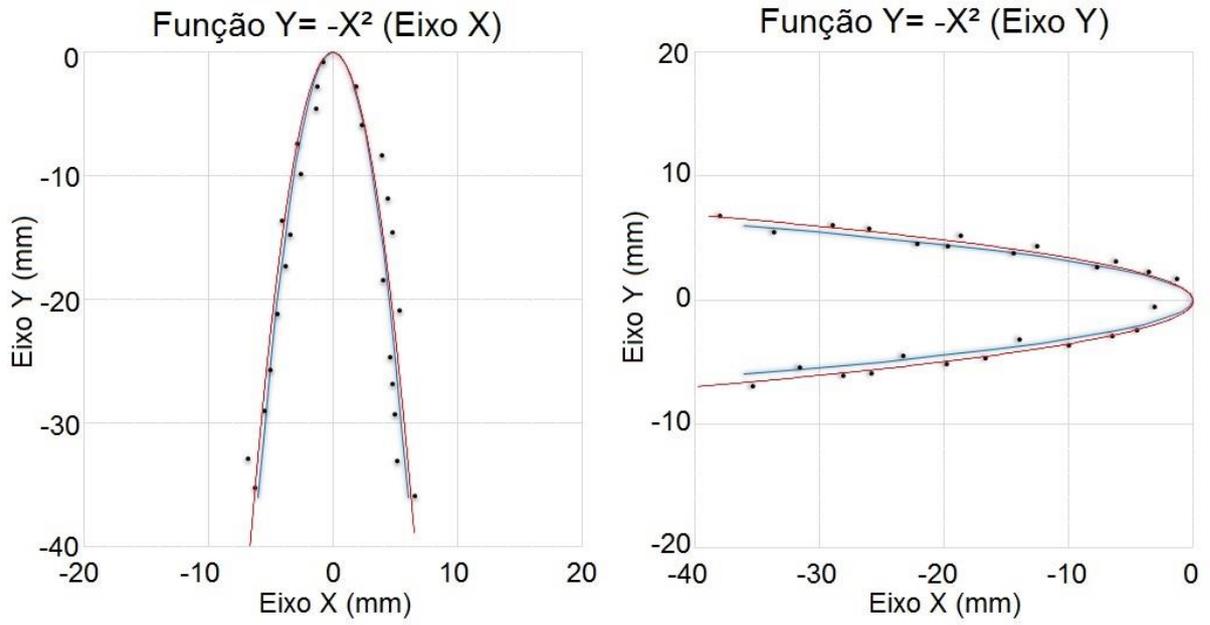
**Figura A-2:** Desvio de forma livre (Peça 2).



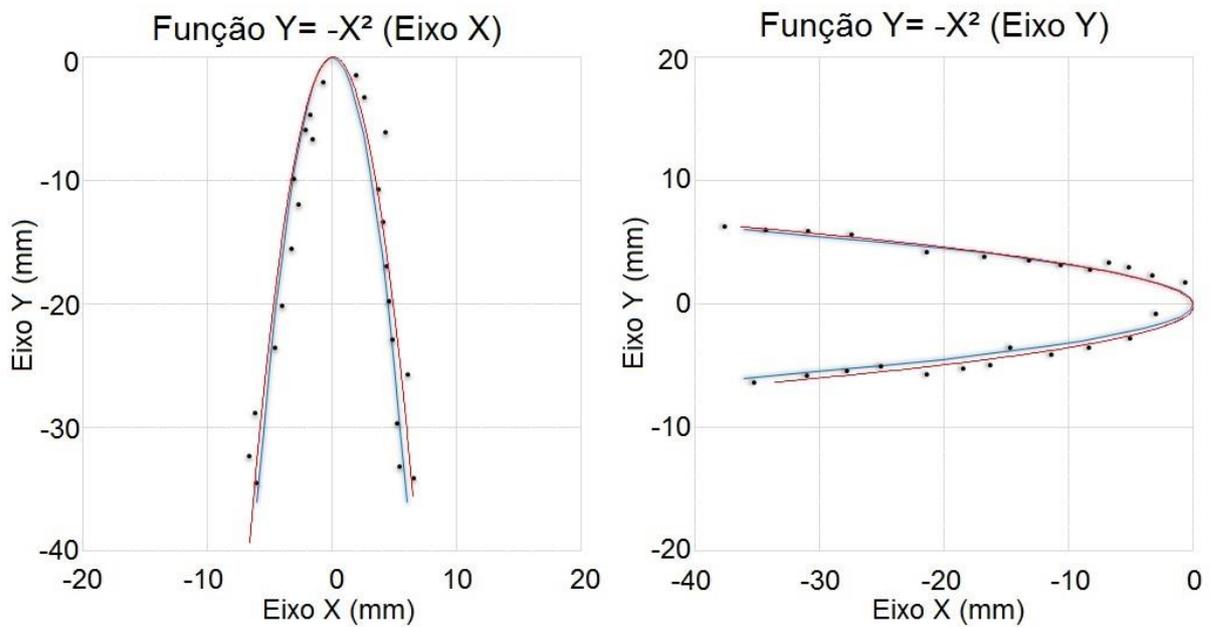
**Figura A-3:** Desvio de forma livre (Peça 3).



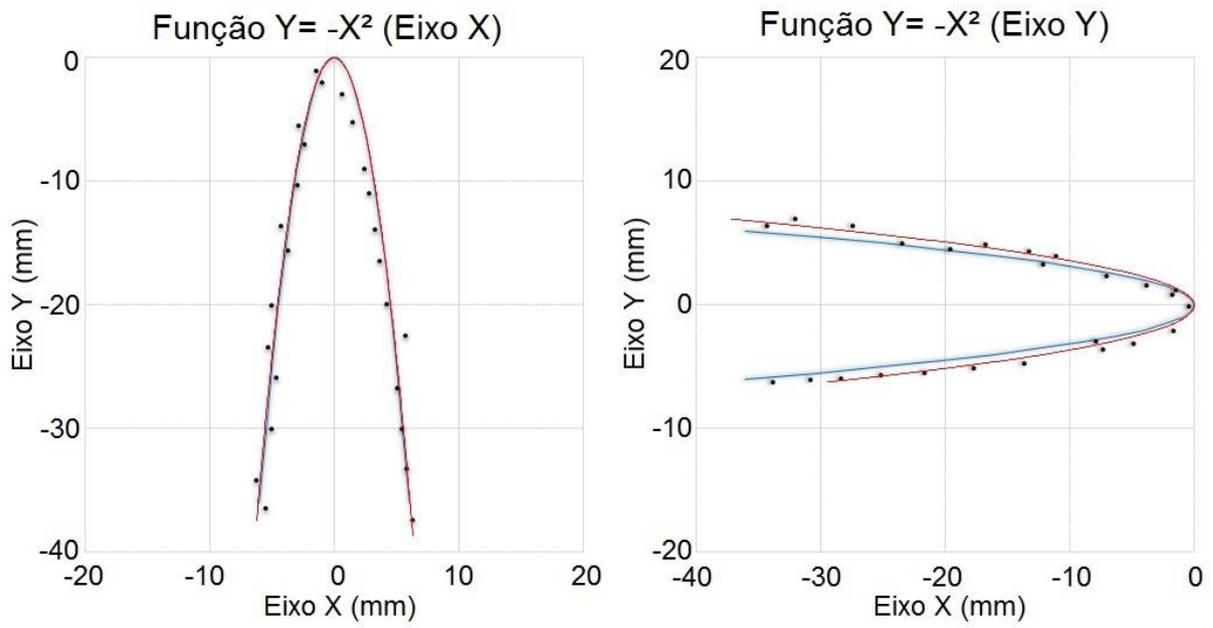
**Figura A-4:** Desvio de forma livre (Peça 4).



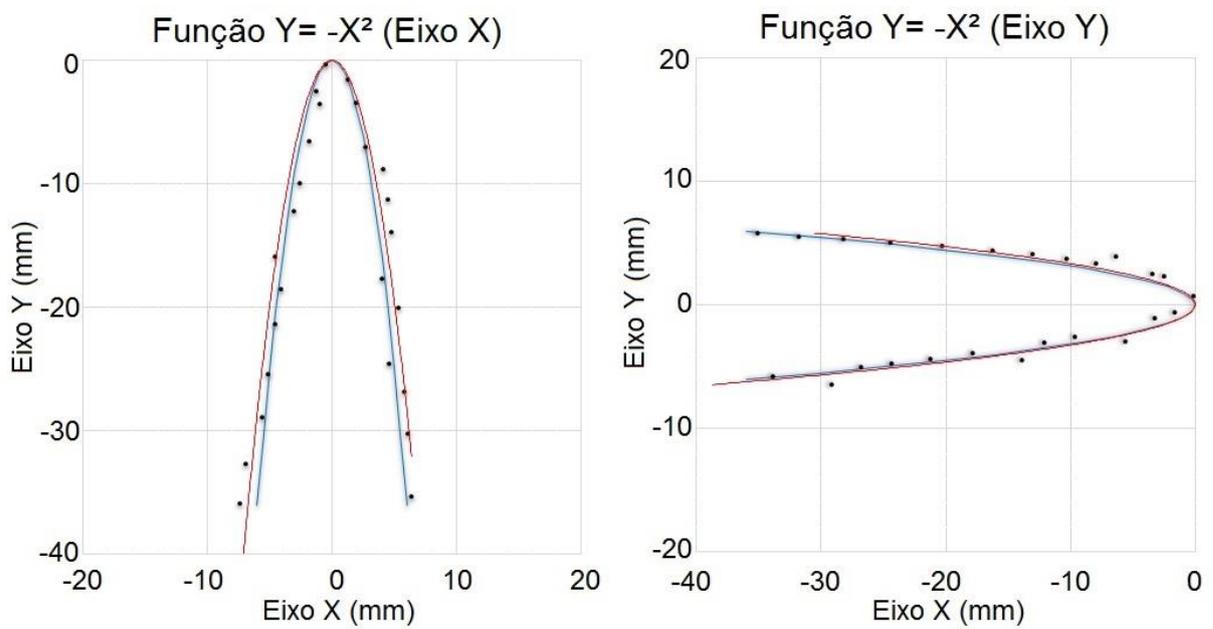
**Figura A-5:** Desvio de forma livre (Peça 5).



**Figura A-6:** Desvio de forma livre (Peça 6).



**Figura A-7:** Desvio de forma livre (Peça 7).



**Figura A-8:** Desvio de forma livre (Peça 8).

## APÊNDICE B – Rugosidade Superficial

