



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SUPERFÍCIES
DE FORMA LIVRE OBTIDAS POR
PROTOTIPAGEM RÁPIDA**

Por,
José Aloísio Corado Guedes
Natália Lopes Piauilino

Brasília, 22 de junho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE OBTIDAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

POR,

José Aloísio Corado Guedes. 13/0143073
Natália Lopes Piauilino. 14/0048316

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antônio Piratelli Filho, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Dra. Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM

Prof. Dr. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz,
UnB/ ENM

Brasília, 22 de junho de 2018

Dedicatória(s)

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

Natália

Dedico este trabalho a todos que contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica.

José Aloísio

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por terem me dado todo apoio para que eu buscasse a realização dos meus sonhos.

Aos meus amigos que estiveram comigo no início do curso Celso, Rafael e Victor. À Taís, Isabel, Natália Gomes, Júlia, Bruno, Rodrigo, Daniela, Paulo, Thais, Jô, Eloisa e Itaylane que sempre estiveram ao meu lado e me ajudaram nos momentos difíceis, em especial à Natália Lopes por todo companheirismo e lealdade ao longo deste e de tantos outros trabalhos.

Ao meu orientador, Antônio Piratelli, por construir conosco este trabalho, transmitindo um pouco de seu conhecimento da área.

Ao João por ter nos cedido sua impressora e ter nos ajudado na fase de prototipagem das peças de nosso trabalho.

Aos meus colegas de curso, José e Lucas pela disponibilidade de ajudar no manuseio das ferramentas do laboratório.

E à Universidade de Brasília pela oferta de uma formação acadêmica de qualidade.

José Aloísio

Agradeço a Deus por ter me dado a força e ter iluminado meu caminho nesta jornada.

À minha família e ao meu namorado, pela paciência, amor, incentivo e apoio durante estes anos de formação.

Aos amigos que fiz na Universidade e aos que me acompanham desde o ensino médio.

Ao Aloísio, que foi o meu parceiro não só neste trabalho, mas em vários outros. Muito obrigada pelo convívio e pela amizade.

Ao professor Piratelli e à Universidade, pela oportunidade da realização do trabalho e pela disposição.

Ao José e ao Lucas, estagiários do laboratório de metrologia, pela ajuda na confecção do trabalho; e ao João, que nos ajudou na impressão das peças.

Natália

RESUMO

Peças de geometrias complexas e compostas por formas livres possuem elevada aplicabilidade na indústria e têm sido cada vez mais utilizadas devido aos avanços tecnológicos dos processos de fabricação, como o sistema CAD/CAM de impressão 3D. A prototipagem rápida, ou impressão 3D, consiste na fabricação por adição de material a partir de um modelo digital, como o modelo CAD. A rapidez e a facilidade são as principais vantagens deste tipo de processo, o qual, no entanto, apresenta alguns problemas que vão desde a concepção das peças até suas aplicações finais. Um desses problemas é a variação dimensional que, em peças de geometria complexa, são especificadas no desenho técnico por meio de tolerâncias de perfil de linha e de superfície. A análise dessas variações pode ser feita através da comparação de pontos coordenados medidos na superfície do protótipo com o modelo desenvolvido em CAD. Sendo assim, para que as peças sejam utilizadas é necessária uma verificação de suas dimensões após o término da prototipagem rápida. Este processo é conhecido como engenharia reversa. Este trabalho apresenta uma avaliação de peças com superfície livre fabricadas por prototipagem rápida por meio de técnicas de engenharia reversa. Deste modo, partindo da medição, reconstrução do modelo CAD, combinações de variáveis do processo de impressão, fabricação de peças por prototipagem rápida e análise dos desvios dimensionais, avalia-se a qualidade superficial e os efeitos que tais variáveis e suas combinações apresentam sobre as peças impressas.

Palavras-chave: *engenharia reversa; impressão 3D; prototipagem rápida.*

ABSTRACT

Freeform surface parts have high applicability in the industry and have been increasingly used due to the technological advances that facilitate manufacturing processes, such as CAD / CAM system for 3D printing. Rapid prototyping or 3D printing consists of manufacturing by addition from a digital model, such as the CAD model. The main advantages of this type of prototyping are the speed and ease. However, this type of manufacturing process presents some problems ranging from the design of the parts to their final applications. The analysis of these variations can be done by comparing coordinate points measured on the surface of the prototype with the model developed in CAD. Thus, before the parts are used, a verification of their dimensions is necessary after the end of the rapid prototyping. This work proposes the evaluation of pieces with freeform surface manufactured by rapid prototyping using reverse engineering techniques. Thus, starting from the measurement, reconstruction of the CAD model, combination of variables of 3D printing process, manufacture by rapid prototyping and analysis of dimensional deviations, the surface quality and the effects that these variables and their combinations present on printed pieces.

Keywords: *reverse engineering; 3D printing; rapid prototyping.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	ASPECTOS GERAIS	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
1.3.1	Sistemas CAD e CAM aplicados à prototipagem rápida	13
1.3.2	Prototipagem rápida	14
1.3.3	Medições por contato e sem contato	18
1.3.4	Superfícies de forma livre	20
1.3.5	Tolerâncias geométricas de superfícies de forma livre	21
1.3.6	Engenharia Reversa	21
1.3.7	Tratamento de dados	22
1.3.8	Parâmetros de Processo	24
1.3.9	Planejamento Experimental Fatorial	26
2	METODOLOGIA	27
2.1	DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	28
2.1.1	<i>Scanner 3D e Scanstudio</i>	28
2.1.2	Rhinoceros	33
2.1.3	CATIA V5	33
2.1.4	MATLAB	35
2.1.5	Planejamento experimental para estudo dos efeitos	35
2.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO CAD	37
2.3	IMPRESSÃO 3D	40
2.3.1	Impressora 3D Tronxy P802EA	40
2.3.2	Impressora 3D Prusa i3 MK3	41
3	RESULTADOS PRELIMINARES	43
3.1	ANÁLISE DOS DESVIOS DA PEÇA INICIAL	43
3.2	FABRICAÇÃO POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA E ANÁLISE DOS DESVIOS	45
4	RESULTADOS FINAIS	50
4.1	ANÁLISE QUALITATIVA	50
4.2	ANÁLISE QUANTITATIVA	54
5	CONCLUSÕES	73
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
7	ANEXOS	77
8	APÊNDICES	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Processo de prototipagem rápida	15
Figura 1.2: Esquema do processo de estereoligrafia (VOLPATO et al, 2007)	16
Figura 1.3: Esquema do processo de manufatura laminar de objetos (VOLPATO et al, 2007)	17
Figura 1.4: Princípio do processo FDM (Volpato et al,2007).....	18
Figura 1.5: Representação do princípio de triangulação a laser (RIPKA e TIPEK, 2007).....	20
Figura 1.6: Fluxograma do sistema de engenharia reversa CAD/CAM (JUN, 2008 - modificada).....	22
Figura 1.7: Exemplo de gráfico boxplot (FARIAS, 2010).....	23
Figura 1.8: Histograma (Torman, 2012)	23
Figura 1.9: Gráfico de Probabilidade Normal (Torman, 2012).....	24
Figura 1.10: Gráfico causa/efeito do processo CAD/CAM	26
Figura 2.1: Fluxograma da metodologia realizada.....	27
Figura 2.2: Representação da peça a ser estudada (medidas em mm)	28
Figura 2.3: Componentes do Scanner 3D NexEngine.....	29
Figura 2.4: Janela de configurações de escaneamento do ScanStudio.....	32
Figura 2.5: Exemplo de ambiente de trabalho do CATIA V5 R21	34
Figura 2.6: Bucha – Peça escolhida	37
Figura 2.7: Configurações de escaneamento utilizadas	38
Figura 2.8: Alinhamento das vistas realizado no ScanStudio	39
Figura 2.9: Superfícies NURBS no modelo CAD.....	39
Figura 2.10: Impressora Tronxy P802EA (Tronxy, 2017).....	40
Figura 2.11: Impressora Prusa i3 MK3	41
Figura 2.12: Interface do software utilizado para gerar os códigos de impressão.	42
Figura 3.1: Análise de desvios do CATIA antes da aplicação do filtro	43
Figura 3.2: Gráfico boxplot mostrando o limite adjacente superior	44
Figura 3.3: Modelo impresso na impressora 3d Tronxy P802EA.....	46
Figura 3.4: Análise de desvios do CATIA da peça impressa antes da aplicação do filtro.....	47
Figura 3.5: Gráfico boxplot mostrando o limite adjacente superior para a peça impressa	48
Figura 4.1: Faces que ficaram sobre a mesa aquecida	50
Figura 4.2: Faces opostas as que ficaram sobre a mesa aquecida	51
Figura 4.3: Peças que ficaram com resquícios de suporte (à esquerda, peças com preenchimento de 90% e à direita, peças com preenchimento de 10%)	51
Figura 4.4: Defeito superficial nas bordas	52
Figura 4.5: Defeito superficial nas bordas das peças impressas na direção z (peças 1, 4, 6, 7, 9, 10, 11 e 15).....	52
Figura 4.6: Defeito superficial nas bordas das peças impressas na direção x (peças 3, 5, 8, 14)	53
Figura 4.7: Descolamento de camada (peças 2,4,5 e 16)	53
Figura 4.8: Peça 14.....	54
Figura 4.9: Desvios da peça 10	56
Figura 4.10: Desvios da peça 6	56
Figura 4.11: Distribuição normal dos desvios da peça 10 antes da aplicação do filtro	57
Figura 4.12: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 10	57
Figura 4.13: Distribuição normal dos desvios da peça 6 antes da aplicação do filtro	58
Figura 4.14: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 6	58

Figura 4.15: Boxplot da peça 6 (lim. sup.: 0,221 mm e lim. inf.: -0,147 mm)	59
Figura 4.16: Distribuição normal dos desvios da peça 6 antes da aplicação do filtro	59
Figura 4.17: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 6	60
Figura 4.18: Distribuição normal dos desvios da peça 9 antes da aplicação do filtro	60
Figura 4.19: Histograma da peça 9 antes da aplicação do filtro	61
Figura 4.20: Distribuição normal dos desvios da peça 14 antes da aplicação do filtro	61
Figura 4.21: Histograma da peça 14 antes da aplicação do filtro	62
Figura 4.22: Boxplot da peça 14 (lim. sup.: 0,865 mm e lim. inf.: -0,745 mm)	62
Figura 4.23: Distribuição normal dos desvios da peça 14 após da aplicação do filtro	63
Figura 4.24: Histograma da peça 14 após da aplicação do filtro	63
Figura 4.25: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o desvio padrão antes da aplicação do filtro.....	64
Figura 4.26: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a média antes da aplicação do filtro.....	64
Figura 4.27: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a amplitude antes da aplicação do filtro.....	65
Figura 4.28: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o desvio padrão após a aplicação do filtro.....	65
Figura 4.29: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a média após a aplicação do filtro.....	66
Figura 4.30: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a amplitude após a aplicação do filtro.....	66
Figura 4.31: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o tempo de impressão.....	67
Figura 4.32: Representação das dimensões medidas com o paquímetro	67
Figura 4.33: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “a”	69
Figura 4.34: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “a”.....	69
Figura 4.35: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “b”	70
Figura 4.36: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “b”	70
Figura 4.37: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “c”	71
Figura 4.38: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “c”.....	71
Figura 4.39: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “d”.....	72
Figura 4.40: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “d”	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Especificações técnicas do Scanner 3D modelo 2020I do fabricante NextEngine (traduzido e adaptado).....	30
Tabela 2.2: Comandos e funções utilizadas no software CATIA.	34
Tabela 2.3: Níveis das variáveis do processo.....	35
Tabela 2.4: Planejamento dos Ensaios	36
Tabela 2.5: Efeitos principais e de interação.....	36
Tabela 2.6: Especificações técnicas da impressora Tronxy P802EA (traduzida e adaptado)..	41
Tabela 3.1: Valores referentes às análises antes e após a filtragem dos pontos.....	45
Tabela 3.2: Valores referentes às análises antes e após a filtragem dos pontos.....	48
Tabela 4.1: Medidas observadas para cada peça fabricada.	55
Tabela 4.2: Medidas realizadas com paquímetro	68
Tabela 4.3: Dimensões da Peça Original	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

CAD	<i>Projeto Auxiliado por Computador</i>
CAM	<i>Manufatura Auxiliada por Computador</i>
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
CNC	Comando numérico computadorizado
NURBS	<i>B-spline Racional não-uniforme</i>
PLA	Ácido poliático
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações gerais preliminares referentes à metrologia de peças com superfícies de forma livre. São abordados os diferentes aspectos sobre prototipagem rápida e medição por coordenadas.

1.1 ASPECTOS GERAIS

A metrologia é uma área da engenharia que estuda os aspectos teóricos e práticos referentes à ciência das medições e é essencial para estudar a conformidade tanto de produtos como de processos, bem como certificar reconhecimento nacional e internacional, garantindo qualidade para o usuário e relações justas de troca.

Com os avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas, os processos de fabricação que envolvem modelagem 3D, especialmente CAD e CAM, tornaram-se objetos de interesse da indústria, devido a rapidez na concepção de protótipos e da facilidade na alteração de projetos. Visto isso, estudos metrológicos fizeram-se necessários para certificar a fidelidade das medidas ao comparar o protótipo com o modelo projetado.

Com o sistema CAD/CAM é possível confeccionar tanto peças de forma definida - aquelas que podem ser descritas por elementos geométricos simples, como círculos e retângulos - como também peças com superfícies de forma livre - que não podem ser descritas por elementos geométricos simples e necessitam de análise distinta. A idealização de modelos de superfícies de forma livre é de suma importância para vários ramos da indústria nos quais os dispositivos devem atender a outras características do projeto, e que possuem uma geometria pré-estabelecida para otimizar desempenho. Como por exemplo, hélices e pás de turbinas que, por conta de aspectos aerodinâmicos, possuem geometria complexa.

Nesse sentido, para análises metrológicas dos protótipos, dois métodos podem ser utilizados: com ou sem contato. No primeiro caso, não há contato entre o sensor e o objeto a ser medido, como no caso do Scanner a laser. Já no segundo, o sensor entra em contato com a peça, como por exemplo medições com paquímetro ou em máquina de medição por coordenada (MMC).

As máquinas de medição por coordenadas medem as dimensões da peça desejada a partir da posição do elemento requerido. Baseado na posição dos elementos, pode-se determinar os parâmetros geométricos necessários. A máquina é normalmente capacitada para operar em três coordenadas ortogonais, entretanto, pode-se habilitar para que haja movimento angular, o que é ideal para peças simétricas de rotação. Segundo Arenhart (2007) os principais erros relativos a MMC são devido aos

fatores estruturais mecânicos, construtivos e de montagem, tais como em relação ao sistema de apalpação, software de medição e software de controle da máquina.

Já o Scanner a laser opera com varredura da peça. As propriedades do laser se alteram quando há uma interação com a peça, dessa maneira, o scanner calcula e armazena em tempo real as medições das coordenadas. As vantagens deste equipamento consistem na velocidade de aquisição dos dados, boa precisão e alto nível de detalhamento das peças. As desvantagens baseiam-se no alto custo e também uma elevada quantidade de dados e arquivos.

Além disso, empregam-se as máquinas citadas no processo conhecido como engenharia reversa, em que são obtidos modelos CAD a partir de peças já existentes fazendo uso das coordenadas obtidas. Esse processo é utilizado para vários fins, dentre eles: determinar o design original, modernizar processo de produção, descobrir razões de falha de um produto.

A impressão 3D é um grupo de técnicas utilizadas para fabricar modelos tridimensionais em escala, a partir de um modelo CAD. Para isso, define-se variáveis do processo, tais como: altura da camada, preenchimento, material e velocidade de impressão.

Muitas vezes as aplicações industriais exigem que peças fabricadas por prototipagem rápida possuam certa qualidade dimensional, para alcançá-la é necessário um estudo das variáveis presentes em todo o processo CAD/CAM, ou seja, desde o escaneamento até a impressão, com finalidade de se chegar na melhor combinação possível para minimizar os desvios dimensionais e os defeitos superficiais. Para isso, pode-se fabricar peças a partir de um mesmo modelo CAD com diferentes combinações de variáveis e avaliar as influências que cada uma delas tem sobre medidas de dispersão.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos causados por algumas das principais variáveis no processo de prototipagem rápida. Para isso, pode-se avaliar a qualidade dimensional baseada em medidas de dispersão como média, desvio padrão e amplitude dos desvios dimensionais existentes entre um modelo CAD de uma peça original com a nuvem de pontos de uma peça obtida por prototipagem rápida fabricada utilizando engenharia reversa.

Isso será feito a partir de uma pesquisa experimental na qual serão impressas peças com diferentes combinações de variáveis e os produtos destas impressões terão suas dimensões comparadas com o modelo CAD da peça de referência. Além disso, observar a qualidade superficial das peças, identificando possíveis defeitos e suas causas.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 Sistemas CAD e CAM aplicados à prototipagem rápida

Os sistemas CAD/CAM são empregados em diversas aplicações de engenharia, pois por meio deles pode-se criar o *design* de um produto e projetar o processo de produção do mesmo. O CAM faz

uso do modelo CAD gerado para formular a maneira de manufatura, que normalmente é realizada numa máquina de usinagem do tipo CNC.

As primeiras máquinas do tipo CNC surgiram na década de 1970, em que acoplou-se o computador ao sistema de controle numérico, já pré-existente. A impressora 3D a ser utilizada nesse trabalho é uma máquina desta modalidade e que se popularizou bastante nos últimos 5 anos. Pode-se atribuir essa popularização a alguns fatores, tais como: vencimento de diversas patentes e o surgimento de bens de consumo manufaturados em máquinas desse tipo (COSTA,2014).

O que ocorre na impressão 3D é a solidificação ou ligação de um líquido ou pó em cada ponto da seção transversal horizontal da peça projetada. As camadas são repetidas muitas vezes até que o objeto esteja pronto (Enciclopédia Britânica).

Segundo Azevedo (2013) o diferencial das máquinas 3D é o fato delas operarem de maneira aditiva, ao contrário das máquinas tradicionais de usinagem, que esculpem um bloco de material. Sendo assim as principais vantagens citadas pelo autor são: baixo custo de produção, utilização de material mais barato, máquina com preço mais baixo que outras similares, não gera sucata e nem utiliza uma matriz. Por outro lado, ele apresenta como desvantagens: resistência baixa das peças, produtividade menor, exige manutenção e várias interrupções ao longo do processo.

A partir do estudo apresentado por Azevedo (2013), a impressora 3D é ideal para prototipagem rápida, pois associa a sua capacidade de produzir peças com geometria complexa à aplicação para o ferramental rápido. Além disso, é ideal para criação de protótipos funcionais.

Segundo Dalton (1998), a conversão de nuvem de pontos 3D para CAD é facilitada ao se usar algoritmos que foram desenvolvidos para esta finalidade. Nesse sentido, a conversão é feita com a ajuda de um operador que seleciona grupos específicos de pontos e depois os direciona para o programa CAD para a representação do modelo.

Esse processo leva a uma construção rápida da peça, no entanto, a dificuldade de se converter a nuvem de pontos 3D em um modelo CAD aumenta com o tamanho e a complexidade da peça. Para peças maiores e mais complexas, serão necessárias a captação de um maior número de imagens sob perspectivas diferentes.

1.3.2 Prototipagem rápida

O processo de prototipagem rápida pode ser considerado como um grupo de técnicas utilizadas para fabricar modelos físicos tridimensionais em escala a partir de um projeto desenvolvido em CAD. Tal processo pode ser utilizado tanto para criar peças com geometria simples quanto para desenvolver modelos com superfícies de forma livre, o que facilita processos de fabricação que antes do desenvolvimento dessa tecnologia demandavam mais tempo e custo.

Pham e Gault (1997) apresentam em seu trabalho uma visão geral da tecnologia disponível na época para se fazer prototipagem rápida, fazendo uma comparação entre os processos. Segundo os

autores, a prototipagem rápida pode se dividir nos processos que adicionam material e nos que removem. Além disso, de acordo com Kruth (1991) o material a ser acrescentado pode ser líquido, em pó ou então a partir de placas.

Posto isso, conforme afirma Kruth (1991) as técnicas que são baseadas na adição de material líquido podem ser feitas com uso do laser, pela solidificação de um fluido eletroreológico ou a partir do derretimento e subsequente solidificação de um material. Já as técnicas usando pó, podem ser feitas utilizando laser ou agentes de liga. Quanto aos métodos utilizando placas, eles podem ser classificados de acordo com a maneira de que eles são ligados, podendo ser por meio do laser ou de um adesivo.

Conforme Aarnio (2010), o processo de prototipagem rápida pode ser indicado pelo fluxograma da Figura 1.1.

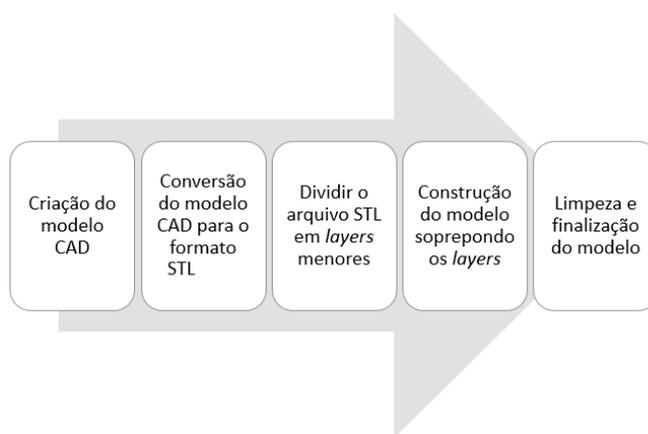


Figura 1.1: Processo de prototipagem rápida (AARNIO, 2010 - adaptado e traduzido)

Ademais, Aarnio (2010) aponta algumas vantagens do uso de prototipagem rápida, tais como: possibilidade de produção de quase qualquer aspecto geométrico e de forma, redução de tempo e custo, possibilidade de detecção de erros em estágios iniciais, uso em inúmeras indústrias e áreas do conhecimento, redução do desperdício de material e dispensabilidade de ferramentas. No entanto, algumas desvantagens persistem, tais como: elevado preço do maquinário e do material, alguns materiais são quebradiços e superfície mais rugosa, se comparado aos métodos tradicionais de fabricação.

Segundo Mahindru & Mahendru (2013), existem seis técnicas de prototipagem rápida: Litografia estérea (SLA); Fabricação de objetos laminados (LOM); Sinterização seletiva a laser (SLS); Modelagem de deposição fundida (FDM); Cura sólida na base (SGC); e Impressão 3D em jato de tinta.

De acordo com Volpato et al. (2007), o processo de estereolitografia “utiliza uma resina líquida fotocurável, sendo a cura obtida pela aplicação de um laser com comprimento de onda específico, geralmente UV (ultravioleta)”. Essa resina é mantida em um recipiente, que se desloca a cada camada construída e o laser polimeriza a resina, fazendo com que ela passe para o estado sólido. Esse processo

é mostrado na Figura 1.2. Os benefícios deste método consistem na sua boa precisão e qualidade superficial, além de ser um dos mais conhecidos. Quanto às desvantagens, têm-se: necessidade de suporte e de um pós-processamento para remoção dos mesmos, necessidade de pós-cura, reduzida quantidade de materiais para serem utilizados e a toxicidade da resina. (VOLPATO et al.,2007)

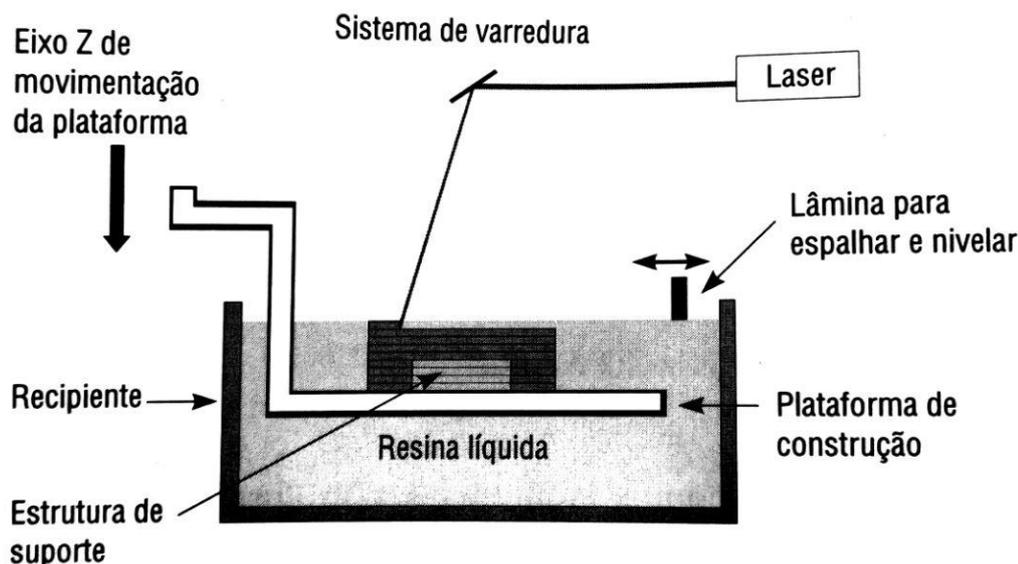


Figura 1.2: Esquema do processo de estereolitografia (VOLPATO et al, 2007)

A manufatura laminar de objetos (LOM), de acordo com Volpato et al (2007), “se baseia na deposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivo em um dos lados para construir a peça camada por camada”. Nesse processo, o material fica enrolado em uma bobina e um rolo aquecido é passado sobre a folha depositada ativando seu adesivo, para que a próxima camada possa ser disposta. O laser é utilizado para conferir a forma desejada (vide Figura 1.3). As principais vantagens deste método apresentadas pelo autor são: dispensa pós-cura e suporte e a velocidade do processo é elevada. Quanto às desvantagens, tem-se: pouca variedade de materiais, inflexibilidade do material utilizado, etapa de pós-processamento é onerosa e não é adequado para peças com paredes finas e pequenos detalhes. (VOLPATO et al,2007)

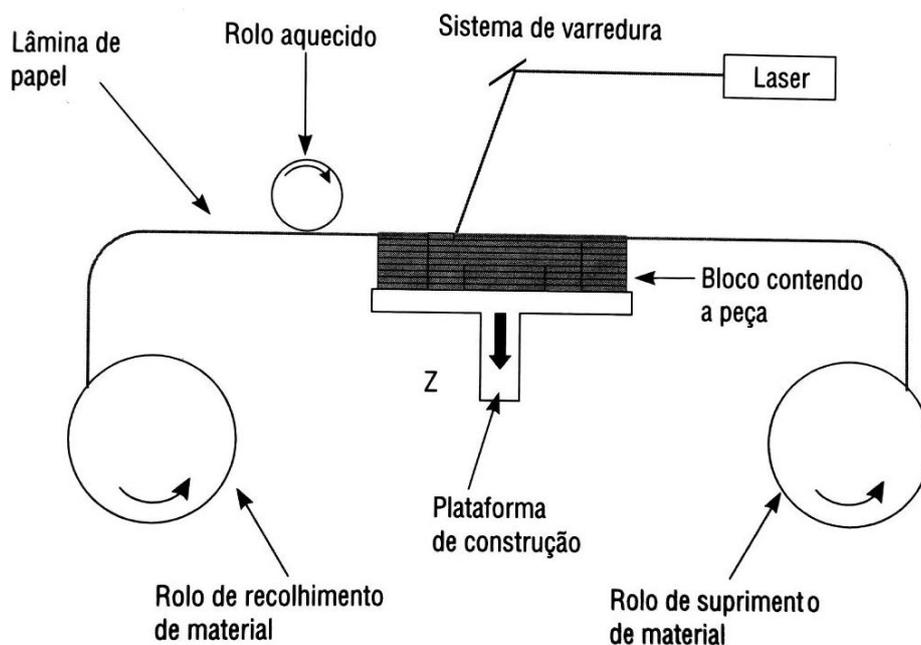


Figura 1.3: Esquema do processo de manufatura laminar de objetos (VOLPATO et al, 2007)

O processo de sinterização seletiva a laser (SLS) sinteriza um material na forma de pó por meio de um laser CO₂ de média potência. O sistema de varredura da máquina faz com que o laser passe pela superfície para obter a forma desejada e fornece a ele energia necessária para sinterizar o material. (VOLPATO et al, 2007)

Segundo Volpato et al (2007), a modelagem por fusão e deposição (FDM), como mostra a Figura 1.4, “constrói o protótipo por deposição de um material extrudado”. Essa tecnologia permite variar o processo de fabricação, sendo possível mudar a forma de preenchimento da área de cada camada. Dentre os benefícios deste método, destacam-se: dispensa pós-cura e o laser. Já as desvantagens, tem-se a baixa velocidade e precisão do processo, necessidade de suporte e de pós-processamento.

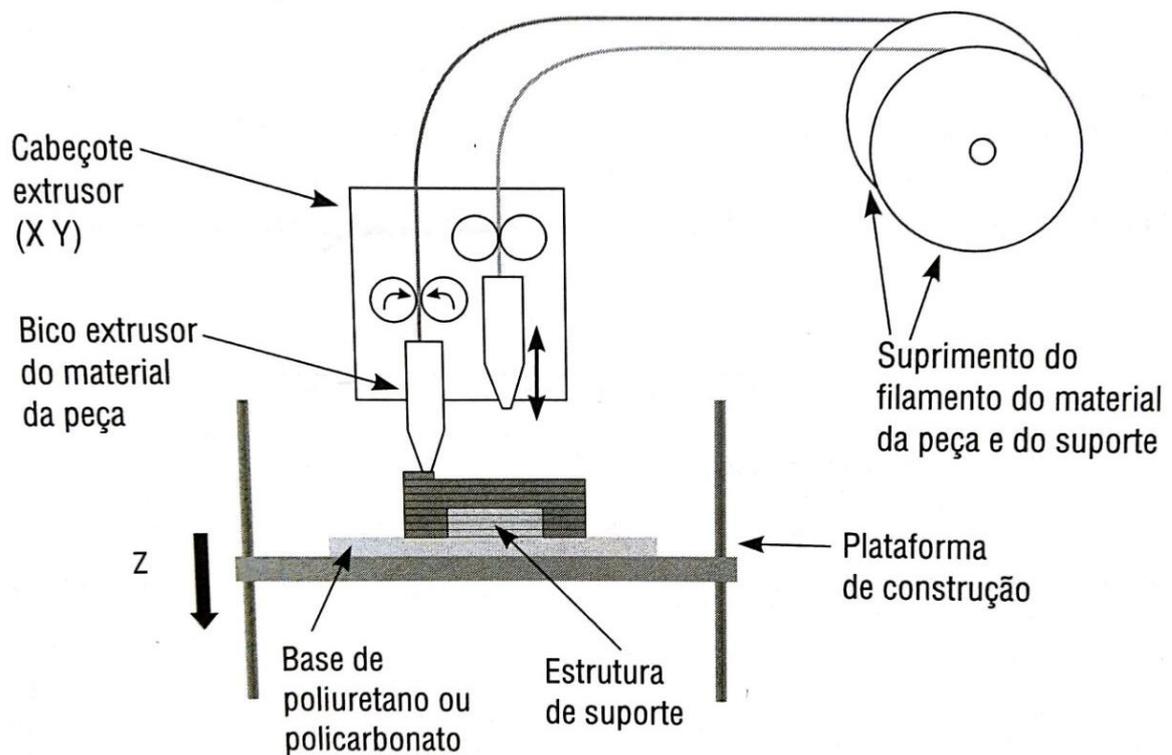


Figura 1.4: Princípio do processo FDM (Volpato et al,2007)

Conforme Lira (2008), “a construção do protótipo é realizada pela ação da lâmpada sobre uma máscara, que foi previamente gerada com a forma de camada, de modo a não se necessitar de deslocamentos tanto no eixo X quanto no eixo Y”. Este método possui um princípio bastante similar ao da estereoligrafia, salvo pelo uso da lâmpada. Segundo o autor, realiza-se um fresamento após o término da produção de uma camada, isto é necessário para nivelar a deposição da camada seguinte.

Por último, a impressão a jato de tinta consiste na deposição de gotas de tinta e posterior cura através de uma luz ultravioleta. De acordo com o fabricante, o maquinário utilizado é diferente. Essa técnica possui uma boa precisão dimensional e boa qualidade superficial. Entretanto, requer uso de suporte nas regiões não conectadas e também pós-processamento para remoção dos mesmos. (VOLPATO et al,2007).

Nos processos de impressão 3D, existem variáveis que interferem na forma final do protótipo, como o ângulo em que as peças são impressas. Por exemplo: um modelo CAD retangular impresso verticalmente pode ter desvios dimensionais diferentes do mesmo modelo CAD quando impresso na posição horizontal, isso se dá devido às diferenças de acurácia em diferentes planos. De acordo com Mahindru & Mahendru (2013, p.11) “Hoje as máquinas comercialmente disponíveis são precisas de ~ 0,08 milímetros no plano x-y, mas menos na direção z (vertical). Melhorias na óptica laser e no controle do motor devem aumentar a precisão nas três direções”.

1.3.3 Medições por contato e sem contato

Os métodos de medição com contato são de grande aplicação na indústria por permitir medições de peças de diferentes portes. Um dos principais métodos de medição com contato é realizado utilizando máquina de medição por coordenadas (MMC) e também o paquímetro.

Uma máquina de medição por coordenadas é um sistema mecatrônico que obtém as coordenadas cartesianas de pontos especificados sobre as superfícies da peça. Existem diversos modelos de MMC, no entanto todos eles possuem três eixos e um apalpador. Na medição por coordenadas, os pontos obtidos são comparados com modelos matemáticos.

Essa variedade de construção mecânica aliada à rapidez e flexibilidade para medição de diferentes formas geométricas contribuíram para a disseminação dessa tecnologia nas atividades de desenvolvimento de produtos, controle dimensional e geométrico e calibração de peças em laboratórios de metrologia.

Albertin e Soares Jr (2011) apontam para o fato de que não é possível avaliar os desvios dimensionais e geométricos com a MMC, diretamente pelas coordenadas. Dessa maneira, seria necessário um programa computacional que, a partir das medições, ajuste os pontos coordenados às geometrias. Após isso, pode-se comparar as dimensões e tolerâncias do objeto em relação ao projeto inicial.

Além disso, percebe-se que ao contrário das peças com geometria conhecida, as peças com geometria complexa e superfícies de forma livre não possuem um padrão de medição, ou seja, não se sabe quantos pontos são necessários e qual a posição ideal para medir as coordenadas de cada um deles.

Segundo Hamburg-Piekar (2006) as medições realizadas com a MMC sempre pressupõem algumas etapas, sendo elas: escolha do sistema de apalpação e calibração da ponta de medição, identificação da posição da peça, medição dos pontos coordenados e apresentação de resultados.

Já na medição sem contato o instrumento de medida não precisa encostar na superfície da peça a qual deseja-se avaliar as dimensões. É notório que tal característica diminui os erros associados ao fator humano, uma vez que o processo depende majoritariamente de máquinas e softwares, sendo uma vantagem que influencia na expansão da utilização deste método.

Segundo Jun (2008), existem alguns tipos de medição sem contato, tais como a acústica, que utiliza a reflexão do som para medir superfícies; a magnética, em que sensores magnéticos são empregados; e a óptica, que utiliza emissores de laser e câmeras como sensores.

Em medições sem contato do tipo óptico é usual a utilização de scanner 3D como instrumento de medição. Este equipamento funciona por meio da leitura de pontos da superfície pela reflexão da luz captadas por sensores que transmitem os dados obtidos para o software responsável pelo processamento destes dados e desenvolvimento de um modelo CAD tridimensional.

Um dos modelos de scanner 3D mais utilizados em estudos metrológicos é o fabricado pela *NextEngine*, que funciona por meio do princípio de triangulação óptica e é composto por um emissor laser, câmera e lentes direcionais.

Para Silva (2011) no princípio de triangulação os eixos ópticos da luz incidente e da lente de imagem formam um ângulo fixo de triangulação, a luz chega ao receptor por reflexão difusa e quando o alvo é aproximado ou afastado do scanner, o laser incide no receptor movendo-se sob a face do detector, sendo então a posição da imagem no detector função da distância entre o sensor e o objeto. A Figura 1.5 mostra uma representação do funcionamento deste tipo de medição.

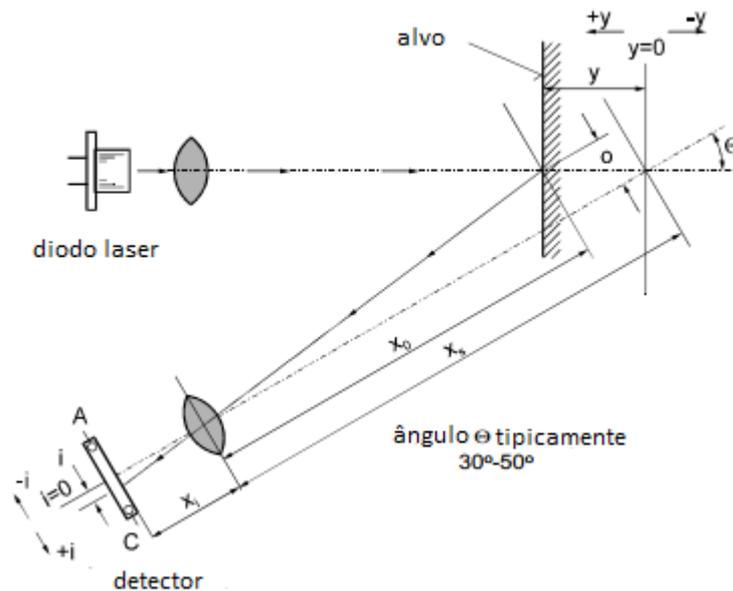


Figura 1.5: Representação do princípio de triangulação a laser (RIPKA e TIPEK, 2007)

1.3.4 Superfícies de forma livre

Pode-se definir uma superfície de forma livre como uma superfície que não pode ser descrita por uma equação matemática. Segundo Pinto (2010), muitas superfícies de forma livre estão na rotina de uma indústria, tais como pás de rotores de turbinas, cascos de navio e “carenagens” de automóveis e aviões. Sendo assim, é essencial que haja um controle geométrico das peças, para garantir sua funcionalidade e *design*. Além disso, conforme Soares Jr (2010), o projeto dos produtos permanece sendo um dos principais inconvenientes da indústria. Dessa forma, faz-se necessário recursos para refinar os processos de fabricação e os processos de análise de conformidade das medidas do projeto com o produto final.

Análogo a isso, de acordo com K.H. Ko, T. Maekawa, N.M. Patrikalakis (2003) e Yadong Li, Peihua Gu (2004), conforme citado por Pinto (2010):

Superfícies livres normalmente são de difícil equacionamento matemático uma vez que não podem ser representadas com boa fidelidade por elementos geométricos simples como planos e superfícies quadráticas. Geralmente possuem normal à superfície bem definida, que é contínua em quase toda sua extensão, e podem ser

representadas como superfícies paramétricas Bezier, Spline, B-Spline, NURBS ou em forma de nuvens de pontos tridimensionais.

As curvas NURBS (*Nonuniform Rational B-Splines*) são as curvas paramétricas consideradas mais complexas e populares tal qual afirma Savio et al (2007) e isso decorre de suas propriedades: habilidade para representar vários tipos de superfícies, controle local da forma da curva ou superfície e habilidade para representar superfícies analíticas simples. Além dessas vantagens do uso das NURBS, Minetto (2003) apresenta outras, tais como: tornar o projeto intuitivo, algoritmos rápidos e numericamente estáveis, não precisam de muitos dados para representar formas complexas e também proporcionam amplo controle sobre a forma da curva.

Conforme o trabalho realizado por Jiang et al (2007) pode-se classificar as formas de superfície, em três classes, de acordo com suas aplicações. A primeira abrange as superfícies que possuem degraus, bordas e facetas; já a segunda, são superfícies com padrão de estruturas repetidas ou formatos de mosaicos; a terceira consiste de superfícies livres.

1.3.5 Tolerâncias geométricas de superfícies de forma livre

Sabe-se que as tolerâncias podem ser dimensionais ou geométricas. As primeiras podem ser definidas como a variação entre a dimensão máxima e mínima para determinada dimensão de uma peça. Já as tolerâncias geométricas podem ser de forma, de orientação, posição e batimento. Para este trabalho, destacam-se as de forma, que podem ser de retilineidade, planeza, circularidade, cilíndricidade, forma de uma linha ou superfície quaisquer. A maneira como especificar essas tolerâncias é encontrado nas NBR 6158 e NBR 6409 da ABNT, respectivamente.

Segundo SOARES JR (2010), as peças com geometria complexa têm suas tolerâncias indicadas por tolerâncias de perfil de linha e de superfície. Para inspecionar as dimensões, observando suas tolerâncias, comparam-se os pontos medidos sobre a superfície com o modelo CAD idealizada.

1.3.6 Engenharia Reversa

A engenharia reversa trata-se da produção de informações técnicas a partir de análises e pesquisas de dados ou produtos já existentes. Este processo tem se tornado cada vez mais útil na indústria e pode ser associado ao sistema CAD/CAM de prototipagem rápida, facilitando o processo de fabricação de peças de geometrias complexas.

A fabricação de peças por engenharia reversa funciona a partir da captação de uma nuvem de pontos na superfície de uma peça já existente. Estes pontos são processados e filtrados por um software que reconstrói um modelo CAD ou fabrica modelos por prototipagem rápida.

Segundo Jun (2008), o processo de engenharia reversa aliado ao sistema CAD/CAM pode ser representado sistematicamente conforme o fluxograma apresentado na Figura 1.6.

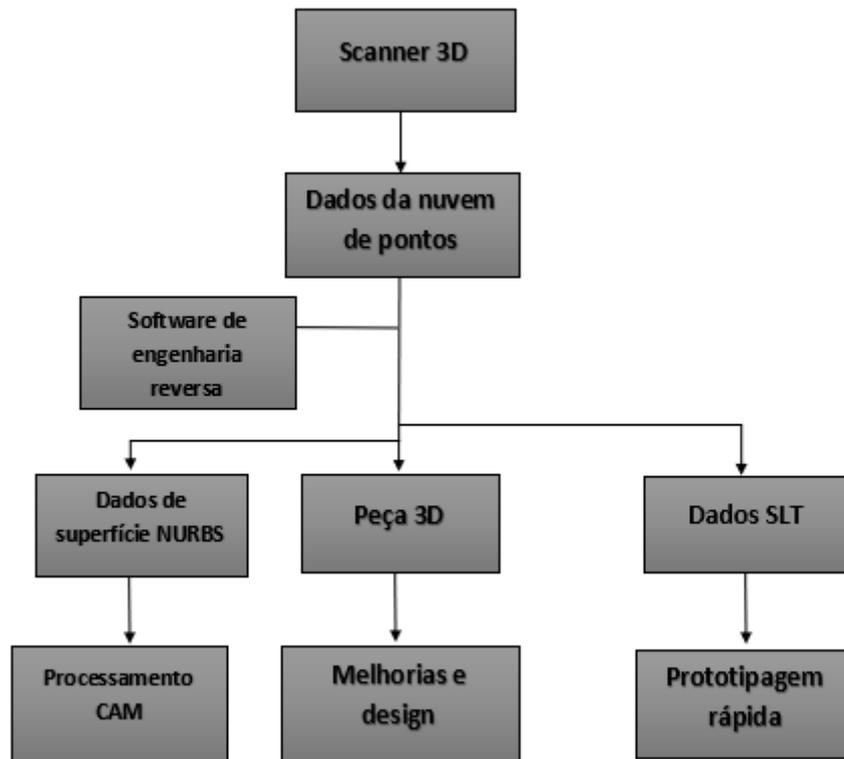


Figura 1.6: Fluxograma do sistema de engenharia reversa CAD/CAM (JUN, 2008 - modificada)

Conforme Azwan et al. (2017) o sistema de engenharia reversa encontra algumas limitações, principalmente óticas, tais como: peças com brilho, espelhadas ou transparentes. Peças com essas características são mais difíceis de se escanear com o *Scanner 3D*.

1.3.7 Tratamento de dados

É comum a utilização de métodos estatísticos para o tratamento de dados recolhidos de um campo amostral. Para isso, pode-se utilizar a ferramenta boxplot. Segundo Farias (2010), o gráfico boxplot é elaborado baseado em cinco números, sendo eles: valor mínimo, primeiro quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e valor máximo. Esse gráfico é constituído por uma caixa que é paralela ao eixo da escala dos dados (neste caso, o desvio médio). Dentro da caixa, é traçada uma linha, marcando a mediana. De acordo com a autora “essa caixa, que descreve os 50% centrais da distribuição, é comum a todas as variantes do boxplot”.

Além disso, é traçada uma linha paralela à escala, que sai dos extremos da caixa e vai até os valores mínimo e máximo. Conforme afirma a autora, os valores que estão dentro dos limites do gráfico, são chamados de valores adjacentes. Já os valores que estão fora desses limites, são os valores atípicos. Um exemplo de boxplot é demonstrado na Figura 1.7.



Figura 1.7: Exemplo de gráfico boxplot (FARIAS, 2010)

Para o exemplo da Figura 1.7, 3 é o valor mínimo, os valores entre 5 e 7 representam o primeiro quartil, 7 representa a mediana, os valores entre 7 e 8 representam o terceiro quartil e 15 é o valor máximo.

Segundo Torman (2012), a construção de um histograma pode ser um método de verificação do formato de distribuição de uma variável contínua e trata-se de um gráfico de barras justapostas, no qual a variável de interesse é dividida em classes no eixo horizontal, enquanto no eixo vertical encontram-se as frequências das classes correspondentes. A Figura 1.8 apresenta um exemplo de histograma de uma distribuição aparentemente normal.

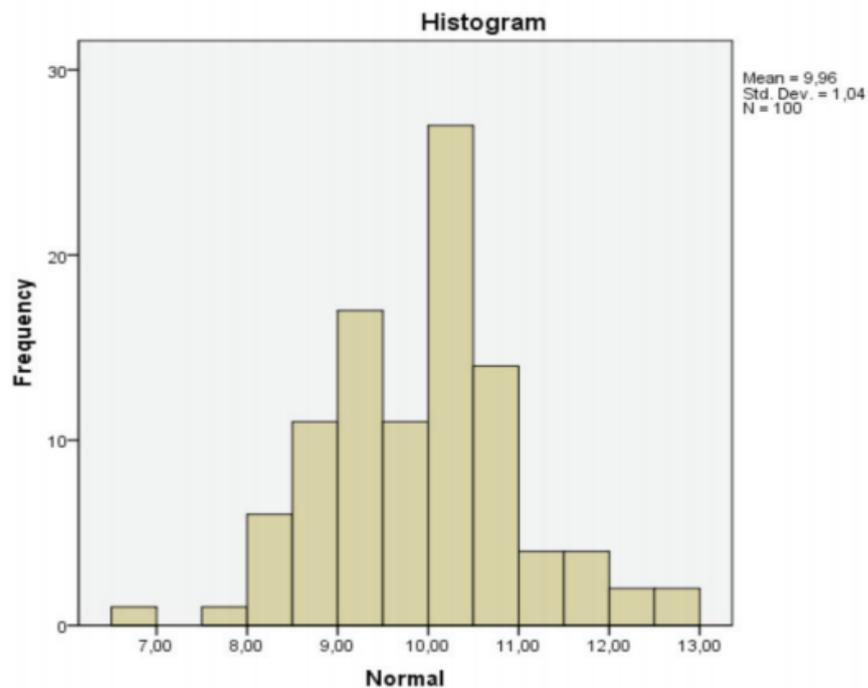


Figura 1.8: Histograma (Torman, 2012)

O gráfico de probabilidade normal, segundo Torman (2012), possui em seu eixo horizontal os valores observados da variável e no eixo vertical os valores esperados caso a variável tenha uma distribuição Normal. Caso haja uma boa aderência dos dados em relação à distribuição Normal, os pontos definidos pelas coordenadas dos eixos horizontal e vertical se aproximam da reta de referência apresentada no gráfico. A Figura 1.9 apresenta um exemplo de gráfico de probabilidade normal.

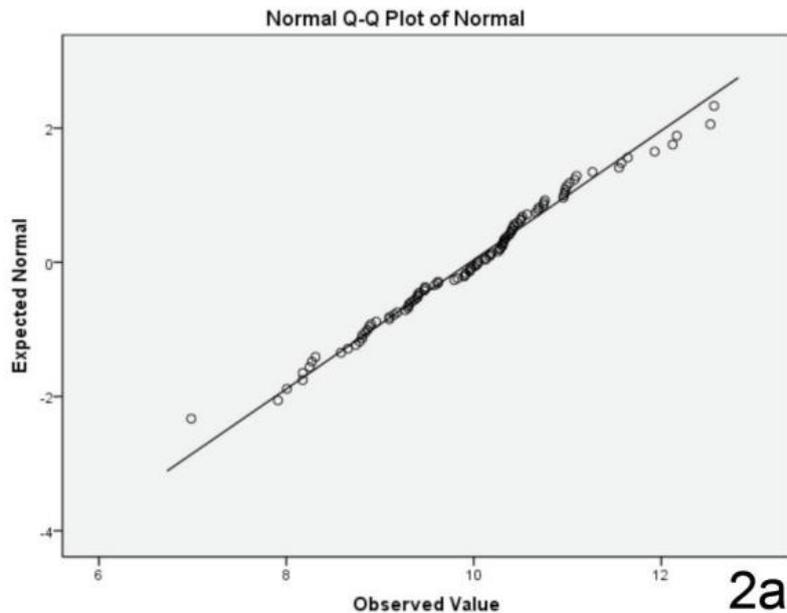


Figura 1.9: Gráfico de Probabilidade Normal (Torman, 2012)

1.3.8 Parâmetros de Processo

Em processos de fabricação por CAD/CAM, além dos parâmetros associados aos processos de medição e manipulação dos dados, há aqueles relacionados à impressão 3D. Ambos podem alterar a qualidade final do produto do ponto de vista dimensional.

Tratando-se da impressão 3D pela tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) pode-se identificar como variáveis de processo, os seguintes parâmetros: altura de camada, velocidade de impressão, direção de impressão, temperatura e preenchimento.

Segundo Azevedo (2013), existem sete modalidades de parâmetros que se pode configurar em uma impressora 3D, sendo eles: de precisão, de preenchimento, de saia (skirt), de velocidade e temperatura, de suporte, de filamento e de tamanho de máquina. Como o objetivo do trabalho se concentra na avaliação metrológica, sabe-se que os parâmetros de precisão, preenchimento e velocidade e temperatura são os que mais influenciam neste quesito.

Dentre os parâmetros de precisão têm-se:

- *Layer Height*: diz respeito a altura da camada da peça. Quanto maior esta altura, menor a resolução da peça.
- *Wall thickness*: é a espessura da parede da peça. Parâmetro aplicável para peças ocas ou parcialmente ocas.

Já os parâmetros de preenchimento, têm-se:

- *Fill Density*: porcentagem de preenchimento da peça. Um baixo preenchimento é frequentemente usado para poupar tempo e dinheiro.

Finalmente, os parâmetros para velocidade e temperatura:

- *Print Speed*: velocidade de impressão relacionada com a velocidade horizontal imposta ao bico.
- *Printing Temperature*: temperatura de impressão. Relacionada com a temperatura em que a impressão será operada.

Além desses parâmetros, sabe-se também que a direção de impressão, ou seja, a orientação do objeto no momento da impressão, influencia bastante nas dimensões e na qualidade da peça. De acordo com os experimentos realizados por Tanoto et al (2017), a orientação de impressão influencia o tempo de impressão, o uso ou não de suportes, a resistência a tração e também a precisão dimensional. No trabalho realizado pelo autor foi notado que para cada direção nas diferentes orientações a variação dimensional não foi proporcional, ou seja, uma mesma peça que obteve o melhor resultado no quesito espessura, foi a que obteve pior resultado em comprimento e largura.

No estudo feito por Peres (2016), também foi verificado que a mudança na orientação de impressão dos corpos de prova fez com que a resistência a tração entre eles diferisse.

O parâmetro de *fill density*, não só afeta as dimensões como também a massa e conseqüentemente, massa específica final do objeto, que aumenta conforme a densidade de preenchimento. Isso influencia também na fluatibilidade de um objeto em um líquido. Isso tudo pode ser observado no trabalho de Tagami et al (2016), mas quanto a variação dimensional, para a aplicação do autor, foi bastante similar e não afetaria o seu uso. Além disso, através do experimento realizado, observa-se que não há um padrão bem definido que relaciona a densidade de preenchimento com a variação dimensional experimentada pelas peças.

Assim como as variáveis relacionadas ao escaneamento e ao processo de prototipagem, as condições ambientais do local de impressão podem influenciar na qualidade das peças. Segundo o Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos (2016), as condições ambientais dentro do local de prototipagem podem afetar a qualidade da peça. A temperatura ambiente, a composição atmosférica e o regime de escoamento do ar podem interferir na solidificação, polimerização, adesão das camadas e nas propriedades mecânicas da peça.

Algumas das principais variáveis que influenciam na qualidade dimensional de uma superfície obtida por prototipagem rápida estão representadas no gráfico representado na Figura 1.10.

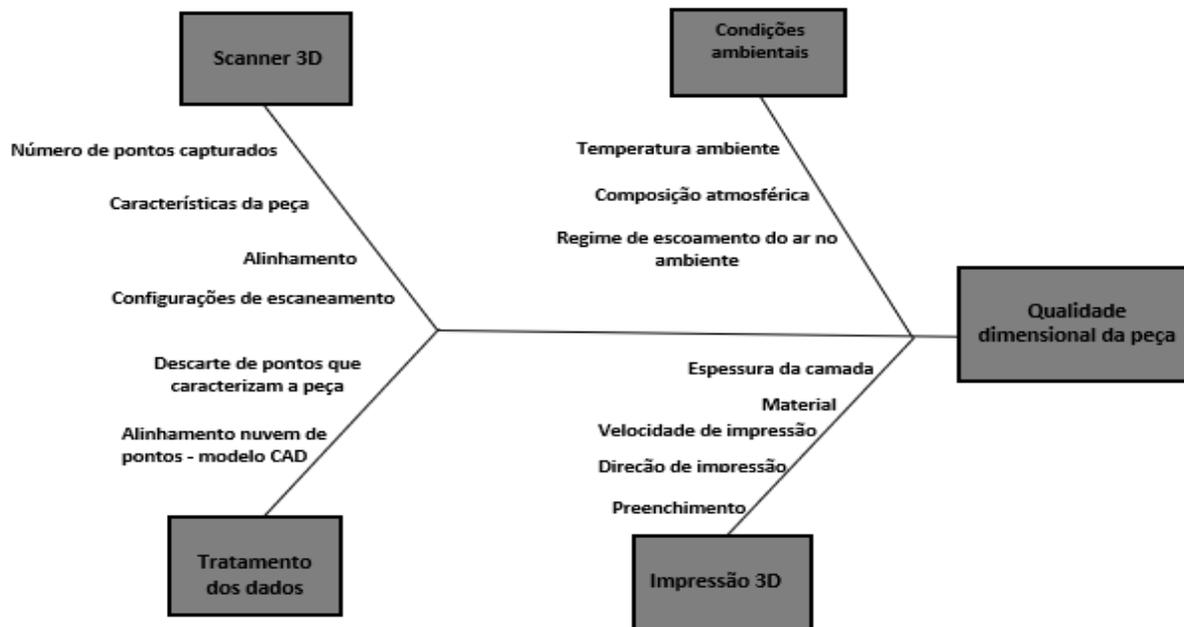


Figura 1.10: Gráfico causa/efeito do processo CAD/CAM

1.3.9 Planejamento Experimental Fatorial

Antes de desenvolver um estudo experimental é necessário um planejamento dos ensaios a serem realizados, bem como as variáveis que se deseja avaliar. Para isso existem alguns métodos que auxiliam na organização e efetividade de procedimentos experimentais. Para Piratelli et al (2003), o planejamento de experimentos pode ser considerado com uma ferramenta poderosa para projetar e realizar testes experimentais e analisar os resultados

Um dos métodos de planejamento experimental é o fatorial. Segundo Peralta-Zamora et al. (2005), os sistemas de planejamento fatorial destacam-se por permitirem avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis a partir de um número reduzido de ensaios experimentais.

Segundo Mattos et al. (2004), quando há muitos fatores, mesmo que ainda sejam em dois níveis, os ensaios podem ser numerosos. Para estes casos, pode-se utilizar projetos fracionários do tipo 2^{k-p} , onde k é o número de fatores (variáveis) e p é o número de fracionamentos, o que resulta em 2^{k-p} combinações de níveis dos fatores ensaiados. Neste tipo de planejamento apenas parte das possíveis combinações de níveis sejam ensaiadas, no entanto garante a possibilidade de se estimar os efeitos principais e, às vezes, as interações entre dois fatores.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada neste trabalho e também os softwares e equipamentos empregados.

O primeiro passo para o desenvolvimento deste trabalho foi a realização de medições de uma peça teste com a finalidade de familiarização com o uso dos equipamentos e softwares necessários para um estudo metrológico eficiente. Para isso, foi feita uma análise visual da composição geométrica da peça, caracterizando os tipos de superfície presentes na mesma, identificando as principais vistas e determinando as melhores posições da peça frente aos sensores e câmeras do scanner. Assim, por meio da utilização do software ScanStudio foi possível alinhar e unir as vistas capturadas, além de ajustar as malhas de pontos. Então, os arquivos gerados pelo ScanStudio foram exportados para o software CATIA a manipulação do modelo CAD e avaliação dos desvios dimensionais entre o próprio modelo e a nuvem de pontos que o gerou, antes e depois de filtrar os dados no MATLAB.

Posteriormente, a partir do modelo CAD, uma nova peça foi impressa por prototipagem rápida, escaneada e teve a nuvem de pontos gerada por este processo comparada com o modelo CAD da peça original. Possibilitando assim, avaliar seus desvios dimensionais.

Para avaliar a influência das variáveis de impressão na qualidade dimensional de peças fabricadas por prototipagem rápida foi utilizado um planejamento experimental fatorial fracionário em dois níveis, no qual as variáveis em estudo são combinadas e a quantidade de peças a serem fabricadas é determinada. A partir daí cada peça impressa foi escaneada e teve suas nuvens de pontos comparadas com o modelo CAD com a finalidade de determinar os desvios dimensionais entre a peça original e os produtos da impressão. A Figura 2.1 mostra um fluxograma da metodologia de trabalho desenvolvida.

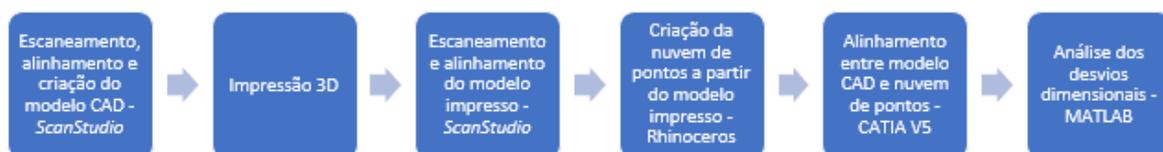


Figura 2.1: Fluxograma da metodologia realizada

A Figura 2.2 mostra uma representação da peça em análise com as medidas tomadas com a utilização de um paquímetro.

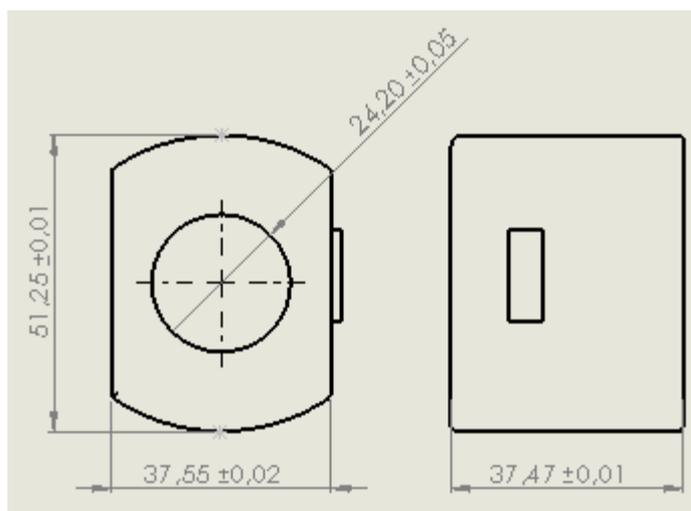


Figura 2.2: Representação da peça a ser estudada (medidas em mm)

2.1 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

2.1.1 Scanner 3D e Scanstudio

O Scanner 3D funciona como instrumento de medição sem contato, como citado anteriormente. Neste trabalho, durante os experimentos, foi empregado o Scanner 3D do fabricante *NextEngine* modelo 2020I, o qual é composto por uma unidade principal - onde se localizam os sensores e os emissores de laser, uma base giratória - que possibilita a captura das medidas em torno de um eixo de rotação e uma haste acoplada à uma plataforma na qual a peça ser medida é disposta. Esta plataforma tem altura regulável devido ao grau de liberdade que permite sua movimentação ao longo comprimento da haste e a peça é posicionada sobre a mesma por meio de um suporte.

A partir da unidade principal feixes de lasers são emitidos e incidem sobre a superfície da peça, refletem, são refratados e direcionados pelas lentes. Então, os sensores internos captam as frações refletidas e geram um código computacional para cada um dos pontos refletidos que juntos dão origem a uma nuvem de pontos e, por meio da triangulação, os pontos se unem e uma malha é criada. As características das malhas são definidas de acordo com as configurações escolhidas com a utilização do software *ScanStudio*. A Figura 2.3 mostra os componentes do *Scanner 3D* da *NextEngine*.

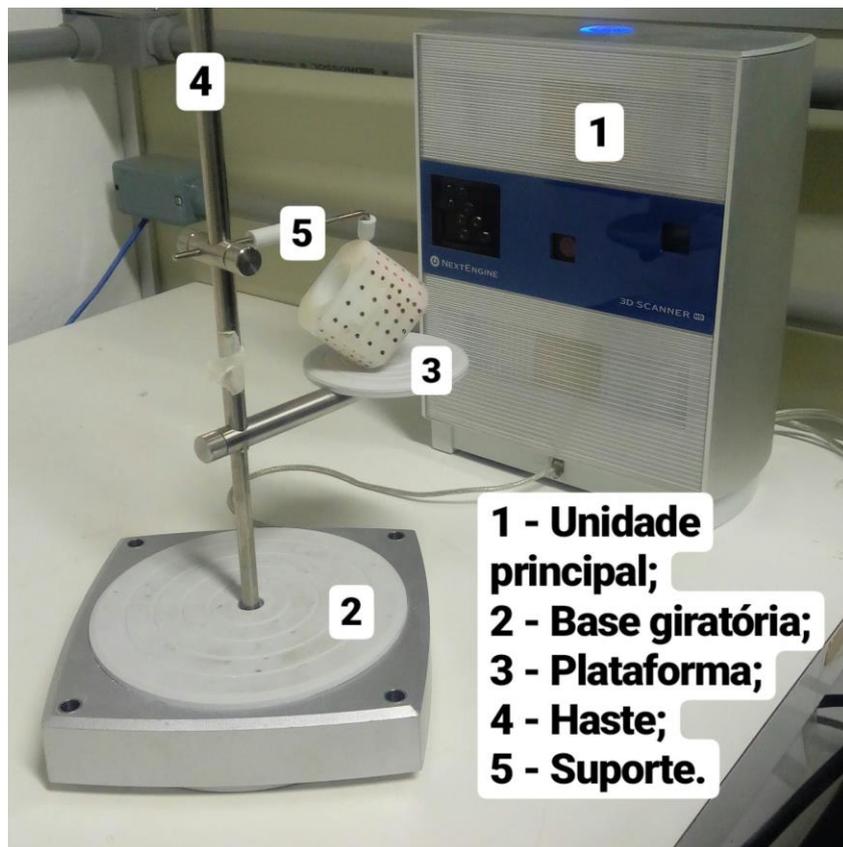


Figura 2.3: Componentes do Scanner 3D NexEngine

Tanto a unidade principal quanto a base são ligadas ao computador por meio de um cabo USB, o que permite a transmissão dos dados obtidos ao computador. Este processo se torna possível com a utilização do software ScanStudio que acompanha o produto e auxilia desde a captura das imagens, criação e ajustes da malha de pontos até o movimento de giro da base.

As especificações técnicas do Scanner 3D NextEngine são disponibilizadas pelo fabricante no catálogo do produto (vide Anexo 1). Algumas das principais informações traduzidas estão dispostas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Especificações técnicas do Scanner 3D modelo 2020I do fabricante NextEngine (traduzido e adaptado)

Sistema de medição	NextEngine de triangulação a laser – MLT
Iluminação (foto)	Iluminadores acoplados de luz branca diversificados parcialmente com tri-fósforo e larga gama de cor.
Fonte	Quatro feixes de laser de 10 mW e comprimento de onda de 650 nm
Tamanho máximo do objeto	Sem limitações (alinhamento de imagens no software)
Capacidade da base (AutoDrive)	20 lb (9 kg)
Tamanho do campo de captura	Macro: 5,1” x 3,8” (129,54 mm x 96,52 mm) Wide: 13,5” x 10,1” (342,9 mm x 256,54 mm)
Densidade de pontos de captura	Macro: 160000 pontos/pol ² (248,0 pontos/mm ²) Wide: 22500 pontos/pol ² (34,9 pontos/mm ²)
Densidade de textura	400 DPI (Macro) 150 DPI (Wide)
Resolução	± 0,005”/0,127 mm (Range em Macro) e ± 0,015”/0,381 mm (Range em Wide)
Velocidade de captura	Cerca de 50000 pontos/s

Antes de iniciar o processo de medição com o Scanner é necessária a familiarização com o software que o acompanha. Isso pode ser feito com a leitura das instruções de uso disponíveis no próprio *ScanStudio* na ferramenta *help* ou no site do fabricante. Conhecendo as ferramentas e utilidades do software se faz necessária a calibração do *scanner* por meio do uso de uma peça padrão (inclusa na compra do produto) que possui cores, texturas e marcações ideais para tal função. Em casos de medição de peças com características que podem interferir na captação dos pontos, como translucidez, coloração e aspecto metálico, recomenda-se a aplicação de um pó que acompanha o produto e a marcação de pontos sobre a superfície da peça para facilitar a criação das malhas pelo software.

Com todos os procedimentos de calibração e preparação da peça realizados, a mesma pode ser colocada sobre a plataforma, fixada ao suporte e colocada frente a unidade principal do *scanner*.

Abrindo o *Scanstudio* e clicando na ferramenta “Scan” pode-se escolher as configurações e tais preferências definem a qualidade e a precisão das malhas a serem geradas. Ao lado das opções de configuração é apresentada a imagem da peça, possibilitando o ajuste de seu posicionamento. As opções de configuração disponíveis são:

- Família de imagens (*Scan Family*): Existem cinco opções de famílias de medição nomeadas de “A” a “E” e em cada uma delas o usuário pode definir configurações

diferentes. Utilizando cinco famílias diferentes serão geradas cinco malhas com características distintas podendo ser combinadas posteriormente.

- *Posição (Positioning)*: Nesta ferramenta pode-se definir quantas posições serão medidas de acordo com a quantidade de ângulos. Selecionando “360°” a peça é explorada em todos os ângulos, “Bucket” a peça é medida em três ângulos consecutivos e “Single” apenas um ângulo da peça é explorado e conseqüentemente só uma vista é gerada.
- *Divisões (Divisions)*: Possibilita a determinação do número de imagens que se deseja gerar de acordo com os ângulos definidos na ferramenta “positioning”, ou seja, a peça é dividida em várias partes e cada uma delas dará origem a uma vista.
- *Ângulo de início (Start angle)*: Permite a alteração do ângulo inicial (360°) para outro valor desejado.
- *Ângulo de tilt (Tilt angle)*: Com o auxílio desta ferramenta, o ângulo de inclinação da peça pode ser modificado entre -35° e 45°.
- *Densidade de pontos (points/in²)*: Determina a quantidade de pontos por polegada quadrada que se deseja medir.
- *Target*: Configuração referente a diminuição ou aumento da iluminação visando controlar a reflexibilidade
- *Range*: Define parâmetros visuais de captura do scanner, podendo ser “Macro”, “Wide” ou “Extended”

A Figura 2.4 Mostra a janela após a seleção da opção “Scan” com as configurações disponíveis no Software ScanStudio.

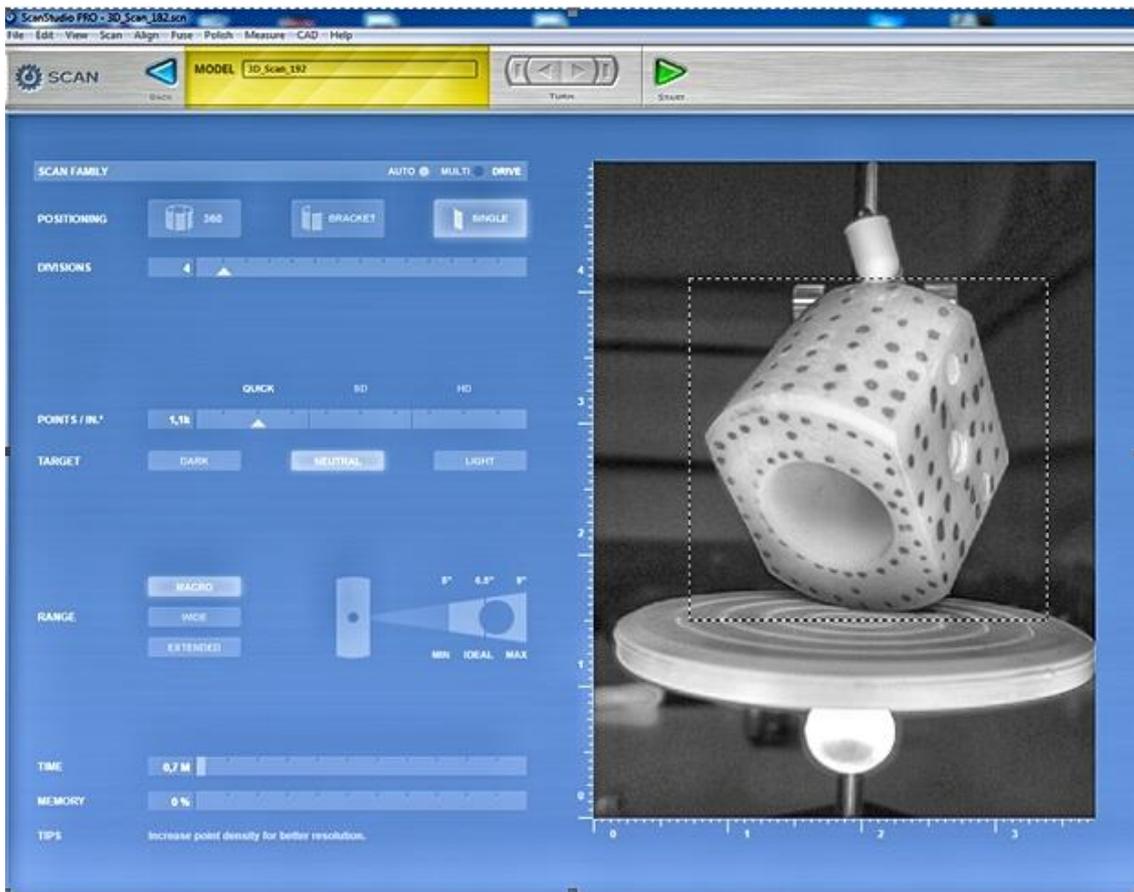


Figura 2.4: Janela de configurações de escaneamento do ScanStudio

Após a seleção das configurações desejadas, inicia-se o processo de escaneamento que dará origem às imagens em três dimensões que muitas vezes necessitam de ajustes e, para isso, o ScanStudio oferece ferramentas para tal finalidade, são elas:

- “Trim”: Permite eliminar partes indesejadas ou fora da área de estudo.
- “Align”: Tal ferramenta é utilizada para fazer o alinhamento entre as imagens geradas por meio da marcação de pontos em comum presentes nas mesmas.
- “Fuse”: Depois de alinhadas as imagens podem ser todas fundidas numa única família através desta opção.
- “Polish”: Utilizada para realizar os acabamentos finais por meio das sub-ferramentas “Fill” (preenchimento de espaços vazios), “Buff” (regularização de regiões com imperfeições), “Simplify” (Simplifica a malha de pontos), “Remesh” (espaços vazios são preenchidos mantendo a textura e a cor), “Clean defects” (elimina os defeitos associados aos ajustes).
- CAD: Ferramenta que define orientações por meio das seguintes sub-ferramentas: “Orient” (estabelece uma origem de referência para as três dimensões), “Surface” (possibilita a geração de uma nova família de imagens com uma nova superfície),
- “Measure”: Auxilia as medições das dimensões das peças (volume, área de superfícies).

- “Output”: Utilizada para exportar os arquivos para formatos compatíveis com outros softwares.

2.1.2 Rhinoceros

O software Rhinoceros usa a tecnologia 3D baseado nas curvas NURBS. Esse tipo de curva permite representar as superfícies de uma maneira mais fiel à realidade. Neste trabalho, este programa é empregado para criar a nuvem de pontos a partir do sólido completo feito no *ScanStudio*.

Para se criar a nuvem de pontos, basta selecionar as malhas desejadas e aplicar o comando *PointCloud*. Após isso, basta salvar o modelo no formato IGES.

2.1.3 CATIA V5

O Software CATIA V5R21 funciona como uma plataforma multitarefa utilizada para edição e desenvolvimento de desenhos assistidos por computador (CAD) e fabricação assistida por computador (CAM) desenvolvida pela empresa *Dassalt Systèmes*. Por meio do mesmo é possível ajustar malhas de pontos em três e duas dimensões e a execução de desenhos a partir do modelo gerado pelo *Scanner 3D* e processado pelo *ScanStudio*.

Antes da utilização do CATIA é preciso atentar-se quanto a compatibilidade dos formatos dos arquivos salvos no *ScanStudio*, sendo a *Initial Graphics Exchange Specification* (.iges) a empregada neste trabalho. Com isso, foi possível abrir as malhas de pontos geradas pelo *Scanner 3D* e efetuar as medições dos desvios dimensionais.

Existem alguns ambientes de trabalhos disponíveis no CATIA, os empregados no desenvolvimento de sistemas CAD/CAM, como o *Digitized Shape Editor* (utilizado para ler, importar e processar peças digitalizadas para nuvem de pontos), o *Quick Surface Reconstruction* (recupera as superfícies de dados digitalizados resultantes das malhas trabalhadas com a ferramenta *Digitized Shape Editor*) e o *Generative Shape Design* (permite criar modelos com forma simples ou complexas por meio de ferramentas de edição como o *Part Design*). A Figura 2.5 mostra o ambiente de trabalho do CATIA de uma nuvem de pontos.

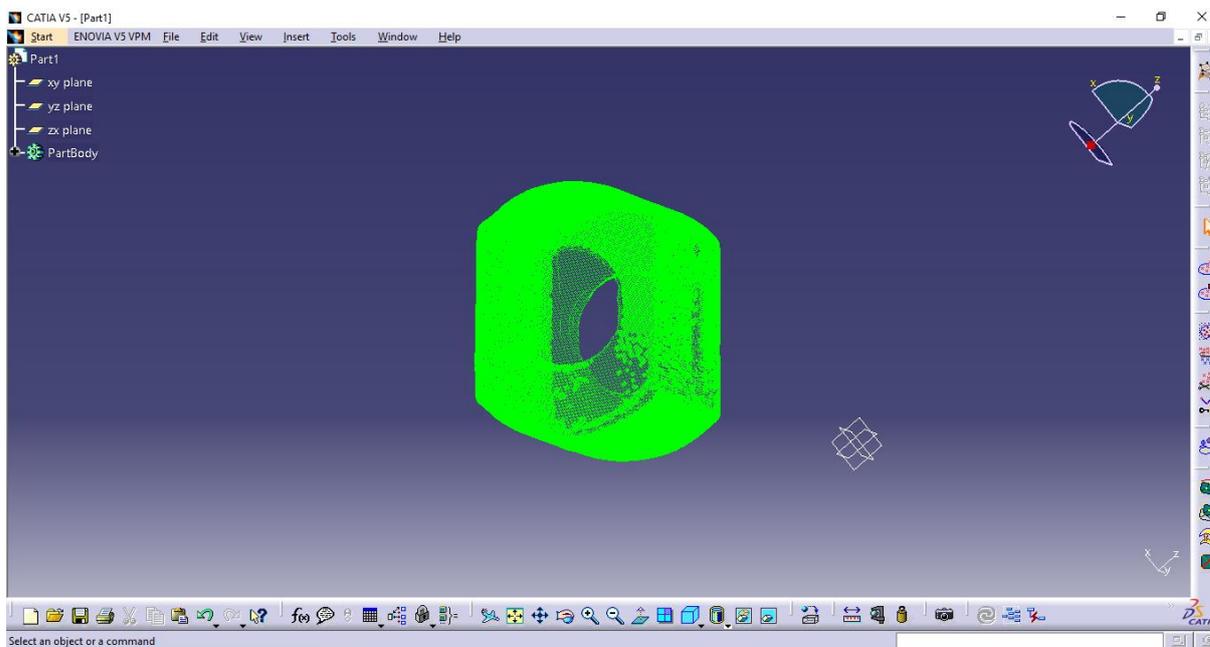


Figura 2.5: Exemplo de ambiente de trabalho do CATIA V5 R21

Os comandos mais utilizados para trabalhar o modelo CAD e suas funções estão dispostos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comandos e funções utilizadas no software CATIA.

<i>Open</i>	Abre os arquivos nativos do CATIA e em formatos como o .IGES (disponível no ScanStudio).
<i>Deviation Study</i>	Analisa os desvios entre os pontos e as superfícies.
<i>Copy</i>	Envia elementos para a área de transferência e permite o posicionamento manual deste.
<i>Axis</i>	Gera um eixo de referência a partir de relações de simetria.
<i>Point</i>	Cria um ponto de referência com coordenadas definidas no desenho
<i>Import</i>	Importa nuvem de pontos
<i>Align by Best Fit</i>	Faz o alinhamento da nuvem de pontos com a superfície por meio de uma rotina topológica.
<i>Align using the Compass</i>	Ferramenta de alinhamento manual entre os pontos e a superfície.
<i>Filter</i>	Homogeneiza a nuvem de pontos

2.1.4 MATLAB

O MATLAB é um software orientado para o cálculo numérico. Por meio dele, nesse trabalho, foi construído um filtro baseado no gráfico boxplot dos desvios entre a nuvem de pontos e o modelo CAD.

Para a verificação da distribuição de variáveis existem alguns tipos de testes que podem ser realizados. Neste trabalho foram utilizados o histograma e o gráfico de probabilidade normal, por meio das funções “histfit(x)” e “normplot (x)” também disponíveis no software MATLAB.

2.1.5 Planejamento experimental para estudo dos efeitos

Para a determinação da quantidade de ensaios, bem como a combinação das variáveis em estudo no processo de prototipagem foi utilizado o planejamento fatorial fracionário em dois níveis, no qual para k variáveis é necessária a realização de 2^{k-1} ensaios.

As variáveis de processo escolhidas para a impressão da peça foram: direção de impressão, material, velocidade, altura da camada e preenchimento. Sendo assim, utilizando o planejamento fatorial fracionário, foram necessários 16 experimentos. Esse planejamento foi escolhido pois permite reduzir a quantidade de ensaios, considerando um número expressivo de variáveis que podem influenciar no processo.

O planejamento foi implementado utilizando o Minitab que, a partir da entrada do número de variáveis e aos sinais atribuídos aos geradores, ordena as frações de um experimento. A Tabela 2.3 mostra como foi definido cada nível de cada fator.

Tabela 2.3: Níveis das variáveis do processo

Níveis	-1	1
Direção de impressão (A)	x	z
Material (B)	PLA	ABS
Velocidade (C)	30 mm/s	60 mm/s
Altura da Camada (D)	0,1	0,3
Preenchimento (E)	10%	90%

Partindo da Tabela 2.3 foi possível planejar os ensaios no Minitab, utilizando o gerador E = ABCD, resultando em 16 ensaios de resolução V, conforme mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Planejamento dos Ensaios

Ensaio	A	B	C	D	E
1	1	1	1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	-1	1	1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	1	1
8	-1	-1	-1	-1	1
9	1	-1	1	1	-1
10	1	-1	-1	-1	-1
11	1	-1	1	-1	1
12	-1	-1	1	-1	-1
13	-1	1	-1	-1	-1
14	-1	-1	1	1	1
15	1	1	-1	-1	1
16	-1	1	1	1	-1

Após a impressão de todas as peças, continuou-se o planejamento experimental, calculando os efeitos principais e os de interação entre eles, sendo: A, B, C, D e E, os efeitos principais e AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE e DE, os efeitos de interação.

Os efeitos de interação são dados pela multiplicação do nível de um efeito pelo nível do outro, por exemplo, para o ensaio 1, efeito AB, tem-se que o seu nível é A multiplicado por B, resultando em 1. A Tabela 2.5, mostra ambos os efeitos.

Tabela 2.5: Efeitos principais e de interação

A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
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	-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	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	-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	-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	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	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	-1
-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1

Os gráficos utilizados para a análise dos efeitos das variáveis são construídos da seguinte maneira:

- 1) Calcular os efeitos multiplicando um a um os níveis de determinado efeito pelo fator que se quer analisar, como média ou desvio padrão, somar esses valores e posteriormente dividir pela

metade da quantidade de ensaios. O resultado obtido desse cálculo é o efeito da variável ou interação. Deve-se aplicar esse passo para todos os fatores principais e interação.

- 2) Feito isso, deve-se ordenar em ordem crescente os valores obtidos para a variável normal padronizada.
- 3) Posteriormente, deve-se calcular a probabilidade acumulada, que é dada em porcentagem. Subtrai-se 0,5 do número da ordem do ensaio, divide-se pelo número de ensaios e por fim, multiplica-se por 100.
- 4) Por último, faz-se um gráfico, em que o eixo das abscissas são as variáveis normais padronizadas; e o eixo das ordenadas os valores das probabilidades acumuladas.

Essa análise foi feita para amplitude, média e desvio padrão antes e após a aplicação do filtro e para o tempo de impressão.

2.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO CAD

Inicialmente, foi escolhida uma bucha como peça de estudo e foram traçados pontos na cor vermelha sobre ela, para facilitar no alinhamento entre as vistas no ScanStudio (vide Figura 2.6). Antes de escanear a peça, passou-se o pó fosco que acompanha o Scanner 3D recomendado para superfícies de coloração difícil de ser captada. Após isso, a peça foi posicionada sobre a plataforma, com auxílio do suporte, de forma que fosse possível visualizar duas faces de cada vez, por meio da câmera do Scanner 3D. Ainda na tela “Scan”, pode-se fazer uma seleção em torno do objeto, para que apenas ele seja escaneado.

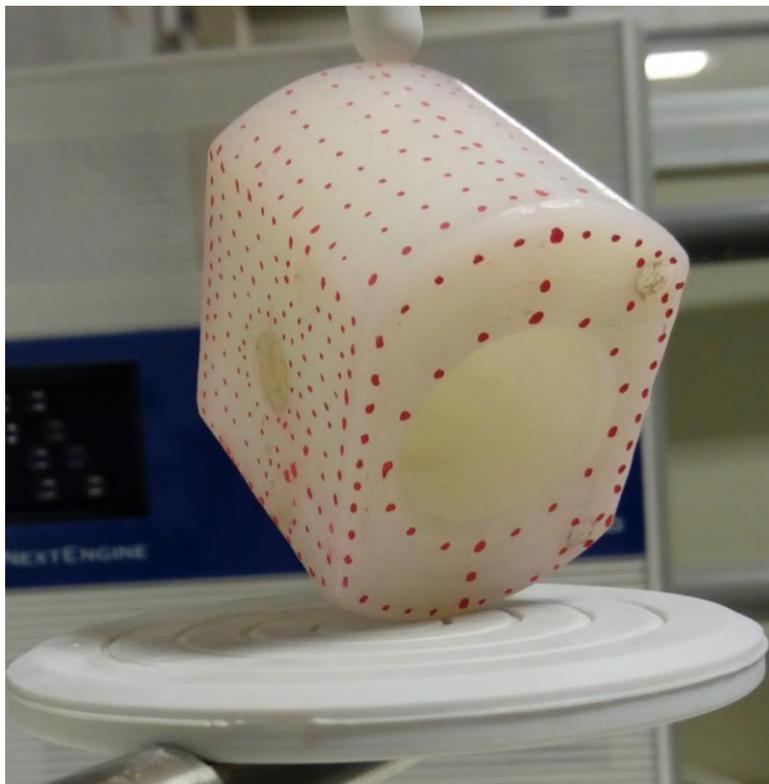


Figura 2.6: Bucha – Peça escolhida

As configurações de escaneamento foram definidas de forma otimizar a obtenção das vistas e facilitar o tratamento posterior das mesmas. Para a família de imagens (*Scan Family*) foi escolhida a opção “Auto” com posicionamento (*Positioning*) de vistas únicas (Single) em 4 divisões, densidade de pontos de 10000 pontos/pol² (15,5 pontos/mm²) - SD e *target* configurada para iluminação neutra. O *Range* foi selecionado na opção *Macro* e a distância da peça ao scanner próxima da ideal recomendada (16,51 cm) para tal seleção. A Figura 2.7 mostra a janela de configurações com as opções selecionadas no procedimento.



Figura 2.7: Configurações de escaneamento utilizadas

Em seguida, iniciou-se o escaneamento. Ele foi feito para captar todas as faces da peça, captando-as duas a duas. Foi necessário gerar seis vistas como esse para assimilar toda a peça. Posteriormente, as faces foram alinhadas (vide Figura 2.8) para obter a superfície da peça por completo. Nesse trabalho foram usados cerca de nove pontos para a realização do alinhamento. Além disso, as imagens foram fundidas em uma só família. Esta fase do trabalho durou cerca de duas horas e meia para cada peça.

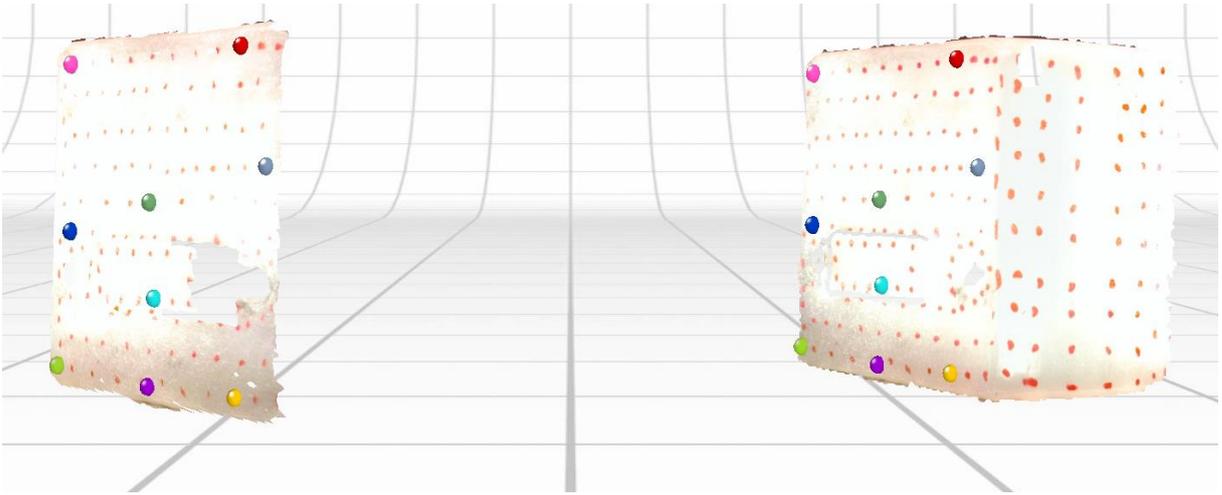


Figura 2.8: Alinhamento das vistas realizado no ScanStudio

Com o intuito de melhorar a fidelidade das imagens do scanner em relação a peça, foram aplicados os comandos:

- “trim” para eliminar eventuais partes que foram escaneadas que não eram da peça e também para fazer os furos da peça, que o Scanner não captou muito bem;
- “buff” para uniformizar as regiões com imperfeição, principalmente a região curva da peça;
- “fill” para preencher as regiões que ficaram com furos e fissuras.

A Figura 2.9 mostra o modelo CAD obtido no final ao se utilizar o recurso “CAD”, ao criar superfícies NURBS. A quantidade de superfícies pode ser arbitrada pelo usuário. Neste trabalho, 404 superfícies foram o suficiente para manter a configuração da peça. Feito isso, o modelo gerado foi salvo no formato SCN.

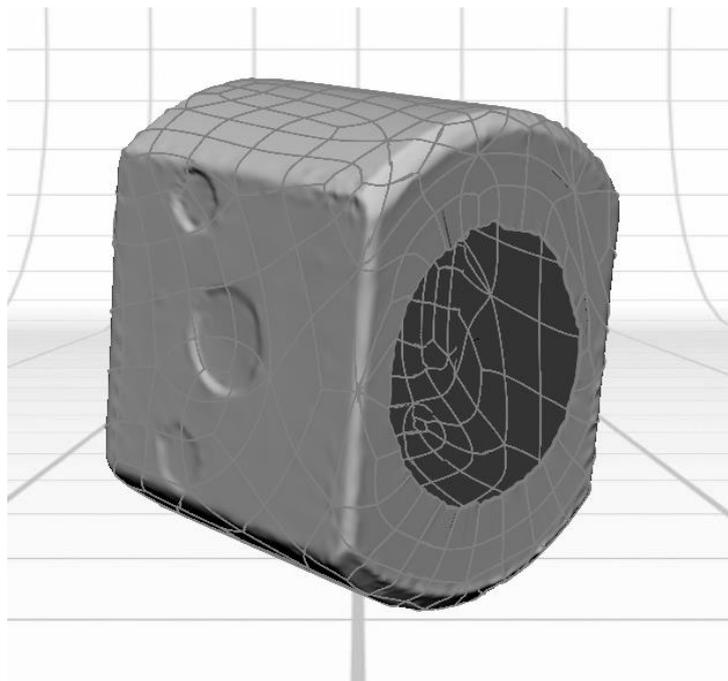


Figura 2.9: Superfícies NURBS no modelo CAD

O sólido ainda no formato SCN (formato do ScanStudio), é importado para o Rhinoceros, onde é salvo em IGES, originando o modelo CAD. Posteriormente, este arquivo é salvo e importa-se novamente o sólido no formato do Scanner. Neste segundo arquivo, a nuvem de pontos será criada. Para criá-la seleciona-se as malhas e aplica-se o comando *PointCloud*. Feito isso, este segundo arquivo pode ser salvo, também no formato IGES.

Finalmente, no CATIA, o modelo CAD foi aberto no ambiente de trabalho *Digitized Shape Editor* e a nuvem de pontos foi importada para o mesmo arquivo. Após isso, usando o recurso *Align using the Compass* a nuvem e o modelo CAD foram alinhados manualmente para posteriormente facilitar o *Align by Best Fit*, alinhamento feito automaticamente pelo software. Em seguida, foi utilizado o recurso *Deviation Study* para analisar os desvios entre o CAD e a nuvem de pontos.

Os pontos dos desvios médios gerados pelo CATIA foram, então, salvos num arquivo de texto. Este arquivo foi importado no MATLAB e aplicado na função “BoxPlot” do programa, o qual criou um limite inferior e superior com base estatística, representando num gráfico os pontos que ultrapassam a região aceitável de desvios (*outliers*). Os valores destes limites foram utilizados para programar um código de filtragem dos dados (disponível no Apêndice I) criando uma nova lista de pontos sem os *outlier*, otimizando a nuvem de pontos. Após todo o processo de filtragem no MATLAB, os limites obtidos pelo gráfico do tipo boxplot foram repassados para o CATIA, para uma nova análise de desvios.

2.3 IMPRESSÃO 3D

2.3.1 Impressora 3D Tronxy P802EA

Para a realização da prototipagem rápida da peça teste deste trabalho foi utilizada a máquina de modelo P802EA do fabricante Tronxy disponibilizada pela empresa Artificer mostrada na Figura 2.10.

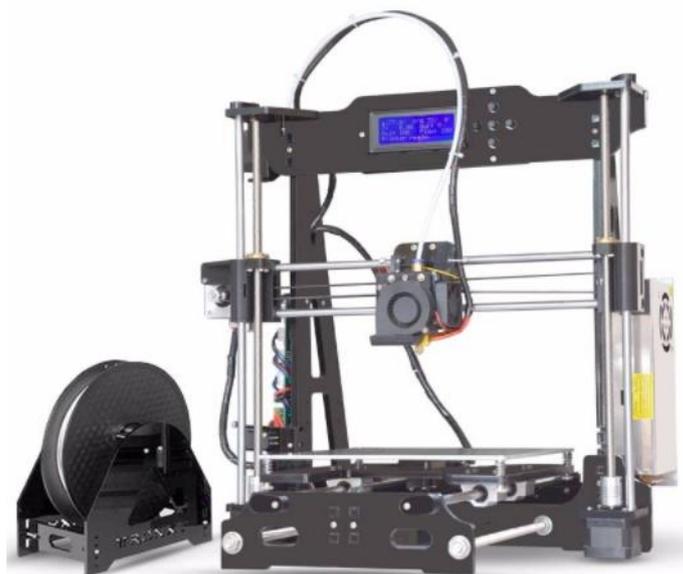


Figura 2.10: Impressora Tronxy P802EA (Tronxy, 2017)

As especificações técnicas da impressora Tronxy modelo P802EA referentes à sua capacidade de operação estão disponíveis no catálogo do fabricante disponível no anexo II e algumas delas listadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Especificações técnicas da impressora Tronxy P802EA (traduzida e adaptado)

Resolução da impressora	0,1 mm – 0,4 mm
Velocidade no eixo Z	200 mm/min
Velocidade nos eixos X e Y	3000 mm/min
Velocidade de impressão	40 – 120 mm/s
Precisão de posicionamento no eixo Z	0,004 mm
Precisão de posicionamento nos eixos X e Y	0,012 mm

2.3.2 Impressora 3D Prusa i3 MK3

Para a fabricação das peças referentes ao estudo das variáveis do processo de impressão 3D foi utilizada a impressora 3D modelo *i3 MK3* da fabricante *Prusa* e o software *Prusa3D Slic3r MK2*. O filamento de PLA utilizado para a impressão foi de cor branco perolado de diâmetro 1,75 mm, enquanto o ABS foi de cor branco fosco com o mesmo diâmetro. A Figura 2.11 mostra a impressora utilizada e seus principais componentes.

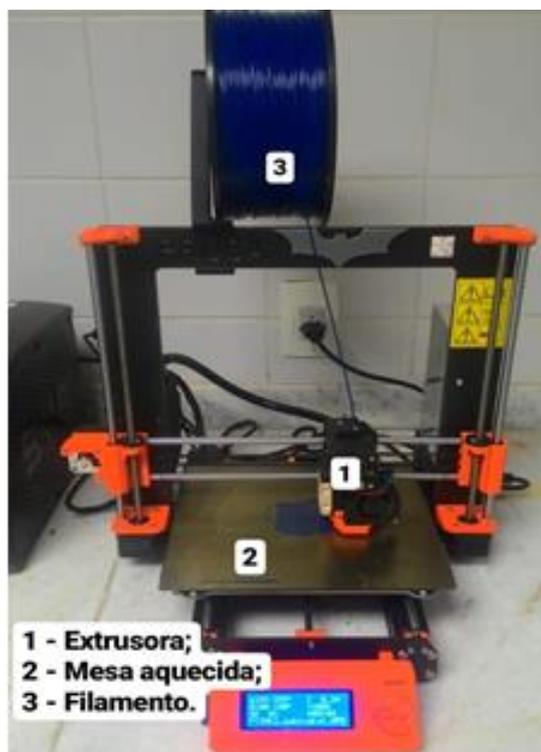


Figura 2.11: Impressora Prusa i3 MK3

Com as variáveis em análise e o planejamento experimental definidos foi possível, através do software, a criação dos códigos de máquina referentes a cada peça a ser impressa. Nestes códigos foram fixadas as configurações padrões e as variáveis em estudo foram modificadas gerando 16 códigos diferentes, um para cada ensaio. As direções de impressão referentes aos eixos X (à direita) e Z (à esquerda) podem ser observadas na Figura 2.12.

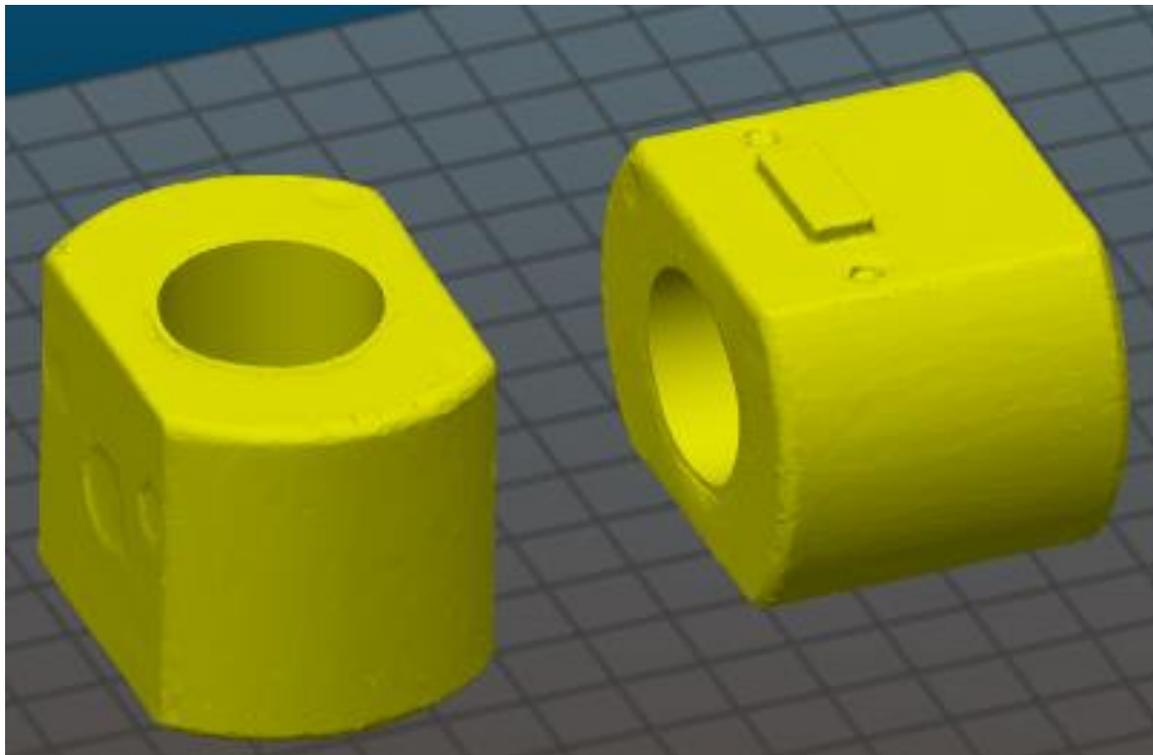


Figura 2.12: Interface do software utilizado para gerar os códigos de impressão.

Os códigos de cada uma das peças foram salvos em um dispositivo de armazenamento de dados com memória flash (cartão SD). O dispositivo foi, então, inserido num leitor presente na impressora, o código referente à peça a ser impressa é selecionado. Antes de se iniciar o processo de impressão, é necessário fazer o pré-aquecimento da mesa e do extrusor, bem como conferir se o filamento se encontra corretamente inserido.

3 RESULTADOS PRELIMINARES

Neste capítulo descreve-se os resultados obtidos para a peça inicial e para a peça impressa

A partir da execução dos procedimentos descritos, foi possível realizar comparações relacionadas aos desvios dimensionais da peça antes e após aplicação do filtro programado em MATLAB.

3.1 ANÁLISE DOS DESVIOS DA PEÇA INICIAL

Os desvios dimensionais obtidos com a utilização do CATIA antes da aplicação do filtro podem ser observados na Figura 3.1.

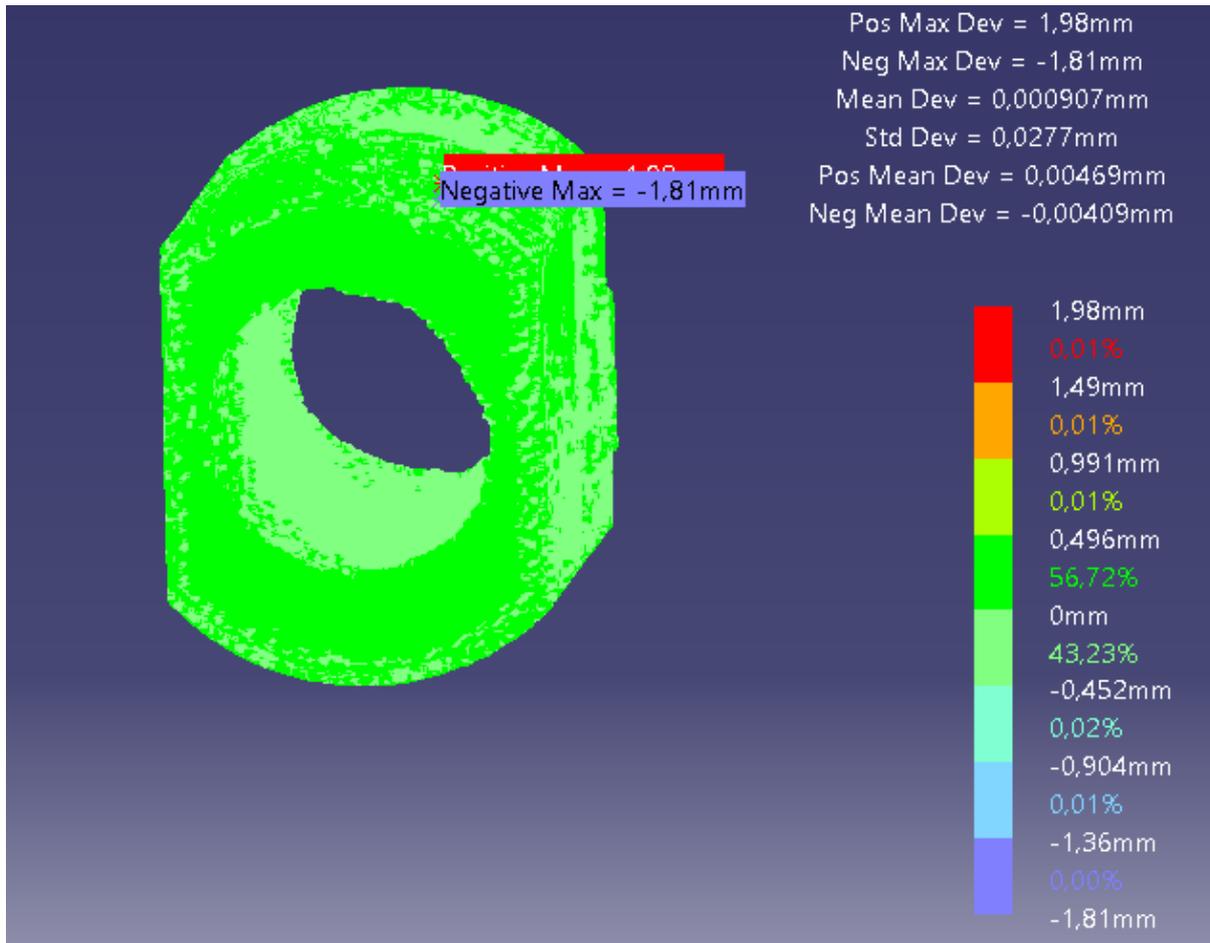


Figura 3.1: Análise de desvios do CATIA antes da aplicação do filtro

Por meio da imagem gerada pela análise de desvios gerada pelo CATIA é possível identificar o percentual de pontos em cada medida. Para o modelo antes da aplicação do filtro, cerca de 99,95% dos pontos encontram-se entre -0,452 mm e 0,496 mm, tais pontos são representados na imagem pela cor verde. Os demais pontos, que representam cerca de 0,06 % do total encontram-se acima de 0,496 mm ou abaixo de -0,452 mm. Visto isso, para otimizar a nuvem de pontos, utilizou-se um filtro estatístico. Esta filtragem é realizada para eliminar os pontos discrepantes provavelmente resultantes do processo de alinhamento e de reflexões dos feixes de laser emitidos pelo *Scanner*.

A partir do código implementado em MATLAB (vide Apêndice I) foram determinados os limites superior (0,002 mm) e inferior (-0,001 mm) dos desvios médios considerados aceitáveis pela análise estatística realizada através do comando boxplot, cujo gráfico está representado

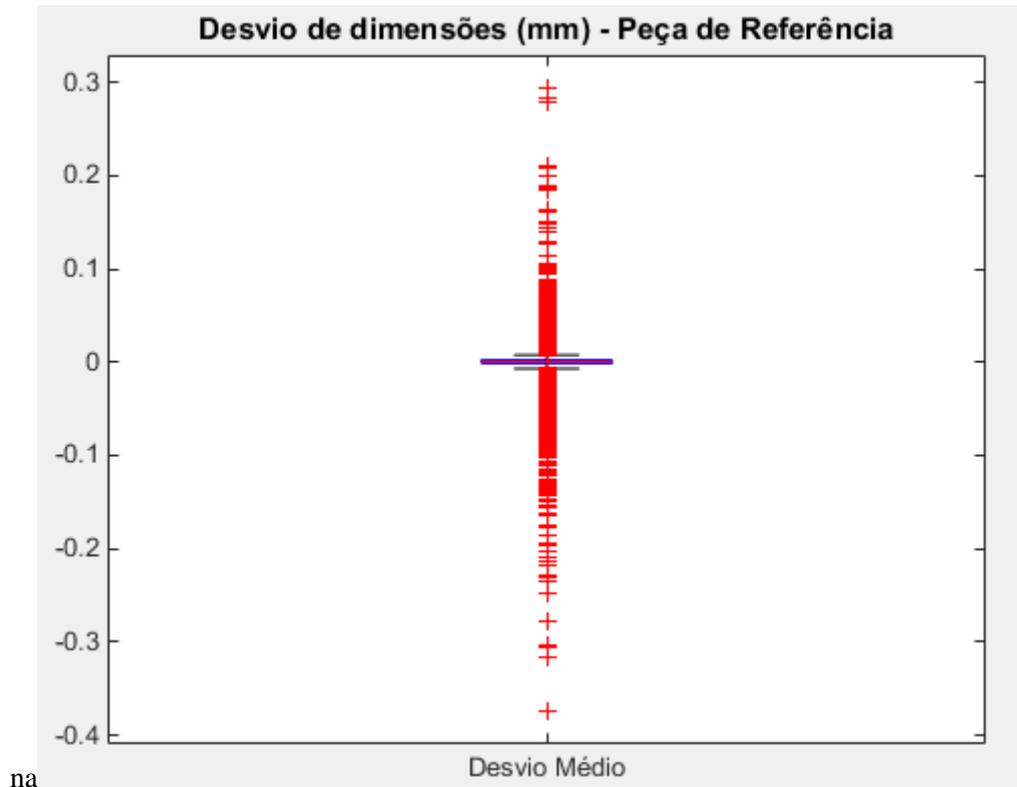


Figura 3.2.



Figura 3.2: Gráfico boxplot mostrando o limite adjacente superior

Por meio da análise do gráfico é possível identificar os pontos que se encontram fora da margem determinada pelos limites interior e superior, representados em vermelho.

Após a aplicação do filtro descartou-se 0,3% dos pontos e notou-se que tais pontos estão, em sua maioria, dispostos nas regiões vazadas da peça, o que pode justificar a imprecisão destes pontos, uma vez que nestas regiões existem detalhes referentes a rosca interna dos furos, o que podem ter interferido na reflexão dos feixes de laser emitidos pelo Scanner.

A partir das análises dos desvios e dos gráficos gerados foram extraídos os dados referentes aos desvios dimensionais antes e após a filtragem. Estes dados estão dispostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores referentes às análises antes e após a filtragem dos pontos

	Antes da filtragem de pontos	Após a filtragem de pontos
Número de pontos analisados	2699286	2691188
Média (mm)	0,001	0,001
Desvio Padrão (mm)	0,028	0,007
Amplitude (mm)	3,790	0,004

Como esperado, com a filtragem 8098 pontos foram descartados, ou seja, cerca de 0,3 % do total de pontos estavam fora da margem definida pelos gráficos boxplot. Este descarte influenciou diretamente nos parâmetros apresentados na Tabela 3.1. O desvio padrão caiu de 0,028 mm para 0,007 mm. Esta diferença pode ser explicada pelo fato da filtragem ter eliminados pontos com desvios muito superiores aos demais, minimizando a amplitude, e conseqüentemente o desvio padrão.

3.2 FABRICAÇÃO POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA E ANÁLISE DOS DESVIOS

O modelo CAD gerado pelo Scanner foi trabalhado no CATIA para realizar os reparos necessários, incluindo a marcação do furo principal da peça. O arquivo foi, então, salvo em “.STL”, formato compatível com a impressora 3D Tronxy P802EA, e enviado para a empresa Artificer efetuar a impressão. O material escolhido para a confecção foi o ácido poliático (PLA), a altura da camada de 0,16 mm, velocidade de impressão de 40 mm/s e densidade de preenchimento de 10%. Tais parâmetros foram escolhidos para a obtenção de um protótipo com uma espessura de paredes razoável, para evitar sua fragmentação durante as medições

A peça obtida por prototipagem rápida com a utilização da impressora Tronxy P802EA após a marcação dos pontos em sua superfície está representada na Figura 3.3.

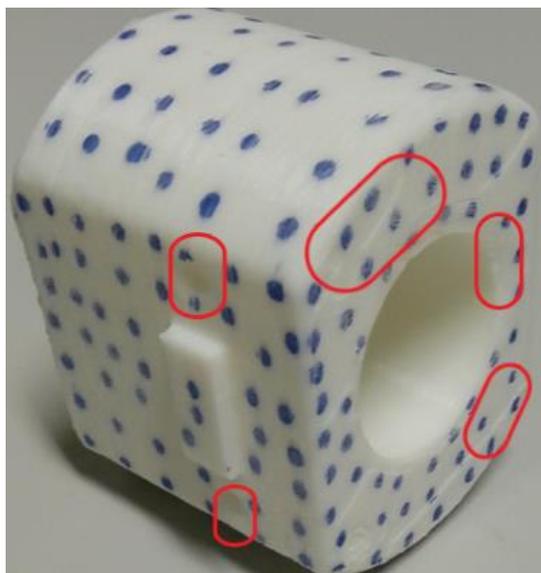


Figura 3.3: Modelo impresso na impressora 3d Tronxy P802EA

Observando o modelo impresso é possível identificar imperfeições na sua superfície e falha nas regiões onde, na peça original, haviam chanfros, ranhuras, furos e roscas, tais falhas podem ser atribuídas ao processo de impressão, uma vez que nenhum tratamento superficial elaborado foi aplicado à mesma após a impressão. Além disso, o modelo de impressora utilizado possui limitações quanto ao reconhecimento de furos, ranhuras e chanfros.

Com a peça confeccionada, a análise metrológica de suas superfícies pôde ser realizada. O escaneamento da peça obtida pela prototipagem rápida, bem como os tratamentos da nuvem de pontos foram realizados utilizando os mesmos procedimentos, equipamentos e configurações descritos no item 2.2.

A nuvem de pontos obtida a partir do modelo impresso foi sobreposta e alinhada ao modelo CAD da peça inicial no CATIA e uma nova análise de desvios foi realizada. A Figura 3.4 mostra a análise de desvios da peça obtida por prototipagem antes da aplicação do filtro.

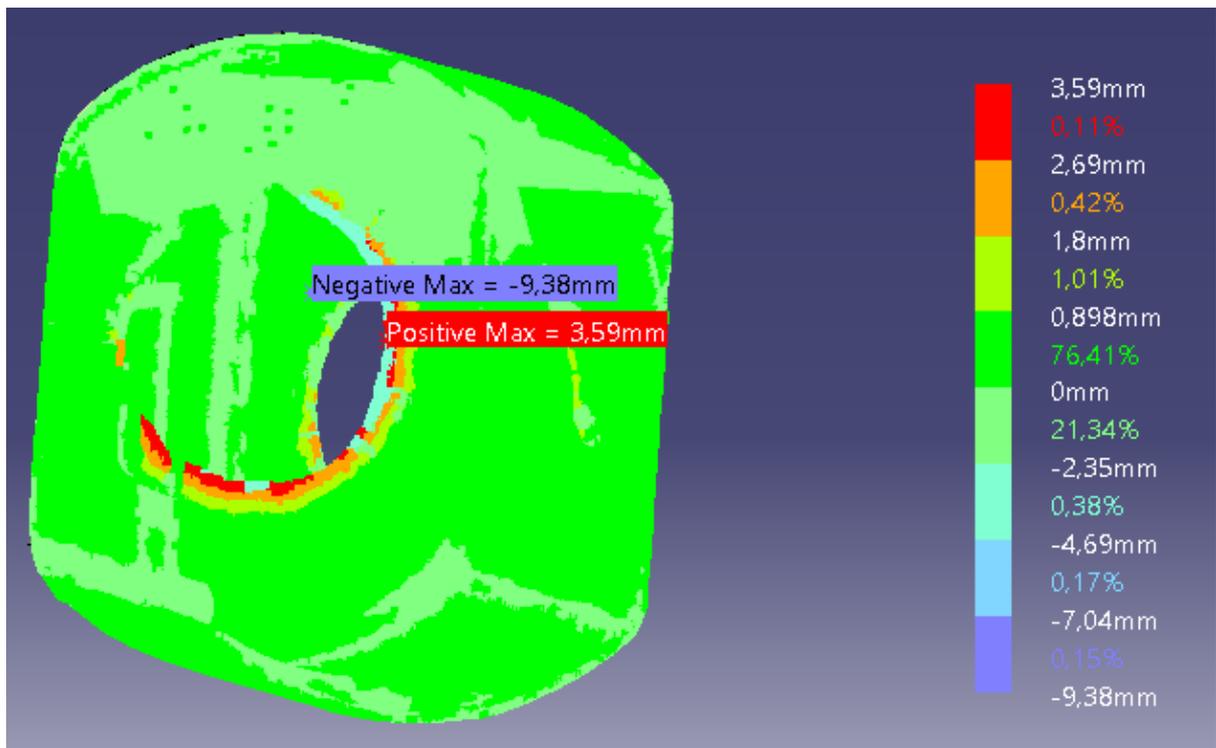


Figura 3.4: Análise de desvios do CATIA da peça impressa antes da aplicação do filtro.

A partir da análise dos desvios é possível verificar que os desvios médios na região dos furos é maior, isso ocorre devido ao fato do mesmo não ter a mesma profundidade que no modelo CAD. Pode-se atribuir essa falha à dificuldade da impressora 3D no acabamento de furos. Na maior parte da peça, os desvios são aceitáveis, visto que soma-se os erros do Scanner com os da impressora. Como a resolução da impressora está entre 0,100 mm e 0,400 mm e a resolução do Scanner para as configurações utilizadas é de 0,127 mm, têm-se uma faixa de erro de 0,227 mm a 0,527 mm, em que está pelo menos 90% dos pontos, como mostrado na Figura 3.4.

Conforme realizado com a peça teste, utilizou-se o código MATLAB (vide Apêndice I) para determinar o limite superior e inferior dos desvios médios considerados aceitáveis pela análise estatística realizada através do comando boxplot. Tais limites podem ser observados na Figura 3.5.



Figura 3.5: Gráfico boxplot mostrando o limite adjacente superior para a peça impressa

Dessa forma, a partir da Figura 3.5, o limite superior de desvio identificado foi de 0,439 mm , e o inferior foi de -0,200 mm, ou seja, os pontos que se encontram fora deste intervalo podem ser descartados para otimizar a análise de desvios.

Após a confecção da peça restaram ranhuras e defeitos superficiais oriundos do processo de impressão. Estes defeitos surgem devido à necessidade de construção do suporte pela própria impressora antes da impressão da peça, para que a mesma não se mova durante o processo. Alguns resquícios destes suportes permaneceram na peça mesmo após o tratamento superficial da mesma, o que influenciou na medição dos desvios dimensionais.

Uma das maneiras de se melhorar a qualidade da peça seria na fase de planejamento para o processo de prototipagem rápida. Nesta etapa, devem-se levar em conta os seguintes aspectos: orientação da peça, os parâmetros do processo, geração de suportes e o preenchimento da camada.

Segundo Volpato et al. (2007) em boa parte dos processos de prototipagem rápida há a necessidade de construção de estruturas de suporte para servir de apoio às regiões do protótipo. E, para a melhoria da qualidade final do protótipo é necessário realizar uma etapa de pós-processamento e acabamento, como pintura, polimento e usinagem.

A partir das análises dos desvios e dos gráficos gerados foram extraídos os dados referentes aos desvios dimensionais antes e após a filtragem. Estes dados estão dispostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores referentes às análises antes e após a filtragem dos pontos

	Antes da filtragem de pontos	Após a filtragem de pontos
Número de pontos analisados	2742702	2517153
Média (mm)	0,064	0,094
Desvio Padrão (mm)	0,545	0,126
Amplitude (mm)	13,170	0,694

O processo de filtragem eliminou 225549 pontos que se encontravam fora do intervalo estabelecido, esta quantidade representa cerca de 4,2 % do total de pontos recolhidos. O descarte destes pontos fez com que a nuvem de pontos de a peça impressa tornar-se mais próxima do modelo CAD, diminuindo o valor dos desvios dimensionais.

Analisando os valores de desvio padrão e amplitude nota-se uma queda nos valores dos mesmos ao comparar os desvios antes e depois da filtragem. O desvio padrão após a filtragem caiu de 0,545 mm para 0,126 mm e a amplitude de 13,170 mm para 0,694 mm, ou seja, os valores após a aplicação do filtro estatístico encontram-se próximos a resolução do valor do Scanner, que é de 0,127 mm.

4 RESULTADOS FINAIS

4.1 ANÁLISE QUALITATIVA

Além da análise apresentada anteriormente, foi feito também uma análise qualitativa das peças, para identificar possíveis erros na impressão que alteram a qualidade delas. Posto isso, é importante salientar que não foi realizado nenhum tipo de acabamento superficial nas peças, foram apenas retirados os suportes de impressão com auxílio de um alicate.

Primeiramente, percebe-se que a face que ficou em contato com a mesa aquecida, para impressão em ambas as direções, ficou com uma qualidade mais baixa, por conta do suporte criado pela impressora. Isso pode ser mostrado na comparação feita entre as Figura 4.1 e Figura 4.2 . A Figura 4.1 mostra a face que ficou em contato com a mesa na peça 1, que foi impressa na direção z e na peça 3, que foi impressa na direção x. Já a Figura 4.2 mostra a face oposta à que ficou sobre a mesa aquecida.



Figura 4.1: Faces que ficaram sobre a mesa aquecida



Figura 4.2: Faces opostas as que ficaram sobre a mesa aquecida

Outro fator que pode ser observado é que nas peças impressas na direção x há a criação de um suporte na região do furo. Este, quando o preenchimento é de 90% fica mais difícil de ser removido, visto que ele fica mais rígido. Posto isso, ainda ficaram resquícios do suporte na peça, como pode ser observado na Figura 4.3. Esse aspecto pode ser observado nas peças 3,5,8 e 14, de preenchimento 90%; e nas peças 12 e 13, de preenchimento 10 %.



Figura 4.3: Peças que ficaram com resquícios de suporte (à esquerda, peças com preenchimento de 90% e à direita, peças com preenchimento de 10%)

Além disso, outro defeito superficial notado é nas bordas da face que ficou sobre a mesa aquecida, como apresentado na Figura 4.4 . Esse defeito em todas as peças, salvo as peças 2, 12, 13 e 16. Nestas, notou-se que há em comum a direção de impressão (X) e o preenchimento (10%). As Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram todas as peças com esse defeito superficial.

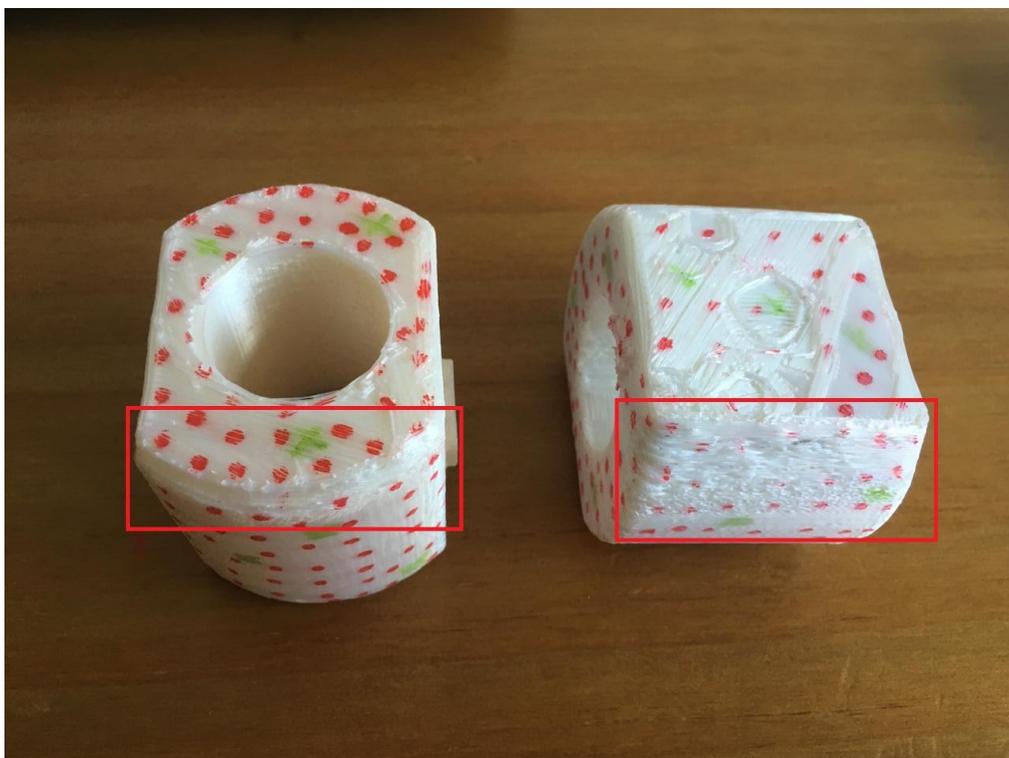


Figura 4.4: Defeito superficial nas bordas



Figura 4.5: Defeito superficial nas bordas das peças impressas na direção z (peças 1, 4, 6, 7, 9, 10, 11 e 15)



Figura 4.6: Defeito superficial nas bordas das peças impressas na direção x (peças 3, 5, 8, 14)

Outro defeito que pode ser observado é o descolamento da camada nas peças 2, 4, 5 e 16, como mostra a Figura 4.7. Pode-se atribuir esse defeito à solidificação antecipada do material depositado, dificultando a aderência de uma camada à outra.



Figura 4.7: Descolamento de camada (peças 2,4,5 e 16)

Por fim, a peça 14 tem a pior qualidade superficial, sendo que esta foi impressa duas vezes, e em ambas, ficou com um acabamento inferior, como mostra a Figura 4.8.



Figura 4.8: Peça 14

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

Após a fabricação das peças, do recolhimento da nuvem de pontos e das análises de desvios antes e depois da filtragem, foi possível observar medidas de dispersão, como o desvio padrão (S) e amplitude (A), os desvios médios (Dm), o tempo decorrido de cada um dos ensaios e a porcentagem de pontos mantidas após o filtro (% pontos). Estes valores estão apresentados na Tabela 4.1.

A forma de aplicação do filtro se deu da mesma maneira que foi aplicada nos resultados preliminares, com a ajuda de um gráfico do tipo boxplot. Sabe-se que a quantidade total de pontos é de 1048575 antes da filtragem para todas as peças.

Tabela 4.1: Medidas observadas para cada peça fabricada.

Peças	Tempo (s)	Antes da filtragem			Depois da filtragem			
		S (mm)	Dm(mm)	A(mm)	S(mm)	Dm(mm)	A(mm)	% pontos
1	12172	0,275	0,044	7,146	0,098	0,039	0,644	94,1
2	17458	0,231	0,118	7,795	0,134	0,114	0,843	98,2
3	13515	0,350	0,057	9,964	0,167	0,056	0,879	97,8
4	10999	0,329	0,004	8,424	0,134	0,001	0,858	97,2
5	29384	0,377	0,141	8,558	0,226	0,145	1,322	97,3
6	6360	0,375	0,013	8,830	0,053	0,008	0,368	86,8
7	12160	0,262	0,103	7,707	0,124	0,103	1,321	98,3
8	33106	0,375	0,211	8,985	0,096	0,201	0,477	84,5
9	6375	0,635	0,161	8,862	0,095	0,164	0,624	87,7
10	15330	0,158	0,066	3,742	0,103	0,064	0,579	94,3
11	29517	0,320	-0,005	7,013	0,199	-0,011	1,024	94,6
12	15098	0,432	0,275	9,619	0,095	0,248	1,262	96,7
13	15609	0,359	0,147	8,036	0,199	0,147	1,173	97,1
14	13999	0,408	0,017	9,729	0,319	-0,062	1,609	97,8
15	32150	0,303	-0,019	6,758	0,128	-0,027	0,691	91,1
16	8132	0,298	0,139	7,831	0,148	0,147	0,804	92,3

Analisando as figuras e gráficos de desvios das peças (vide apêndice II), nota-se que os maiores desvios sempre, em todas as peças, são no furo central, pode-se atribuir essa condição ao fato da reflexão da luz no furo da peça no momento do escaneamento e na dificuldade do *scanner* em produzir um furo completo, com o cilindro interno. Dessa maneira, pode-se desconsiderar esses desvios, já que estes não são devido a peça, mas ao *scanner*.

Através da análise da Tabela 4.1 e sabendo que a resolução do *scanner* é 0,127 mm, nota-se que antes da aplicação do filtro, a peça que apresentou os melhores resultados foi a peça 10, com desvio padrão de 0,158 mm, como mostra a Figura 4.9. Já após a aplicação do filtro, a peça 6 que apresentou o melhor resultado, com desvio padrão de 0,053 mm, como mostra a Figura 4.10.

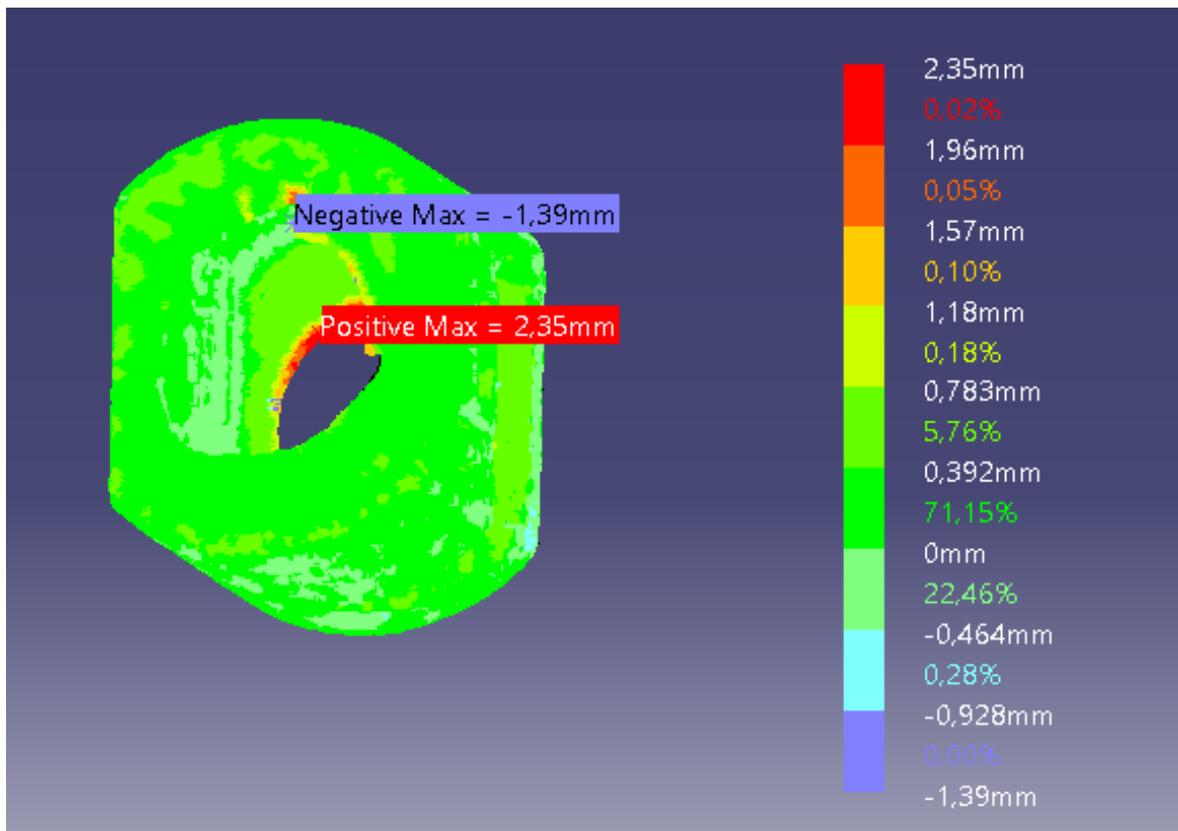


Figura 4.9: Desvios da peça 10

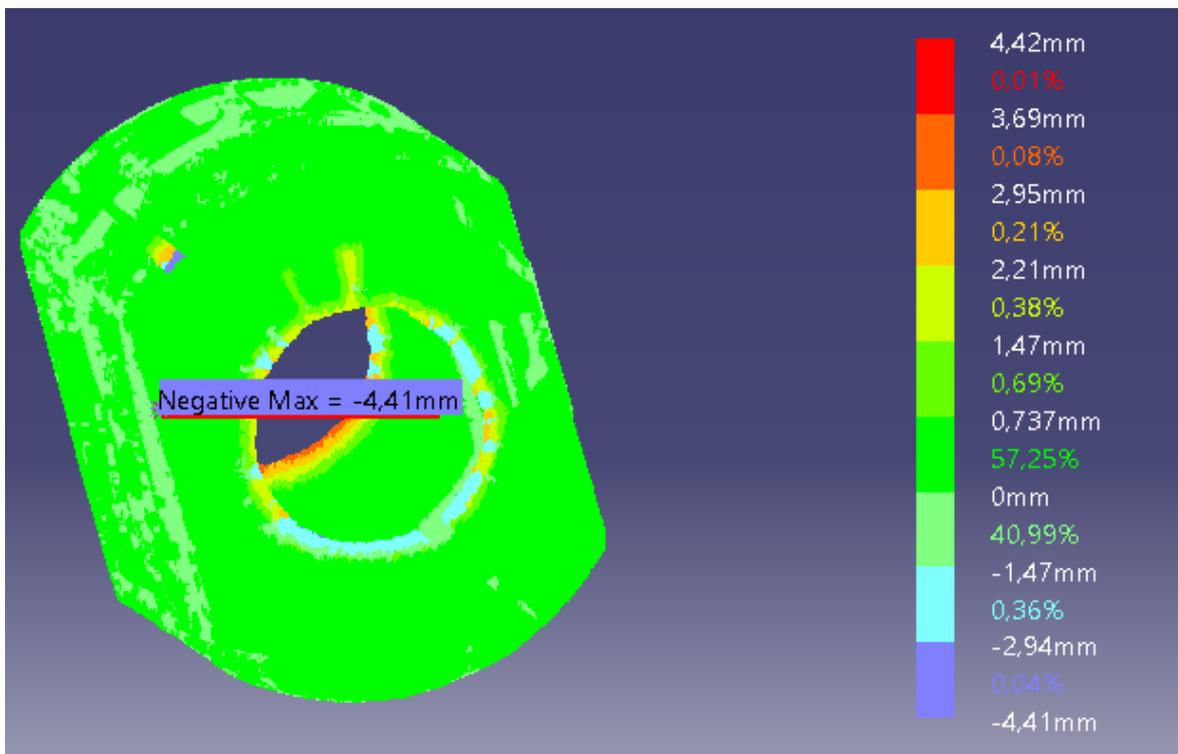


Figura 4.10: Desvios da peça 6

Também foi feito uma análise através de um histograma e de um gráfico de probabilidade normal, antes e após a aplicação do filtro de cada peça. A partir da análise deles (vide Apêndice III),

comprova-se o que foi mostrado na Tabela 4.1. As Figura 4.11 e Figura 4.12 apresentam a distribuição dos desvios da peça 10 e seu respectivo histograma antes da aplicação do filtro.

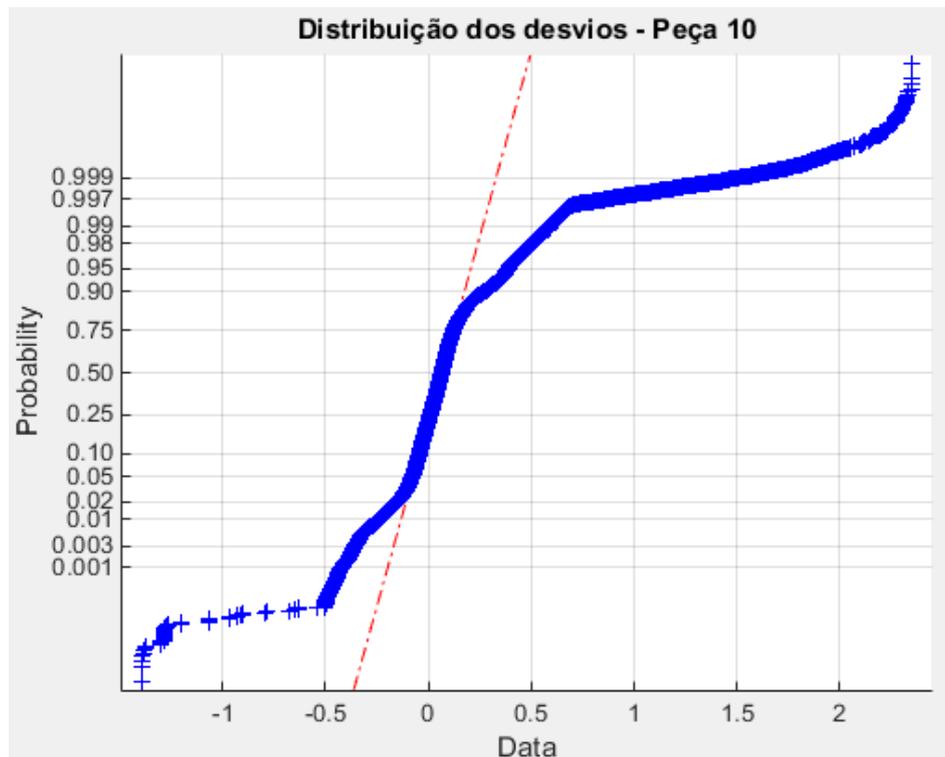


Figura 4.11: Distribuição normal dos desvios da peça 10 antes da aplicação do filtro

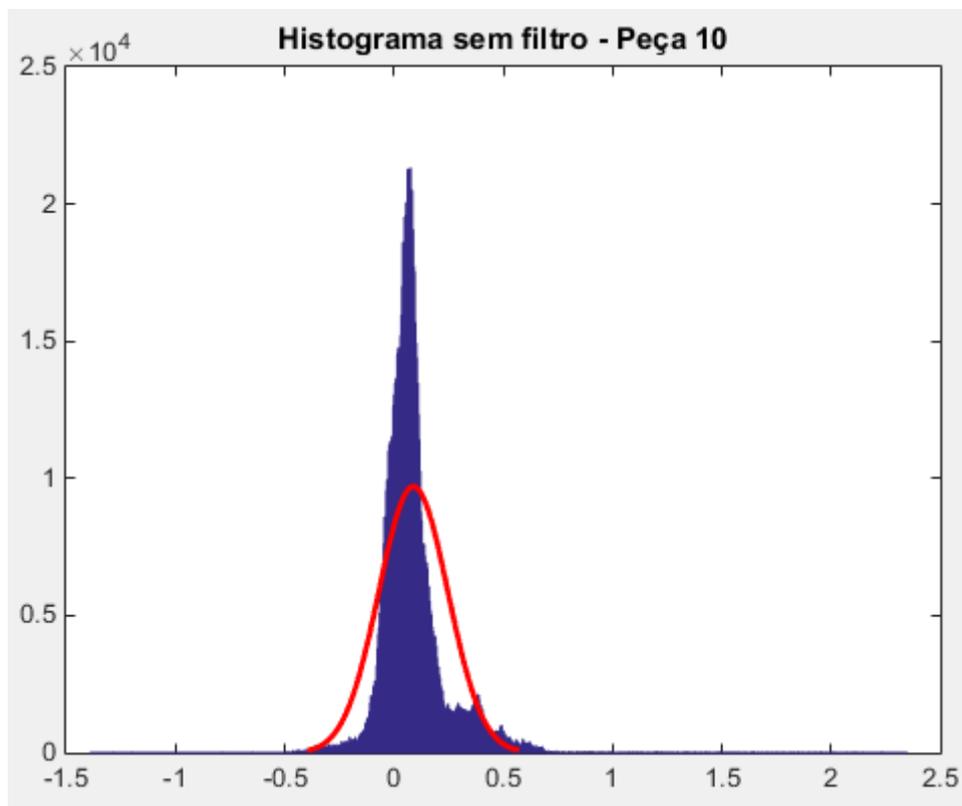


Figura 4.12: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 10

As Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam a distribuição dos desvios da peça 6 e seu respectivo histograma antes da aplicação do filtro. Já a Figura 4.15 mostra o boxplot para os pontos.

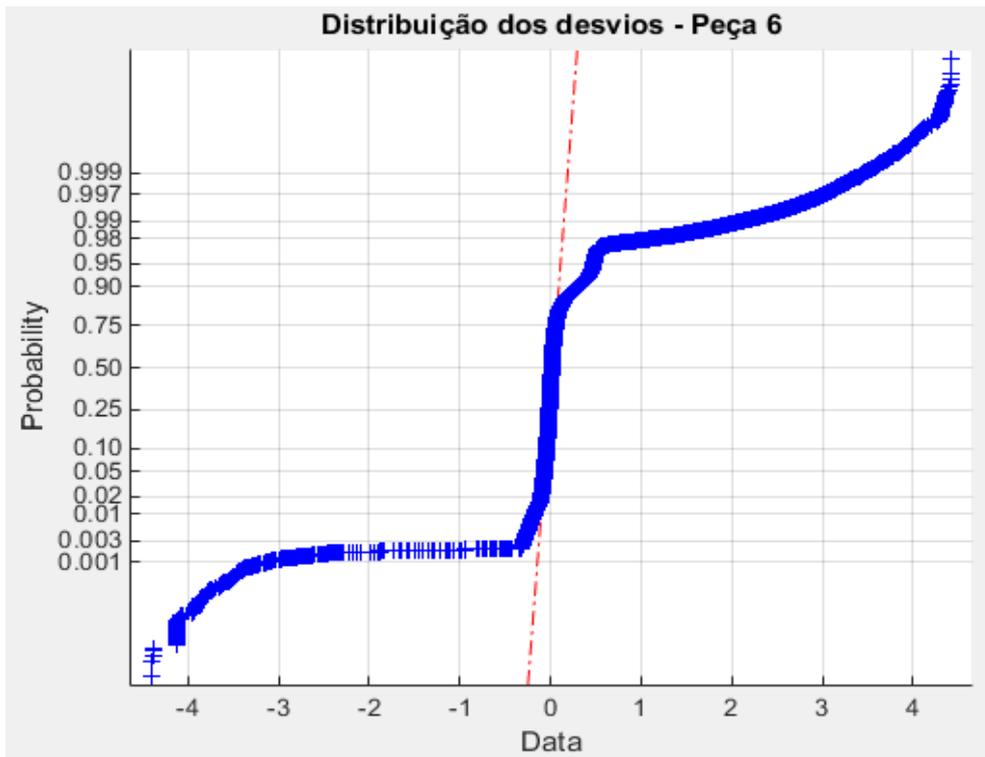


Figura 4.13: Distribuição normal dos desvios da peça 6 antes da aplicação do filtro

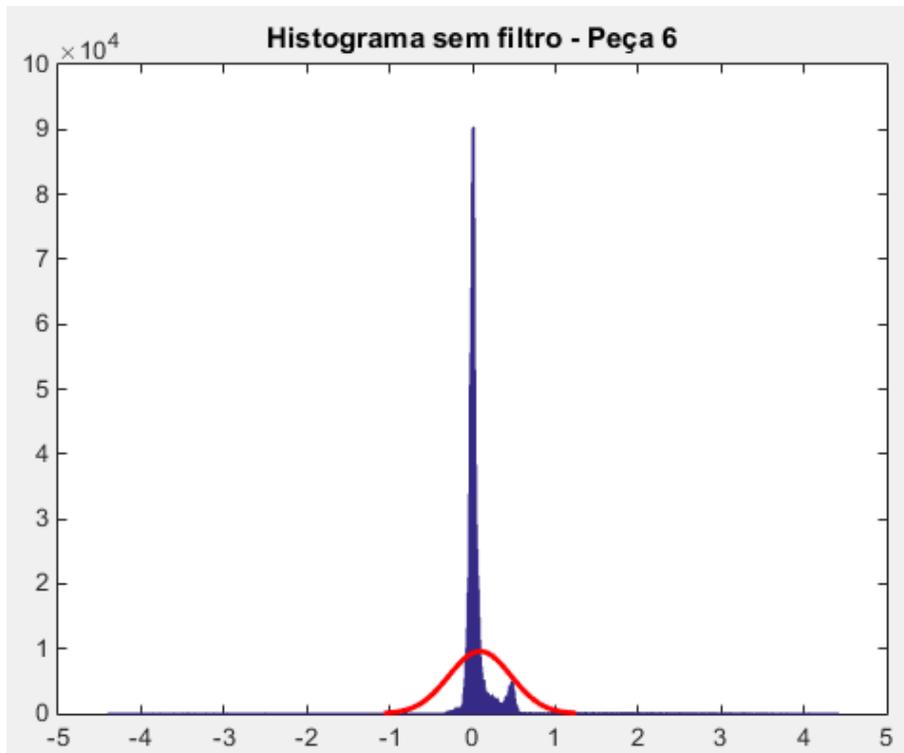


Figura 4.14: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 6

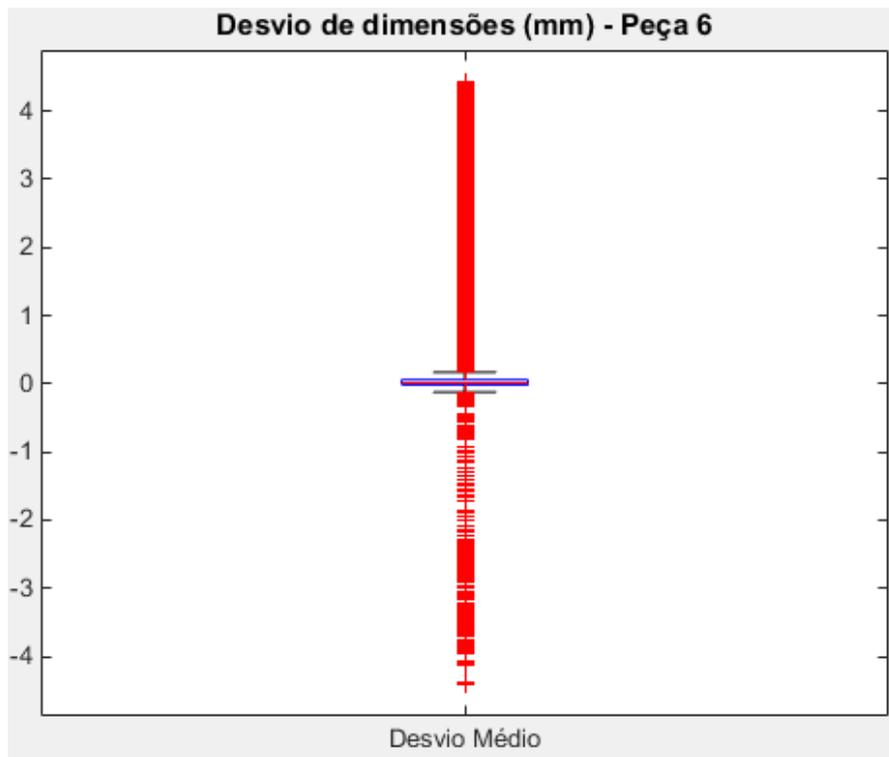


Figura 4.15: Boxplot da peça 6 (lim. sup.: 0,221 mm e lim. inf.: -0,147 mm)

Para a confecção dos gráficos de distribuição dos desvios e histograma após a filtragem utilizou-se o boxplot da Figura 4.15. Com os limites obtidos 13,2% dos pontos foram descartados. Em comparação com as demais peças, houve um considerável descarte de peças. Já as Figura 4.16 e Figura 4.17 mostram a distribuição dos desvios e histograma após filtragem.

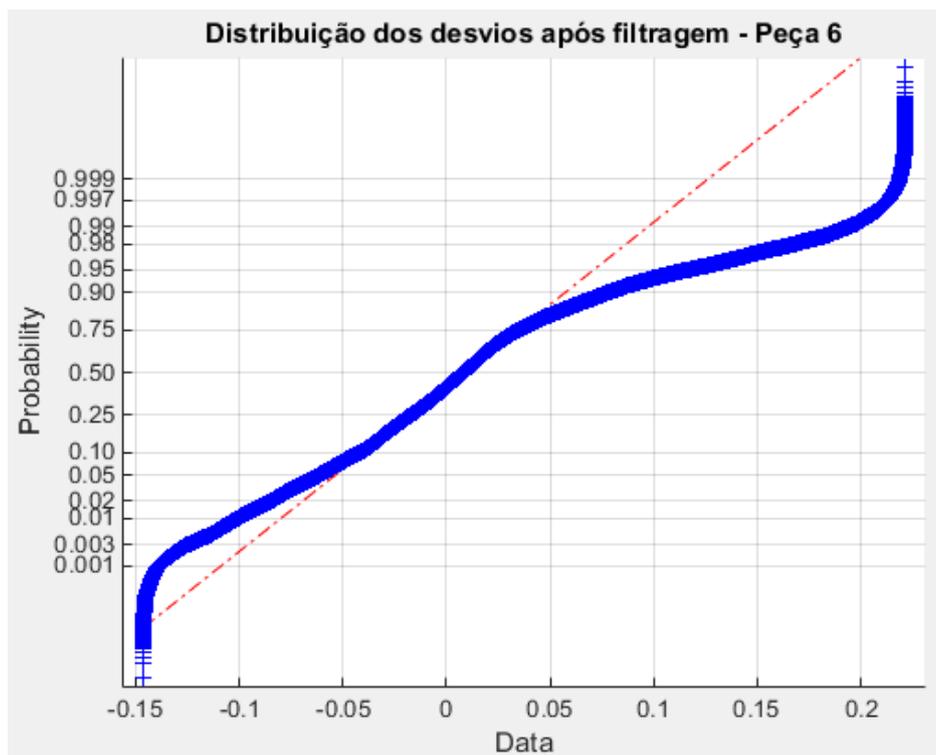


Figura 4.16: Distribuição normal dos desvios da peça 6 antes da aplicação do filtro

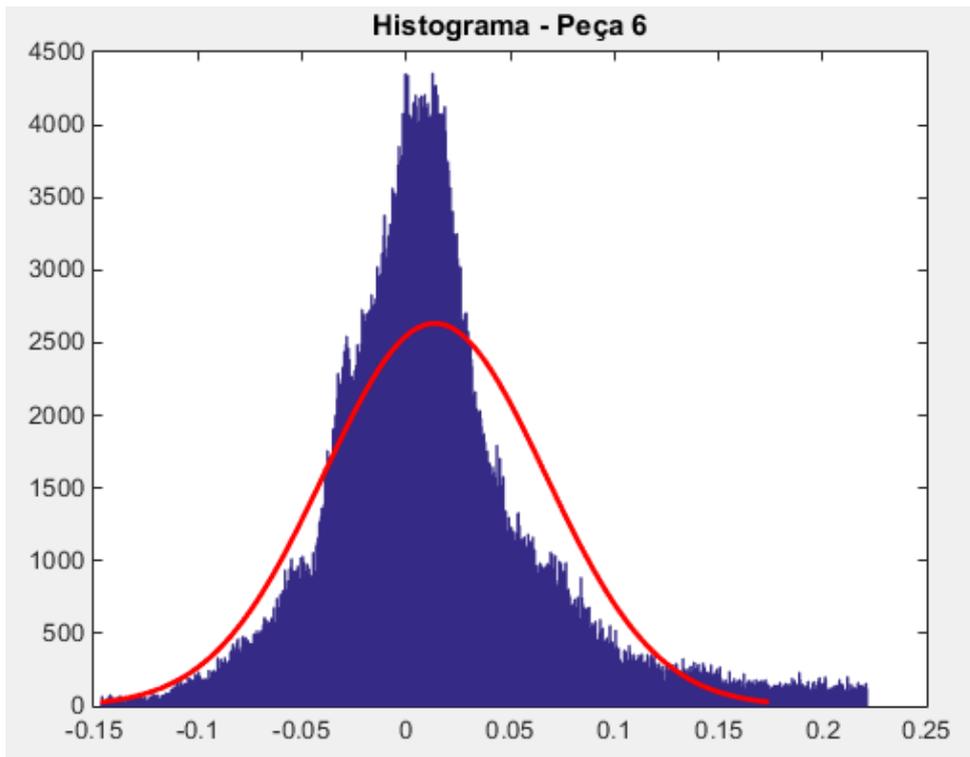


Figura 4.17: Histograma antes da aplicação do filtro da peça 6

Além disso, a peça que apresentou o pior resultado antes da aplicação do filtro, foi a peça 9, com desvio padrão de 0,635 mm. Já após a aplicação do filtro, a peça 14 que apresentou o pior resultado, com desvio padrão de 0,319 mm. As Figura 4.18 e Figura 4.19 mostram a distribuição normal dos desvios e histograma da peça 9 antes da aplicação do filtro.

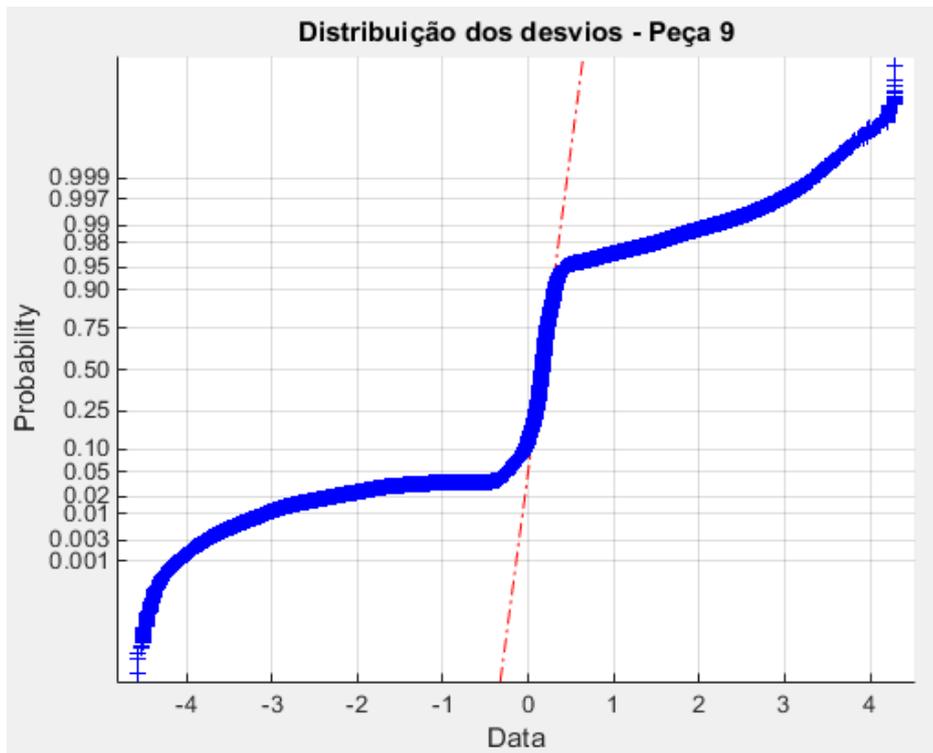


Figura 4.18: Distribuição normal dos desvios da peça 9 antes da aplicação do filtro

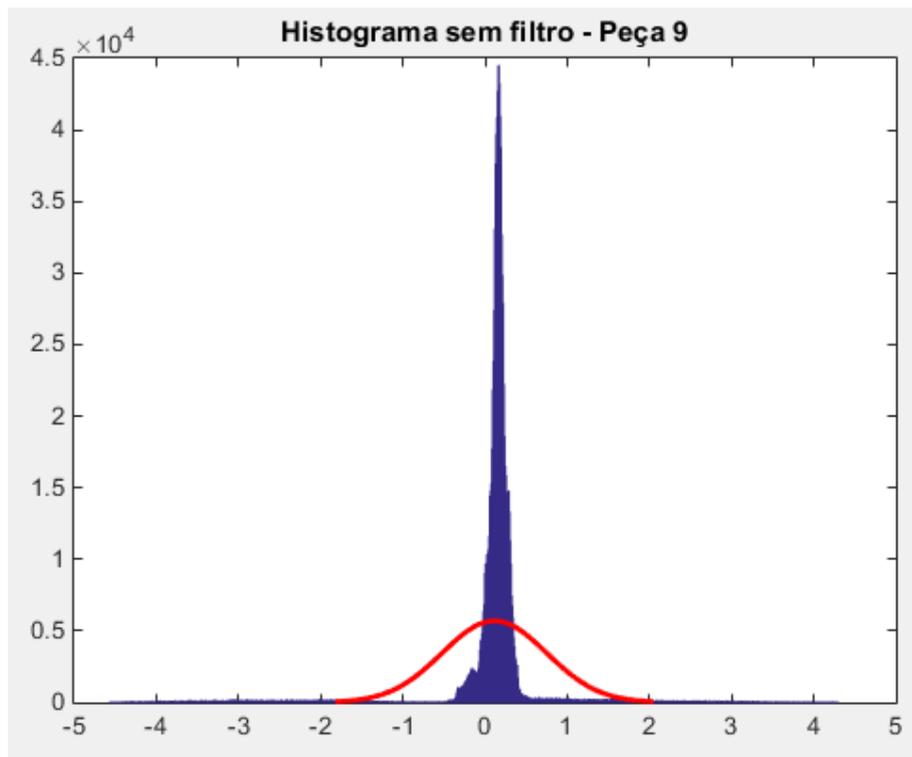


Figura 4.19: Histograma da peça 9 antes da aplicação do filtro

As Figura 4.20 e Figura 4.21 apresentam a distribuição dos desvios e o histograma antes da aplicação do filtro, respectivamente. Já a Figura 4.22 mostra o boxplot para a peça 14.

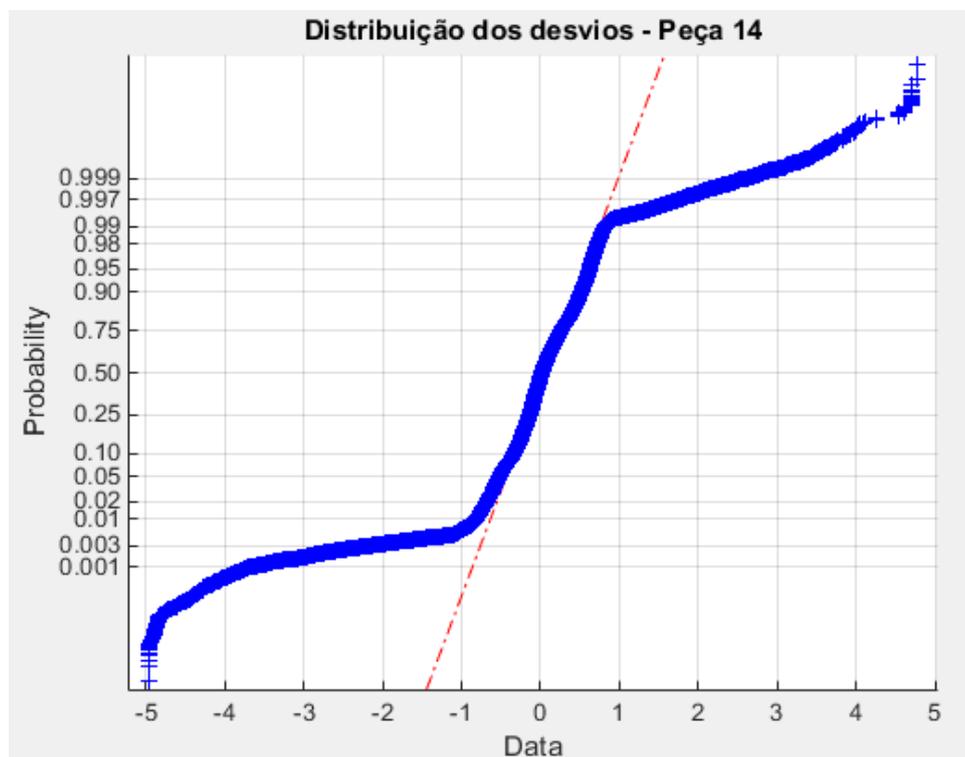


Figura 4.20: Distribuição normal dos desvios da peça 14 antes da aplicação do filtro

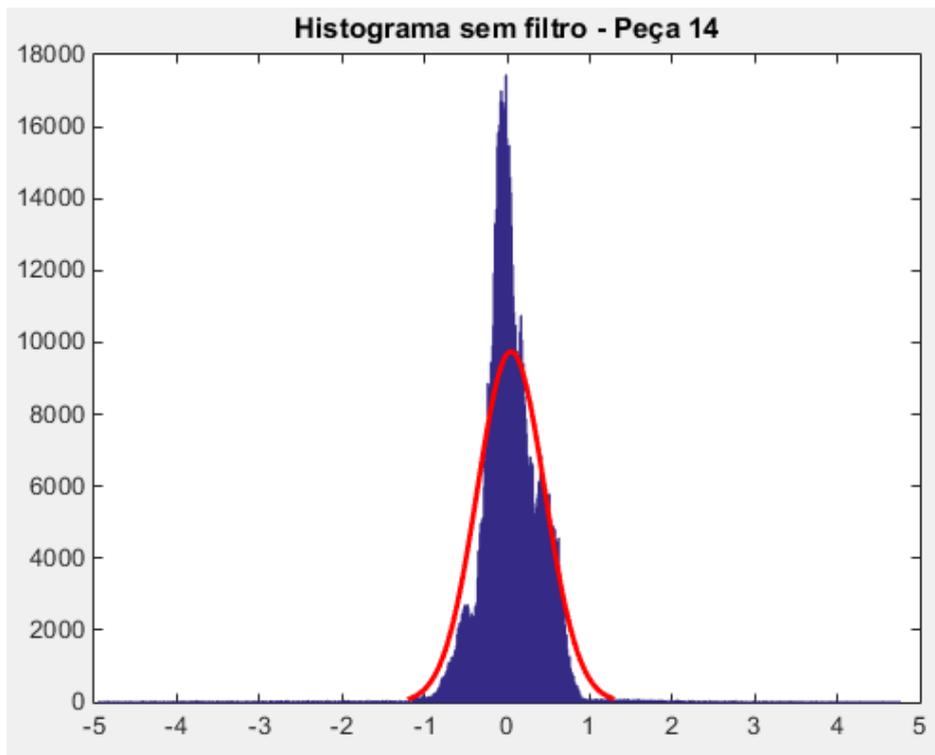


Figura 4.21: Histograma da peça 14 antes da aplicação do filtro

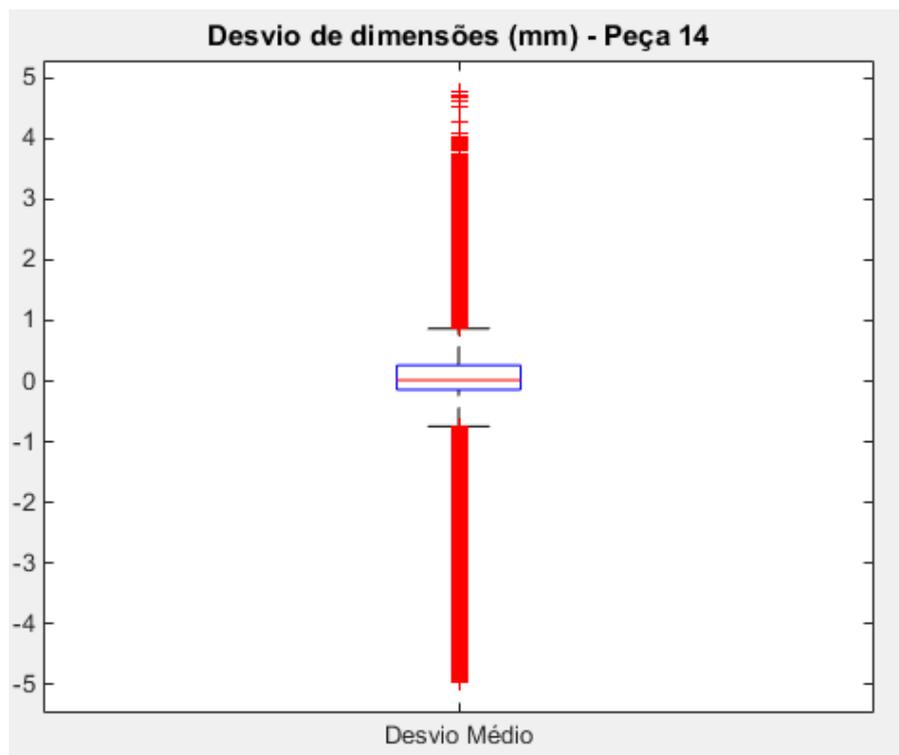


Figura 4.22: Boxplot da peça 14 (lim. sup.: 0,865 mm e lim. inf.: -0,745 mm)

Para a confecção dos gráficos de distribuição dos desvios e histograma após a filtragem utilizou-se o boxplot da Figura 4.22. Com os limites obtidos 2,2% dos pontos foram descartados. Já as Figura 4.23 e Figura 4.24 mostram a distribuição dos desvios e histograma após filtragem.

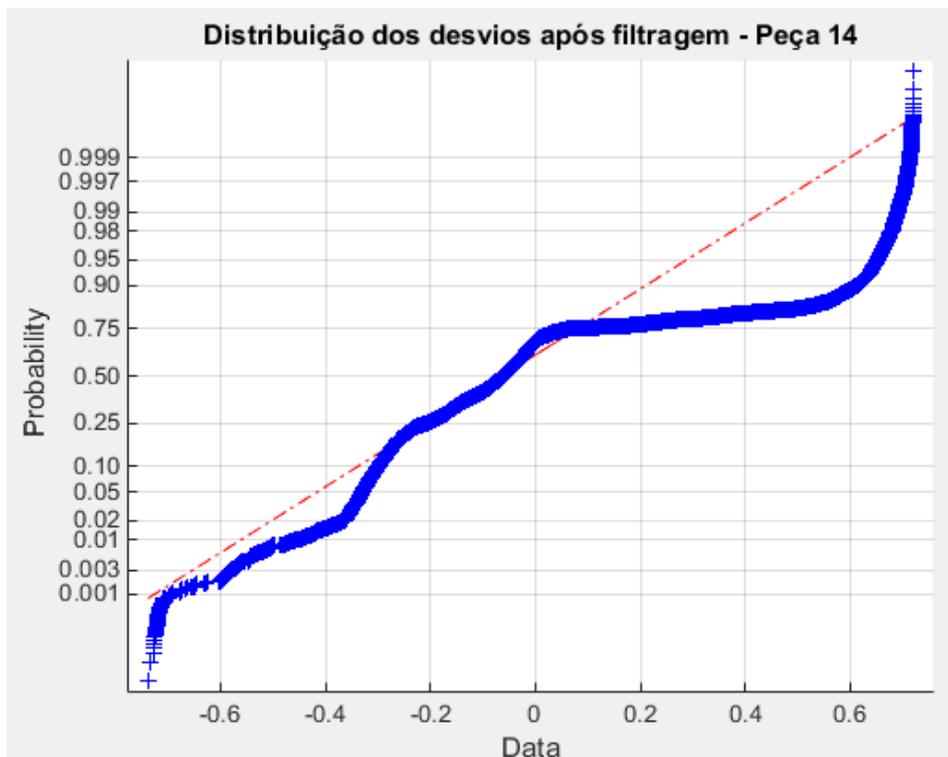


Figura 4.23: Distribuição normal dos desvios da peça 14 após da aplicação do filtro

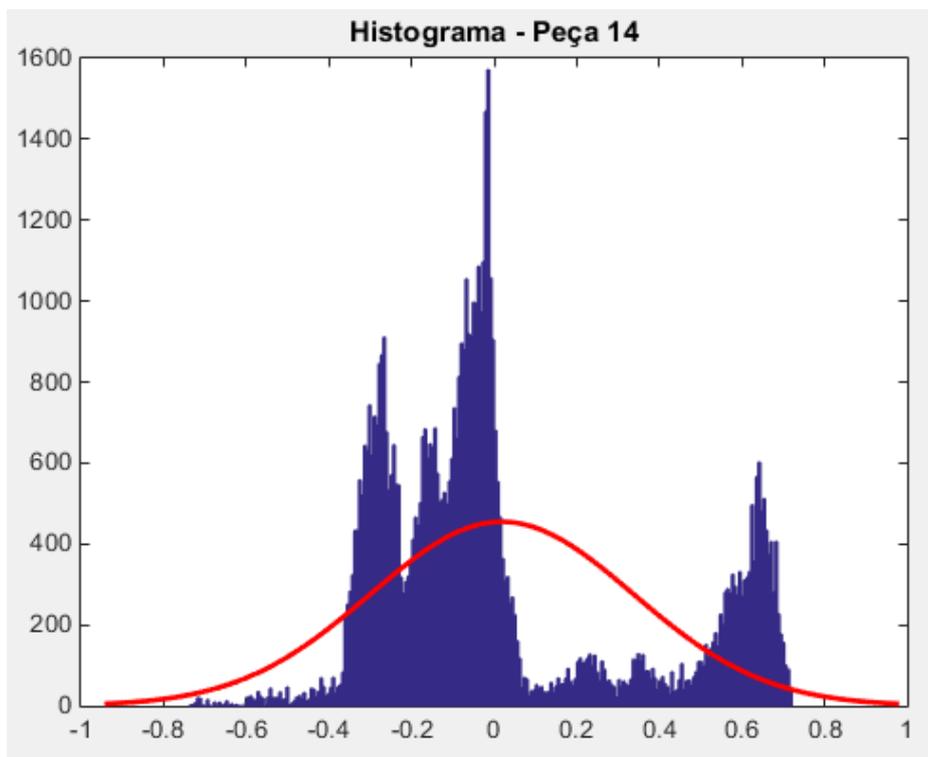


Figura 4.24: Histograma da peça 14 após da aplicação do filtro

Posteriormente, para analisar a influência das variáveis do processo, seguindo o planejamento fatorial fracionário, utilizou-se os dados obtidos no escaneamento. Assim, obteve-se os gráficos apresentados nas Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27, para antes da aplicação do filtro e os gráficos apresentados nas Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30, para depois da aplicação do filtro. Além

disso, verificou-se a influência dessas variáveis sobre o tempo de impressão, como apresentado na Figura 4.31.

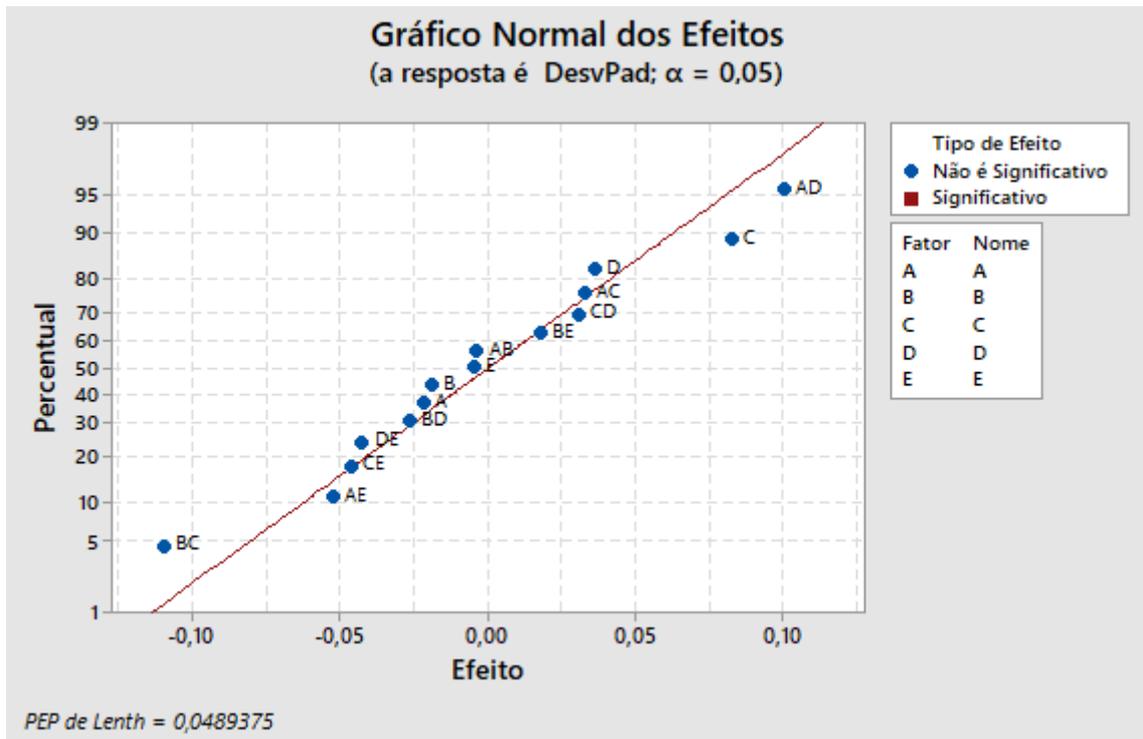


Figura 4.25: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o desvio padrão antes da aplicação do filtro

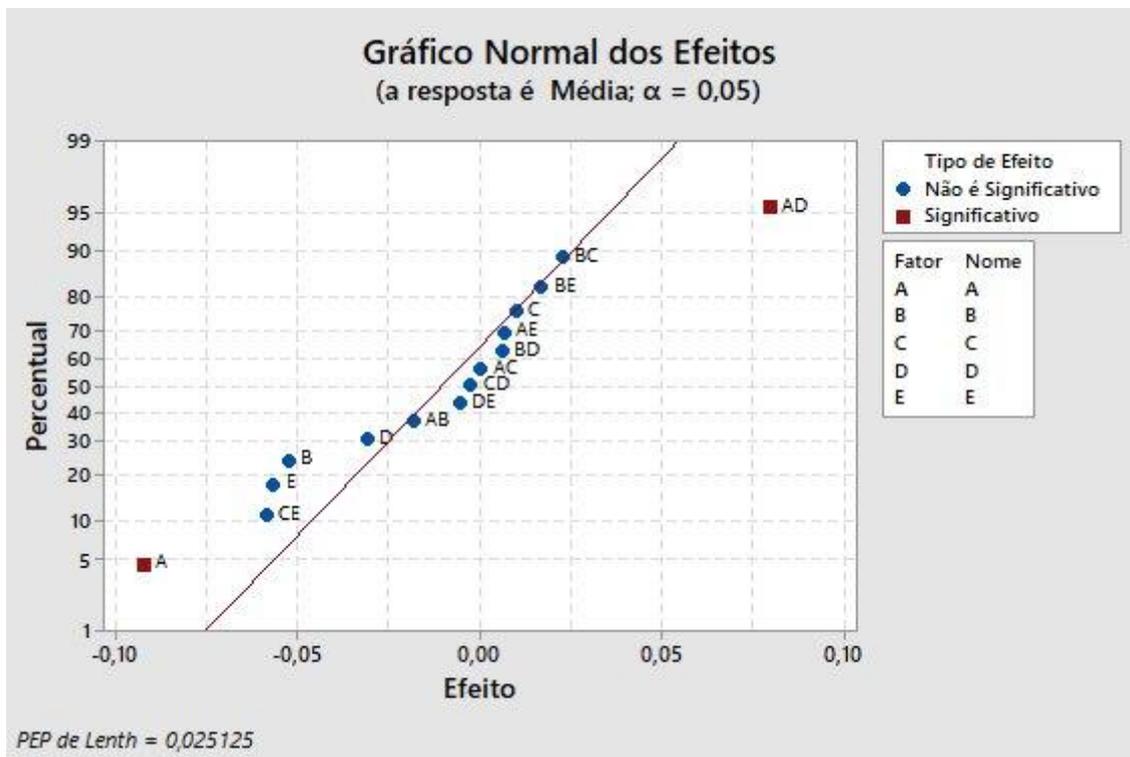


Figura 4.26: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a média antes da aplicação do filtro

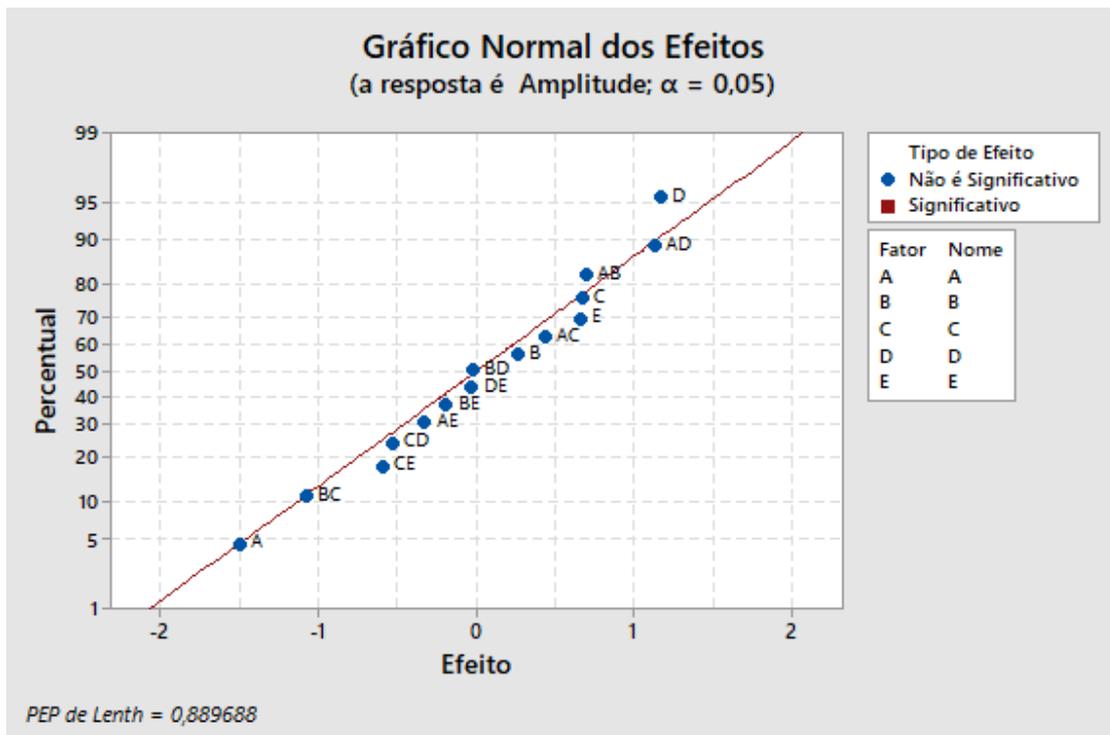


Figura 4.27: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a amplitude antes da aplicação do filtro

Ao se analisar os gráficos apresentados Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27, nota-se que apenas ao se comparar com os dados da média obteve-se resultados significativos, sendo eles a direção e a direção combinada com a altura da camada. Para o desvio padrão, os parâmetros mais consideráveis, mesmo que não sejam significativos, foram a velocidade de impressão, o material combinado com a velocidade de impressão e direção combinado com a altura da camada. Já para a amplitude, as variáveis mais expressivas foram a direção e a altura da camada e a combinação desses fatores.

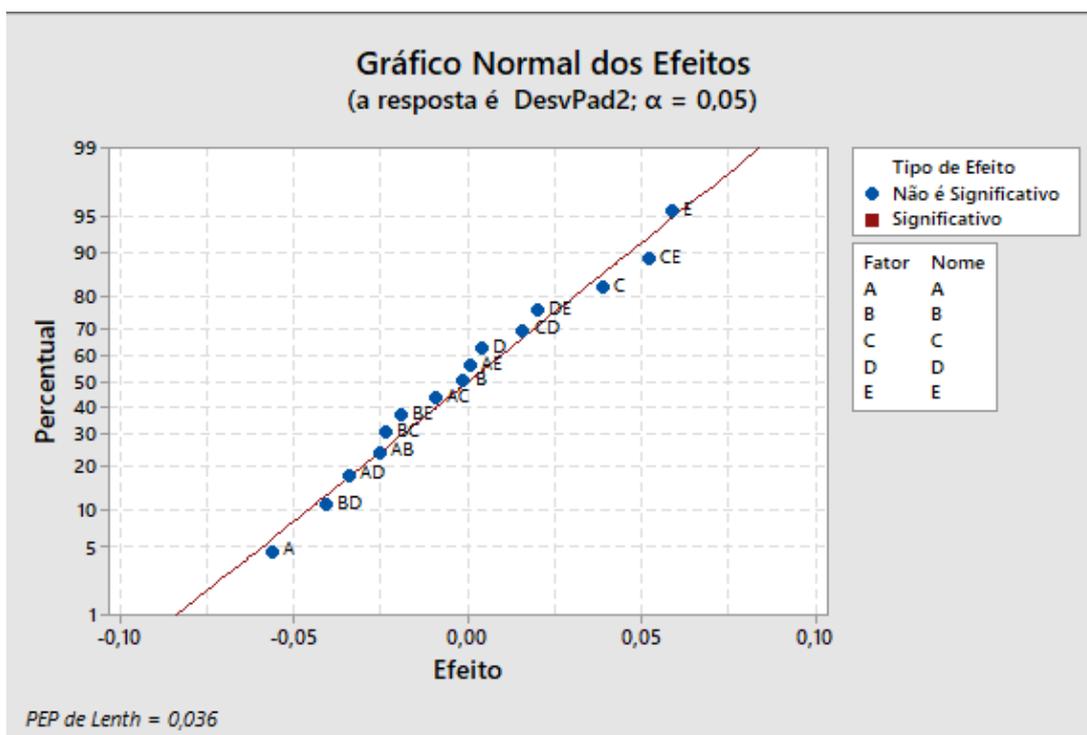


Figura 4.28: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o desvio padrão após a aplicação do filtro

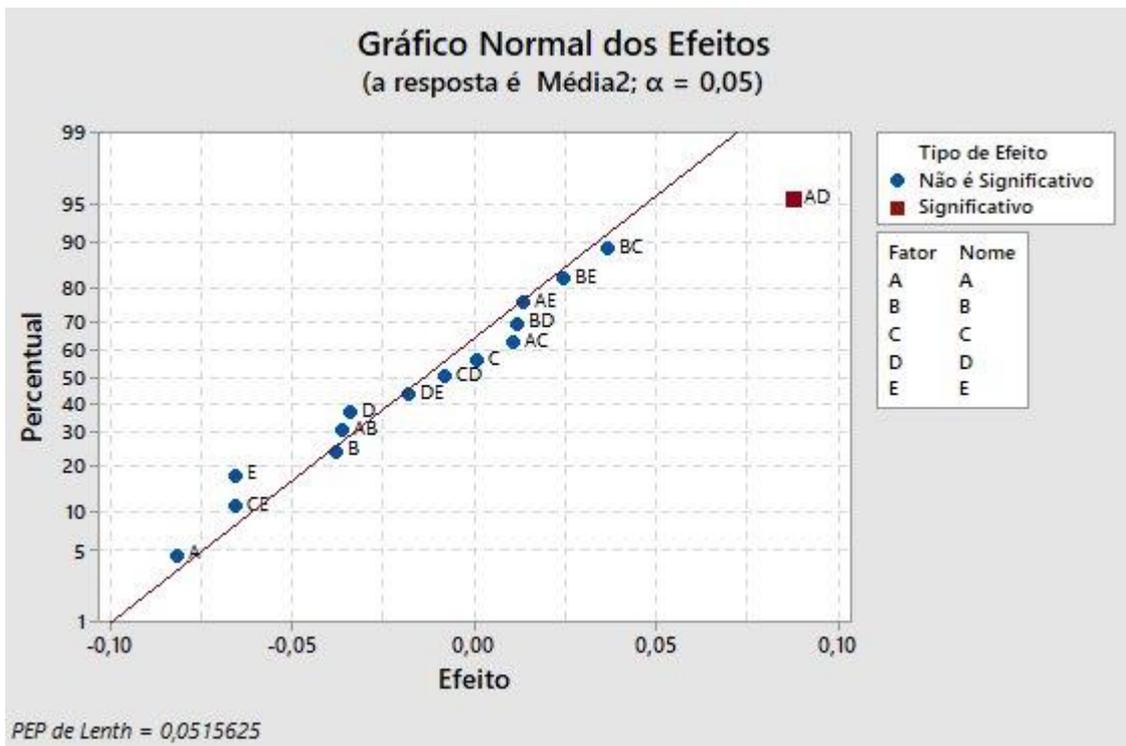


Figura 4.29: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a média após a aplicação do filtro

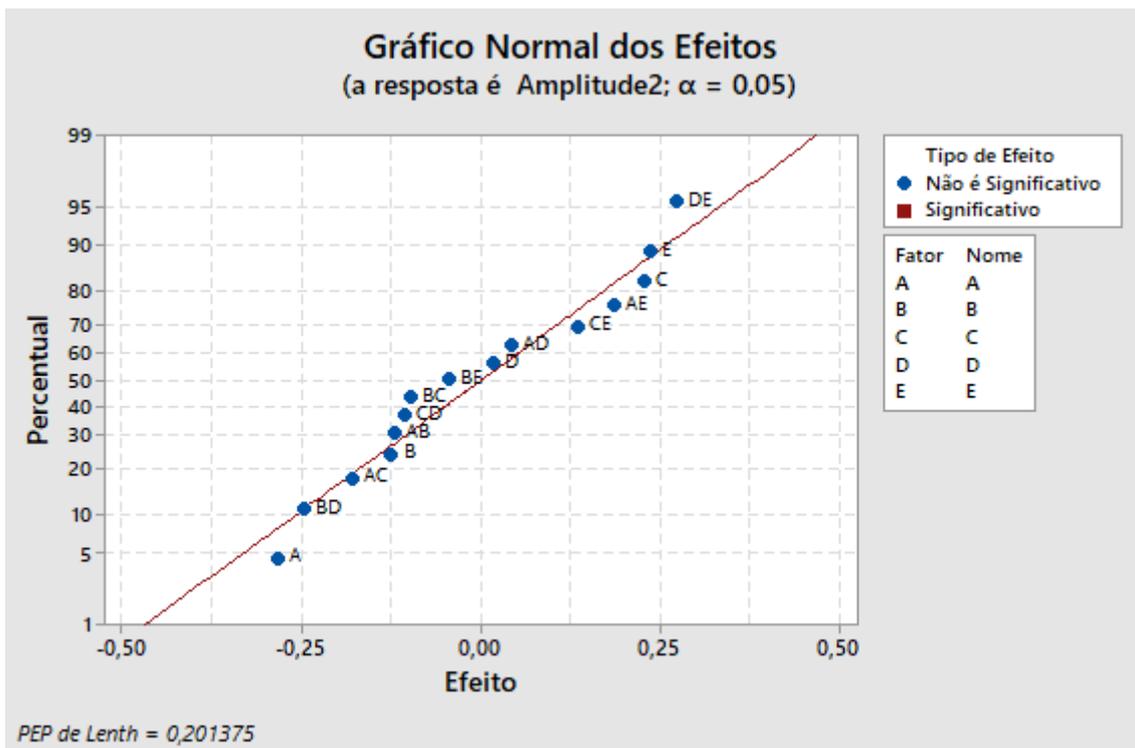


Figura 4.30: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com a amplitude após a aplicação do filtro

Ao se analisar os gráficos apresentados Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30, nota-se que para o desvio padrão, os parâmetros mais consideráveis, mesmo que não sejam significativos, foram a direção, preenchimento, e a velocidade de impressão combinada com o preenchimento. Para a média, a combinação entre a direção e a altura de camada foi significativa. Já para a amplitude, as variáveis mais expressivas foram a direção e a combinação entre altura de camada e preenchimento.

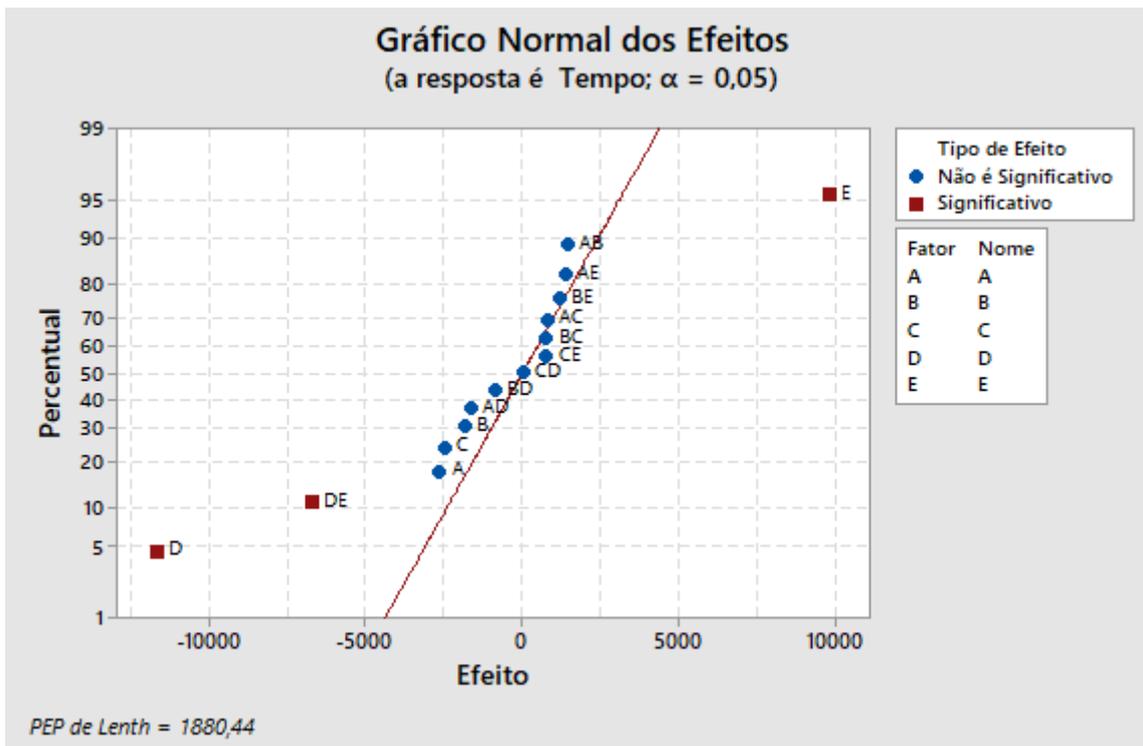


Figura 4.31: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados com o tempo de impressão

Para o tempo, como o gráfico apresentado na Figura 4.31, percebe-se que a altura da camada, o preenchimento e a combinação desses fatores, como já era esperado.

Além do mais, também foram realizadas medições com contato das dimensões a, b, c e d representadas na Figura 4.32, utilizando o paquímetro para cada uma das 16 peças fabricadas. Os valores encontram-se na Tabela 4.2.

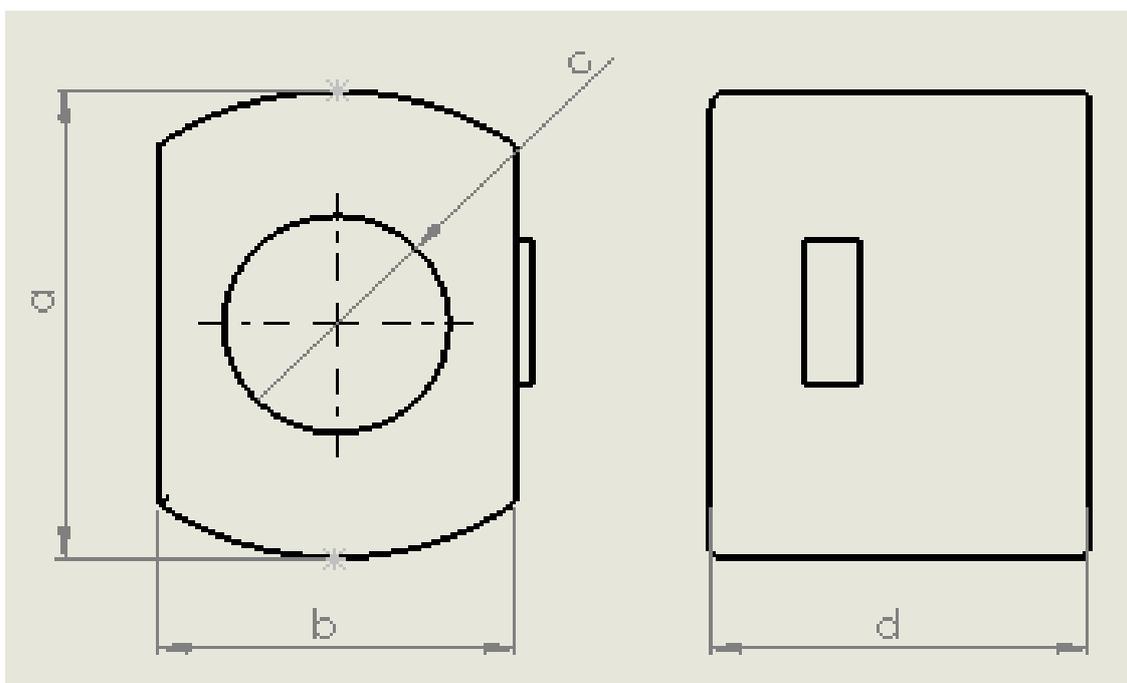


Figura 4.32: Representação das dimensões medidas com o paquímetro

Tabela 4.2: Medidas realizadas com paquímetro

Peça	a		b		c		d	
	X (mm)	S (mm)						
1	51,82	0,04	37,53	0,01	23,81	0,03	40,31	0,02
2	52,17	0,04	38,07	0,03	24,02	0,06	39,96	0,08
3	51,85	0,05	38,23	0,01	23,38	0,04	39,69	0,03
4	51,83	0,07	37,57	0,06	23,61	0,13	40,32	0,22
5	51,88	0,02	38,26	0,07	23,65	0,09	39,74	0,08
6	51,88	0,04	37,73	0,06	23,50	0,04	40,22	0,09
7	51,90	0,03	37,76	0,10	23,27	0,29	40,65	0,12
8	51,98	0,06	38,29	0,07	23,52	0,13	40,04	0,07
9	52,05	0,01	37,83	0,06	23,44	0,06	40,51	0,11
10	52,03	0,03	37,83	0,06	23,53	0,12	40,42	0,14
11	51,99	0,02	37,83	0,06	23,72	0,03	40,50	0,03
12	52,13	0,02	38,53	0,18	23,62	0,06	40,26	0,05
13	51,88	0,05	38,31	0,20	23,52	0,10	40,16	0,02
14	52,03	0,01	38,31	0,08	23,45	0,09	39,89	0,06
15	51,86	0,02	37,61	0,05	23,47	0,27	40,25	0,10
16	52,18	0,06	37,80	0,15	23,69	0,08	40,04	0,02

Para efeito de comparação, mediu-se também a peça original, que foi utilizada para a confecção do modelo CAD. As dimensões dela encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dimensões da Peça Original

Peça Original	a	b	c	d
X (mm)	51,85	37,55	24,20	39,47
S (mm)	0,01	0,02	0,05	0,01

Inicialmente, percebe-se que na maior parte das peças o desvio padrão da dimensão “c”, referente ao furo central, é o maior, pode-se atribuir isso ao fato de que o furo tenha desvios de cilindridade, ou seja, não é um cilindro perfeito. Ao se comparar as dimensões das peças impressas com as dimensões da peça original nota-se que para os intervalos obtidos, nenhuma peça se adequa as dimensões “c” e “d”, referentes ao diâmetro do furo central e a altura, respectivamente. Além disso, 6 delas, se adequam à dimensão “a” e 4 à dimensão “b”, sendo que as peças 1, 4 e 15 se adequam a ambas.

Posteriormente, assim como foi feito a análise dos efeitos por meio das medições do *scanner*, foi feito também para as medições com o paquímetro. Dessa forma, obteve-se os gráficos apresentados nas Figura 4.33 e Figura 4.34, para a dimensão a; nas Figura 4.35 e Figura 4.36, para a dimensão “b”; nas Figura 4.37 e Figura 4.38, para a dimensão “c”; e nas Figura 4.39 e Figura 4.40, para a dimensão “d”

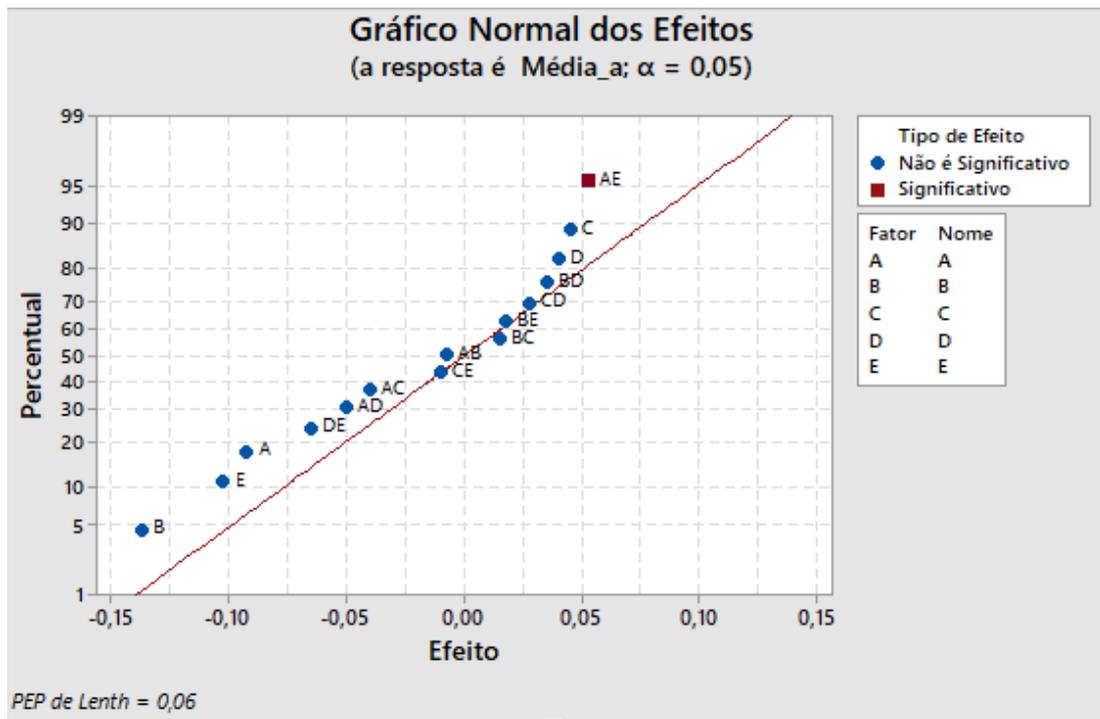


Figura 4.33: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “a”

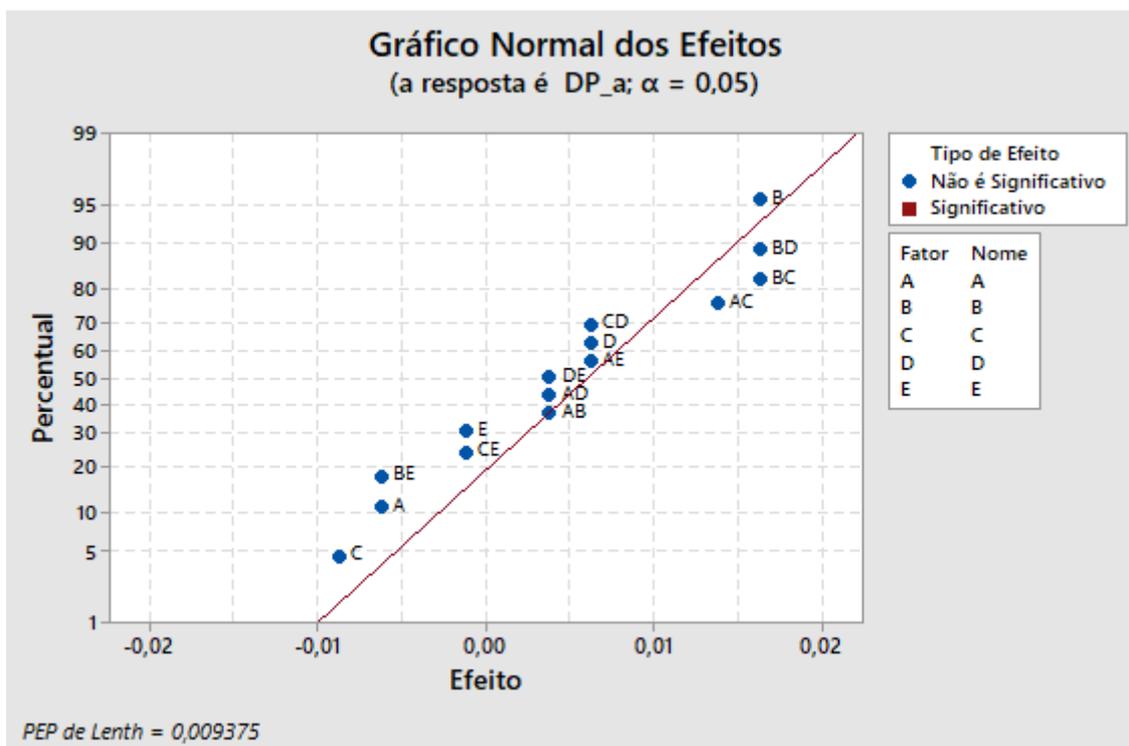


Figura 4.34: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “a”

Para a média na dimensão “a”, como apresentado na Figura 4.33, o único efeito significativo é o AE (combinação entre direção de impressão e preenchimento). Já para o desvio padrão, como apresentado na Figura 4.34, percebe-se que não há efeitos significativos.

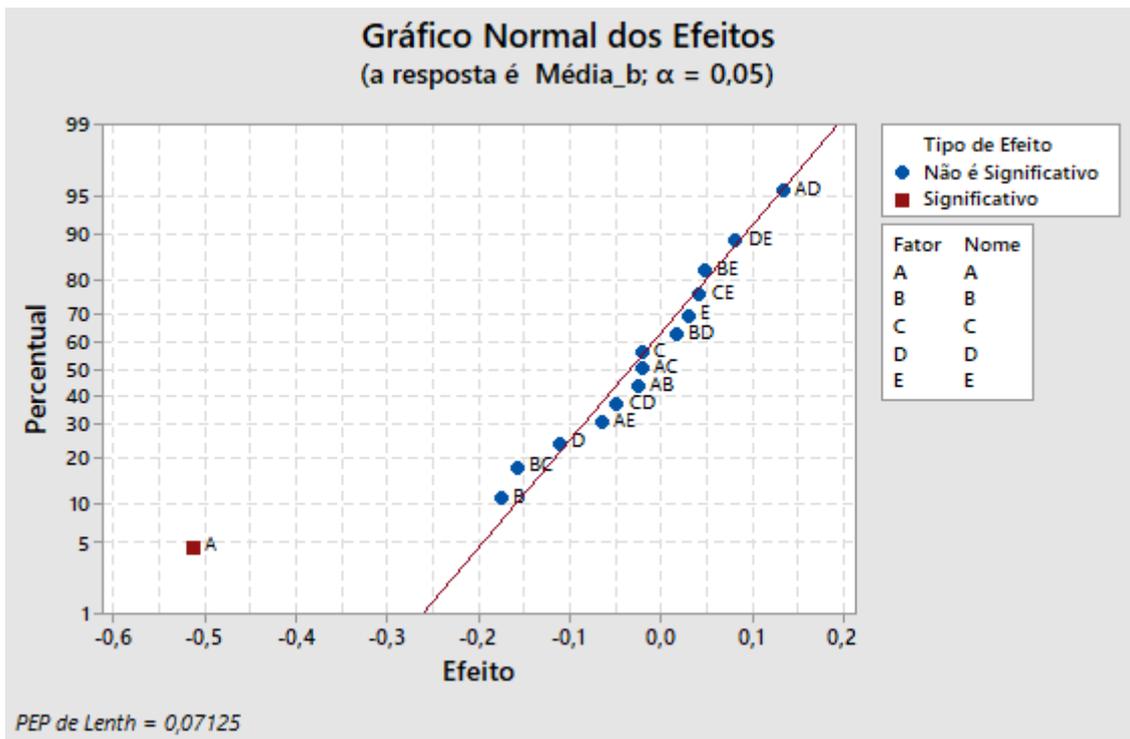


Figura 4.35: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “b”

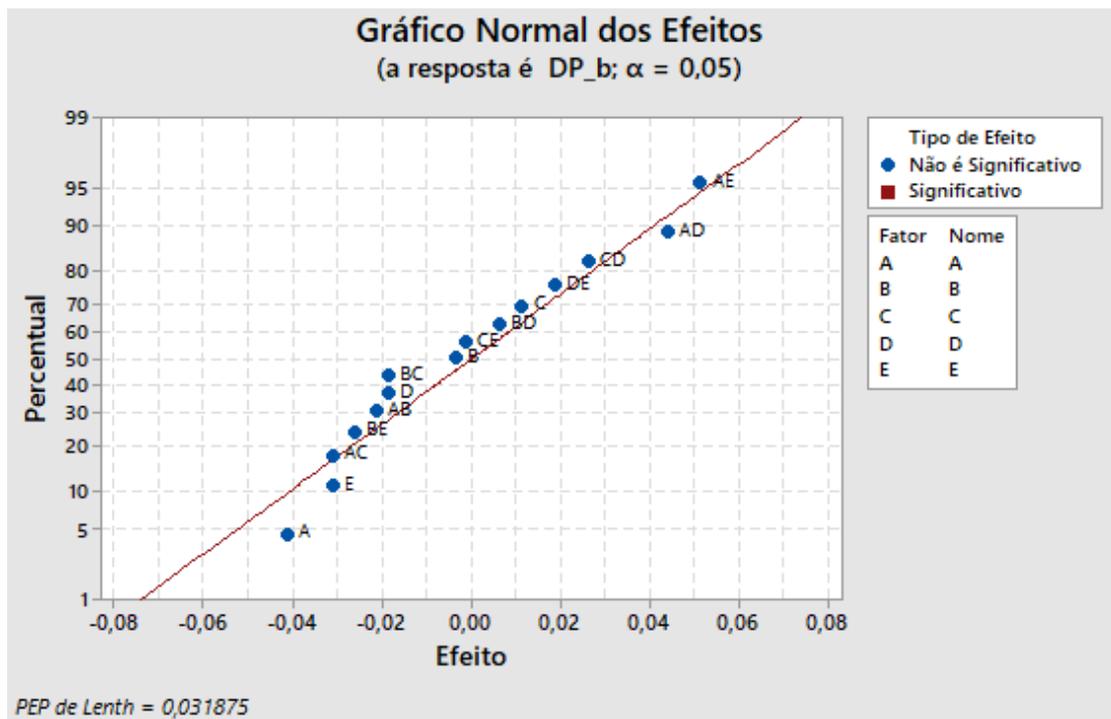


Figura 4.36: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “b”

Para a média na dimensão “b”, como apresentado na Figura 4.35, o único efeito significativo é o A (direção de impressão). Já para o desvio padrão, como apresentado na Figura 4.36, não há efeito significativo.

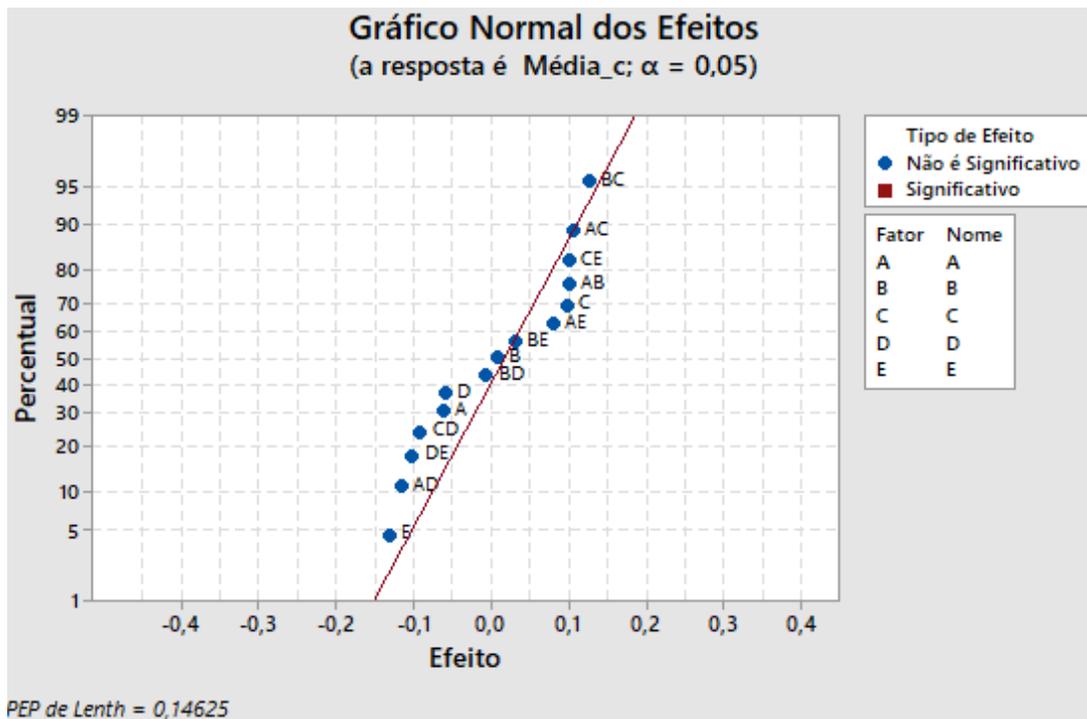


Figura 4.37: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “c”

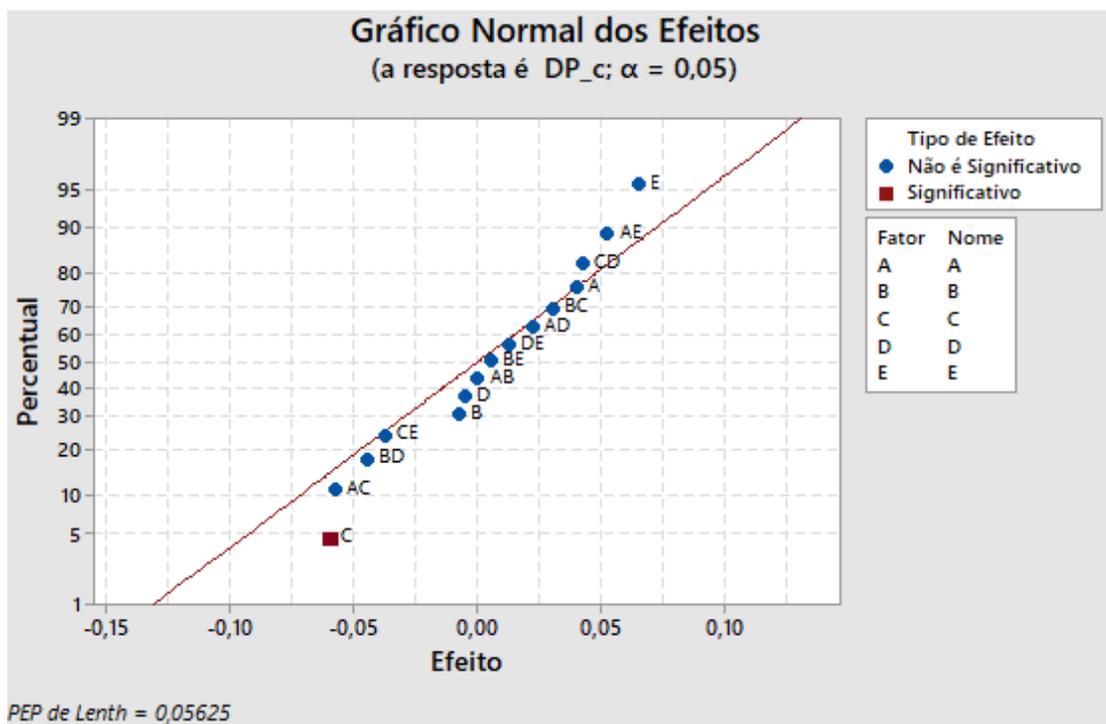


Figura 4.38: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “c”

Para a média dimensão “c”, como apresentado na Figura 4.37 não há efeito significativo. Já para o desvio padrão, como apresentado na Figura 4.38, percebe-se um efeito significativo, C (velocidade de impressão).

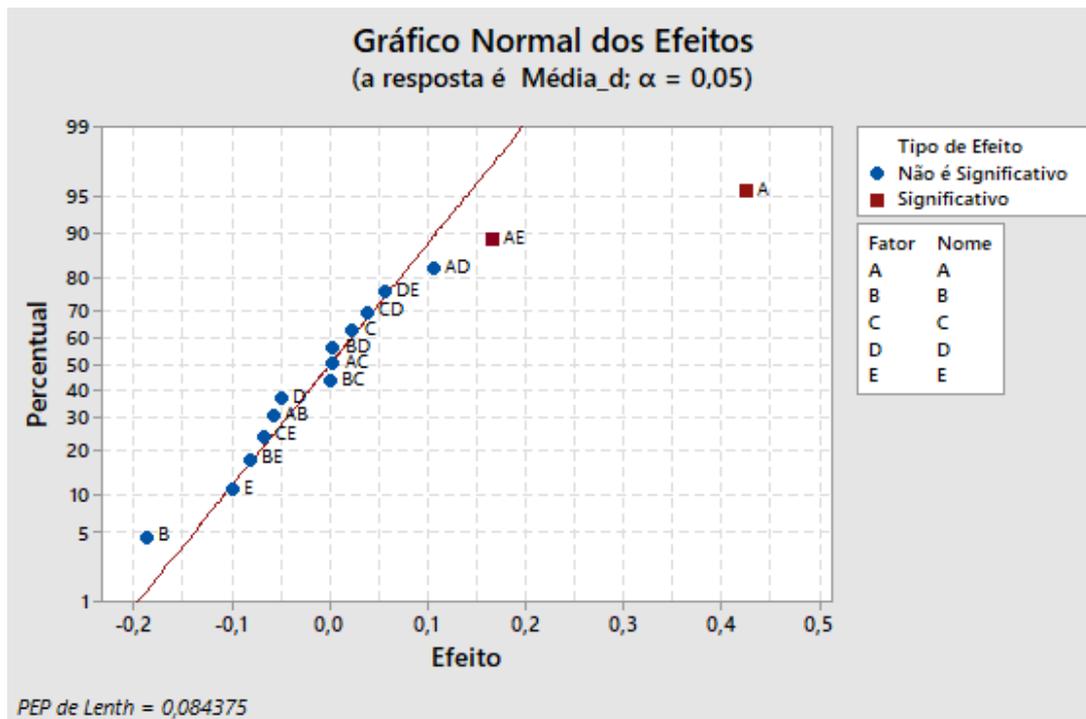


Figura 4.39: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados da média para a dimensão “d”

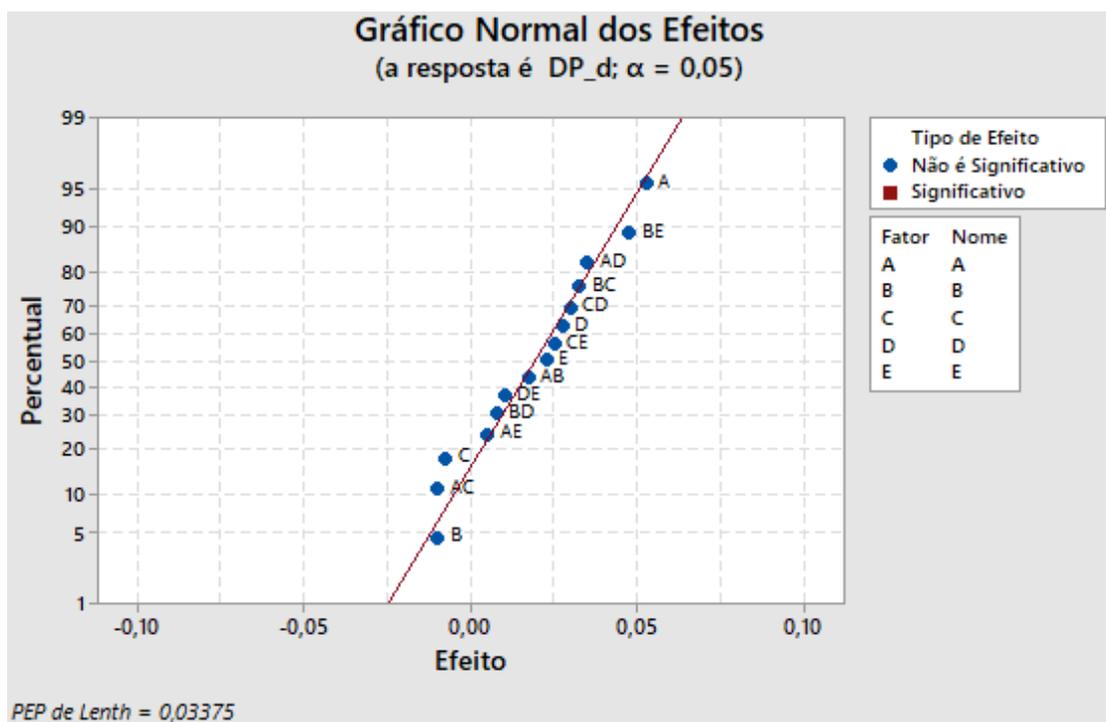


Figura 4.40: Gráfico dos efeitos ao se comparar os dados do desvio padrão para a dimensão “d”

Para a média dimensão “d”, como apresentado na Figura 4.39 percebe-se dois efeitos significativos, sendo eles: A (direção de impressão) e AE (combinação entre direção de impressão e preenchimento). Já para o desvio padrão, como apresentado na Figura 4.40, não há efeito significativo.

Posto isso, pode-se comparar o resultado obtido na análise de desvios com o scanner à análise dos desvios com o paquímetro. Percebe-se que não há uma compatibilidade dos erros significativos, salvo para as médias das dimensões “b” e “d”, que tem o efeito A (direção de impressão) em comum.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta considerações finais a respeito dos resultados alcançados e propostas para o aprofundamento nos temas abordados

Na primeira parte do experimento, utilizando a metodologia proposta foi possível, por meio da aplicação do conceito de engenharia reversa, confeccionar uma bucha por prototipagem rápida e realizar um estudo metrológico comparando suas dimensões com às referentes ao modelo CAD da peça inicial. Este tipo de análise é de extrema importância para avaliar a viabilidade do uso de máquinas de impressão 3D na execução de peças em que as tolerâncias dimensionais são estritamente relevantes.

Para a análise de desvios obtida pela comparação entre a nuvem de pontos e o modelo CAD da peça inicial, os valores de amplitude e desvio padrão diminuíram com a aplicação do filtro. A amplitude caiu de 3,790 mm para 0,004 mm, enquanto para o desvio padrão a queda foi de 0,028 mm a 0,007 mm. Tal resultado mostra que o filtro foi efetivo e eliminou os pontos discrepantes, otimizando a nuvem de pontos. No caso da análise dimensional referente à comparação do modelo CAD da peça original com a nuvem de pontos gerada a partir do escaneamento da peça fabricada por prototipagem rápida, os valores de amplitude e desvio padrão antes da filtragem dos dados foram, respectivamente, 13,170 mm e 0,545 mm. Já a amplitude e o desvio padrão obtidos após a filtragem foram, respectivamente, 0,694 mm e 0,126. Este resultado pode representar de uma boa maneira as dimensões da peça. Os pontos referentes às regiões onde existem defeitos superficiais muito elevados antes da filtragem não eram esperados, pois não condizem com a realidade dimensional da peça. Visto isso, os resultados obtidos após a filtragem apresentam-se mais fiéis ao observados na peça produzida.

Na segunda parte do experimento, a partir da determinação das variáveis em estudo do processo de impressão 3D (material, velocidade de impressão, altura da camada, densidade de preenchimento e orientação do objeto) e de um planejamento experimental fracionado do tipo 2^{k-p} , 16 peças foram fabricadas, cada uma combinando as variáveis de forma distinta, para a realização de uma análise da influência das mesmas na qualidade dimensional das peças.

Uma avaliação qualitativa das peças foi realizada e, por meio desta, foi possível identificar algumas falhas superficiais nas peças. Naquelas em que o preenchimento de 90% está associado ao material ABS, observa-se má formação nas regiões de algumas arestas. Há, também, em algumas peças descolamento das camadas em algumas regiões que possivelmente estão associadas à variáveis ambientais não estudadas.

Comparando as nuvens de pontos recolhidas por meio de medição indireta de cada um dos protótipos com o modelo CAD da peça que as originou, foi possível determinar o desvio padrão, a média e a amplitude dos desvios. Por meio da análise de gráficos de efeitos e probabilidade acumulada, essas medidas de dispersão, bem como o tempo de fabricação foram associadas às

variáveis estudadas. Com isso observou-se que o desvio padrão foi mais afetado pela velocidade, material combinado à velocidade e altura combinada à direção. A média dos desvios foi significativamente influenciada pela direção de impressão e pela combinação de direção e altura de camada. Tratando-se da amplitude, a direção, a altura e a direção combinada à altura foram mais significativas. Já em relação ao tempo a altura de camada, o preenchimento e o preenchimento combinado à altura de camada influenciaram mais expressivamente no resultado.

Após a aplicação do filtro estatístico por meio do boxplot, os efeitos sobre as respostas se modificaram. O desvio padrão passou a ser mais influenciado pela direção, preenchimento e velocidade combinada ao preenchimento. Já a média significativamente pela direção associada à altura de camada. A amplitude passou a ser mais influenciada pela direção, altura da camada e preenchimento.

A partir de medições com contato, utilizando um paquímetro, as dimensões das peças impressas foram comparadas às dimensões da peça utilizada para gerar o modelo CAD. Neste caso, observou-se diferenças relevantes nas medidas das peças, sobretudo quando se refere ao diâmetro do furo presente na peça. Este fato pode ser decorrente de fenômenos relacionados ao escaneamento, como por exemplo a reflexibilidade dos feixes de laser. Além disso, outras variáveis não estudadas neste trabalho, como por exemplo as condições ambientais do local de impressão, podem ter interferido. Dessa forma, percebe-se que as variáveis que mais influenciaram os desvios dimensionais foram o preenchimento e a direção de impressão, para medição com contato e sem contato.

Como sugestões para a continuidade deste trabalho, têm-se a avaliação de variáveis ambientais na qualidade dimensional das peças produzidas por prototipagem rápida e uma análise de mais níveis das variáveis estudadas neste trabalho, por exemplo a utilização de outros materiais, como o PET e o Nylon. Há, também, a possibilidade de se iniciar o estudo das variáveis com um modelo construído diretamente num software, sem a utilização do *scanner*, com a finalidade de separar os erros associados à medição sem contato com as associadas à impressão.

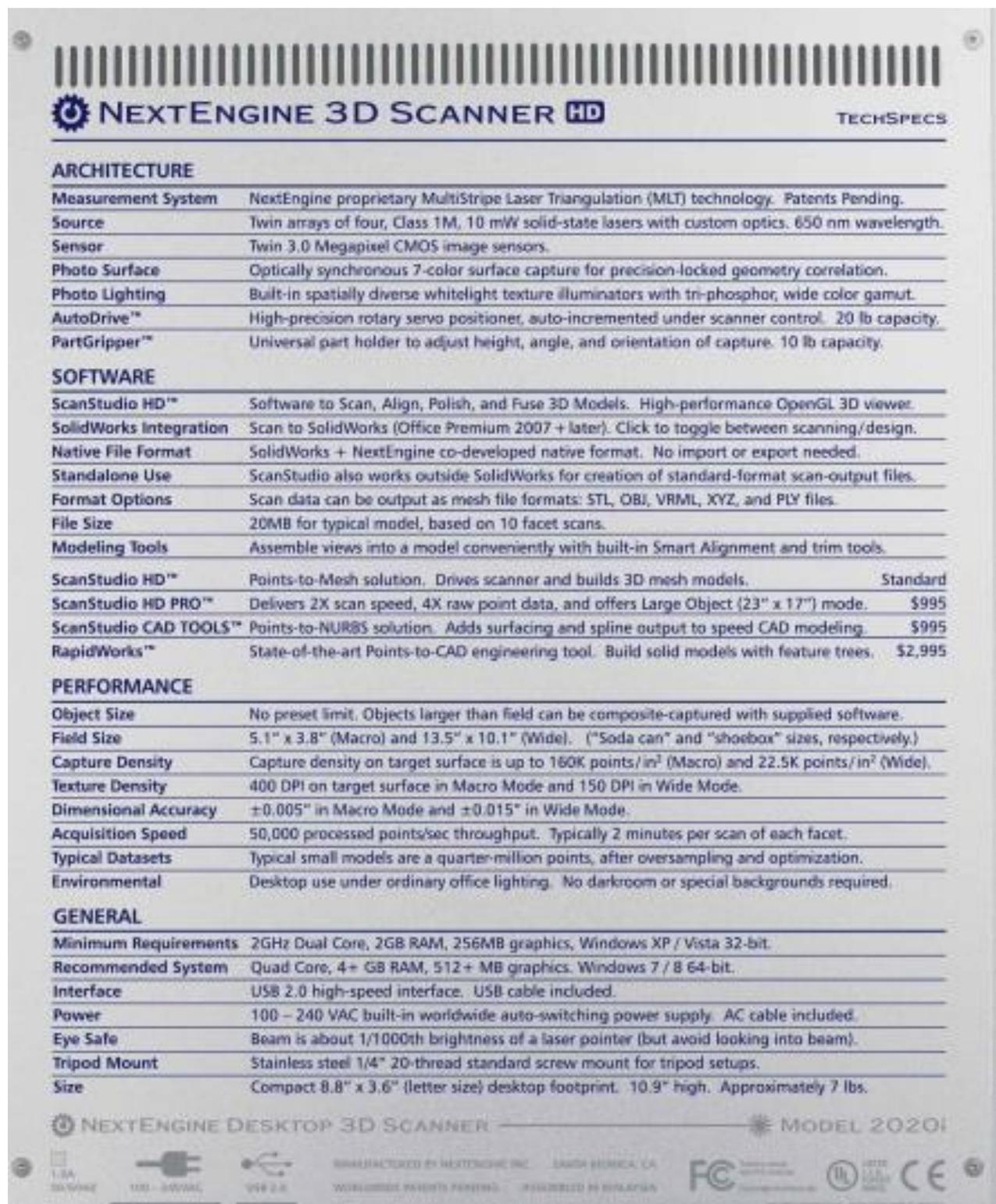
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARNIO, S. **Rapid prototyping**. n. February, p. 2–40. Cottbus, 2010.
- ALBERTIN, Marcos Ronaldo e SOARES JÚNIOR, Luiz e SILVA, João Bosco de Aquino. **Uma proposta para garantia da qualidade metrológica em peças de geometria complexa**. Revista GEPROS, n. 3, p. 147. Fortaleza: 2012. Disponível em: <<http://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/767>>.
- ARENHART, Francisco Augusto. **Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro**. ABCM-Yehan Numata. Florianópolis: 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro. 1997.
- AZEVEDO, Fábio Mariotto De. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. São Carlos, 2013. 48 f. 2013.
- AZWAN, S.S. e colab. **The Effect of Surface Finish on Sculptured Shape Utilizing Scanned Data-Reversed Engineering (CATIA V5 & DELCAM)**. MATEC Web of Conferences, v. 97, Melaka: 2017.
- AZWAN, Sundi Syahrul e SYAFIK, Jumali Muhammad e RAZLY, Raffay Mohamad. **An investigation on the surface finish of sculptured surface utilizing reverse engineering data of crank case cover – (CATIA V5 & DELCAM)**. MATEC Web Conf., v. 1062, p. 1–8. Melaka: 2017. Disponível em: <http://www.matecconferences.org/articles/matecconf/abs/2017/04/matecconf_aigev2017_01062/matecconf_aigev2017_01062.html>.
- COSTA, Francisco Soares da. **Estudo de ganhos de produtividade e de qualidade em máquinas CNC com o uso de sistemas Toolsetter Laser**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/214>>
- DALTON, Graham. **Reverse engineering using laser metrology**. Sensor Review, v. 18, n. 2, p. 92–96. Manchester, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/02602289810209867>>
- ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA, **3D Printing**. 2016. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/3D-printing>>
- FARIAS, De Lima Maria Ana. **O Boxplot**. p. 1–9, Departamento de Estatística. Niterói: UFF, 2010.
- FDA. **Technical Considerations for Additive Manufactured Medical Devices - Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff**. [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.fda.gov/downloads/MedicalDevices/DeviceRegulationandGuidance/GuidanceDocuments/UCM499809.pdf>>.
- HAMBURG-PIEKAR, Daniel Samuel. **Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas**. p. 167, 2006.
- Jiang, X. et al 2007, “Freeform Surface Characterization – A Fresh Strategy”, Annals of the CIRP, Vol.56, pp. 553-556
- JUN, Guo. **Using 3D Scanning in 3D Character Modeling and Game Figure Production**. 2008.
- KRUTH, J. P. **Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques**. v. 40. Lovaina: 1991.
- LIRA, Valdemir Martins. **Desenvolvimento de Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais**

- alternativos.** p. 199, 2008.
- MAHINDRU & MAHENDRU. **Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future.** Global Journal Of Computer Science And Technology Graphics {&} Vision, v. 13, n. 4, p. 27–38, 2013. Disponível em: <<http://computerresearch.org/stpr/index.php/gjcst/article/viewArticle/1435>>.
- MATTOS,VIVIANE LEITE DIAS DE *et al.* **Identificação de efeitos de dispersão em experimentos fatoriais 2.** *Produção*, v. 14, n. 2, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v14n2/prodv14n2a3.pdf>>.
- MINETTO, Ciliane de Fátima. **Um Estudo sobre Curvas NURBS.** p. 114, Porto Alegre. 2003. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3686/000391255.pdf?sequence=1>>.
- PHAM, D T e GAULT, R S. **A comparison of rapid prototyping technologies.** v. 38, p. 1257–1287, Cardiff: 1998.
- PINTO, Tiago Loureiro Figaro da Costa. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão.** p. 189, 2010.
- PIRATELLI-FILHO, Antonio; DI GIACOMO, Benedito. **CMM uncertainty analysis with factorial design.** *Precision Engineering*, v. 27, n. 3, p. 283–288, 2003.
- RIPKA, Pavel e TIPEK, Alois. **Modern Sensors Handbook.** [S.l: s.n.], 2007.
- SAVIO,et al. **Metrology of freeform shaped parts.** v. 56, n. 2, p. 810–835. Aachen: 2007.
- SILVA, Rfa. **Projeto E Desenvolvimento De Um Sistema De Medição Sem Contato Aplicado Ao Processo De Torneamento.** Btd.Biblioteca.Ufpb.Br, 2011. Disponível em: <http://btd.biblioteca.ufpb.br/tde_arquivos/20/TDE-2012-01-16T081600Z-1377/Publico/arquivototal.pdf>.
- SOARES JÚNIOR, Luiz e SILVA, João Bosco de Aquino. **Especificação e controle de tolerância de geometrias complexas e superfícies com forma livre.** n. 2005, 2010.
- TORMAN, Vanessa Bielefeldt Leotti; COSTER, Rodrigo; RIBOLDI, João. **Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação.** *Revista HCPA*, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012.
- VOLPATO, Neri et al. (Org.). **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações.** 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2007. 272 p

7 ANEXOS

		Págs
Anexo I	Especificações técnicas do Scanner 3D NextEngine	76
Anexo II	Especificações técnicas da Impressora 3D Tronxy P802EA	77



NEXTENGINE 3D SCANNER HD TECHSPECS

ARCHITECTURE

Measurement System	NextEngine proprietary MultiStripe Laser Triangulation (MLT) technology. Patents Pending.
Source	Twin arrays of four, Class 1M, 10 mW solid-state lasers with custom optics. 650 nm wavelength.
Sensor	Twin 3.0 Megapixel CMOS image sensors.
Photo Surface	Optically synchronous 7-color surface capture for precision-locked geometry correlation.
Photo Lighting	Built-in spatially diverse whitelight texture illuminators with tri-phosphor, wide color gamut.
AutoDrive™	High-precision rotary servo positioner, auto-incremented under scanner control. 20 lb capacity.
PartGripper™	Universal part holder to adjust height, angle, and orientation of capture. 10 lb capacity.

SOFTWARE

ScanStudio HD™	Software to Scan, Align, Polish, and Fuse 3D Models. High-performance OpenGL 3D viewer.	
SolidWorks Integration	Scan to SolidWorks (Office Premium 2007 + later). Click to toggle between scanning/design.	
Native File Format	SolidWorks + NextEngine co-developed native format. No import or export needed.	
Standalone Use	ScanStudio also works outside SolidWorks for creation of standard-format scan-output files.	
Format Options	Scan data can be output as mesh file formats: STL, OBJ, VRML, XYZ, and PLY files.	
File Size	20MB for typical model, based on 10 facet scans.	
Modeling Tools	Assemble views into a model conveniently with built-in Smart Alignment and trim tools.	
ScanStudio HD™	Points-to-Mesh solution. Drives scanner and builds 3D mesh models.	Standard
ScanStudio HD PRO™	Delivers 2X scan speed, 4X raw point data, and offers Large Object (23" x 17") mode.	\$995
ScanStudio CAD TOOLS™	Points-to-NURBS solution. Adds surfacing and spline output to speed CAD modeling.	\$995
RapidWorks™	State-of-the-art Points-to-CAD engineering tool. Build solid models with feature trees.	\$2,995

PERFORMANCE

Object Size	No preset limit. Objects larger than field can be composite-captured with supplied software.
Field Size	5.1" x 3.8" (Macro) and 13.5" x 10.1" (Wide). ("Soda can" and "shoebox" sizes, respectively.)
Capture Density	Capture density on target surface is up to 160K points/in ² (Macro) and 22.5K points/in ² (Wide).
Texture Density	400 DPI on target surface in Macro Mode and 150 DPI in Wide Mode.
Dimensional Accuracy	±0.005" in Macro Mode and ±0.015" in Wide Mode.
Acquisition Speed	50,000 processed points/sec throughput. Typically 2 minutes per scan of each facet.
Typical Datasets	Typical small models are a quarter-million points, after oversampling and optimization.
Environmental	Desktop use under ordinary office lighting. No darkroom or special backgrounds required.

GENERAL

Minimum Requirements	2GHz Dual Core, 2GB RAM, 256MB graphics, Windows XP / Vista 32-bit.
Recommended System	Quad Core, 4+ GB RAM, 512+ MB graphics, Windows 7 / 8 64-bit.
Interface	USB 2.0 high-speed interface. USB cable included.
Power	100 – 240 VAC built-in worldwide auto-switching power supply. AC cable included.
Eye Safe	Beam is about 1/1000th brightness of a laser pointer (but avoid looking into beam).
Tripod Mount	Stainless steel 1/4" 20-thread standard screw mount for tripod setups.
Size	Compact 8.8" x 3.6" (letter size) desktop footprint. 10.9" high. Approximately 7 lbs.

NEXTENGINE DESKTOP 3D SCANNER — MODEL 2020i

 1-8A
 100 – 240VAC
 USB 2.0
 MANUFACTURED BY NEXTENGINE INC. SANJOSE, CALIFORNIA, USA
 WORLDWIDE PATENTS PENDING. ASSEMBLED IN MALAYSIA
  

Specification

Structure	: Acrylic
Nozzle Qty	: 1
Print Size	: 220x220x210mm
Print Accuracy	: 0.1~0.4mm
print support	: USB/SD Card
LCD Screen	: Support
X,Y Axis Speed	: 3000mm/min
Z Axis Speed	: 200mm/min
Print Speed	: 40~120mm/s
Nozzle Diameter	: 0.4mm(Default)
Nozzle Temp	: 170~260°C
hotbed Temp	: 0~110°C
Print table	: Aluminium
X,Y Axis Accuracy	: 0.012mm
Z Axis Accuracy	: 0.004mm
Filament Diameter	: 1.75mm

Filament	: PLA/ABS/PVC/PA/PVA/TPU/C and so on
File Format	: STL, G-Code
Machine Size	: 450x430x410mm
Package Size	: 460x410x200mm
Machine Weight	: 8KG
Power	: AC110/240V DC12V 15A
Operating System	: WinXP/Win7/MacOS
Print Software	: Repetier-Host/Cura/Slic3r
Environment	: Temp (0~30) Humidity (20~50%)
Software Language	: English/Russian/Spanish and so on

Machine



8 APÊNDICES

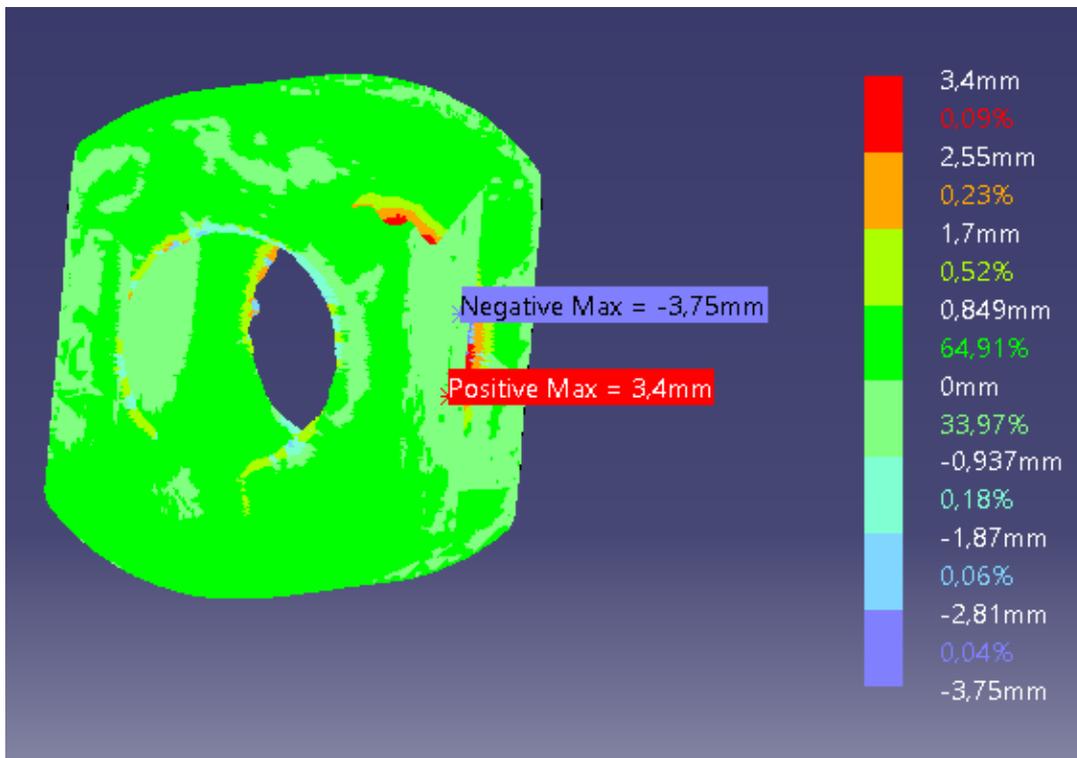
		Págs
Apêndice I	Código Matlab para filtragem dos dados e plotagem dos gráficos	80
Apêndice II	Análise dos desvios no Catia das 16 peças impressas	81-88
Apêndice III	Gráficos de histograma, distribuição dos desvios e boxplot das 16 peças impressas	89-128

```
%Universidade de Brasília
%Projeto de Graduação 2
%Desvios

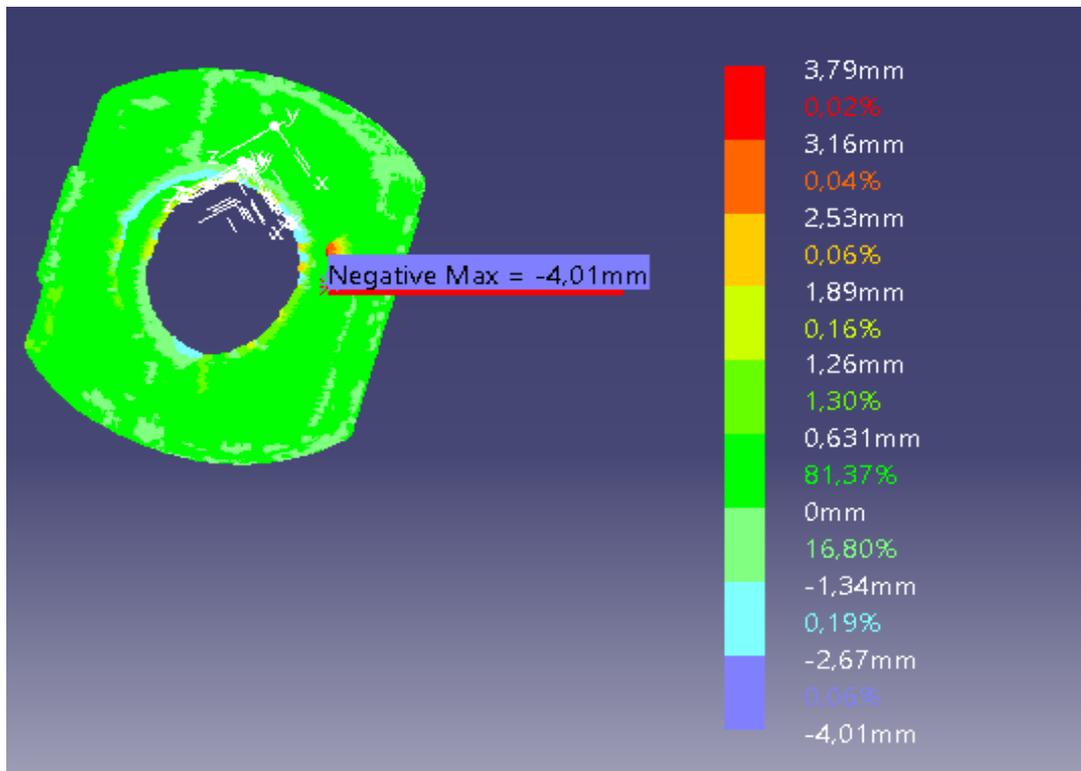
nome = {'Desvio Médio'};
dmedio = VarName1;
normplot(dmedio)
title('Distribuição dos desvios - Peça 14');
boxplot(dmedio, nome)
title('Desvio de dimensões (mm) - Peça 1');
    histfit(VarName1)
    title('Histograma sem filtro - Peça 14')
desviopadrao1 = std(dmedio);
medial = median(VarName1)
n_pontos = length(dmedio);
lim_sup = 0.86483;
lim_inf = -0.74484;
for k = 1:n_pontos
    if (dmedio(k) < lim_sup) && (dmedio(k) > lim_inf)
        d_aceitavel(k) = dmedio(k);
    end
end
A = d_aceitavel';
    fprintf('%f\n',A)

desviopadrao2 = std(VarName2)
media2 = median(VarName2)
histfit(VarName2)
title('Histograma - Peça 14')
normplot(VarName2)
title('Distribuição dos desvios após filtragem - Peça 14')
```

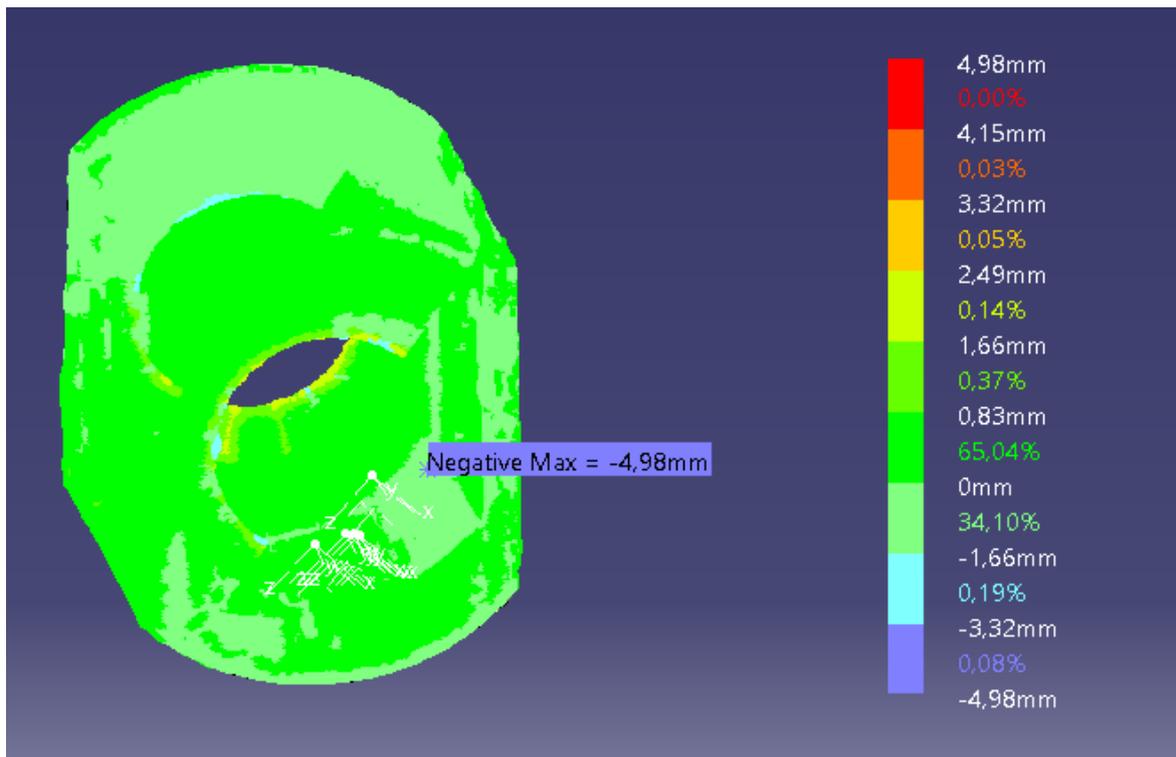
Peça 1



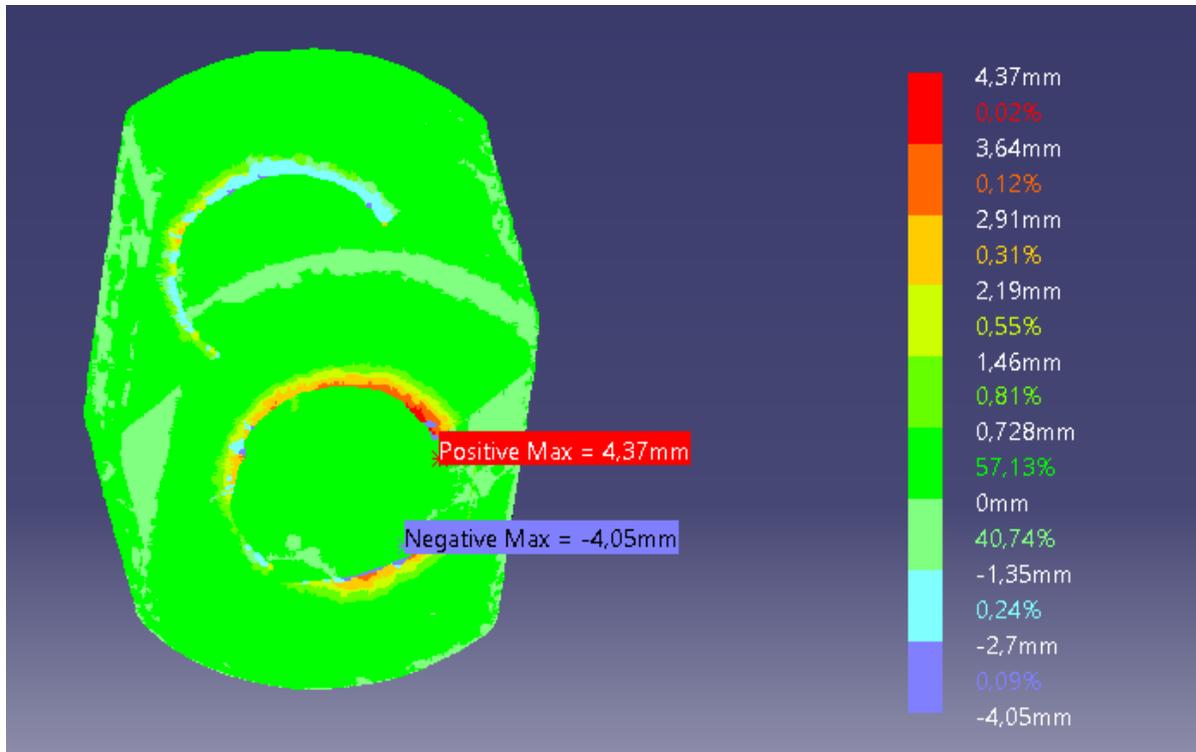
Peça 2



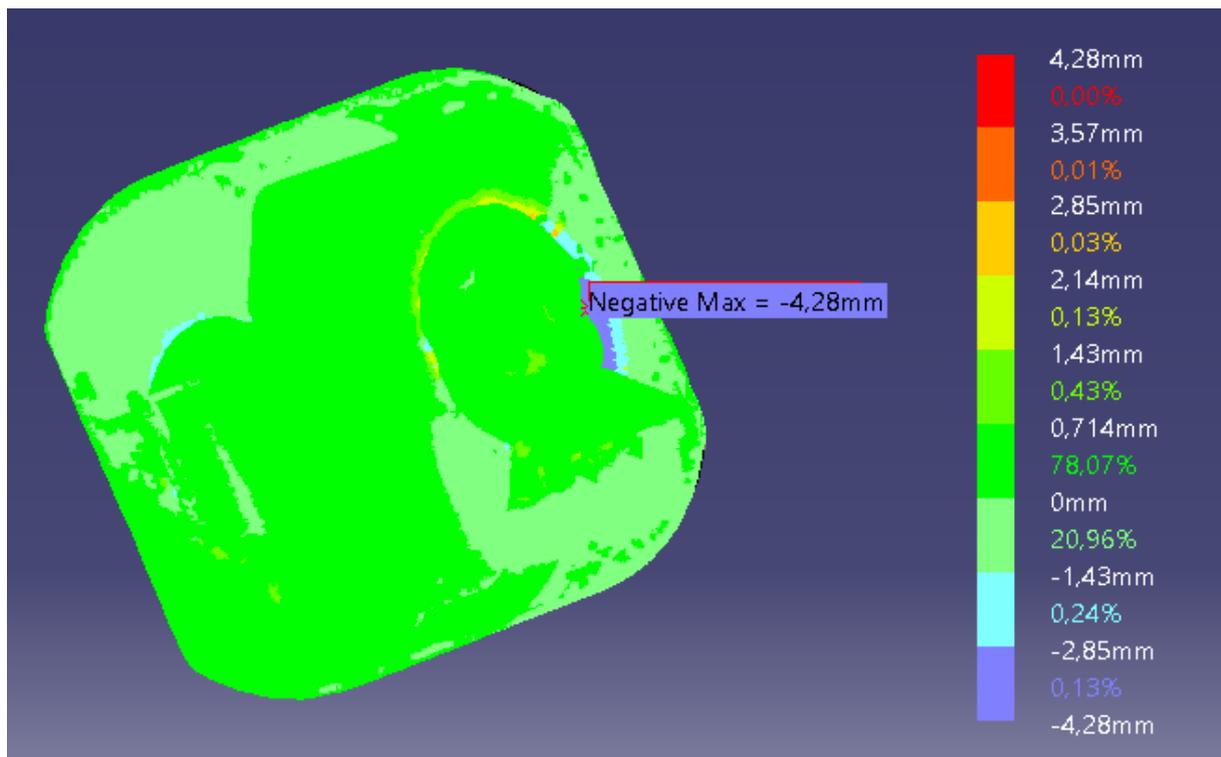
Peça 3



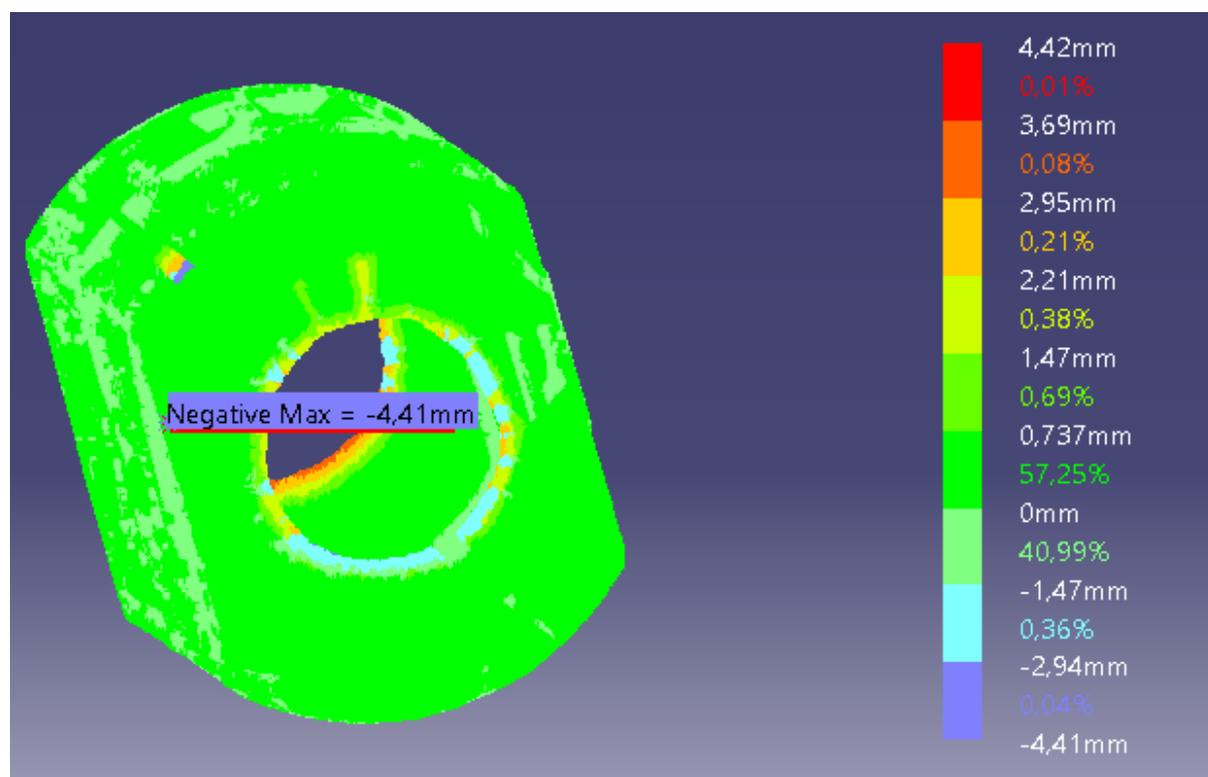
Peça 4



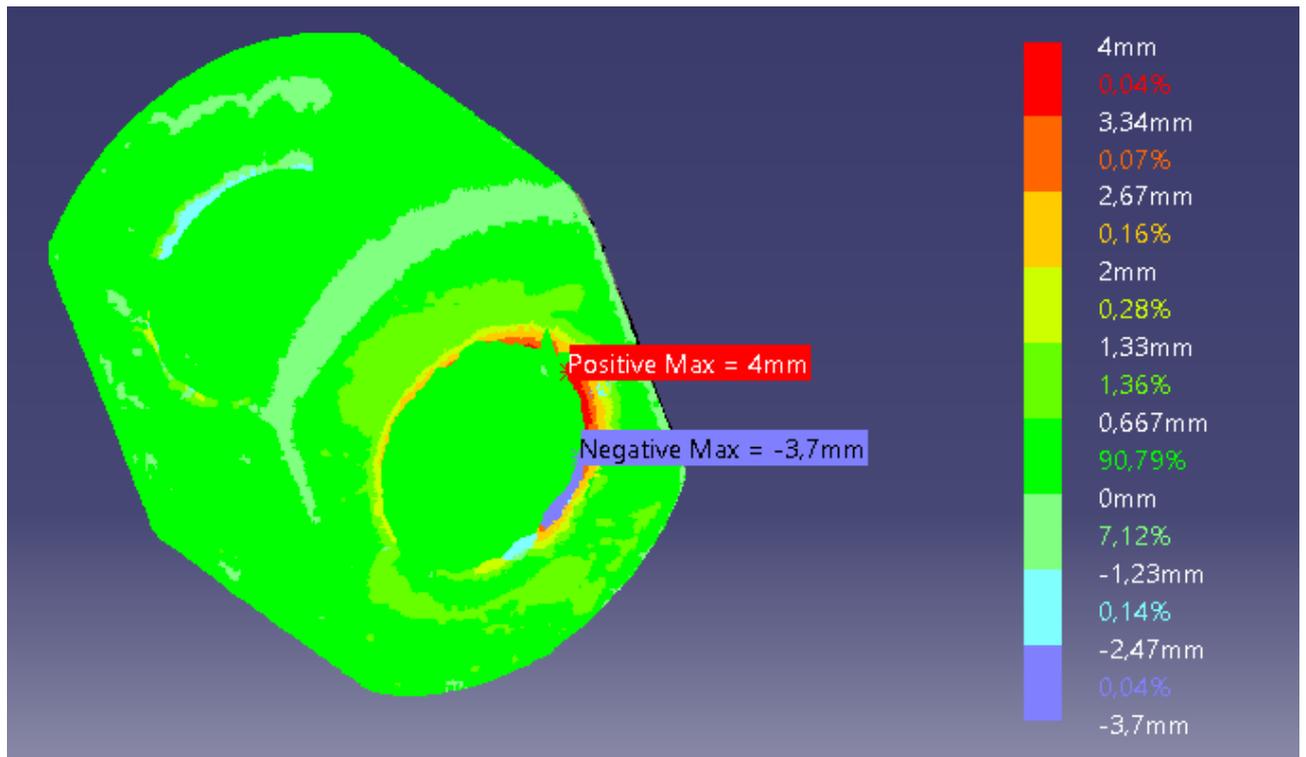
Peça 5



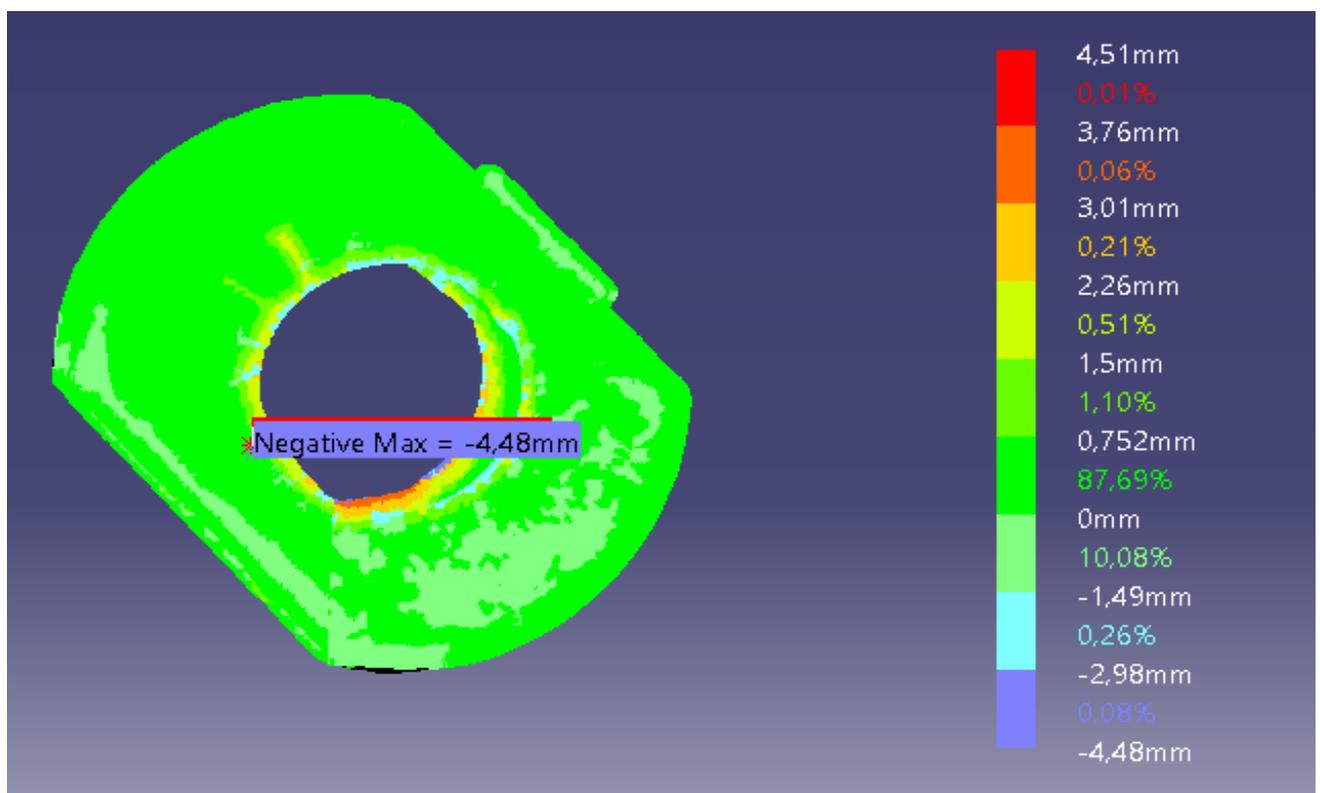
Peça 6



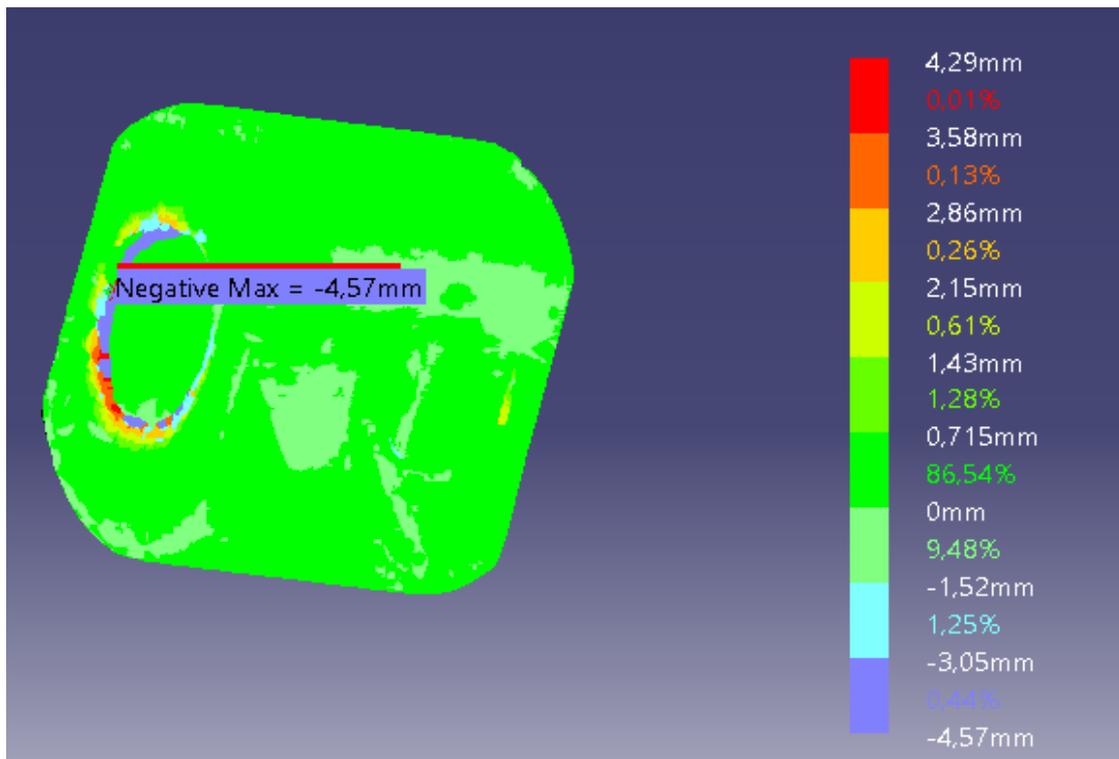
Peça 7



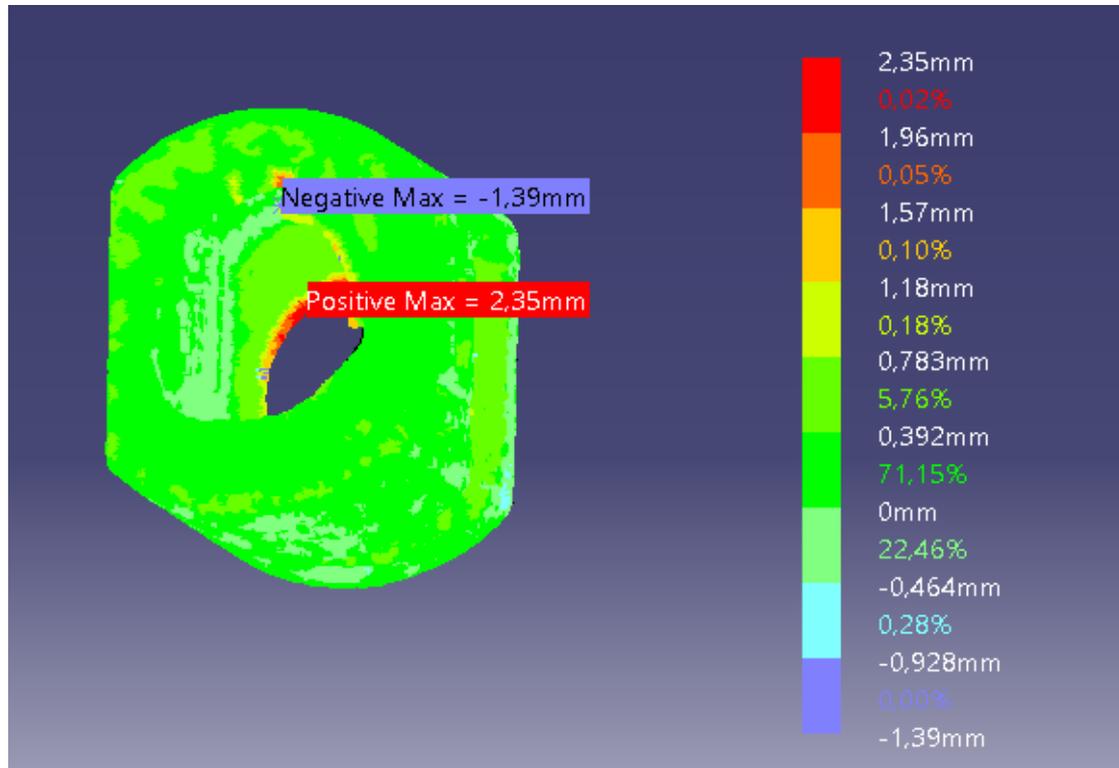
Peça 8



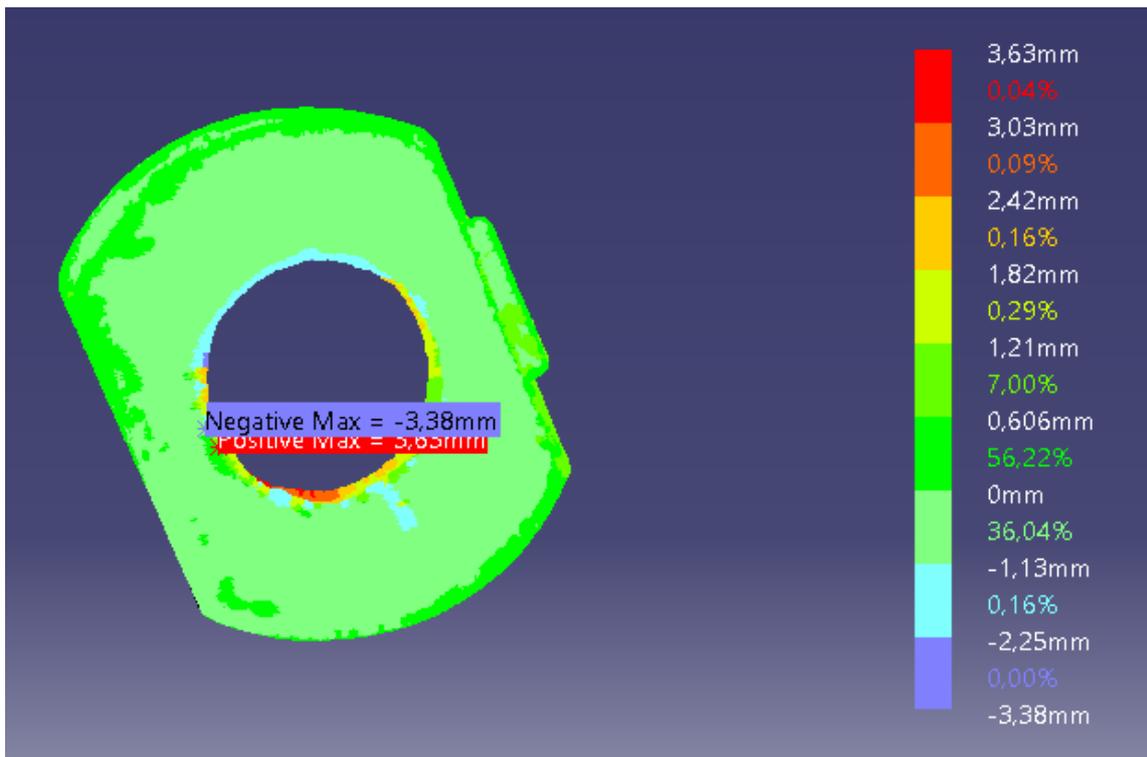
Peça 9



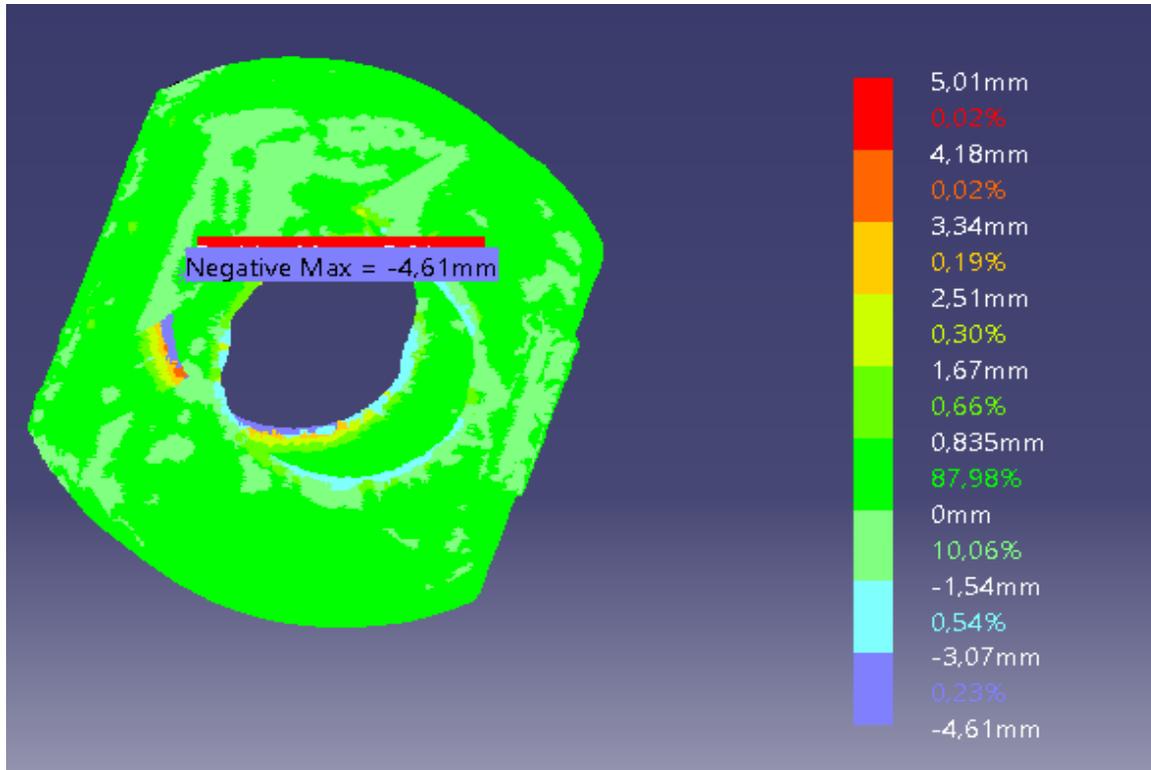
Peça 10



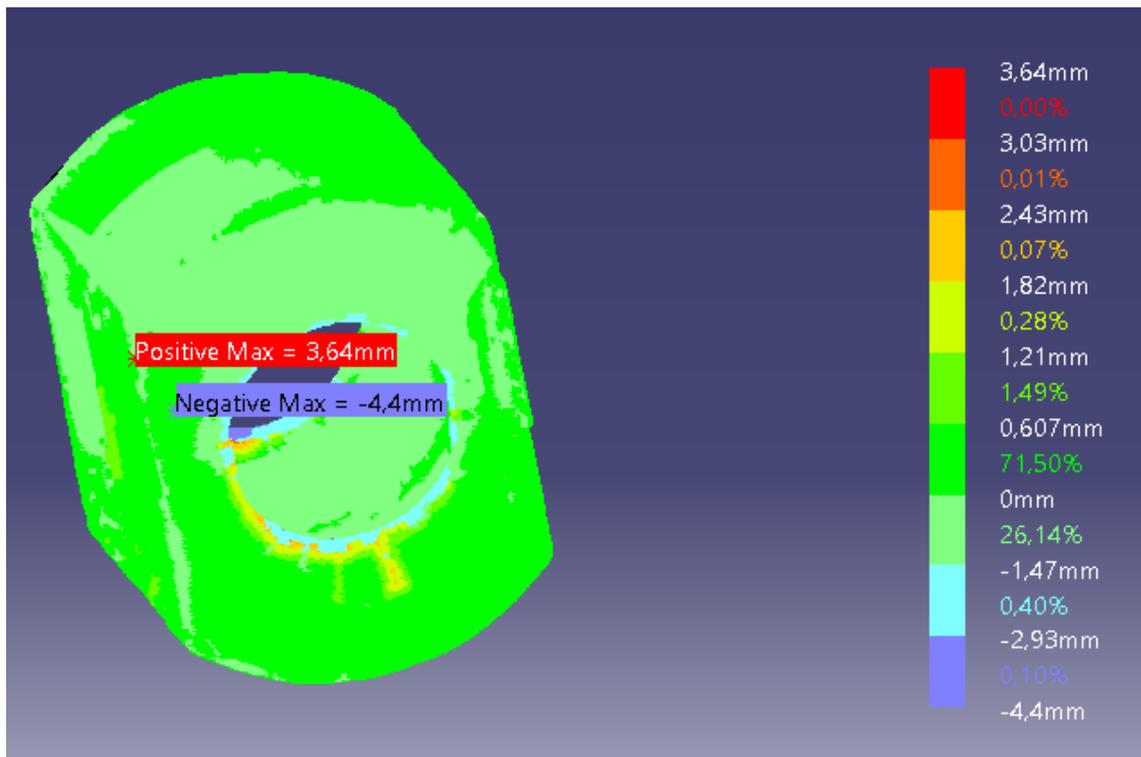
Peça 11



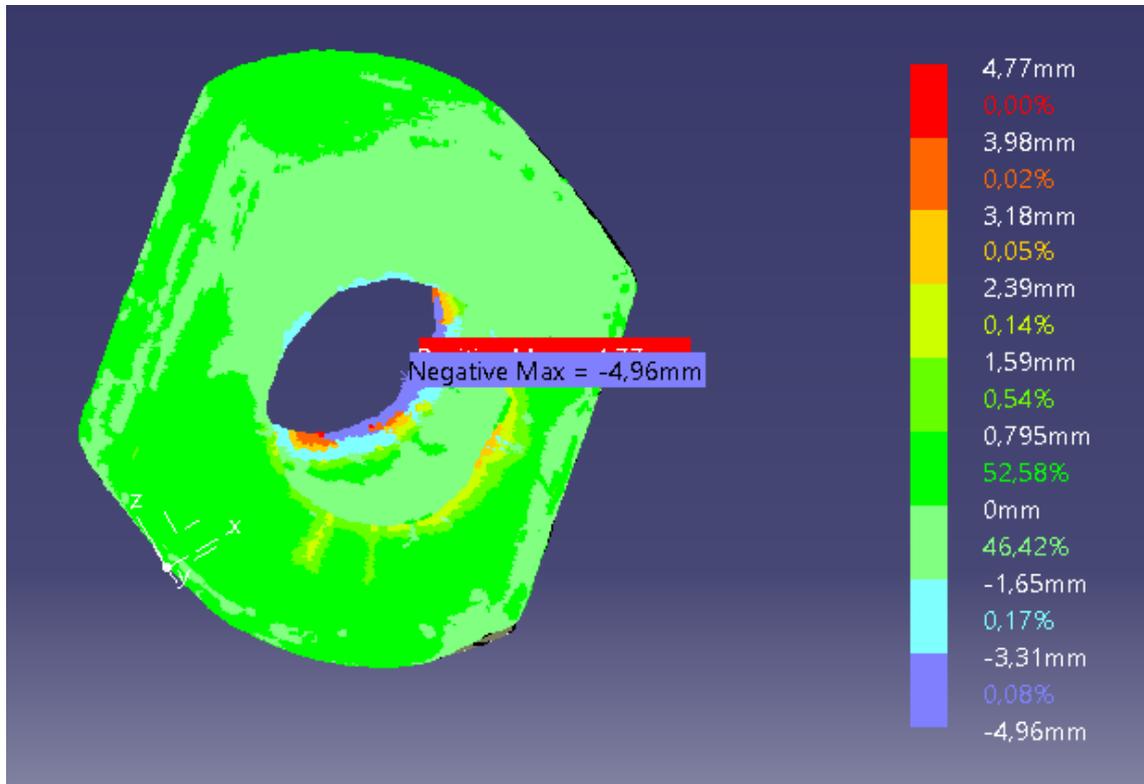
Peça 12



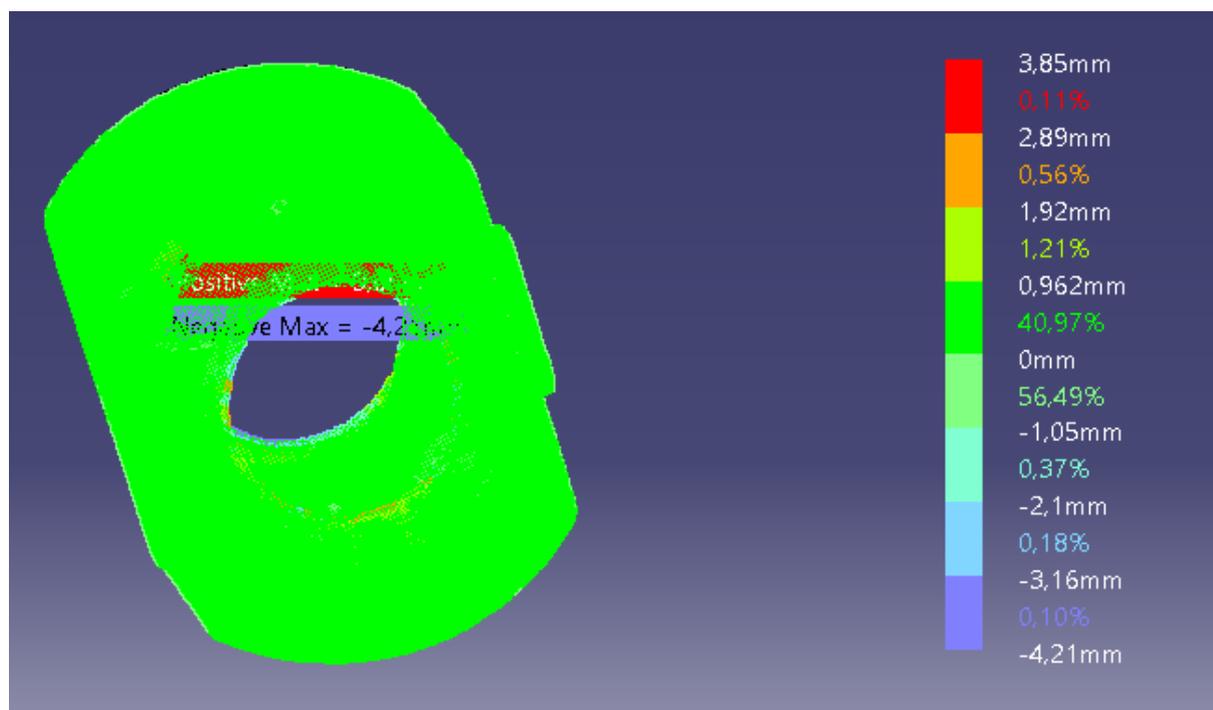
Peça 13



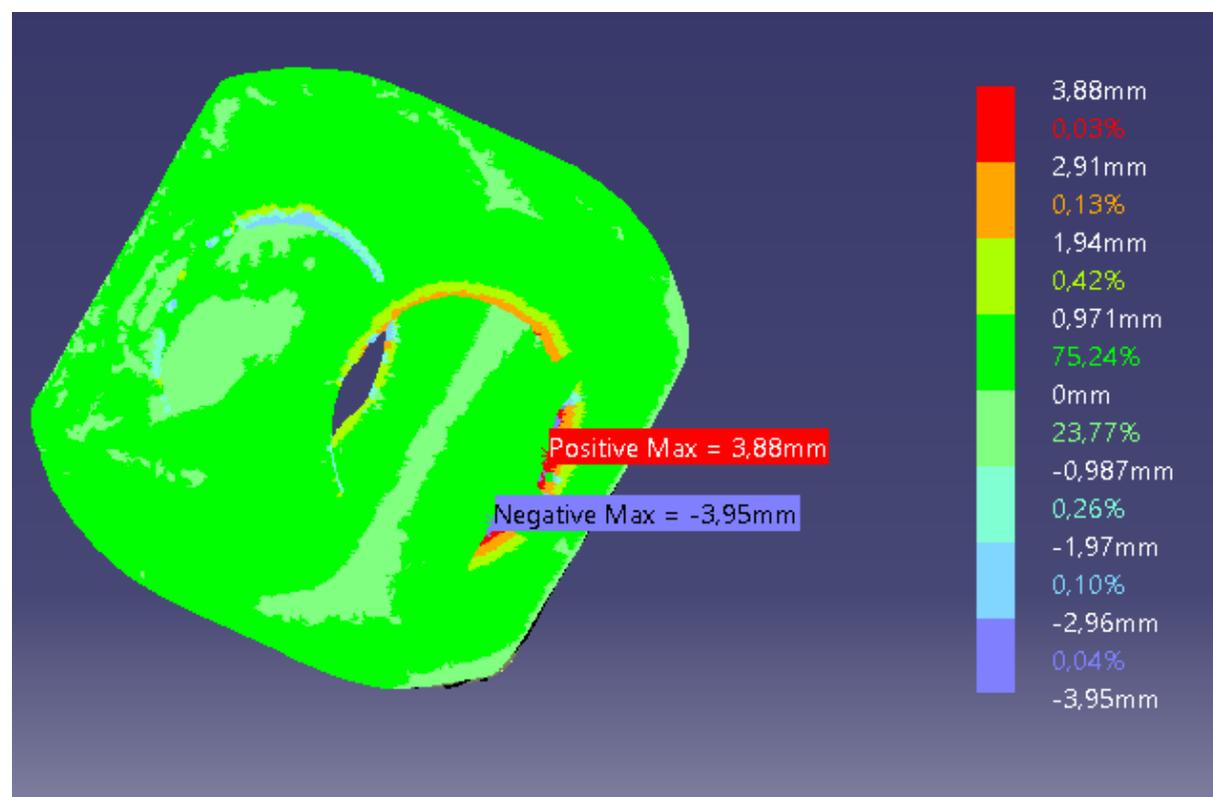
Peça 14



Peça 15

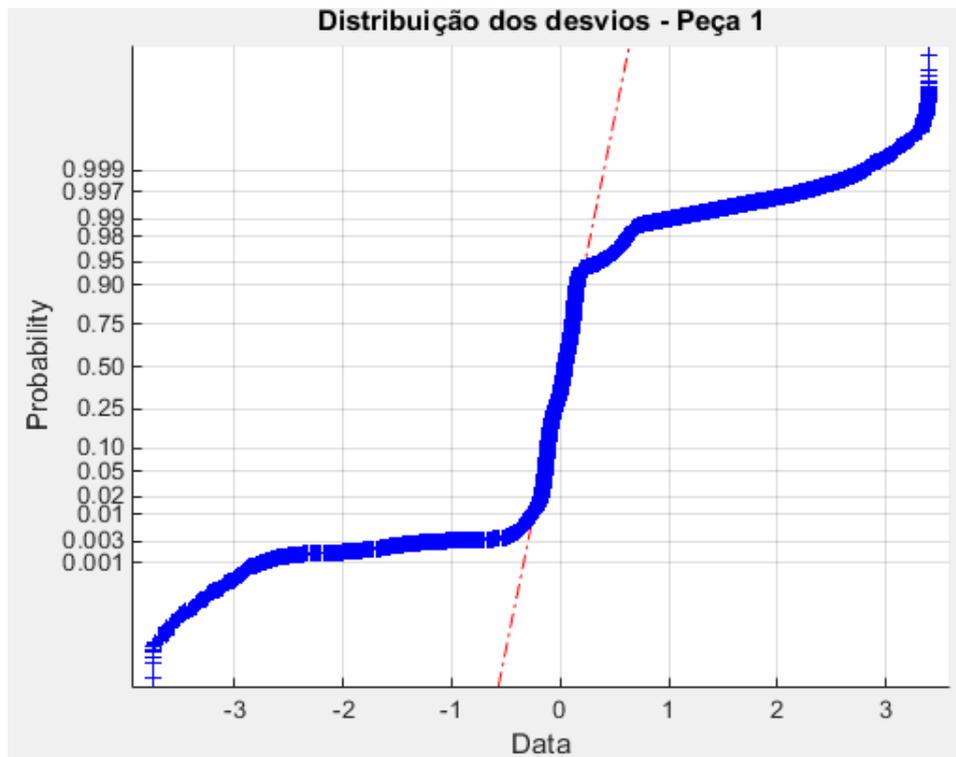


Peça 16

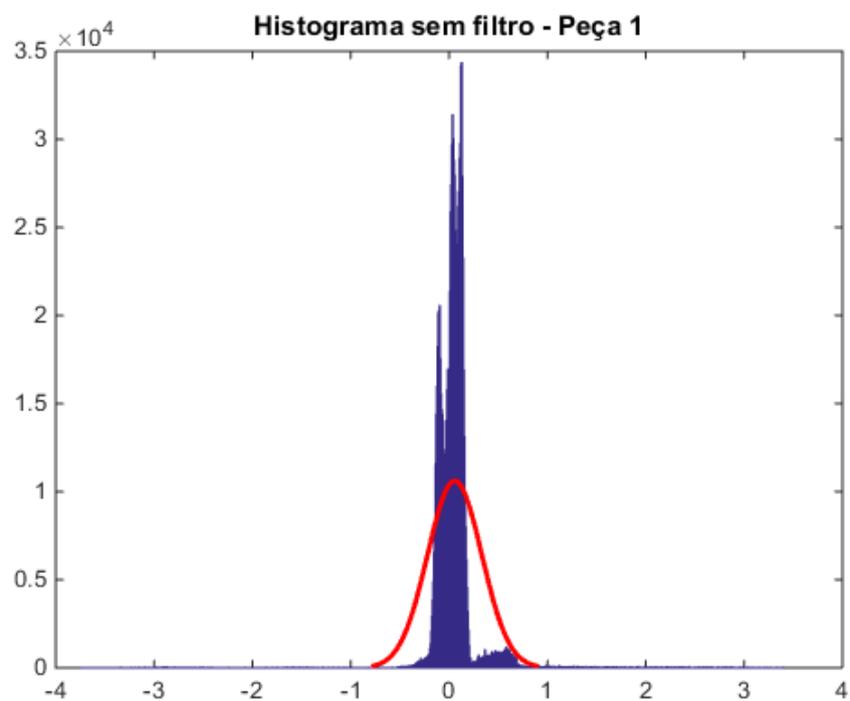


Peça 1

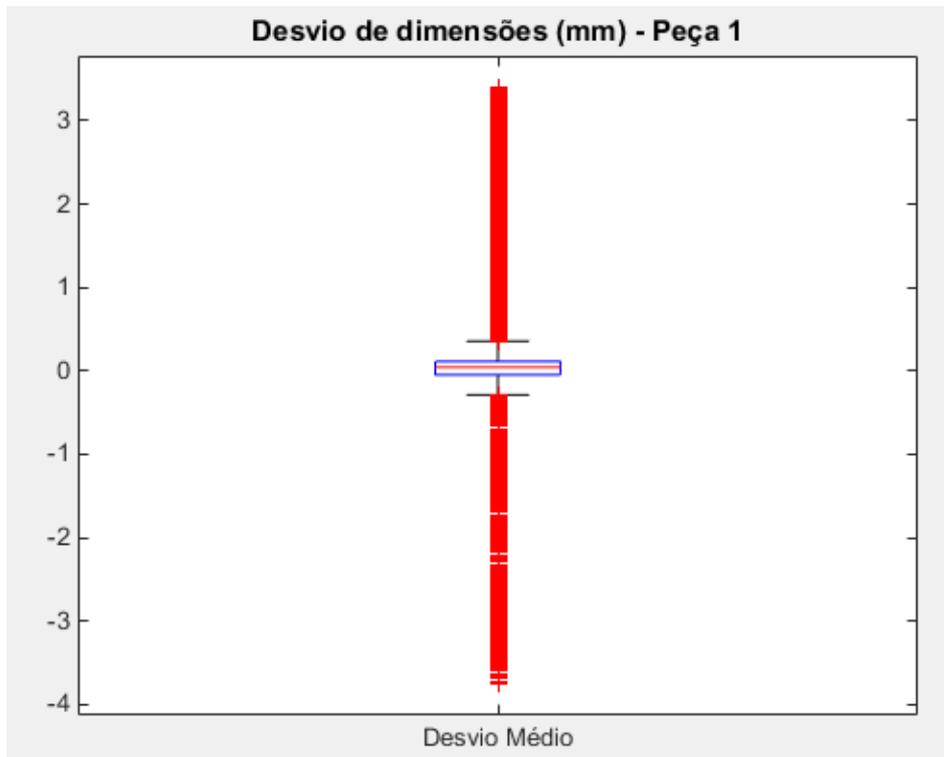
Distribuição dos desvios sem filtro



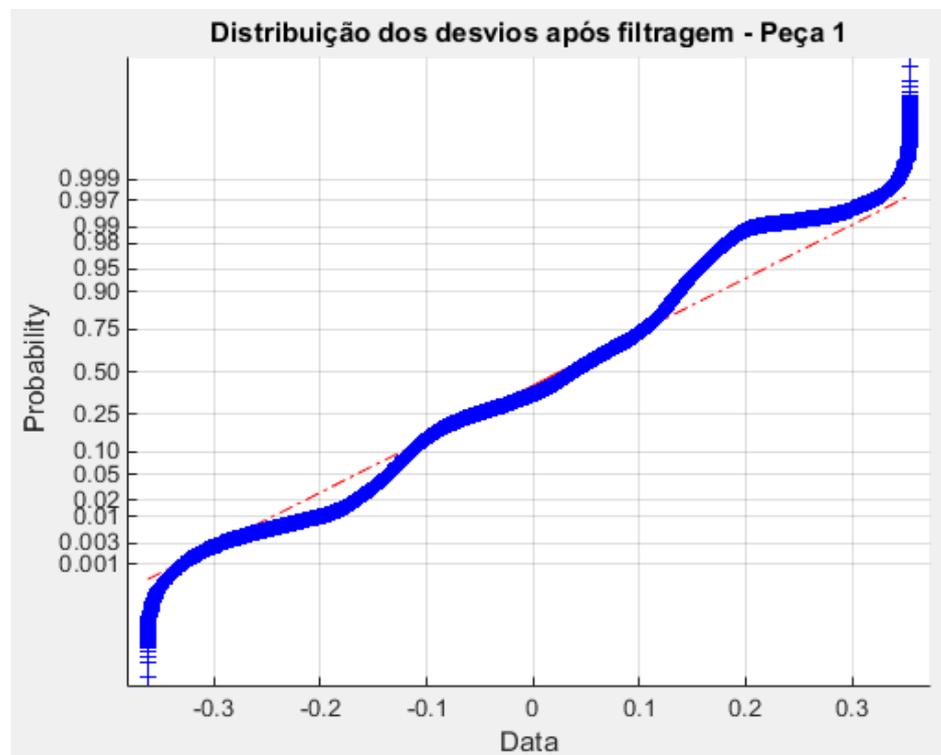
Histograma sem filtro



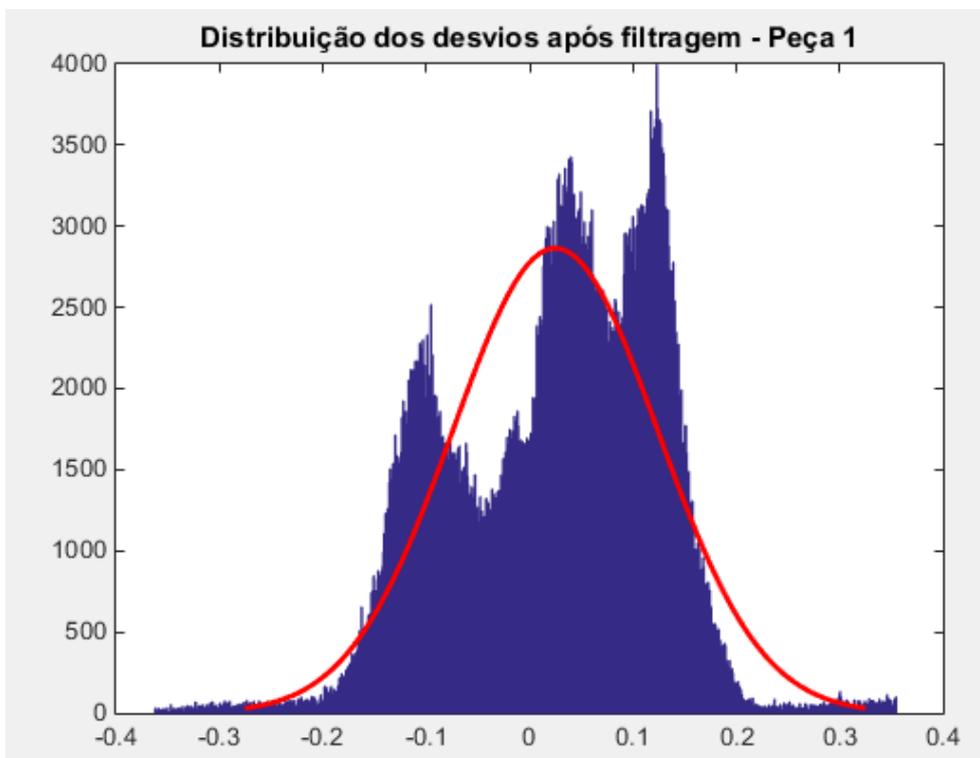
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

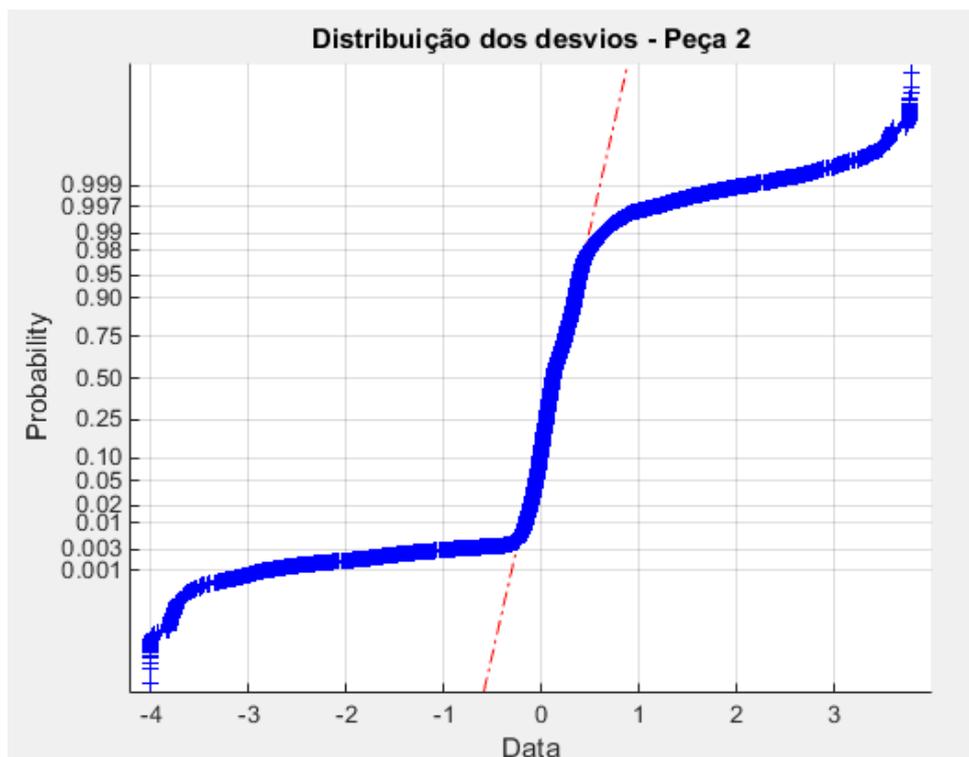


Histograma com filtro

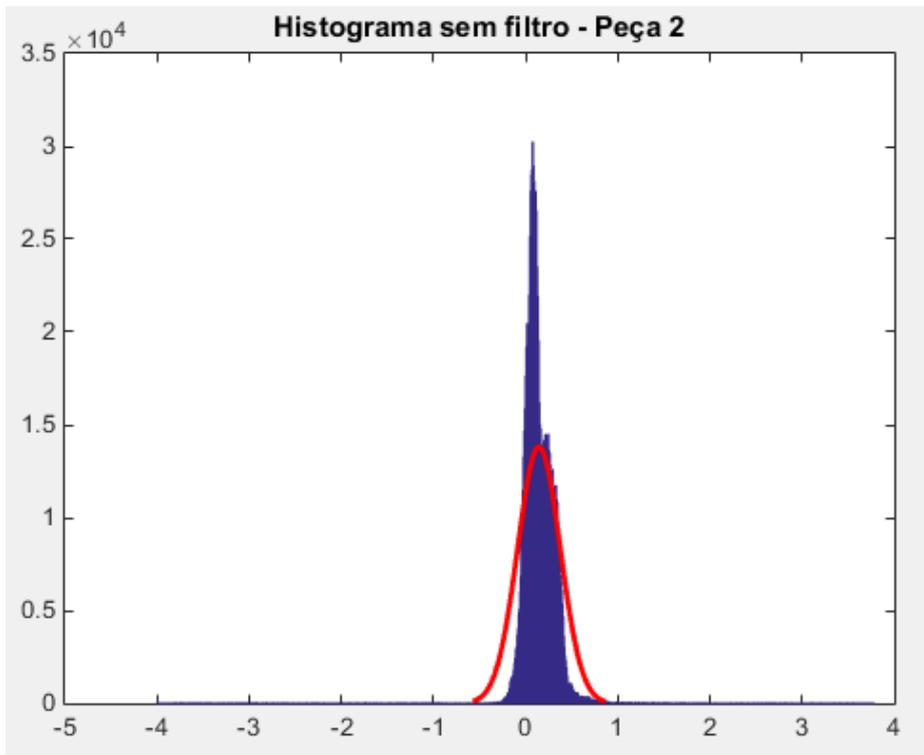


Peça 2

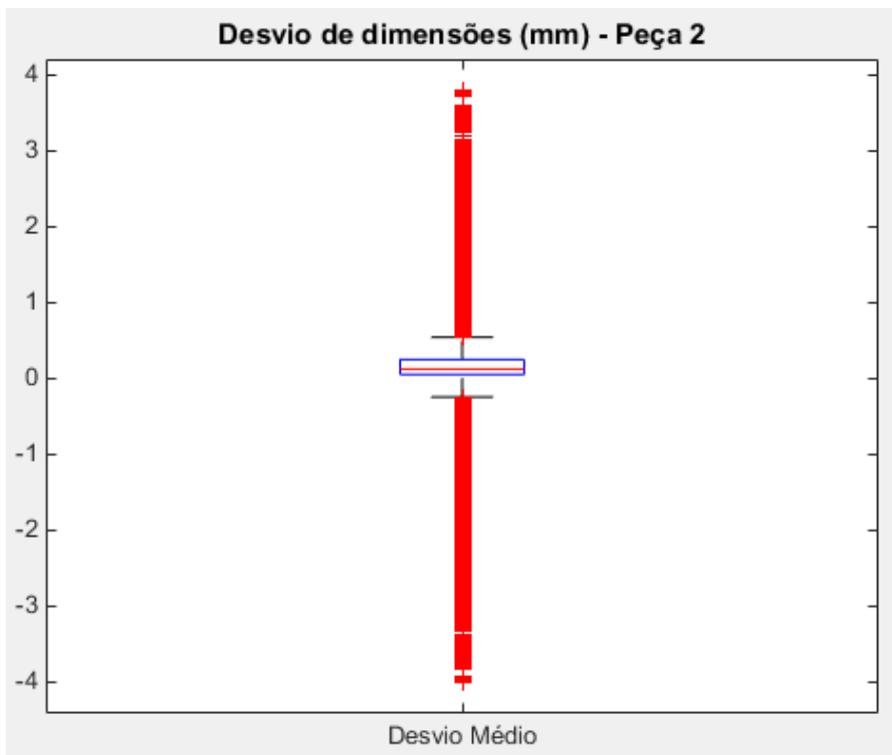
Distribuição dos desvios sem filtro



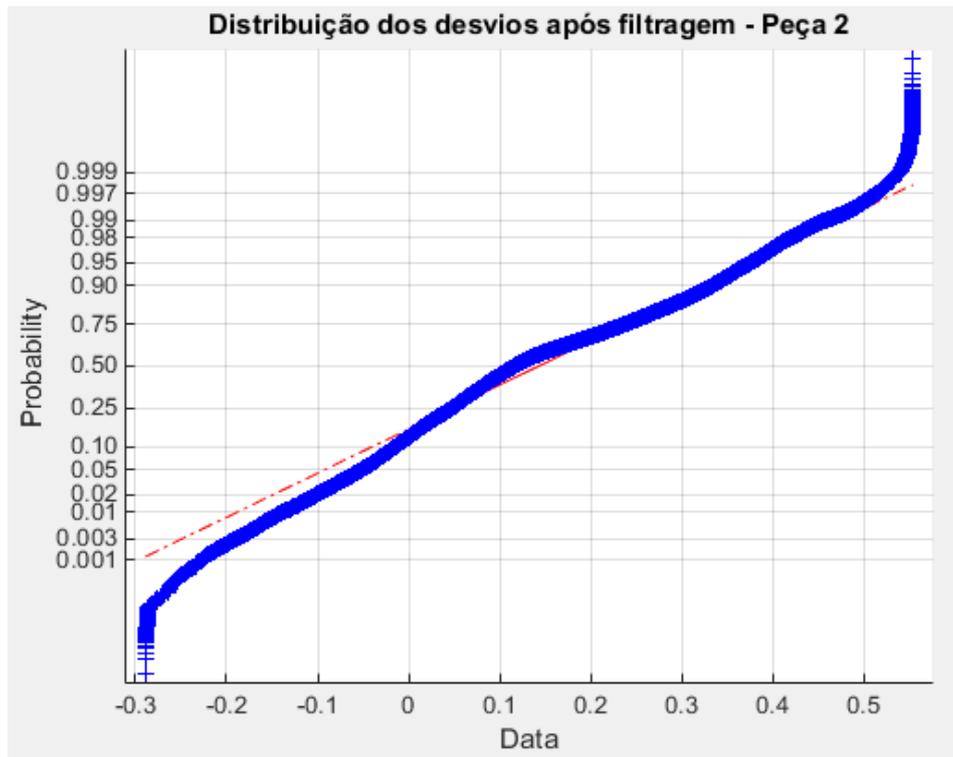
Histograma sem filtro



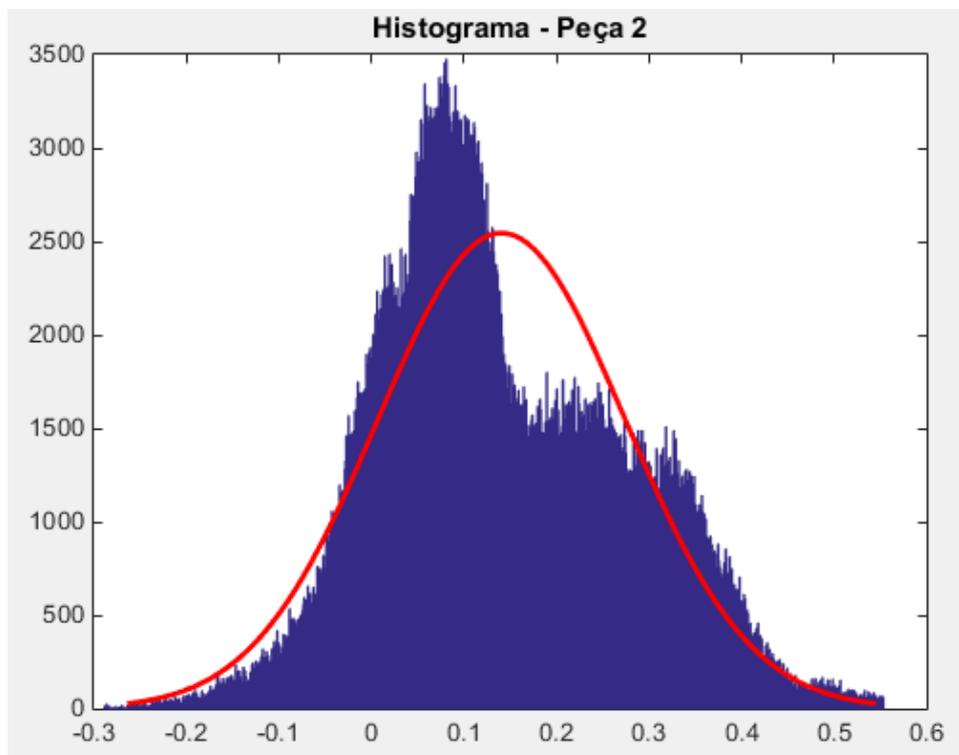
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

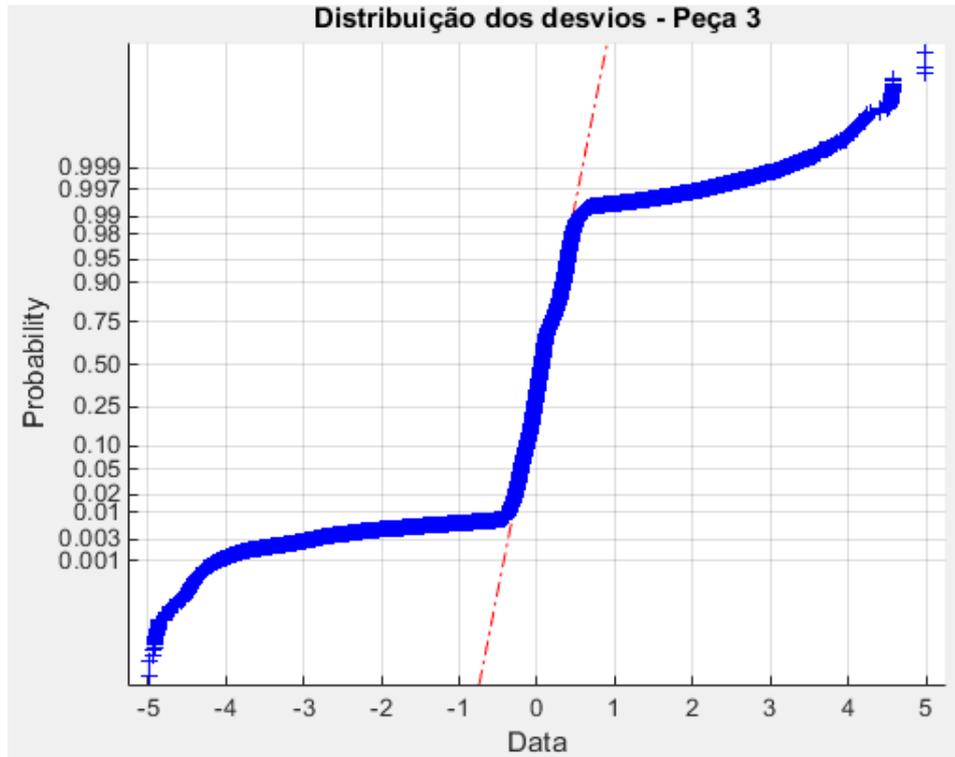


Histograma com filtro

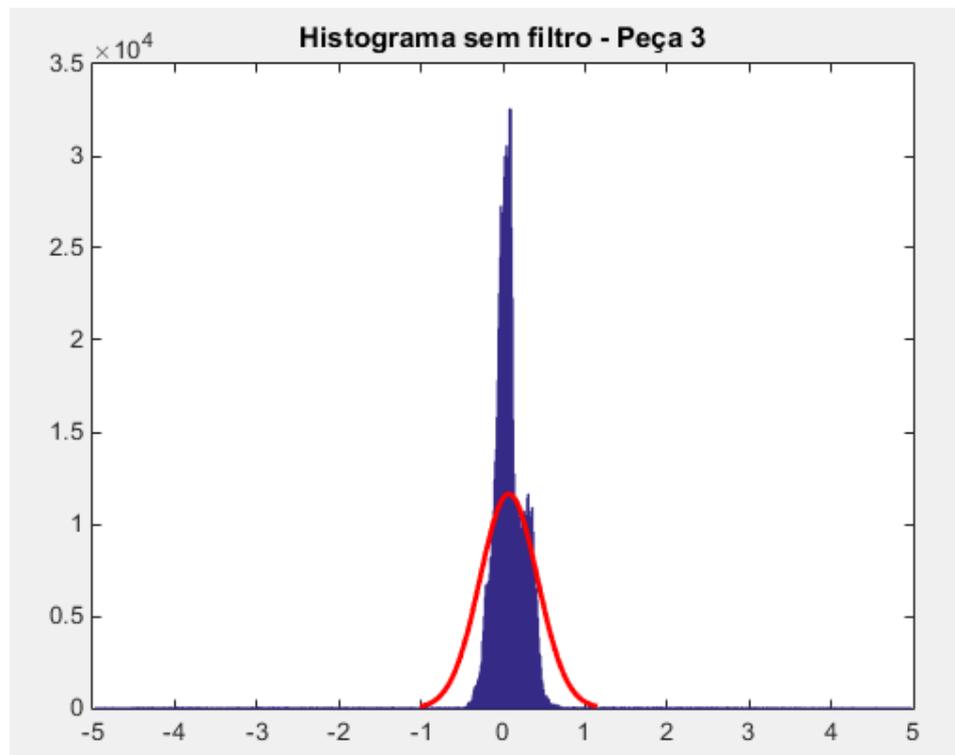


Peça 3

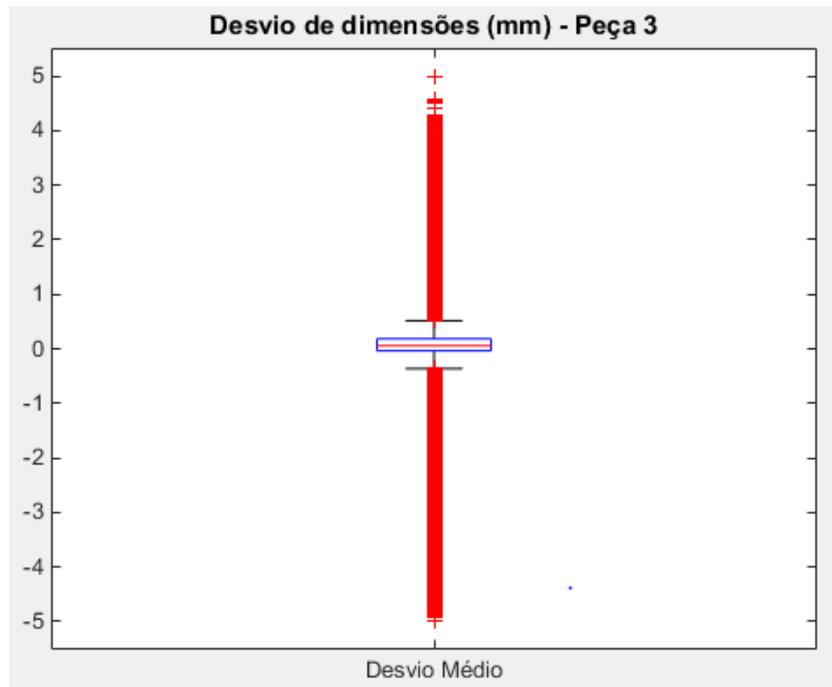
Distribuição dos desvios sem filtro



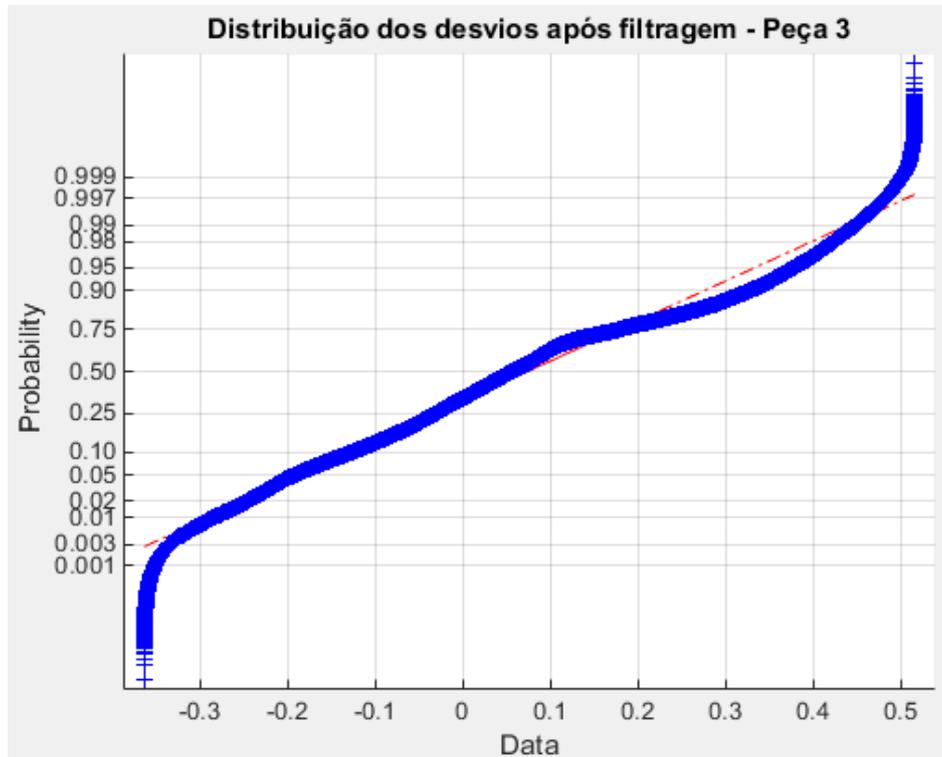
Histograma sem filtro



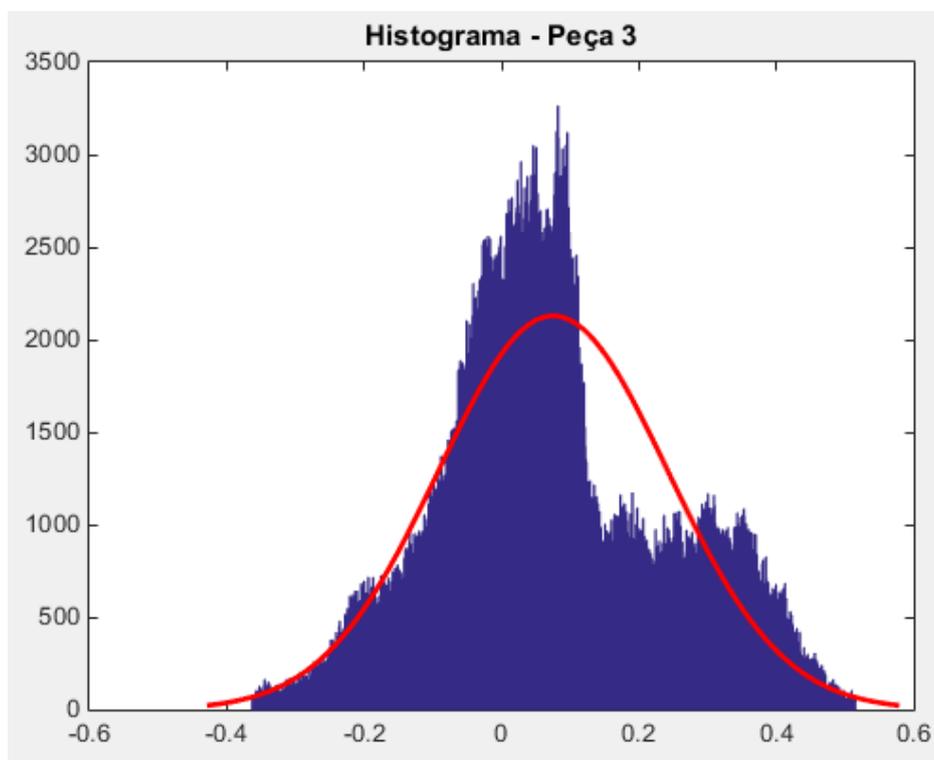
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

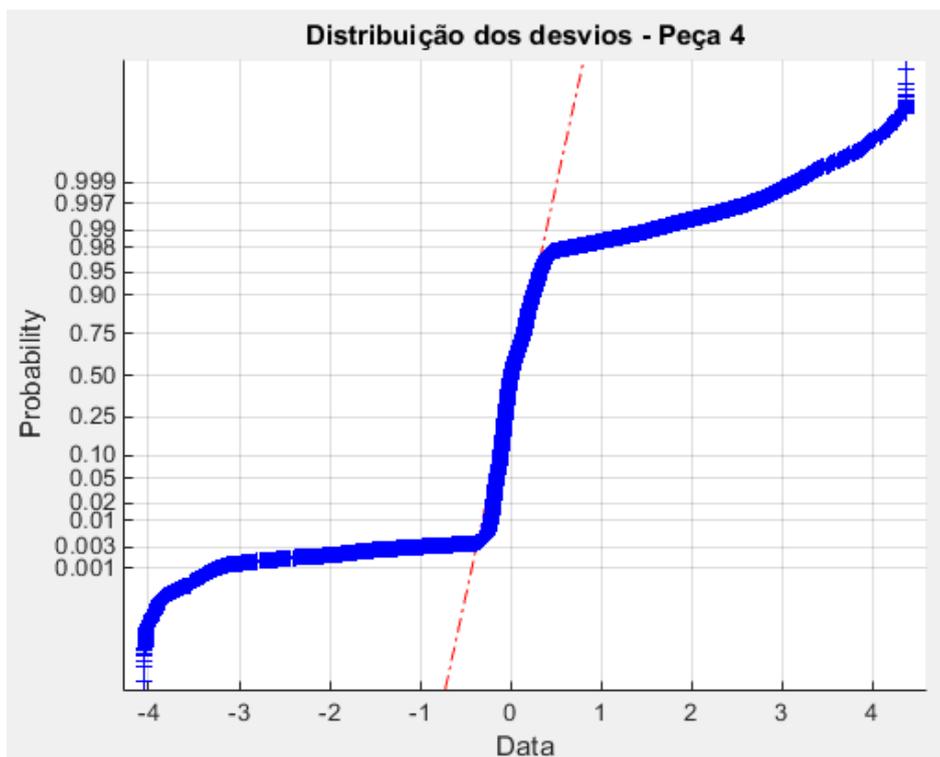


Histograma com filtro

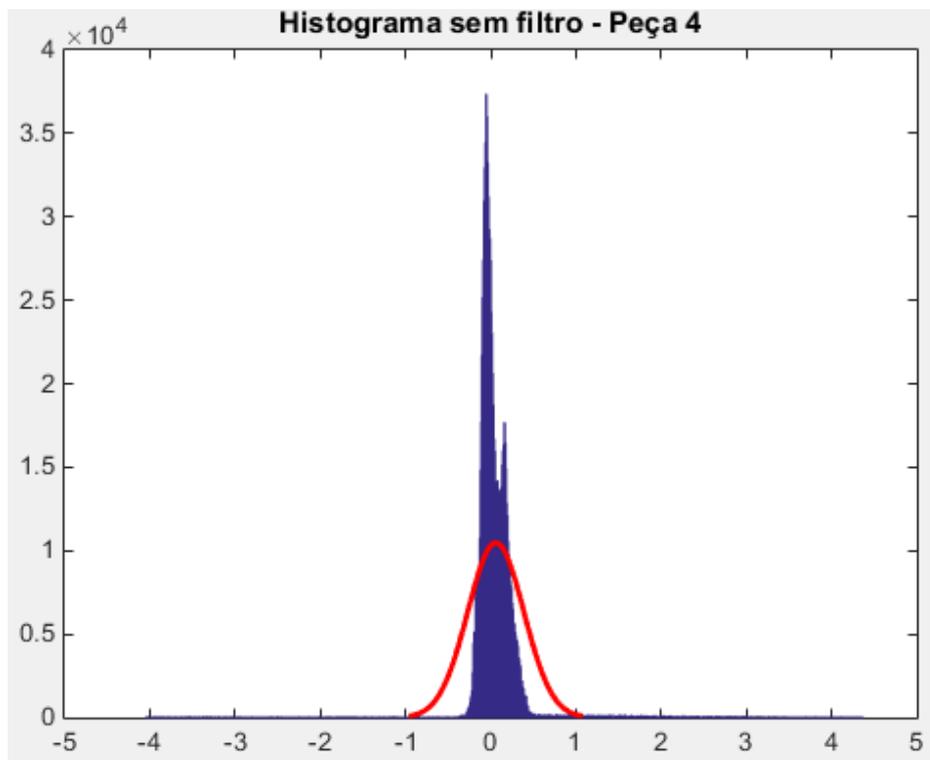


Peça 4

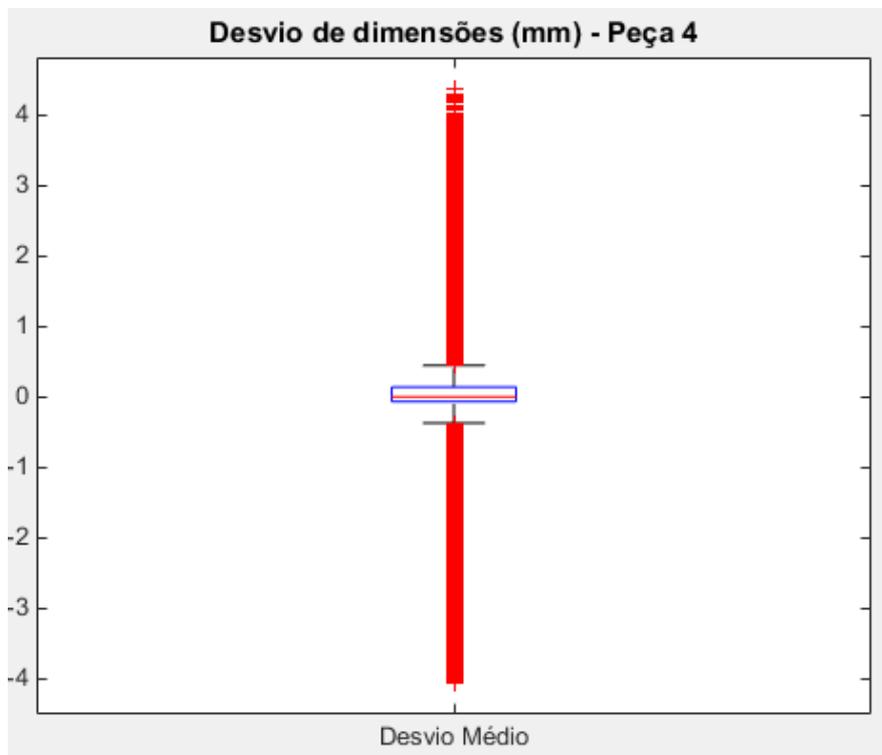
Distribuição dos desvios sem filtro



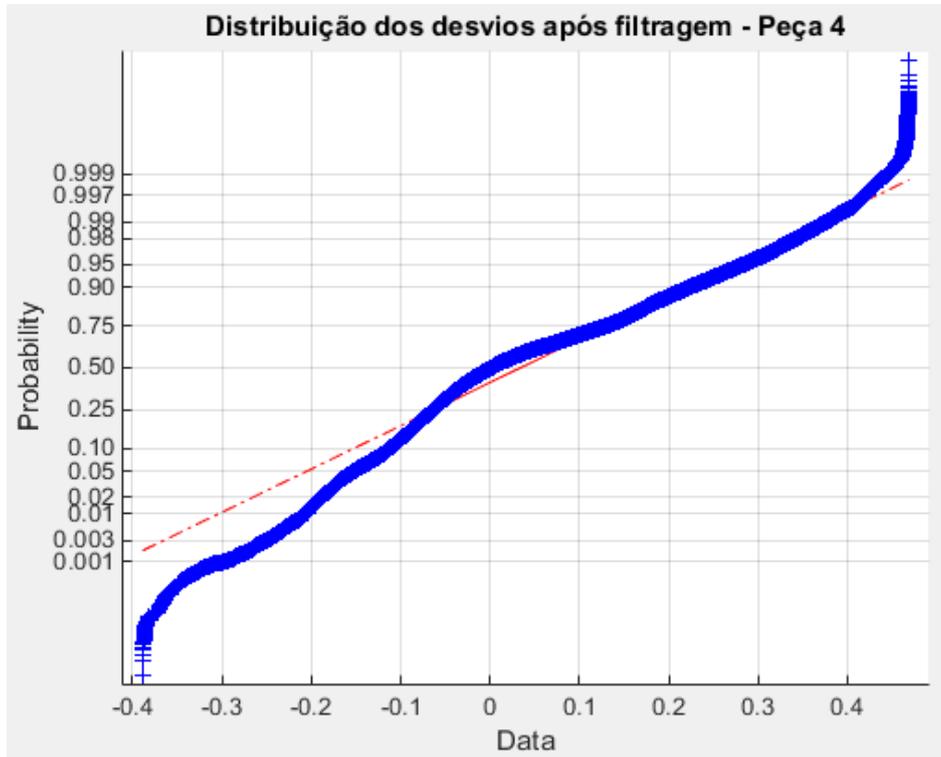
Histograma sem filtro



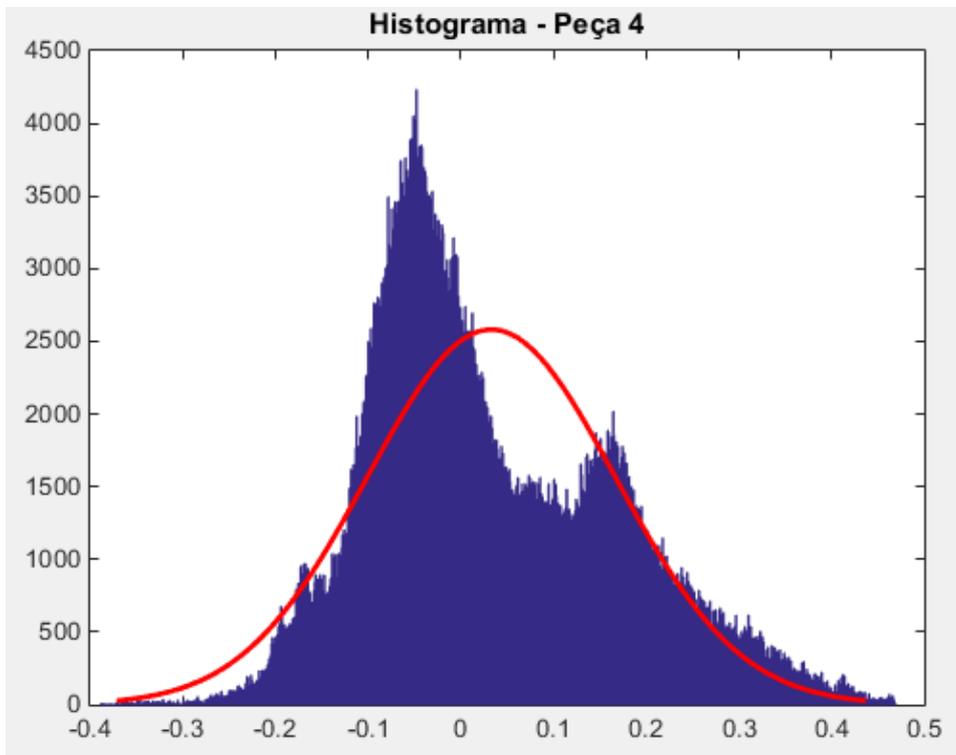
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

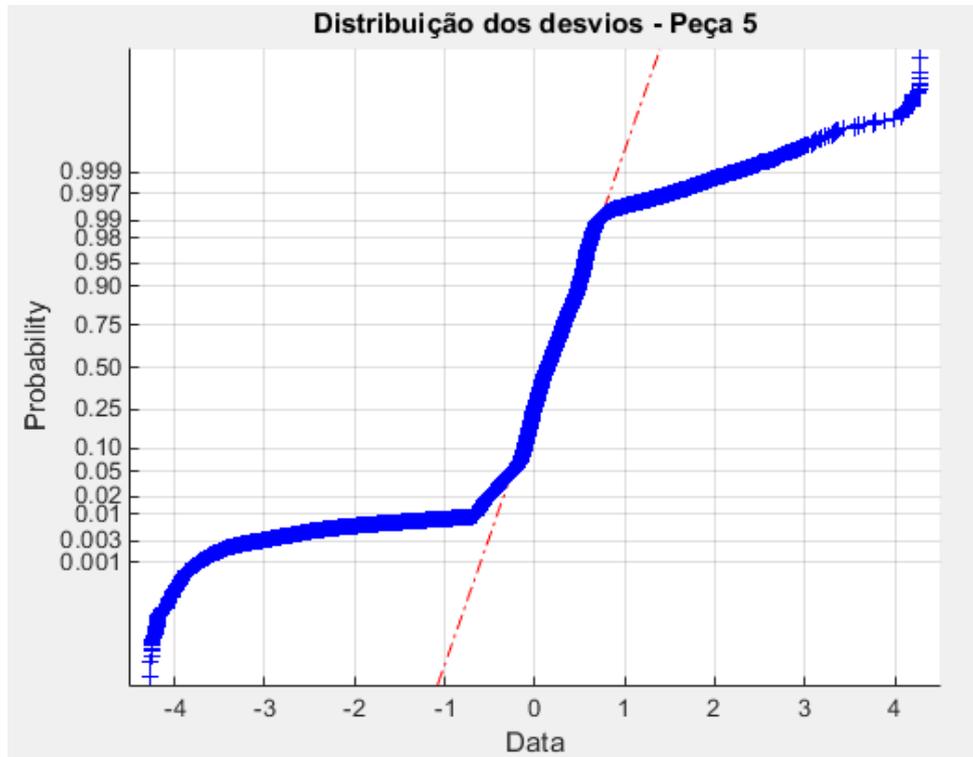


Histograma com filtro

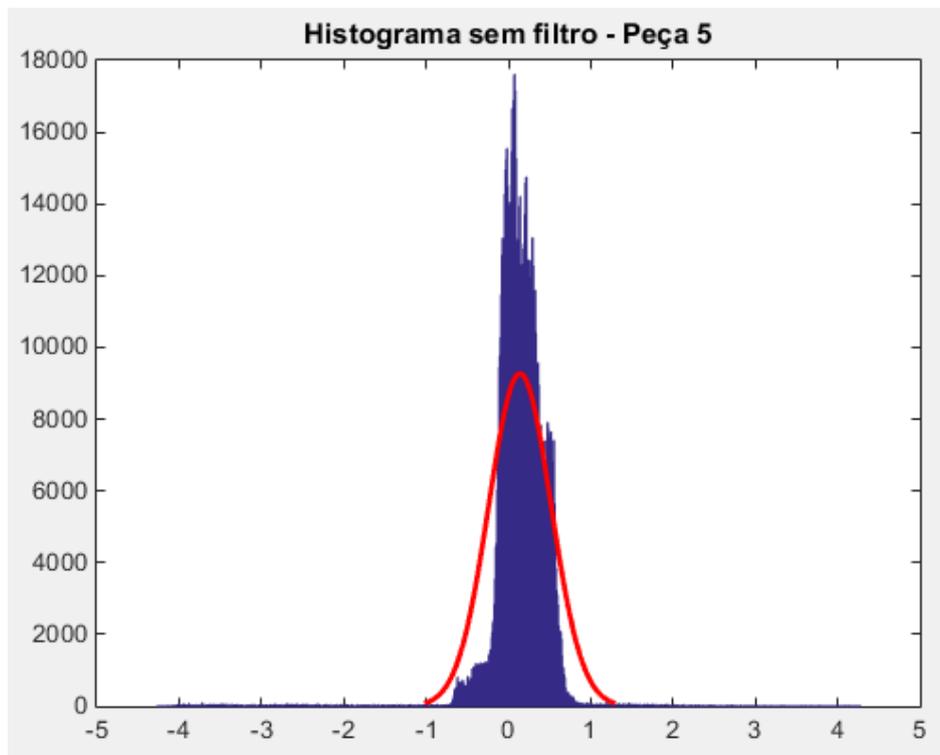


Peça 5

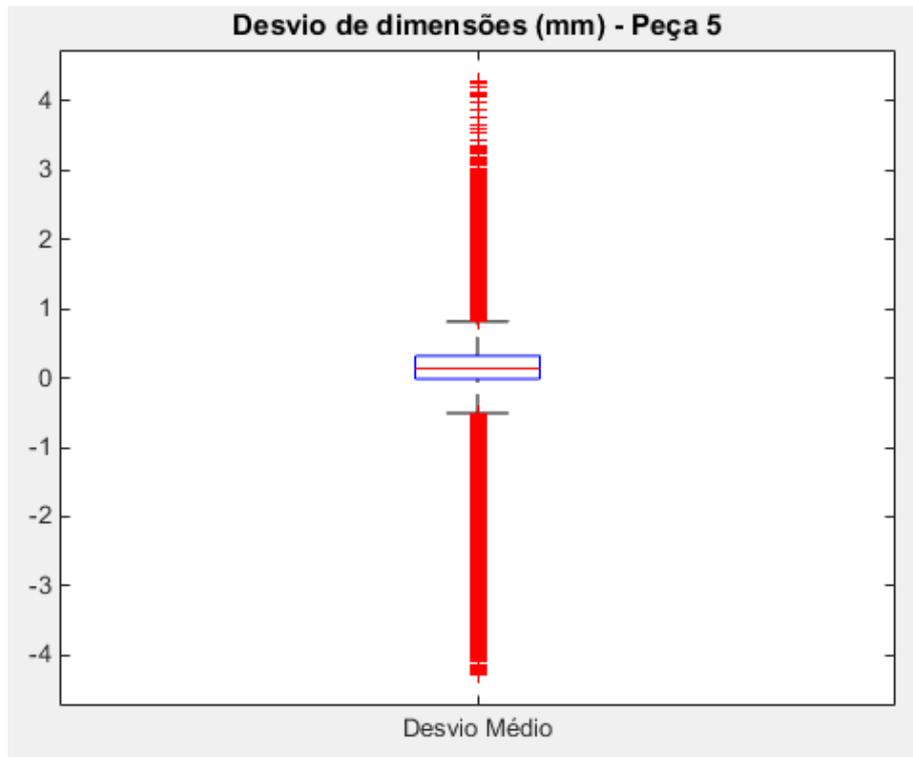
Distribuição dos desvios sem filtro



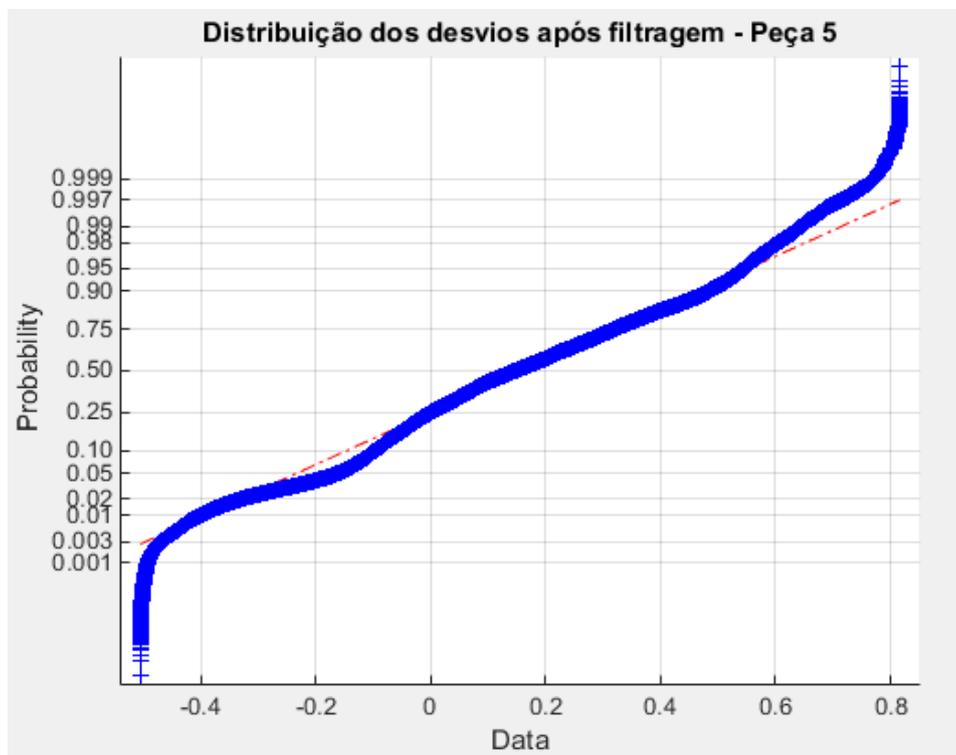
Histograma sem filtro



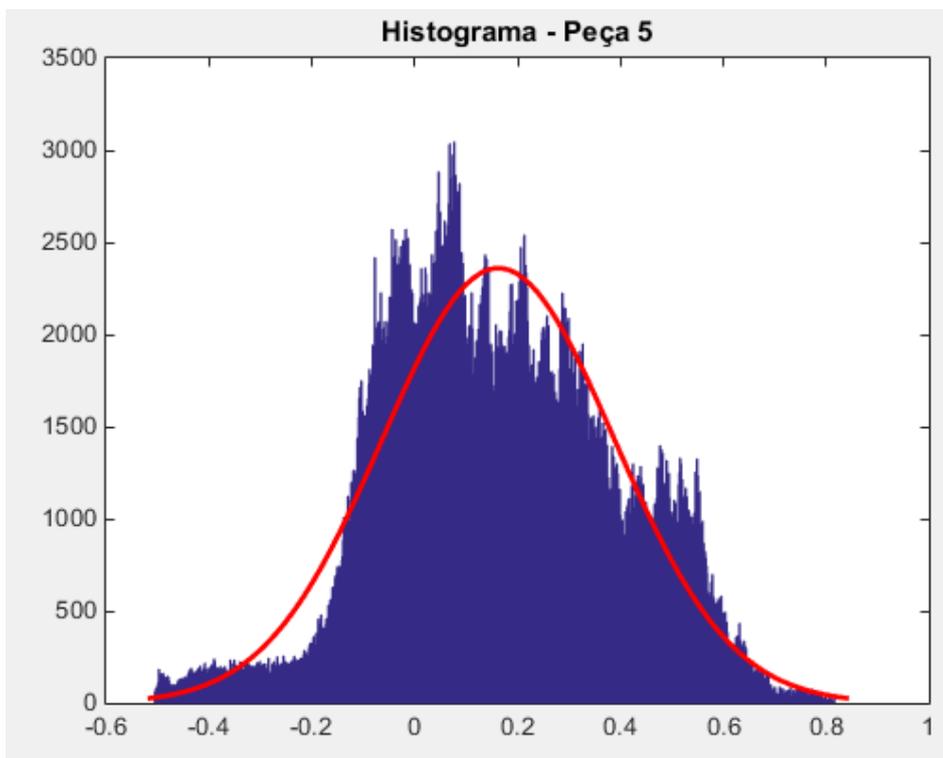
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

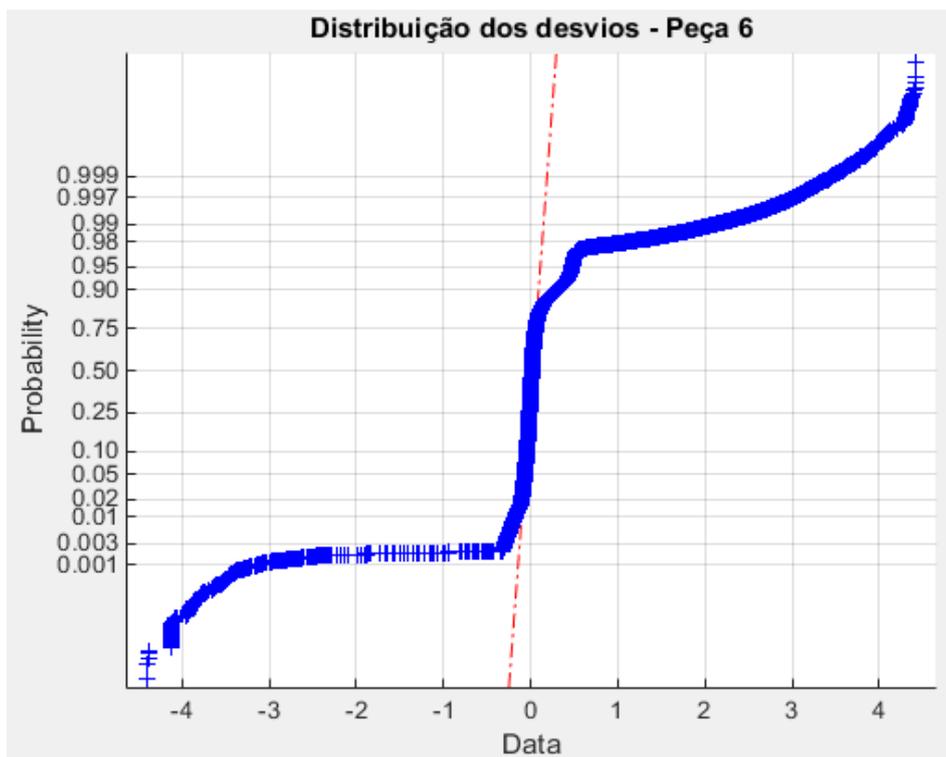


Histograma com filtro

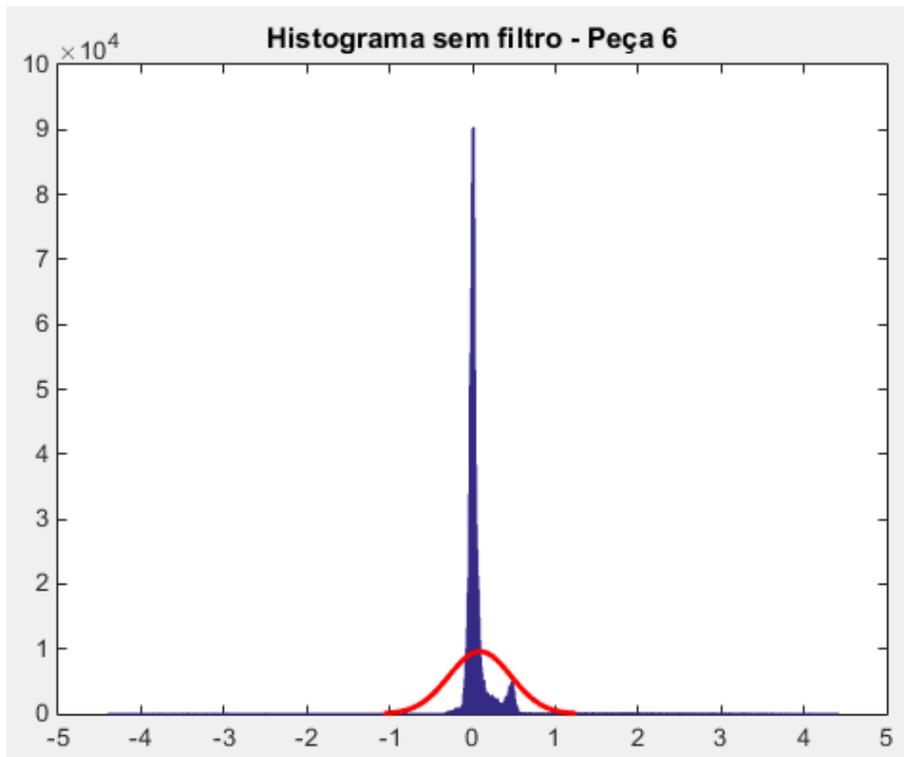


Peça 6

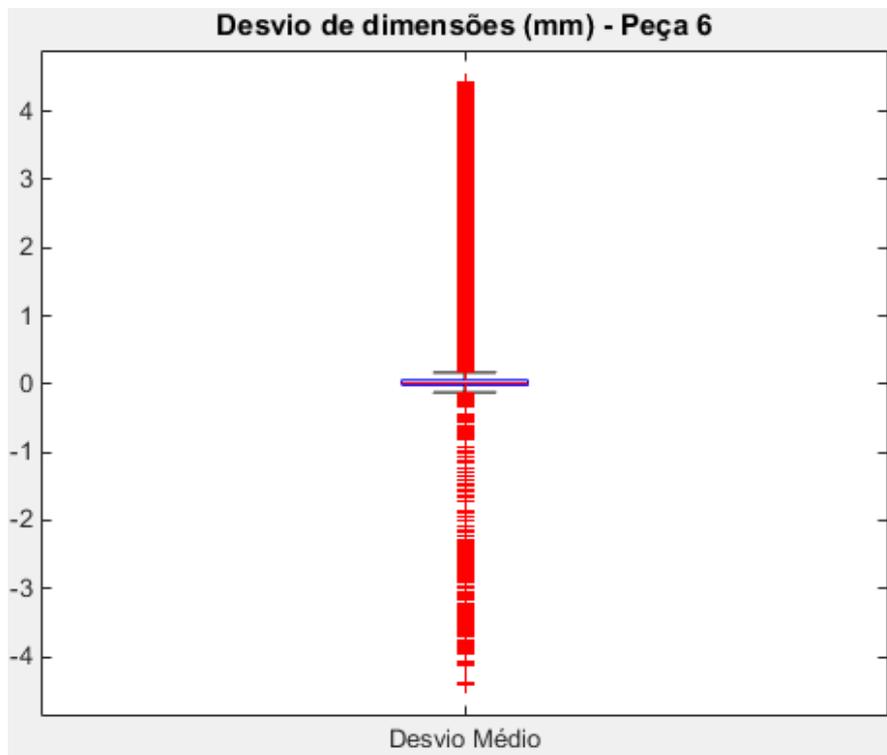
Distribuição dos desvios sem filtro



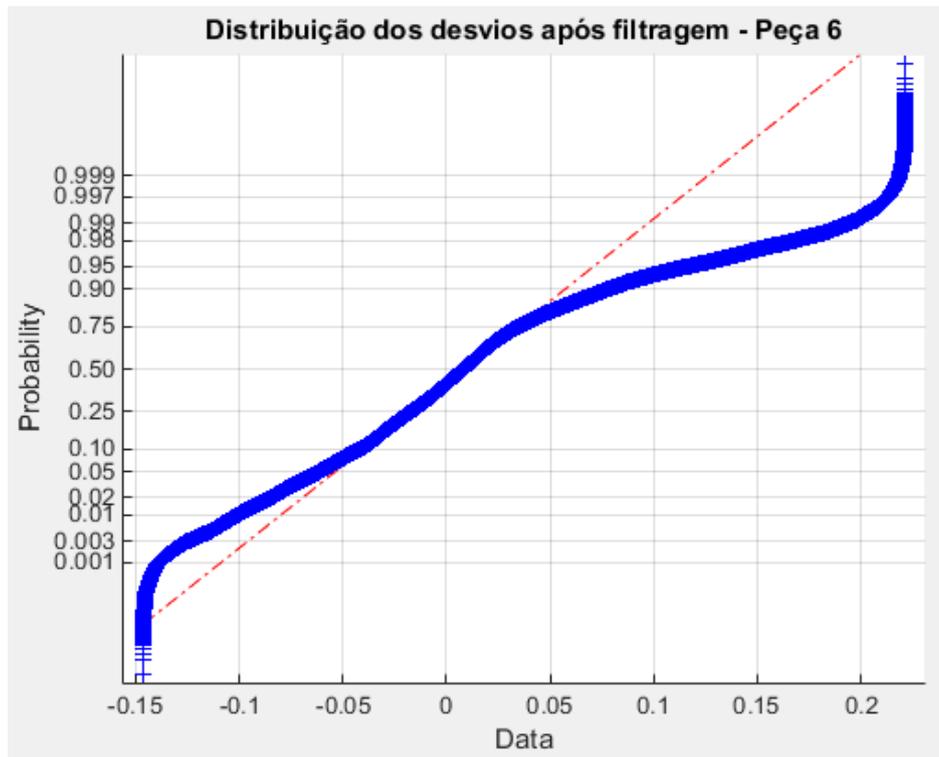
Histograma sem filtro



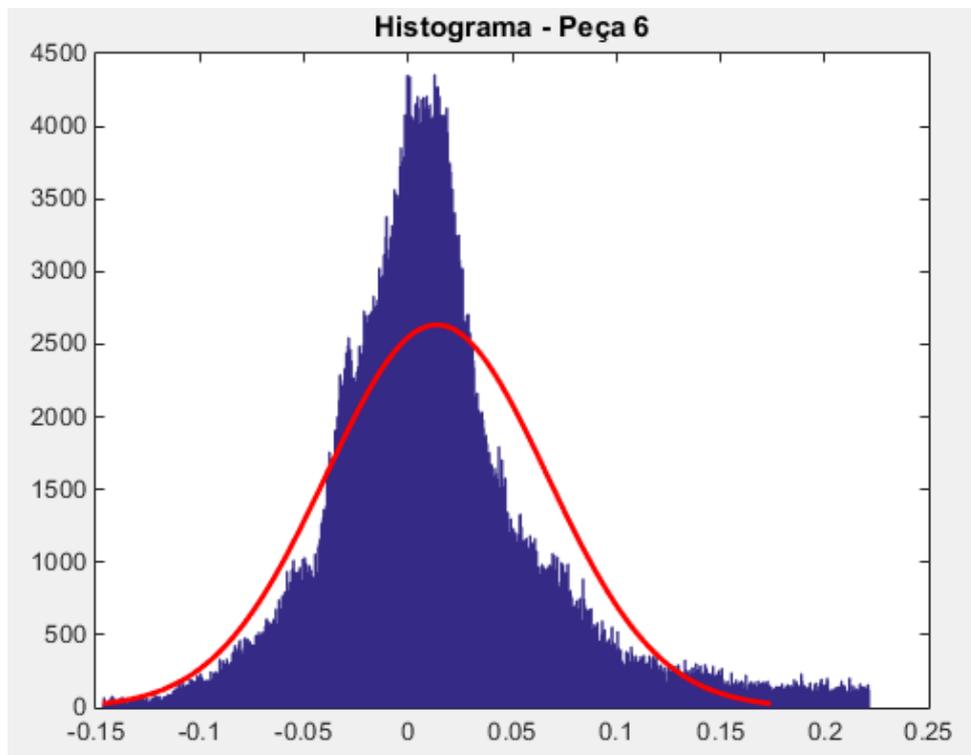
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

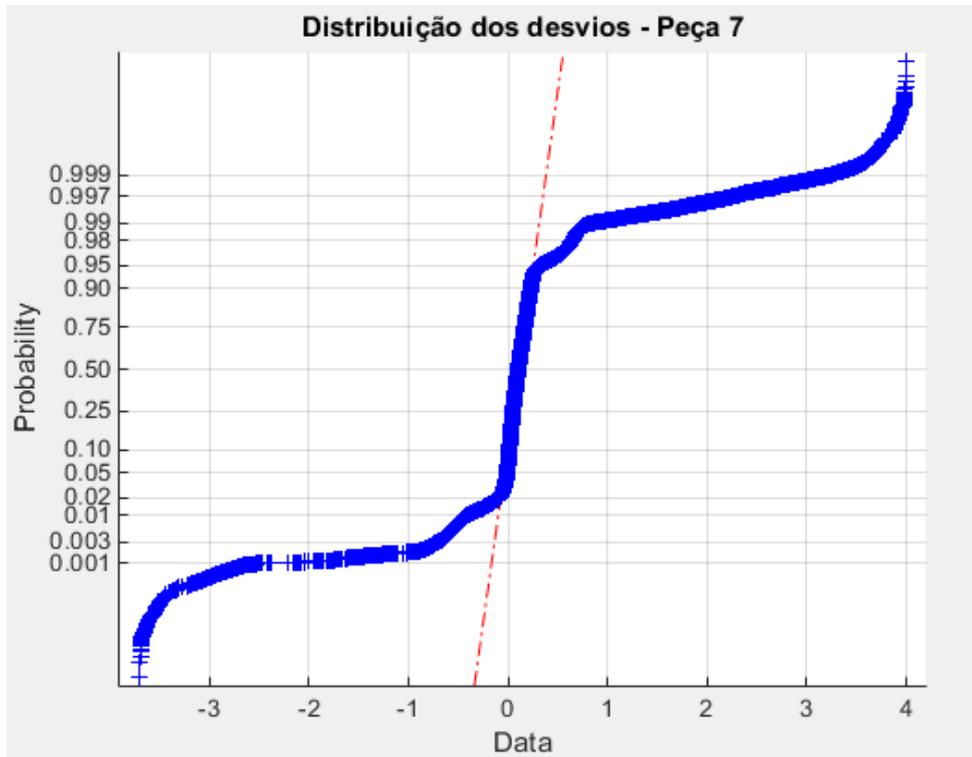


Histograma com filtro

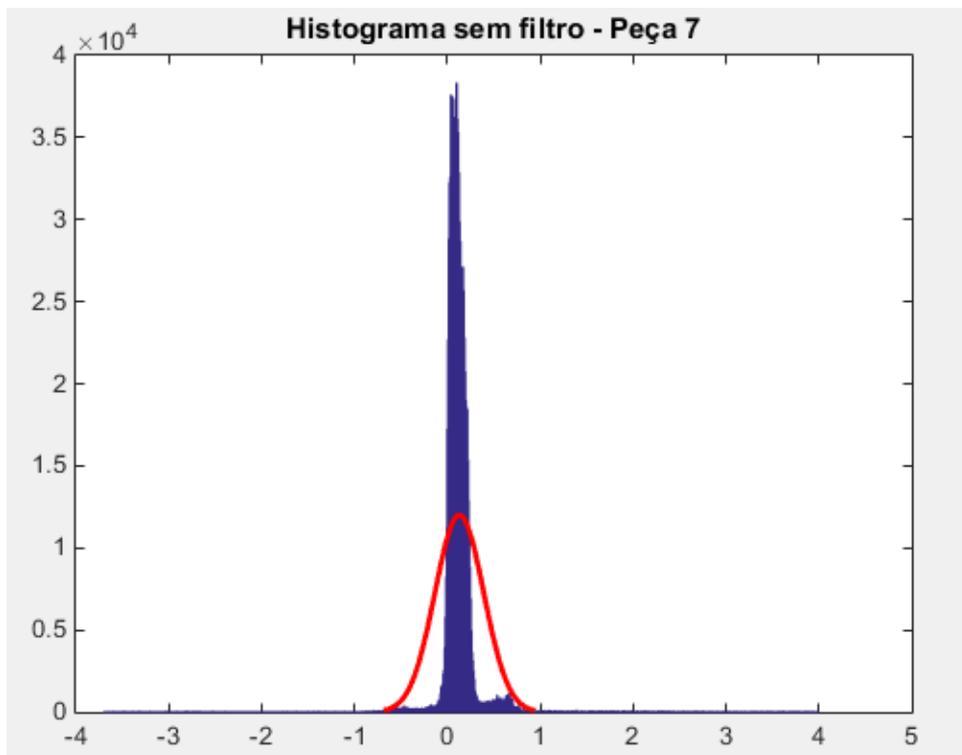


Peça 7

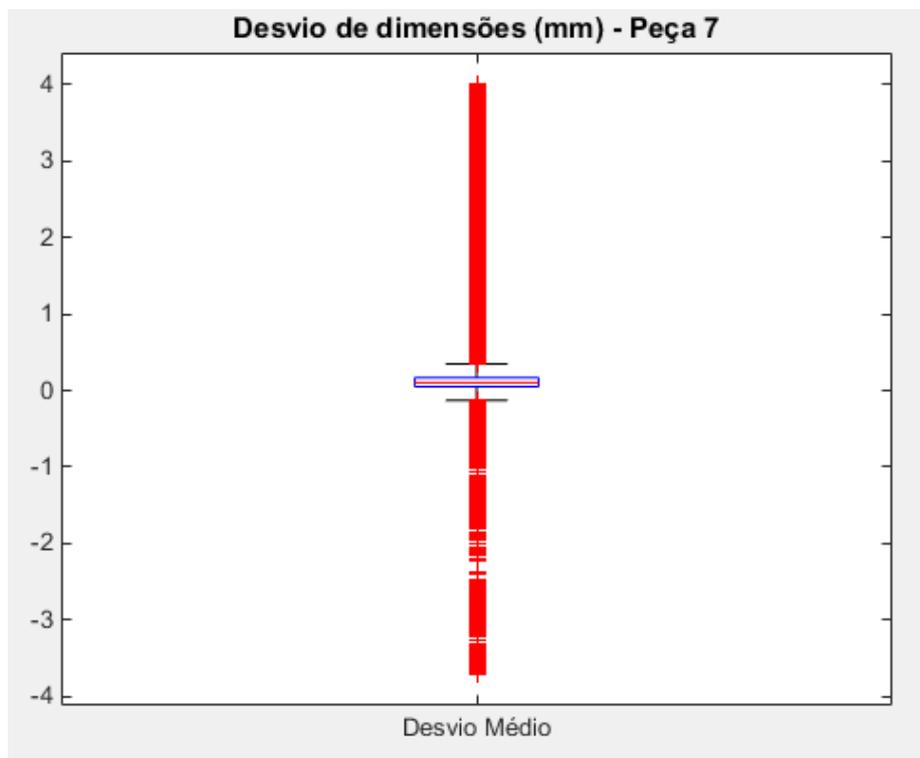
Distribuição dos desvios sem filtro



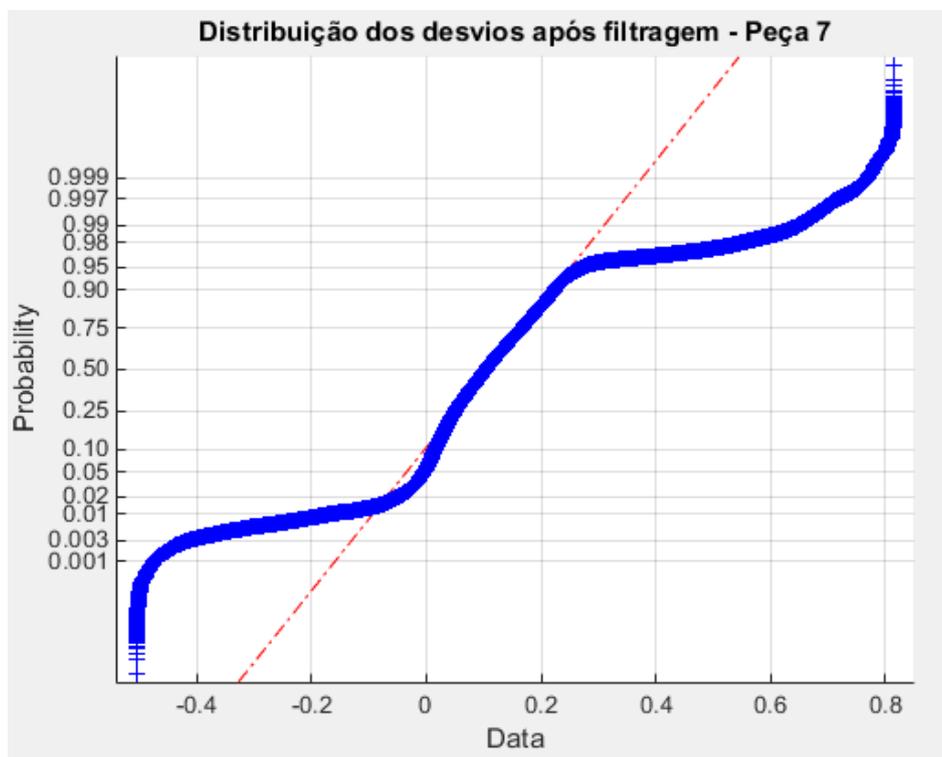
Histograma sem filtro



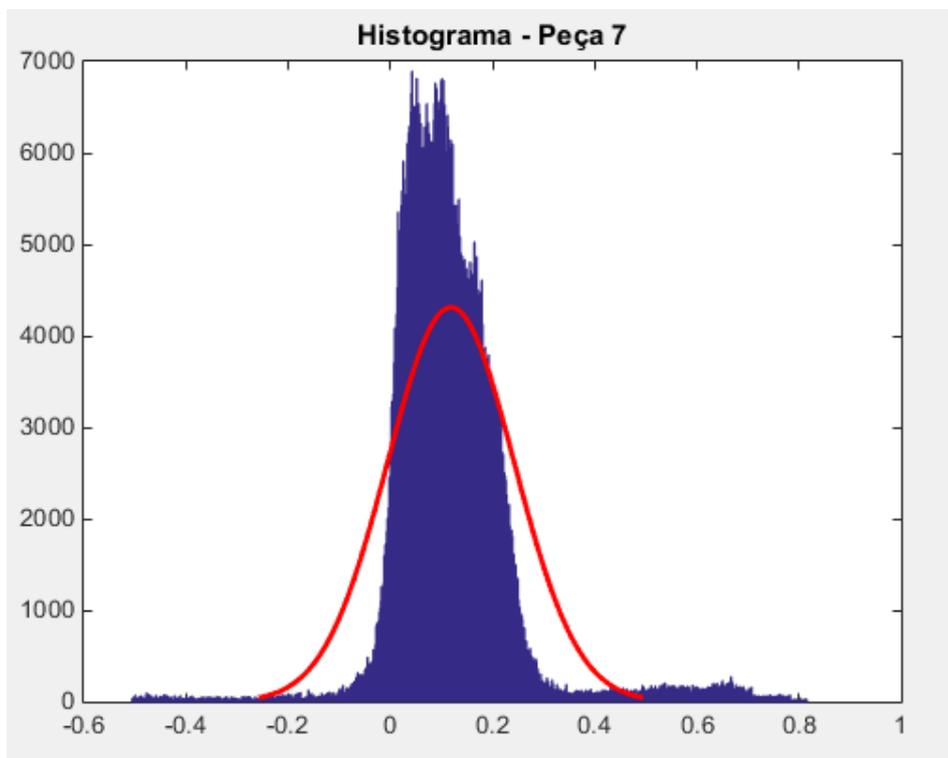
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

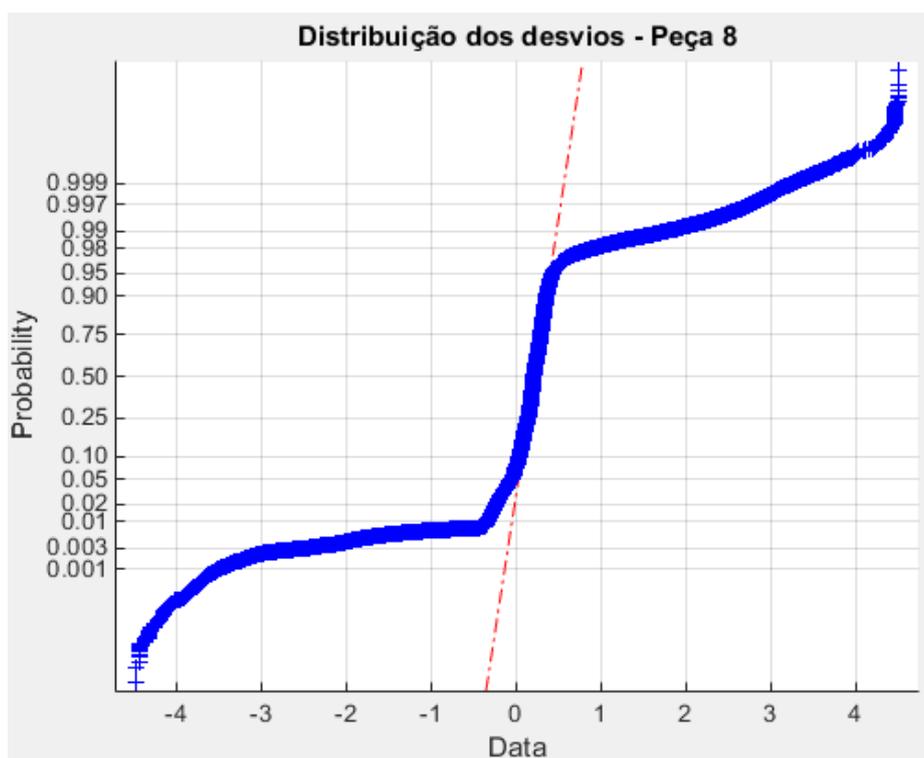


Histograma com filtro

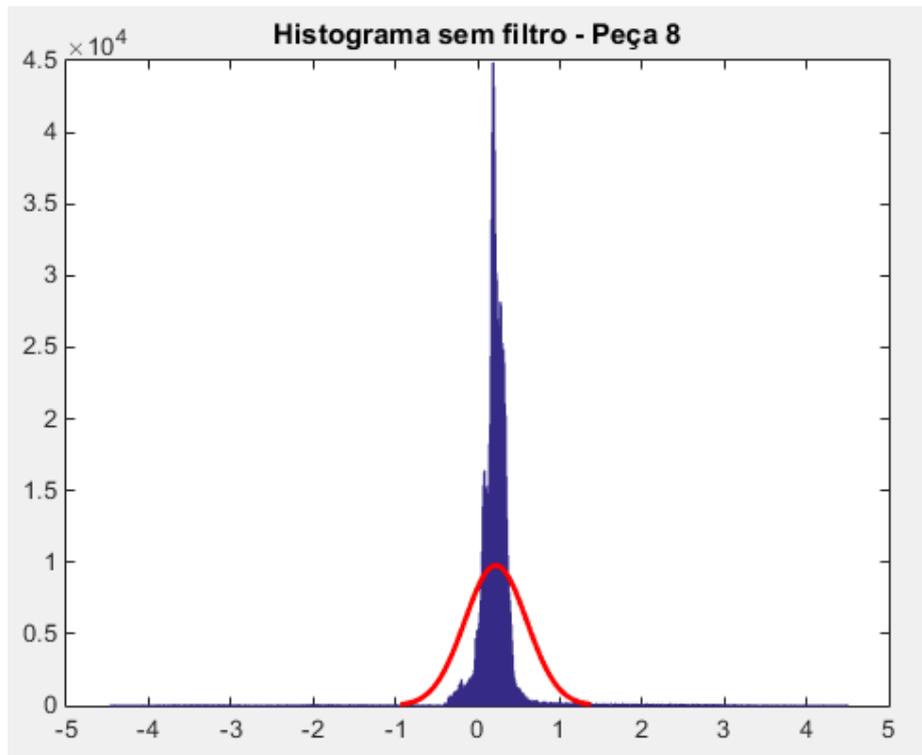


Peça 8

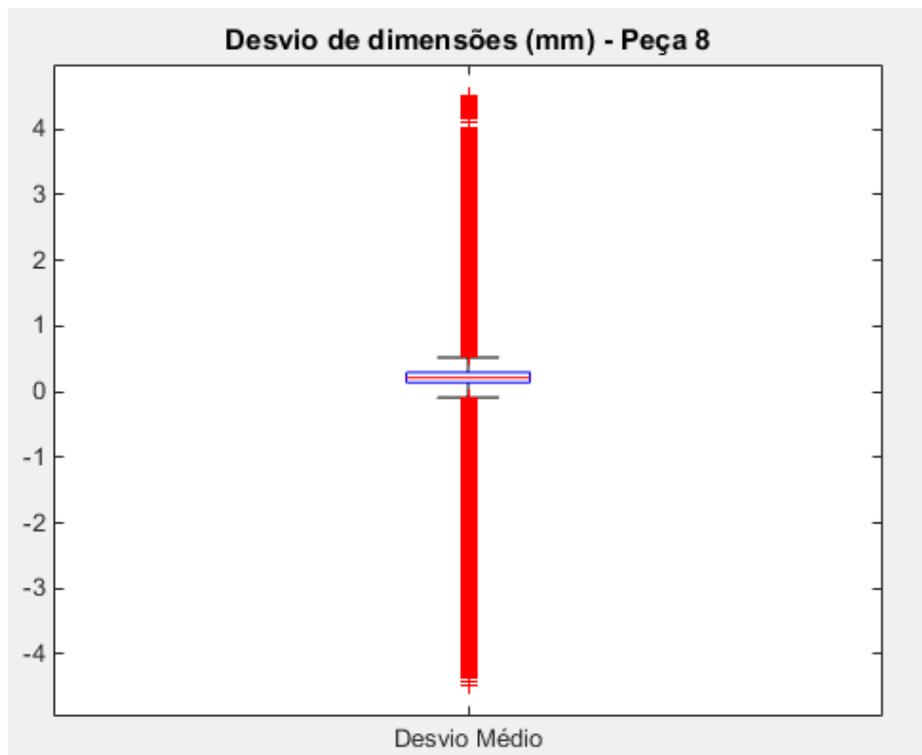
Distribuição dos desvios sem filtro



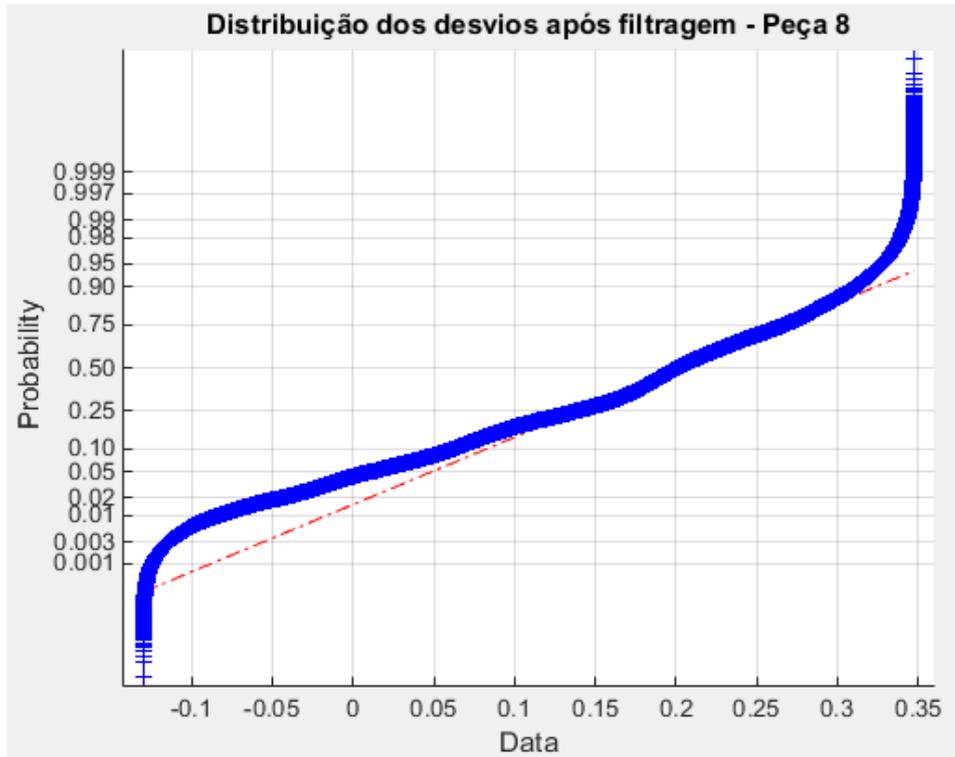
Histograma sem filtro



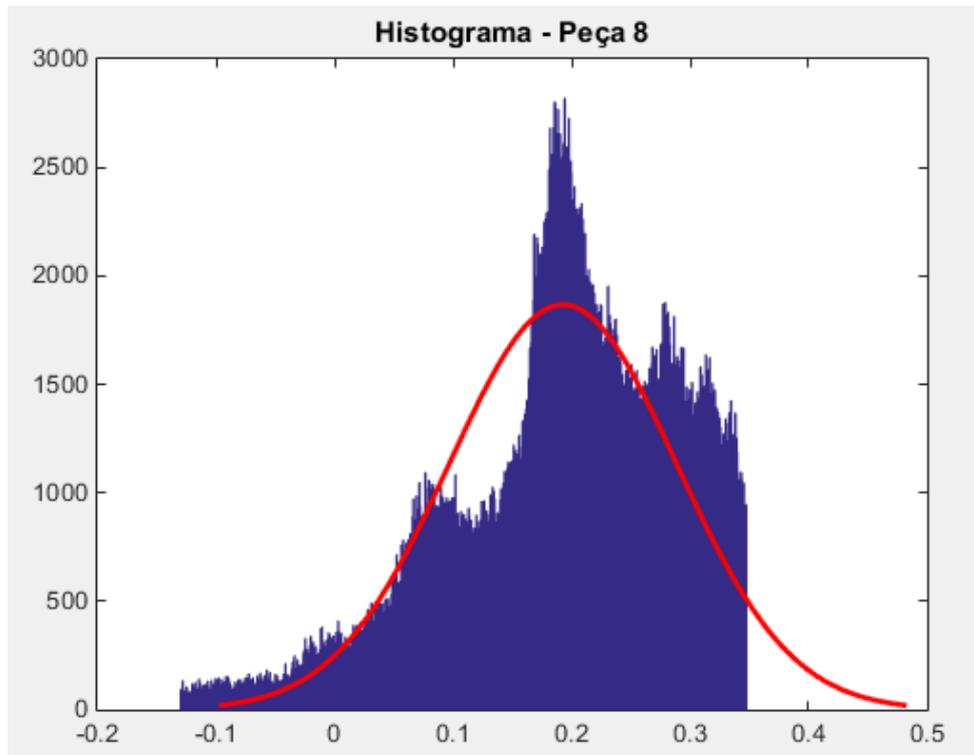
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

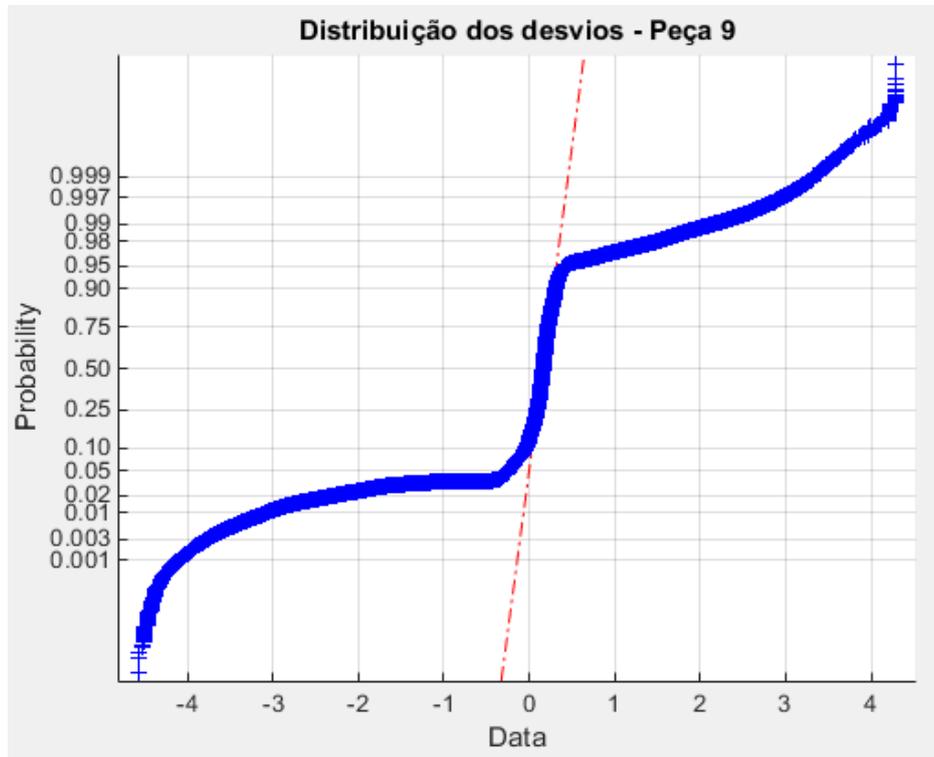


Histograma com filtro

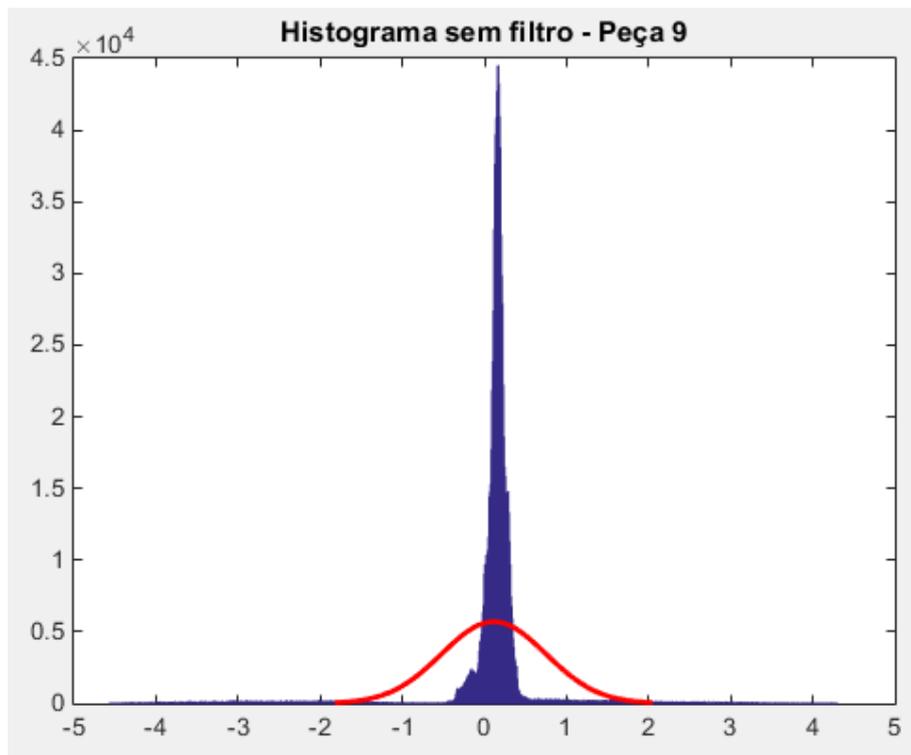


Peça 9

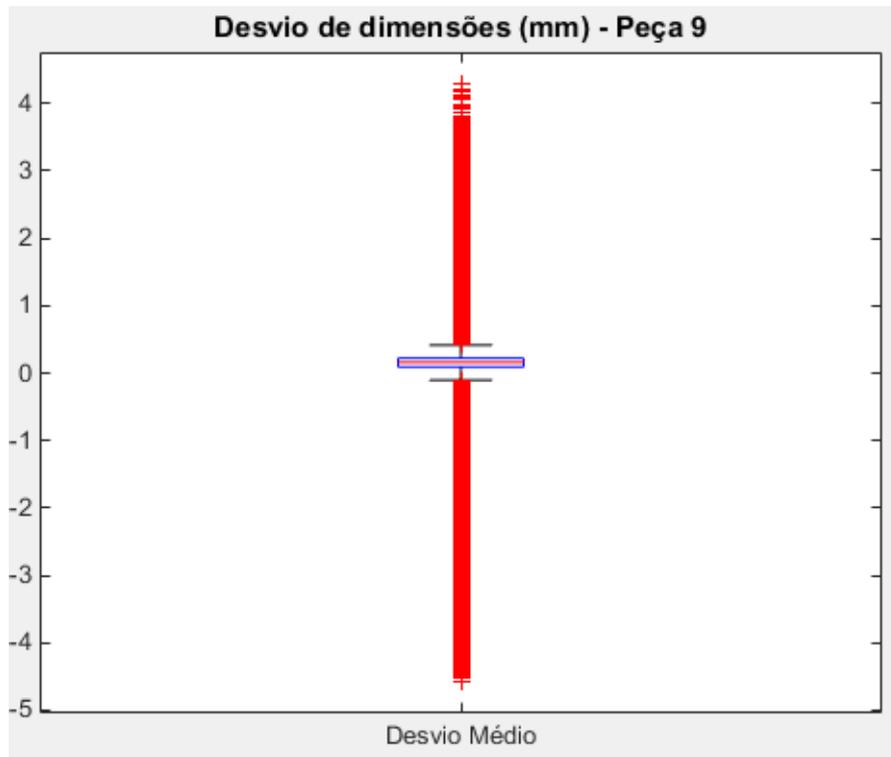
Distribuição dos desvios sem filtro



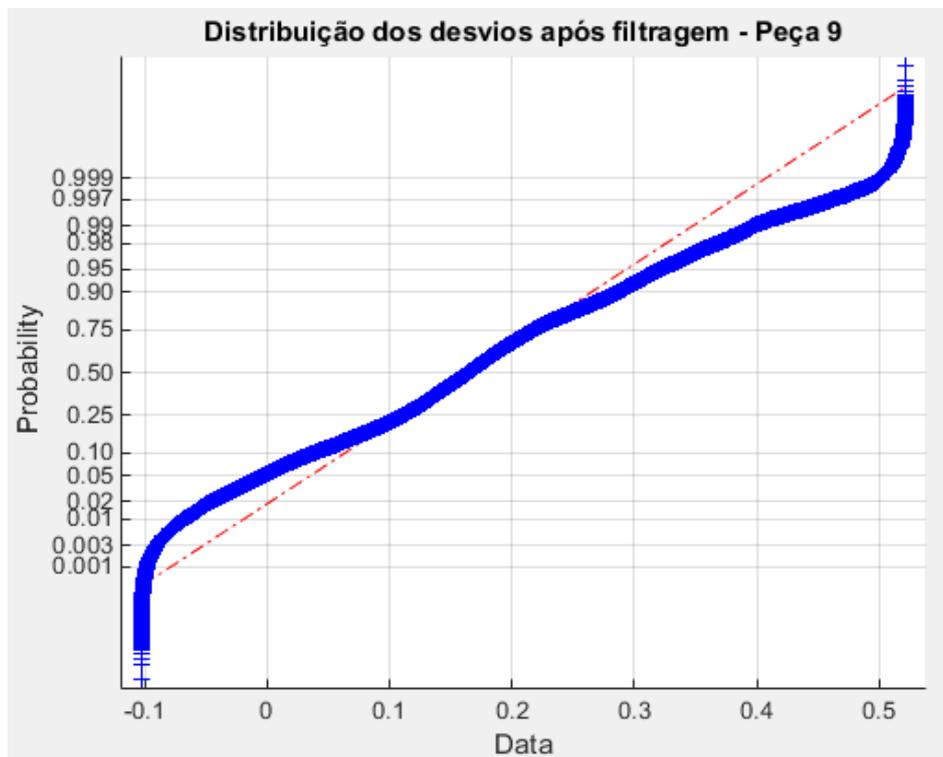
Histograma sem filtro



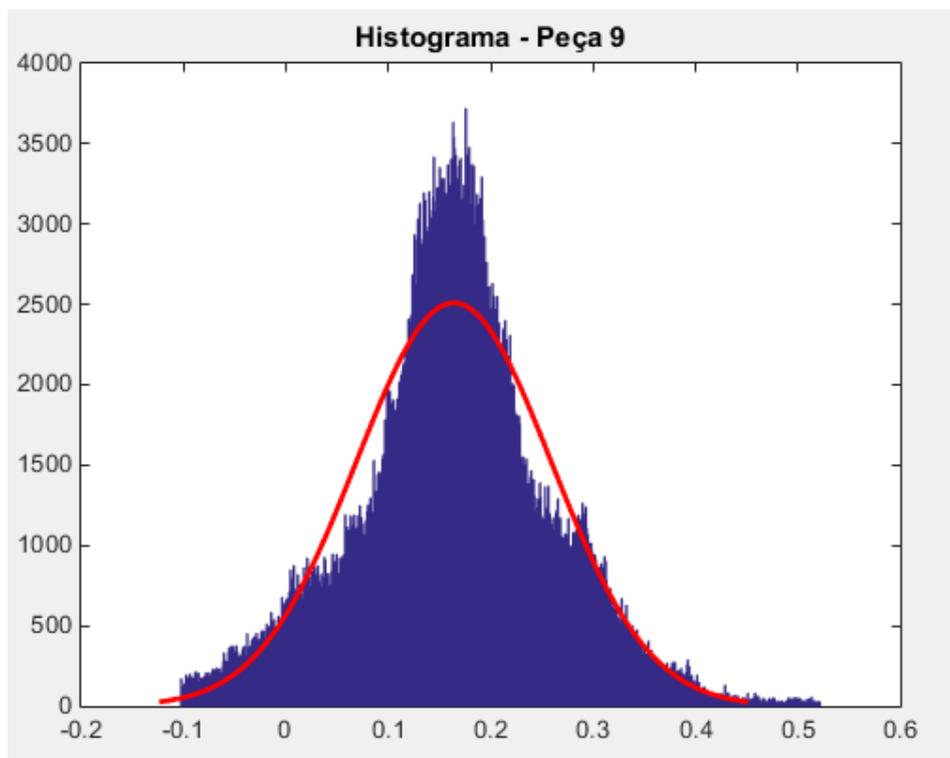
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

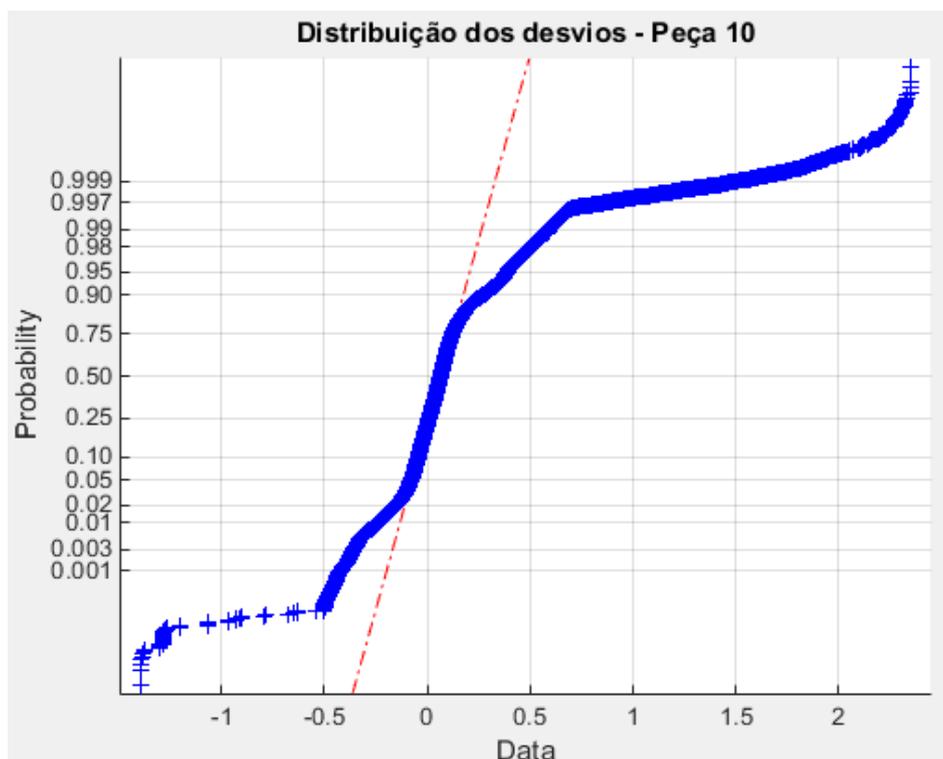


Histograma com filtro

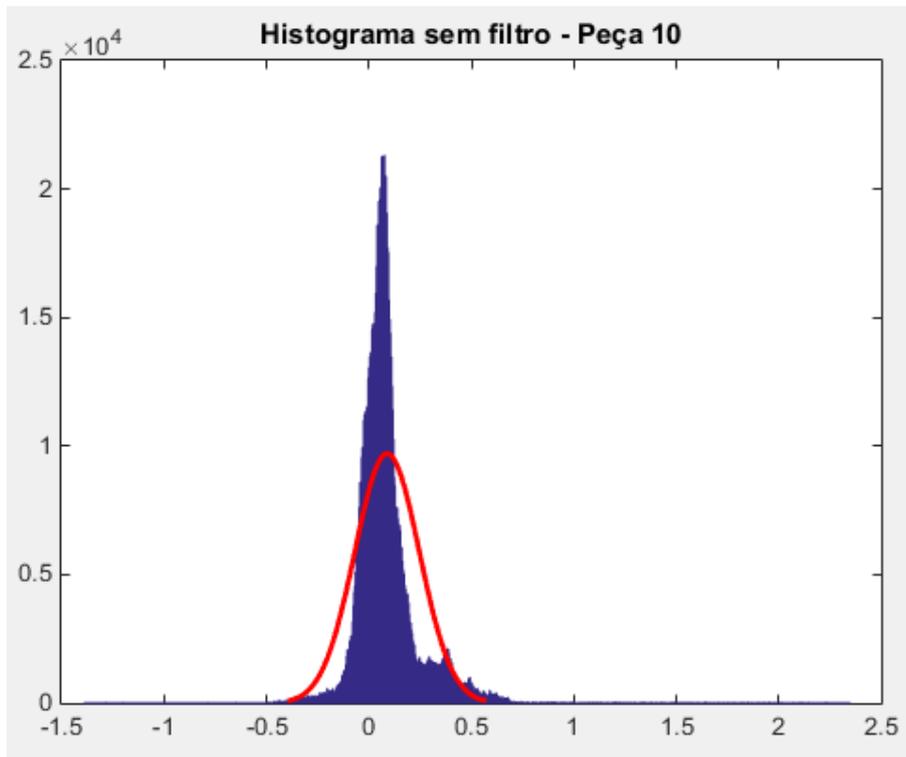


Peça 10

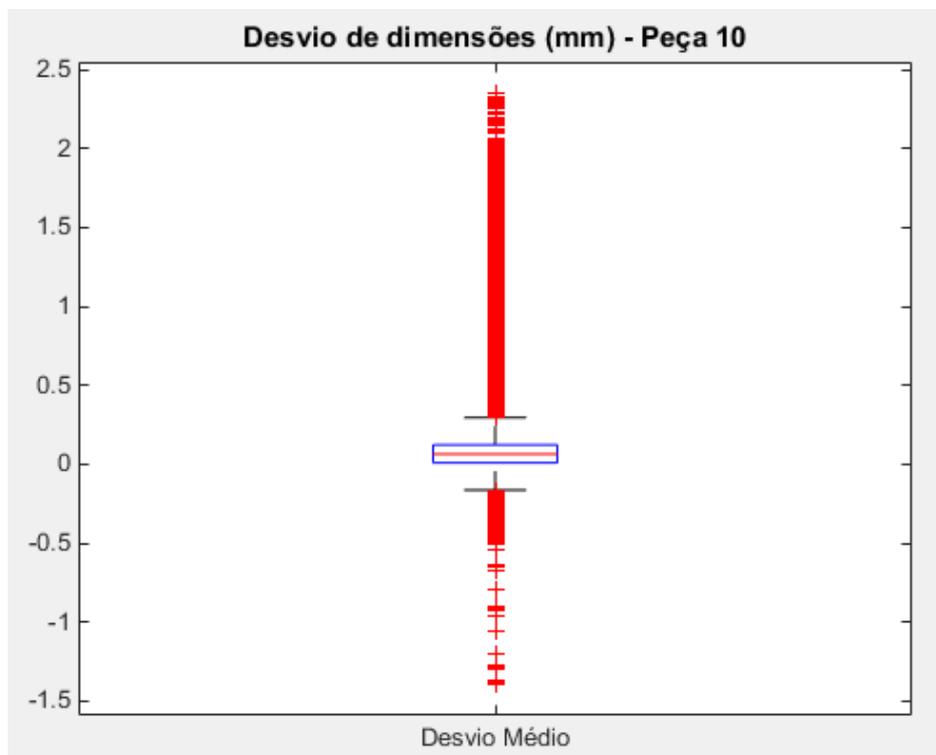
Distribuição dos desvios sem filtro



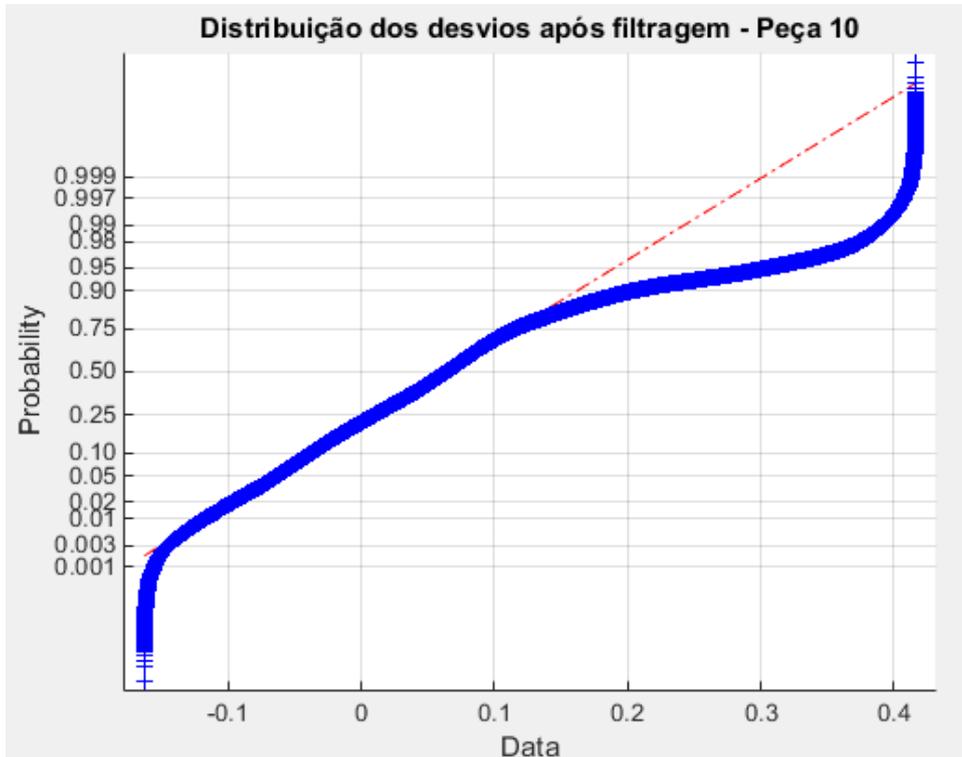
Histograma sem filtro



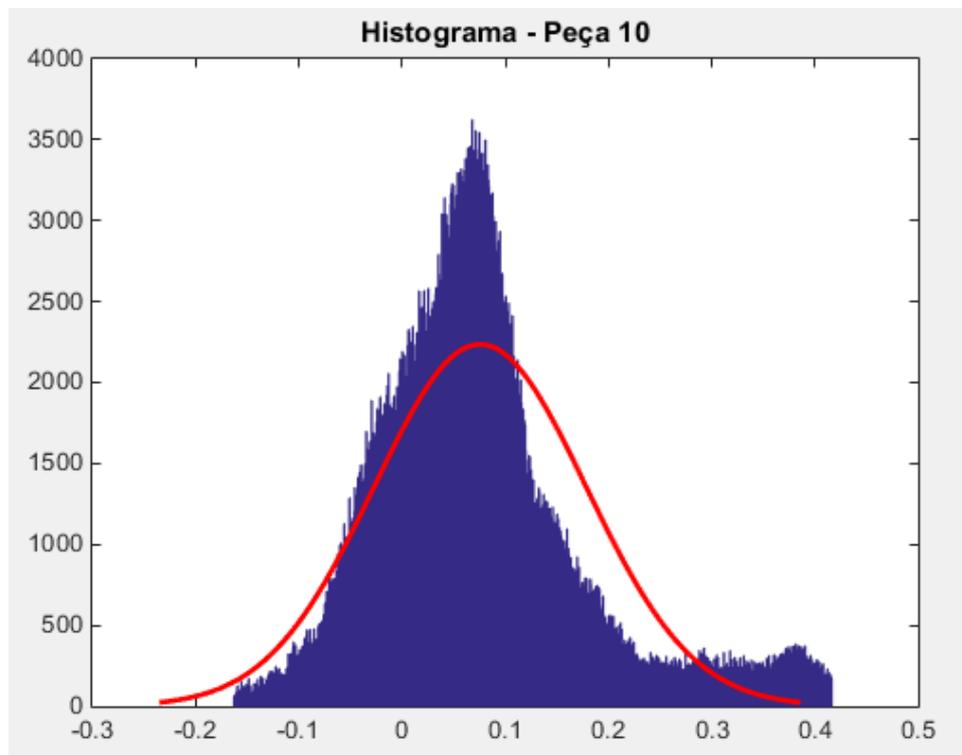
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

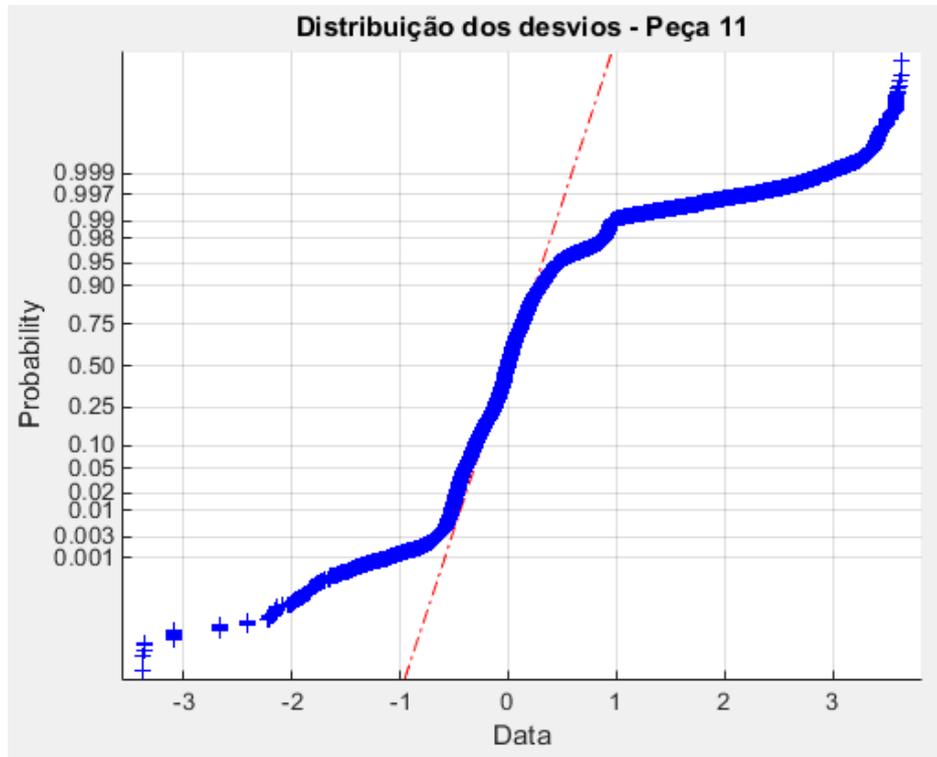


Histograma com filtro

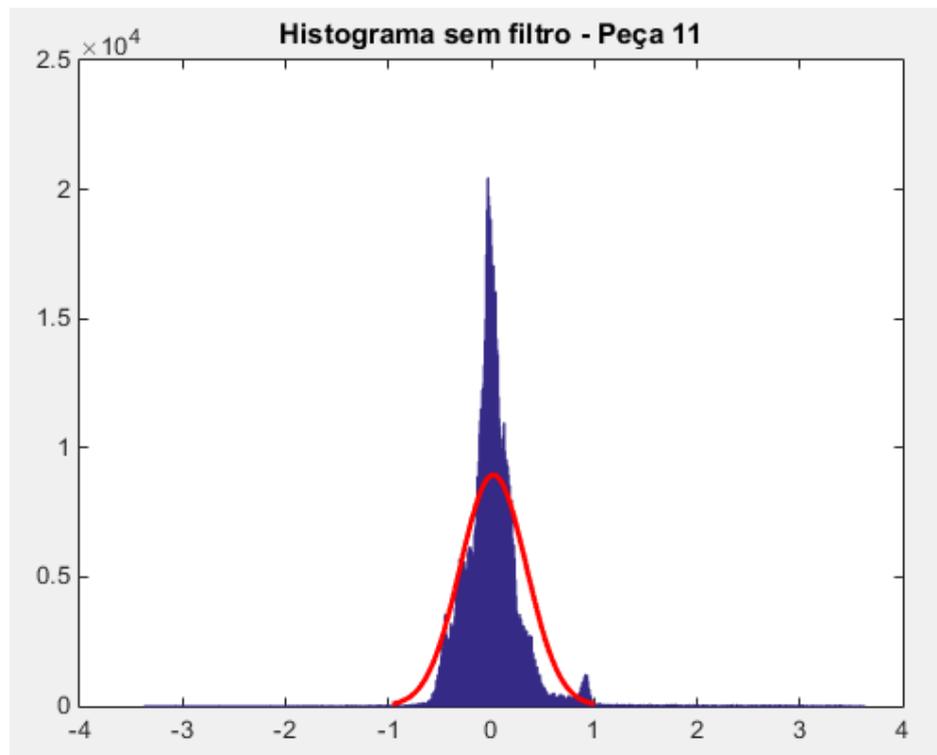


Peça 11

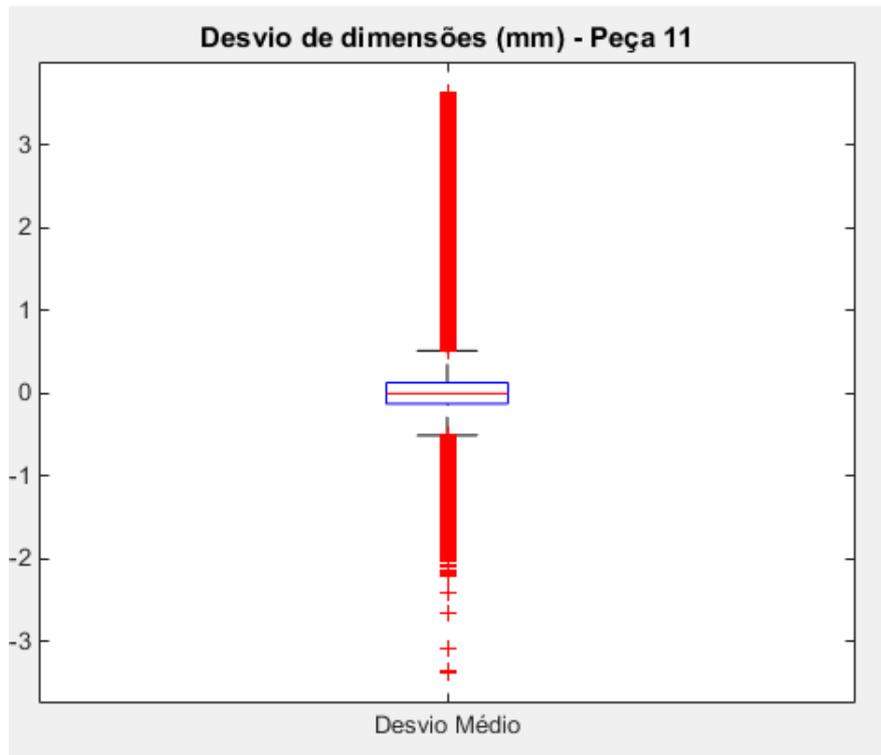
Distribuição dos desvios sem filtro



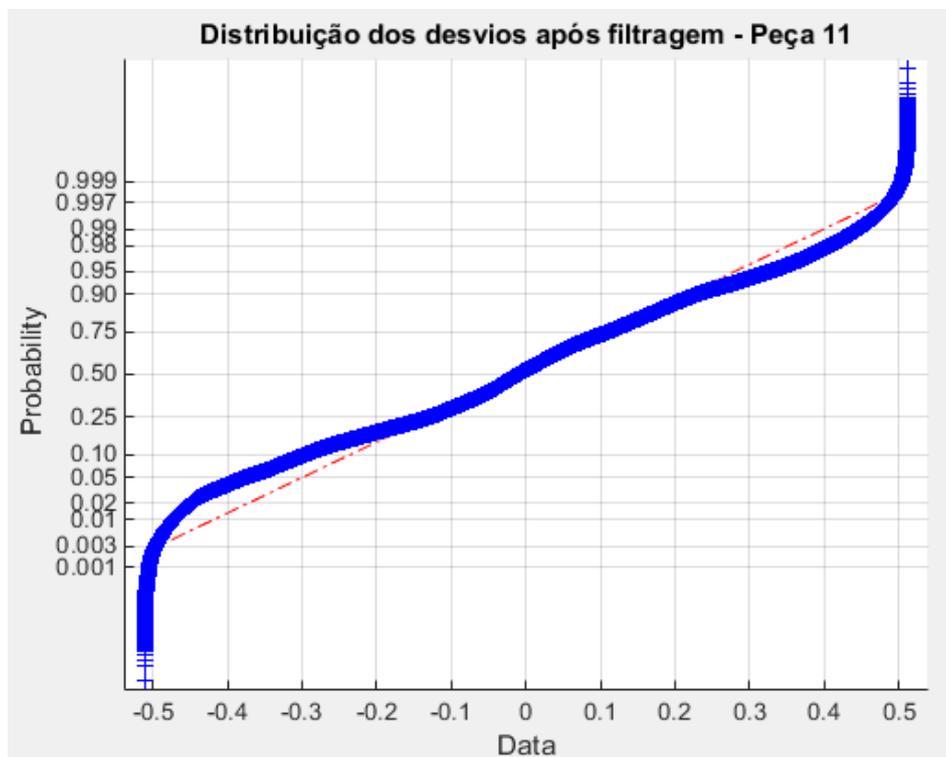
Histograma sem filtro



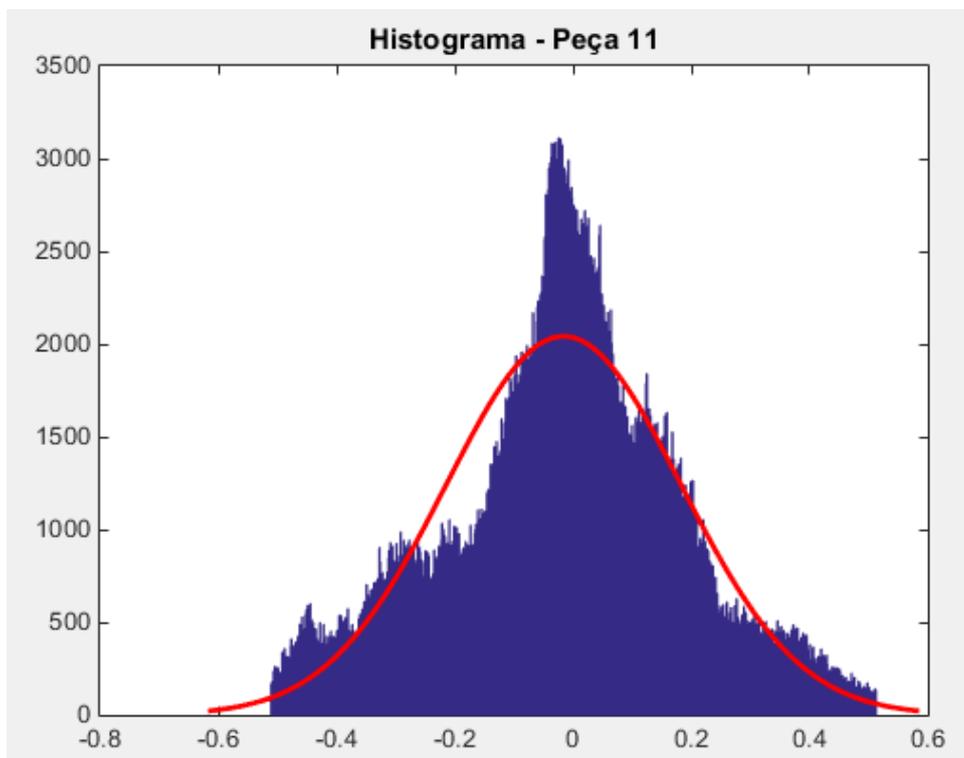
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

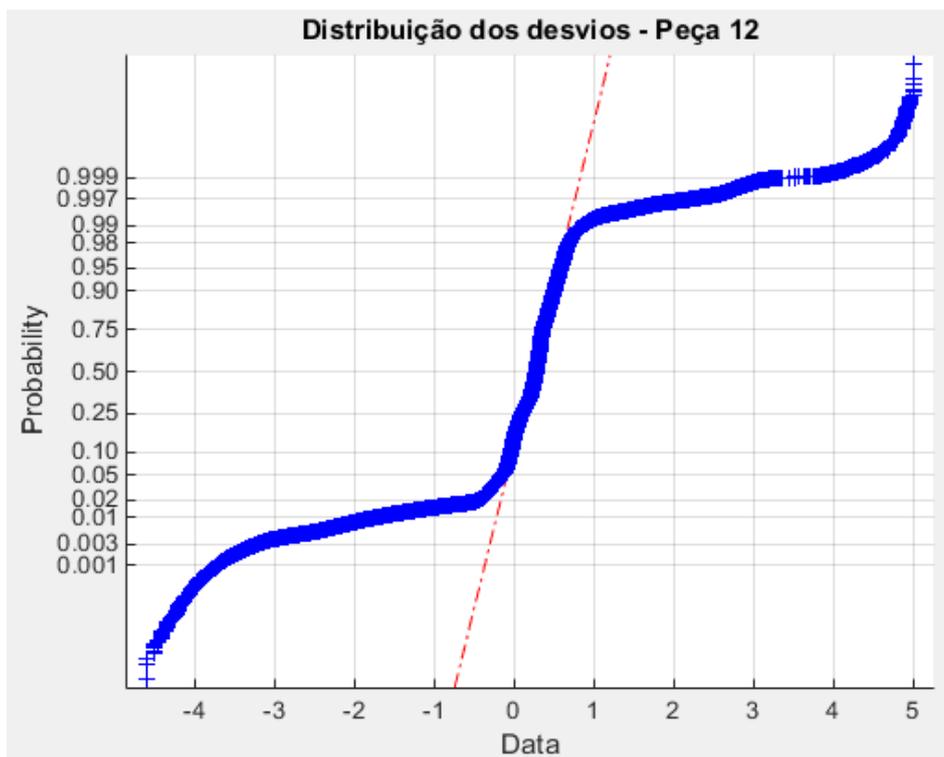


Histograma com filtro

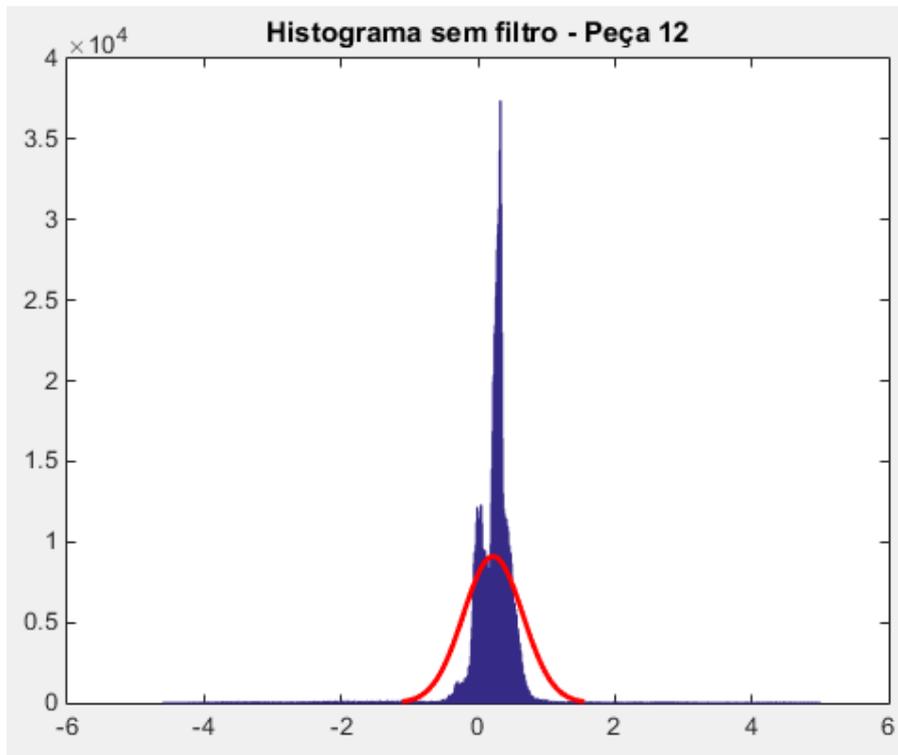


Peça 12

Distribuição dos desvios sem filtro



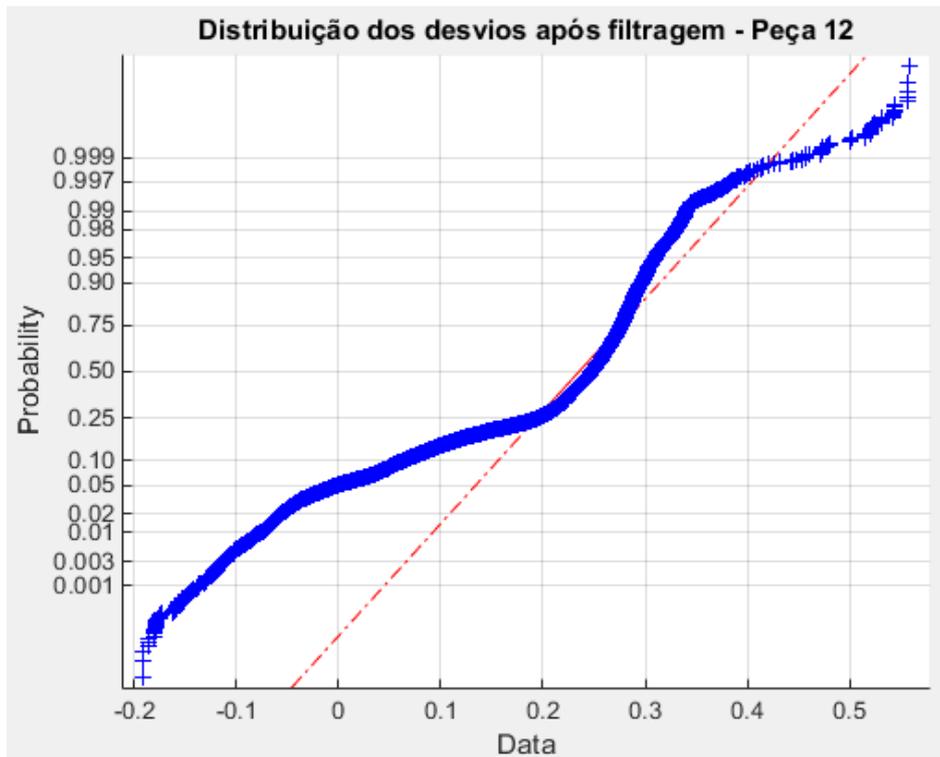
Histograma sem filtro



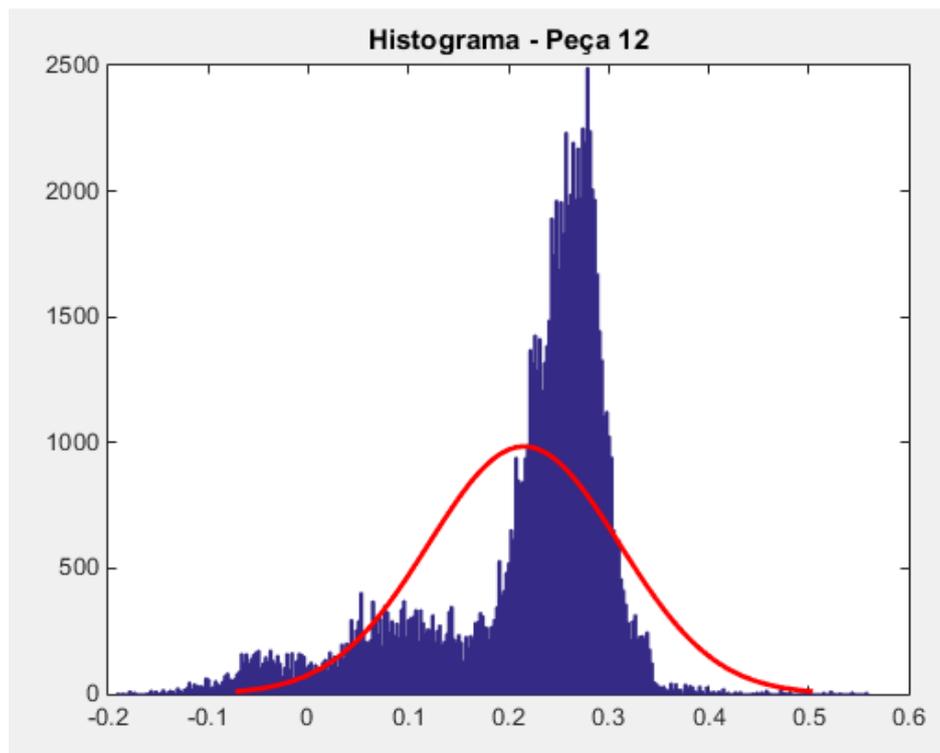
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

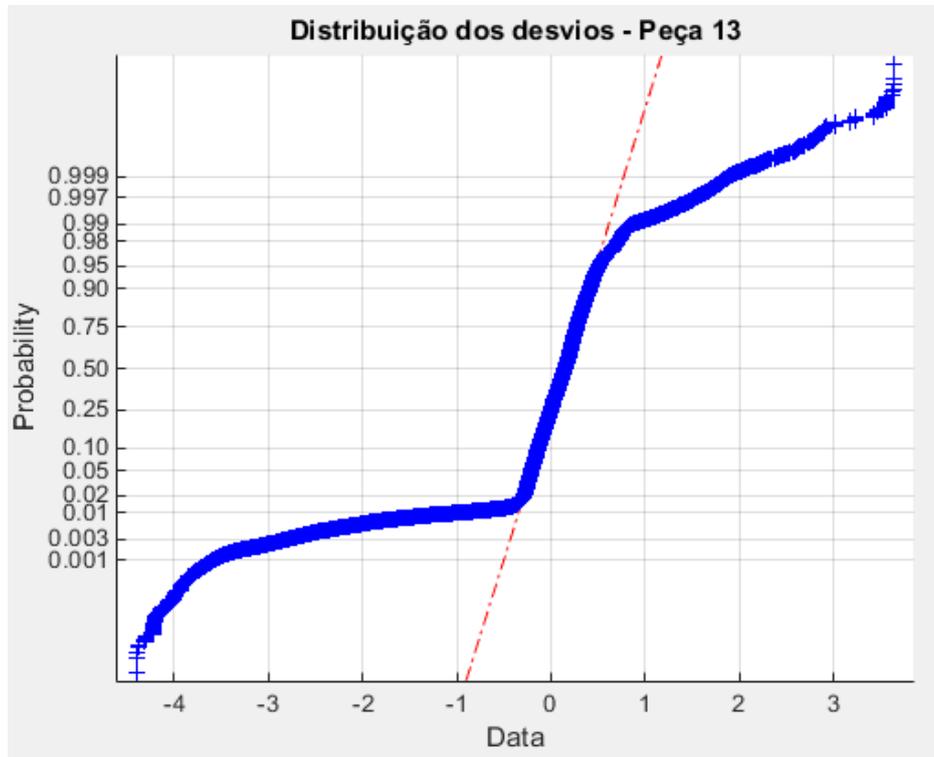


Histograma com filtro

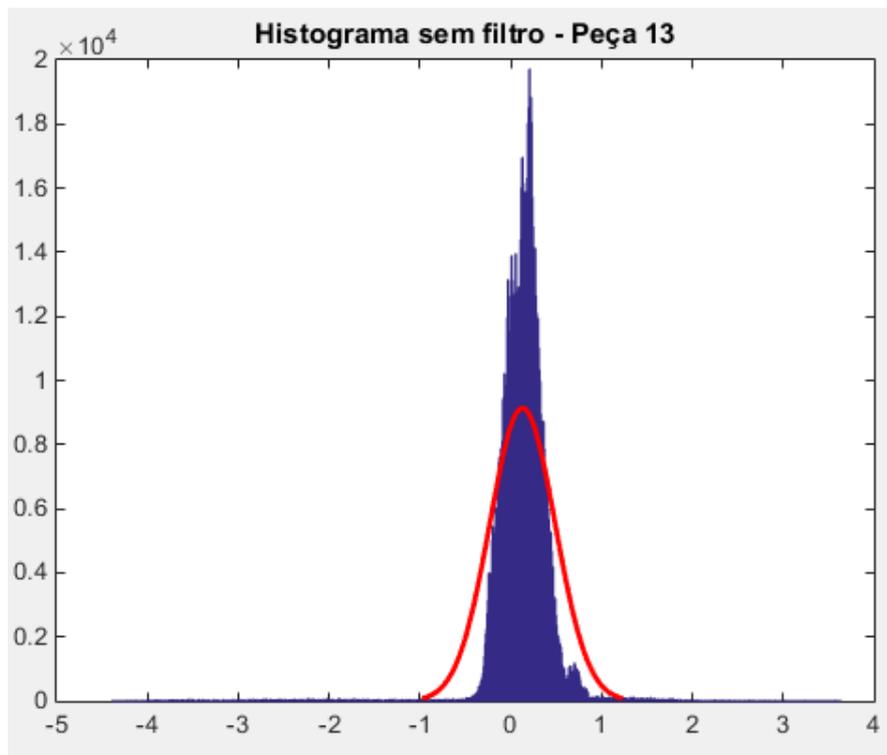


Peça 13

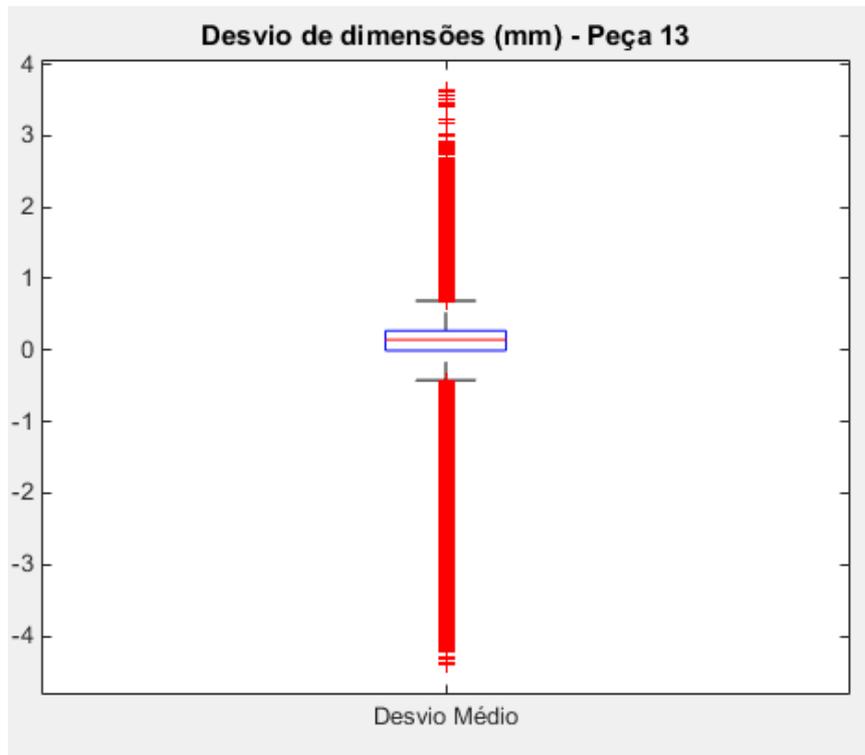
Distribuição dos desvios sem filtro



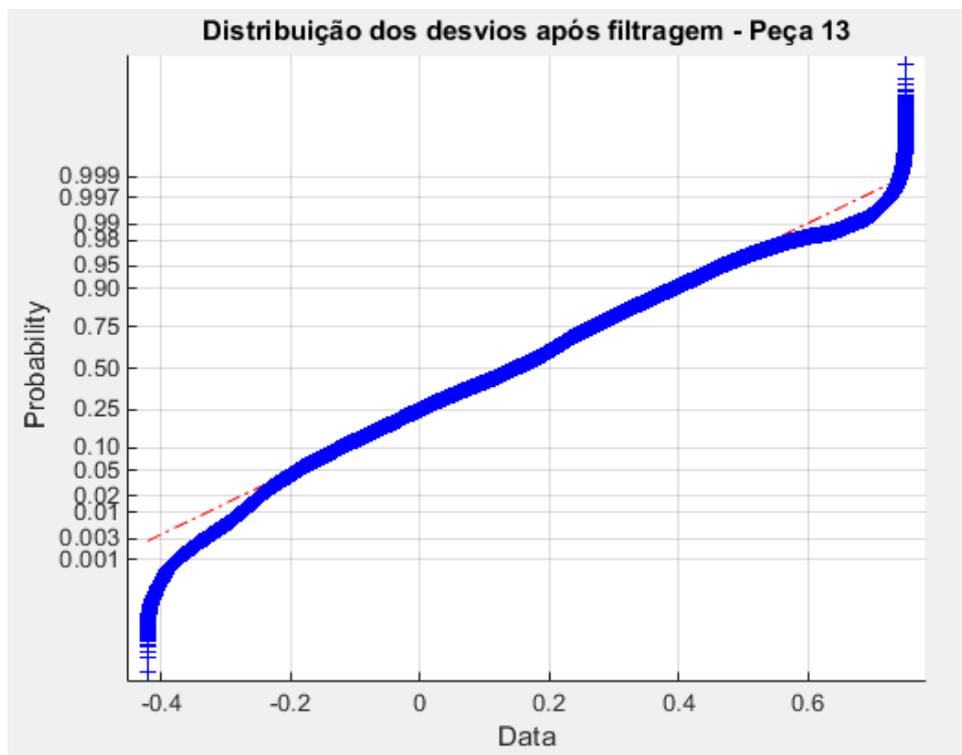
Histograma sem filtro



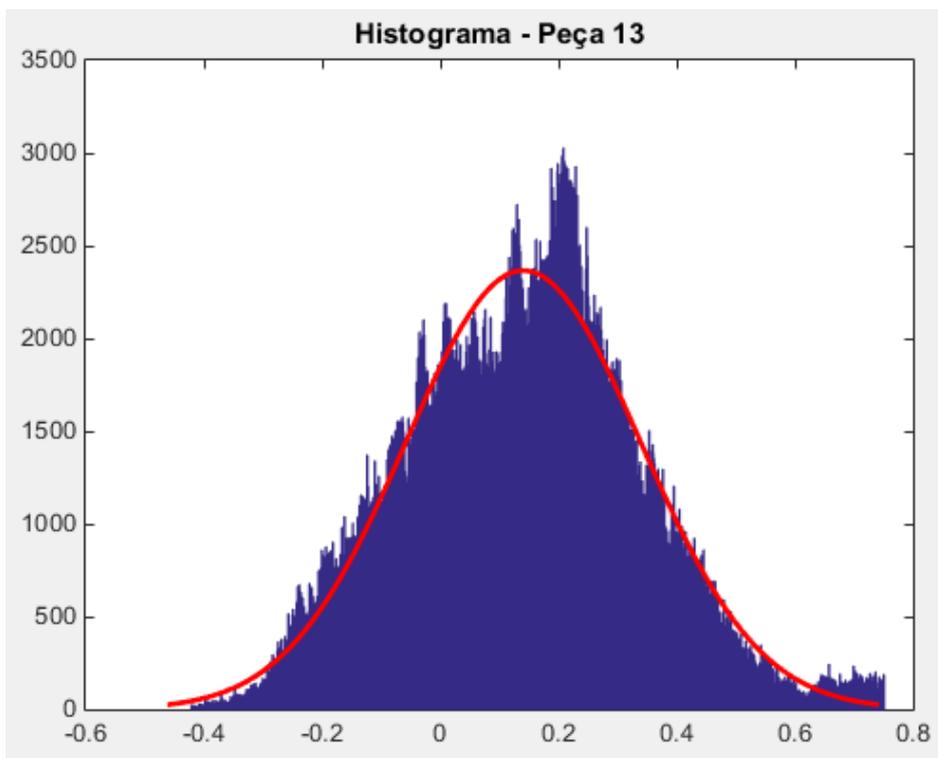
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

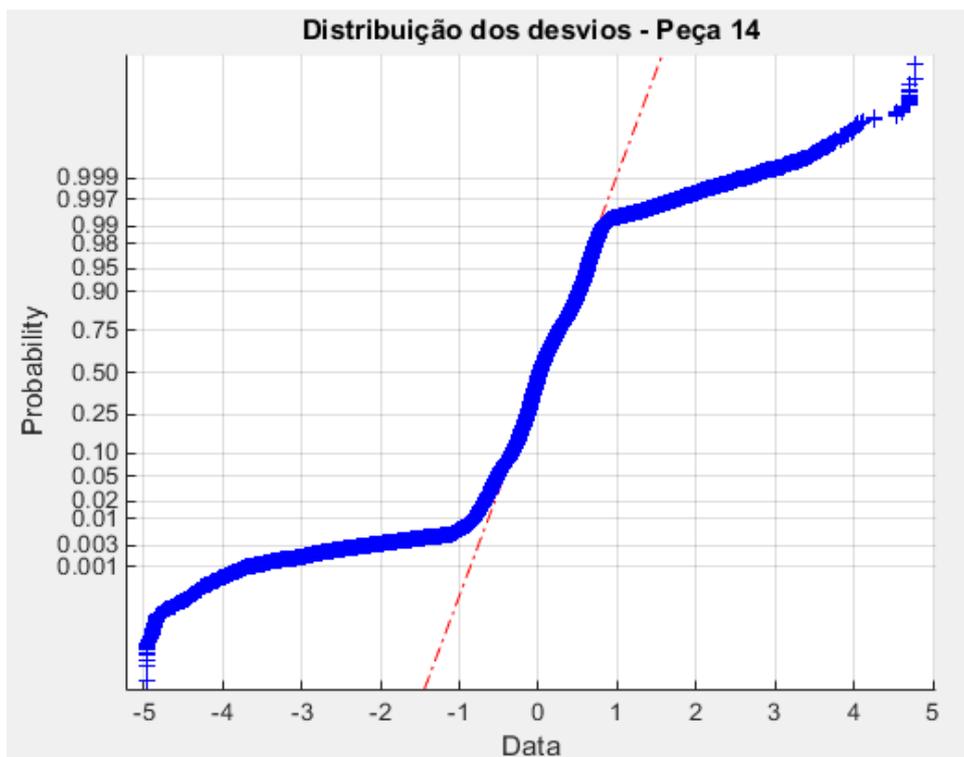


Histograma com filtro

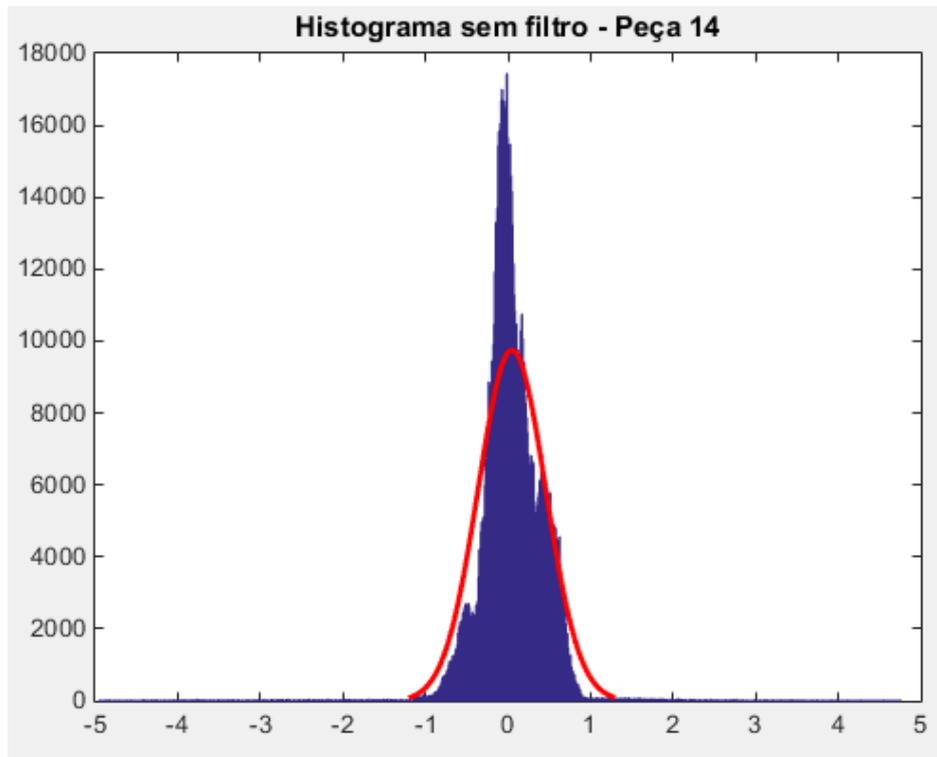


Peça 14

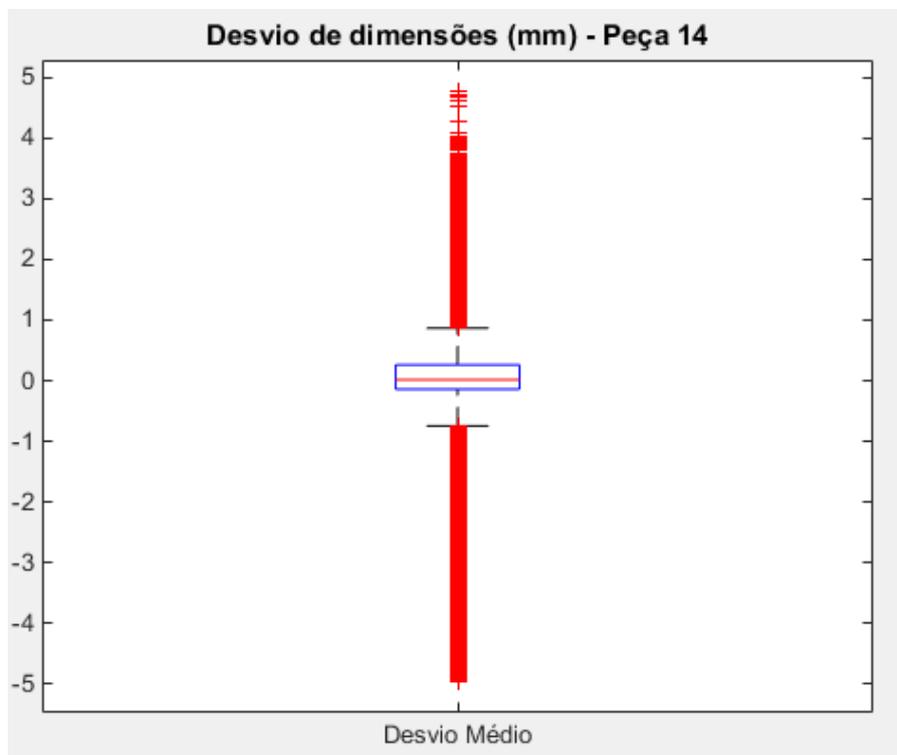
Distribuição dos desvios sem filtro



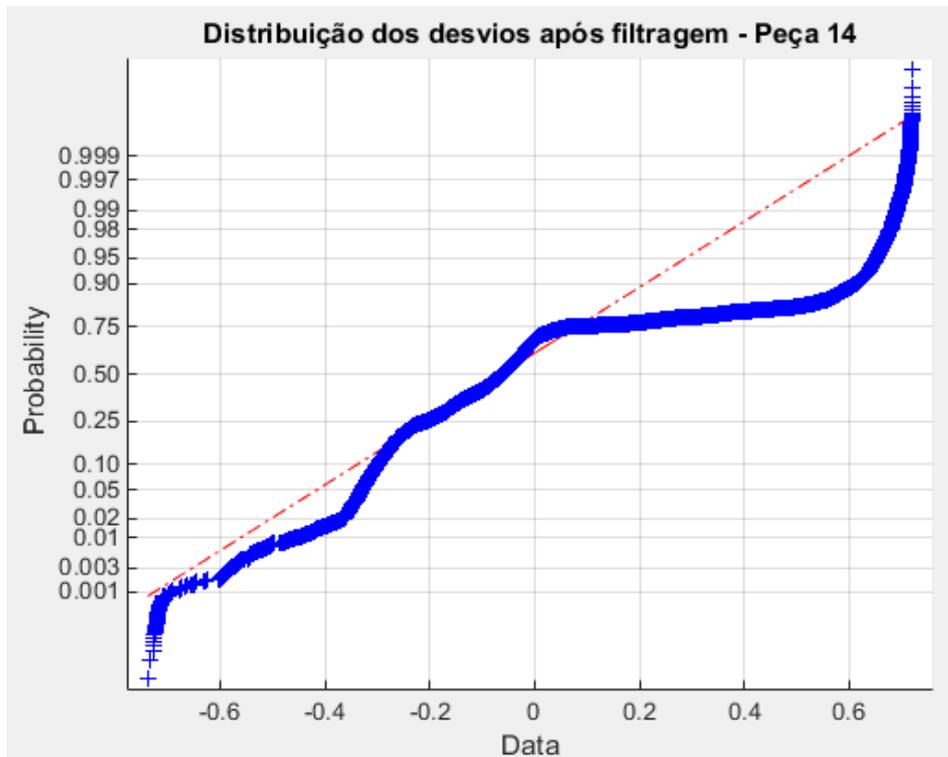
Histograma sem filtro



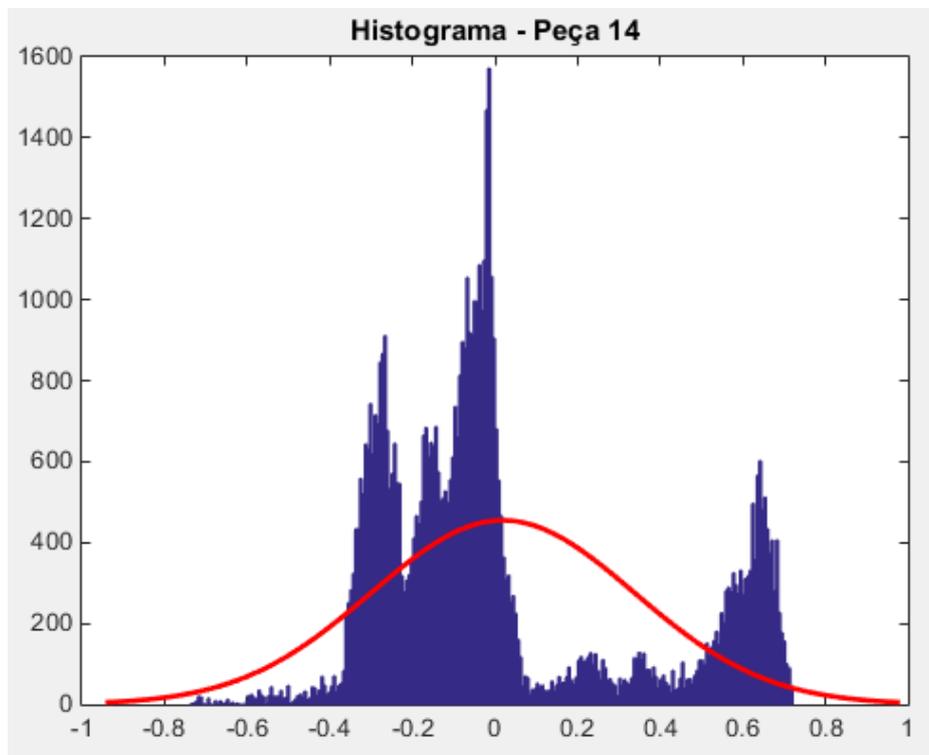
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

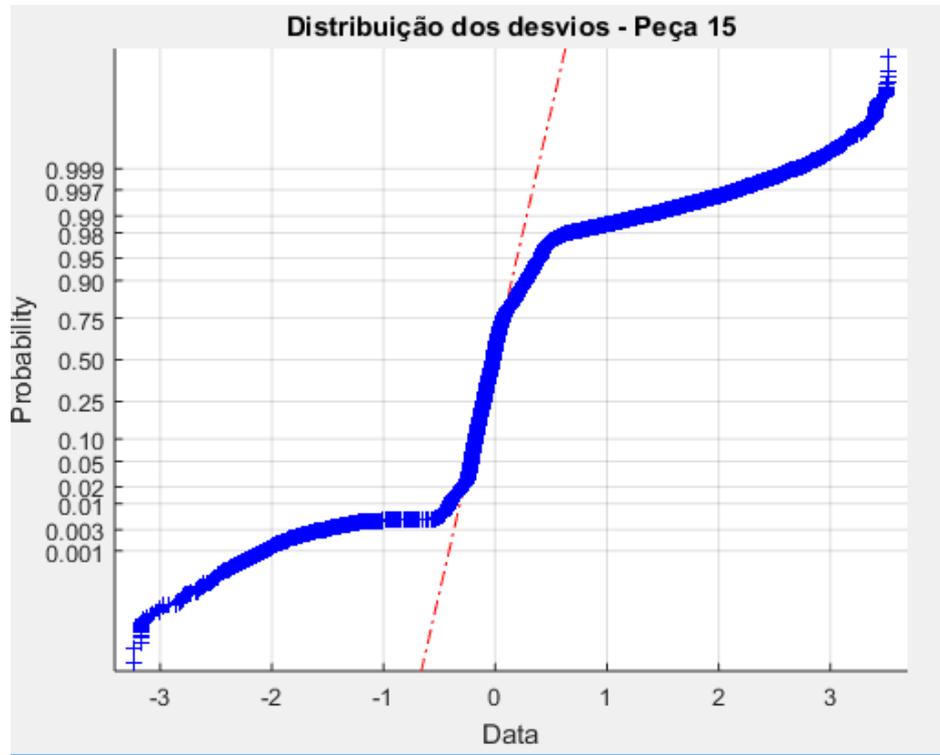


Histograma com filtro

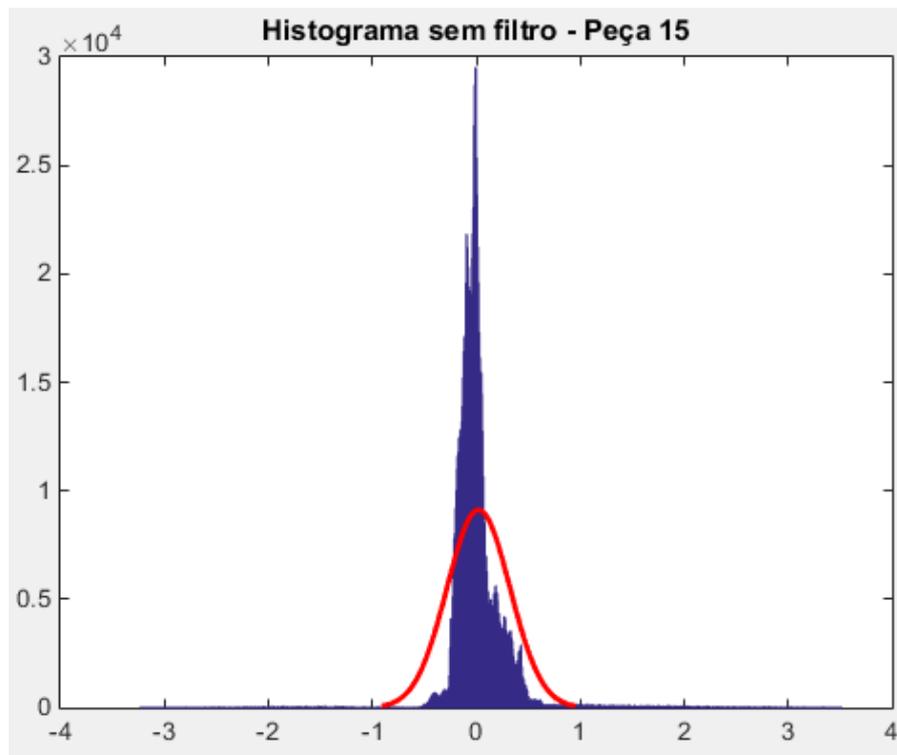


Peça 15

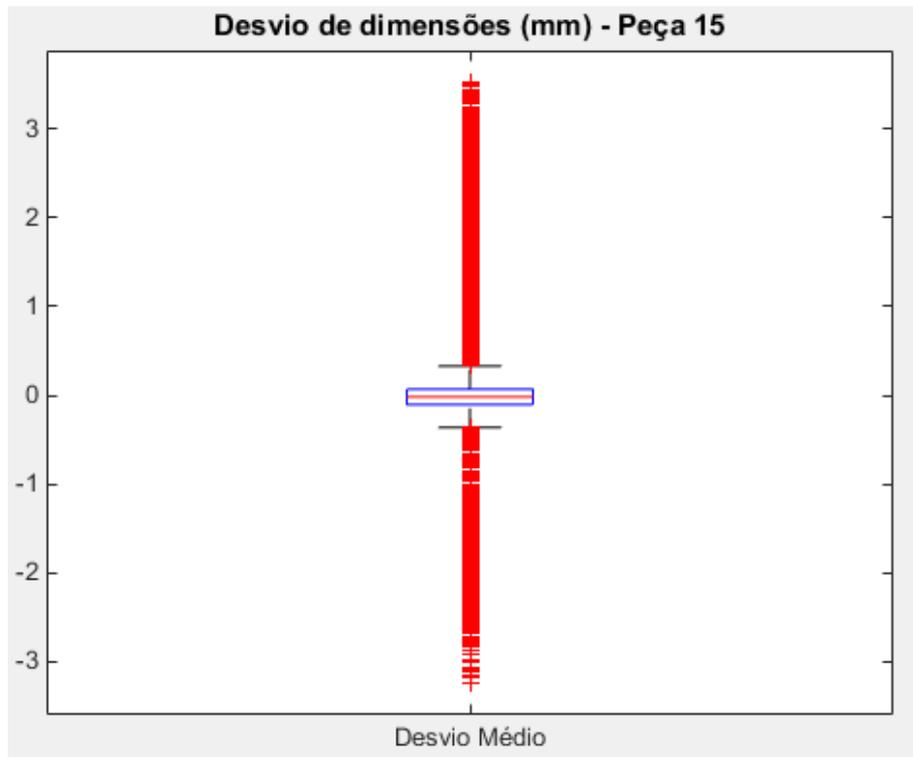
Distribuição dos desvios sem filtro



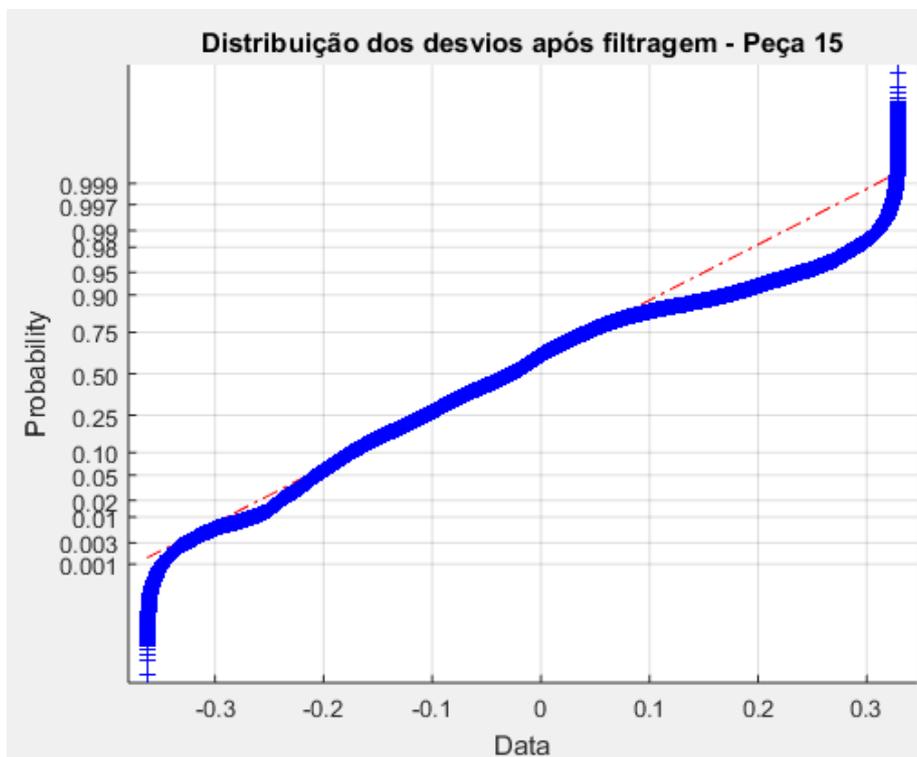
Histograma sem filtro



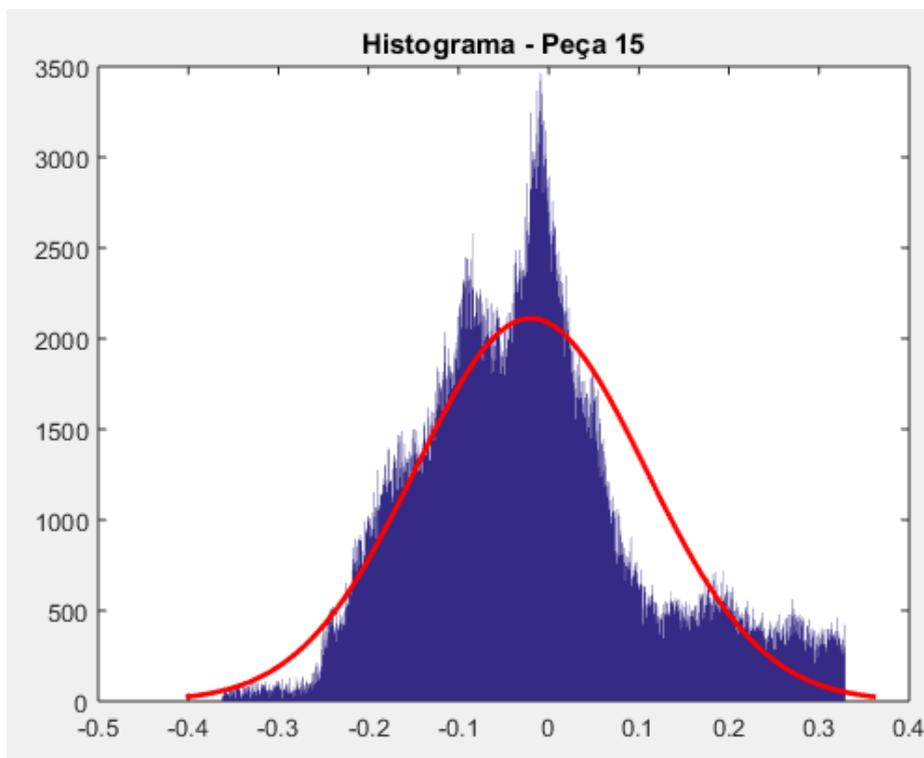
Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro

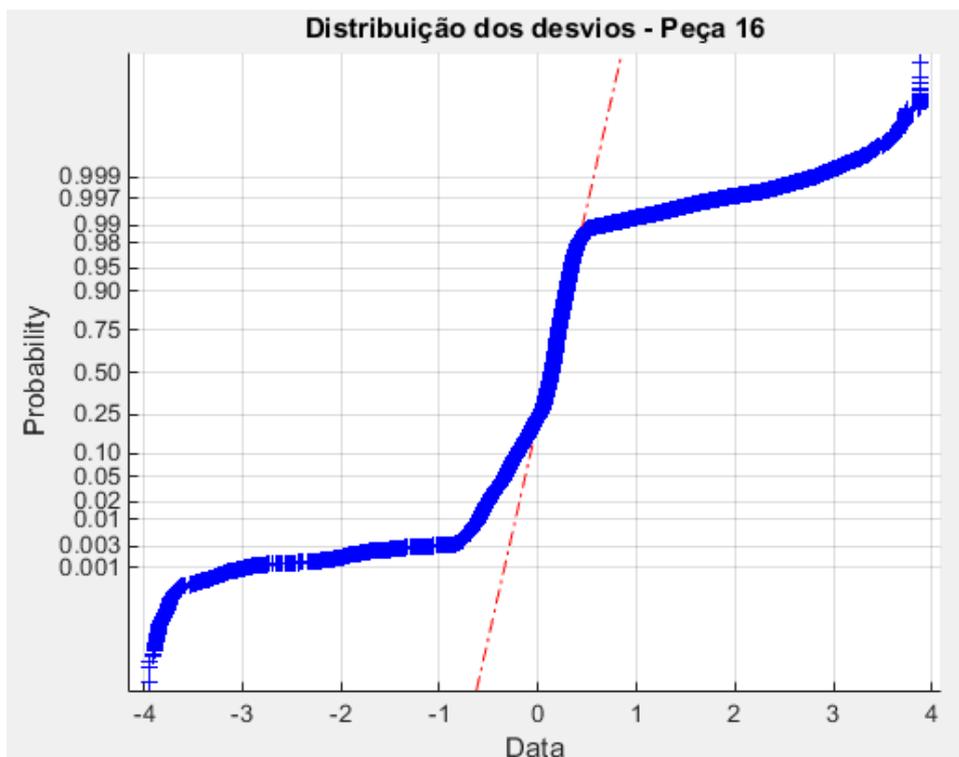


Histograma com filtro

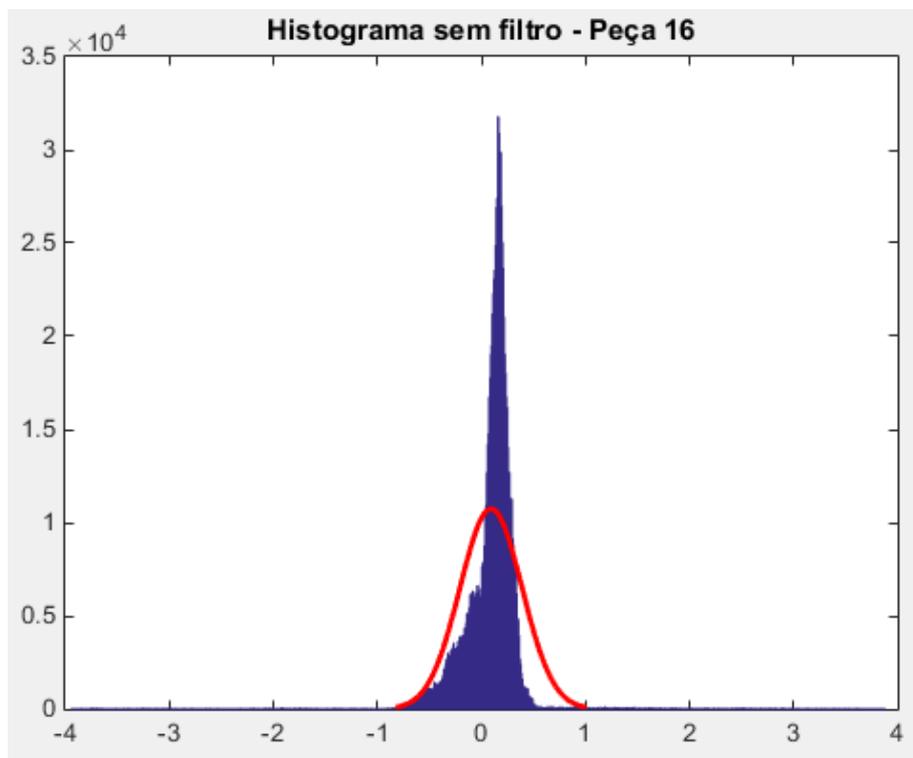


Peça 16

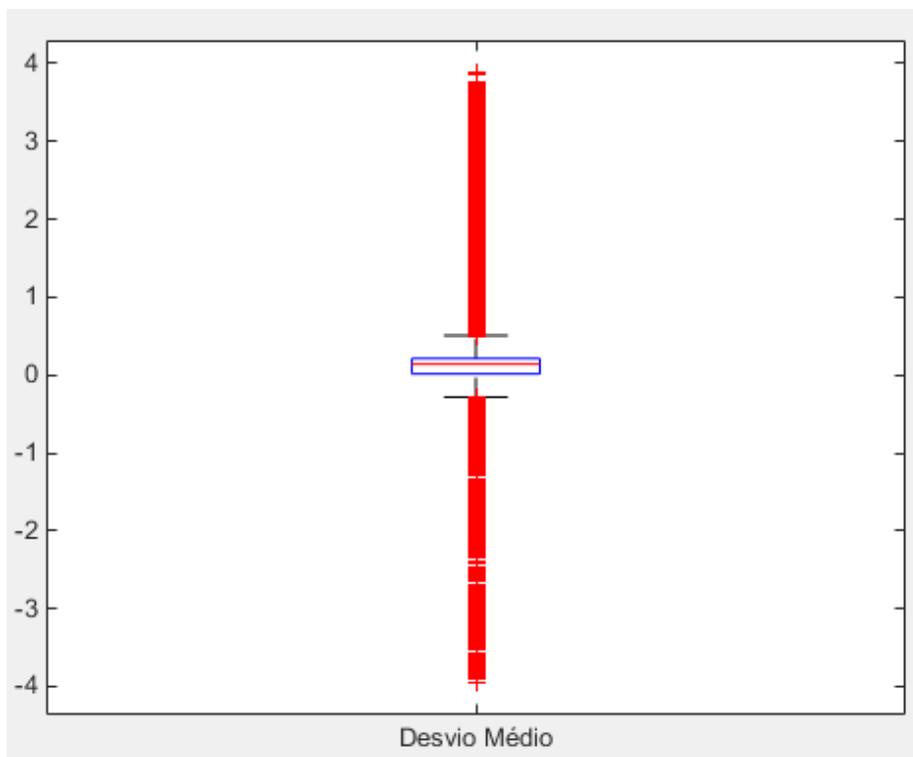
Distribuição dos desvios sem filtro



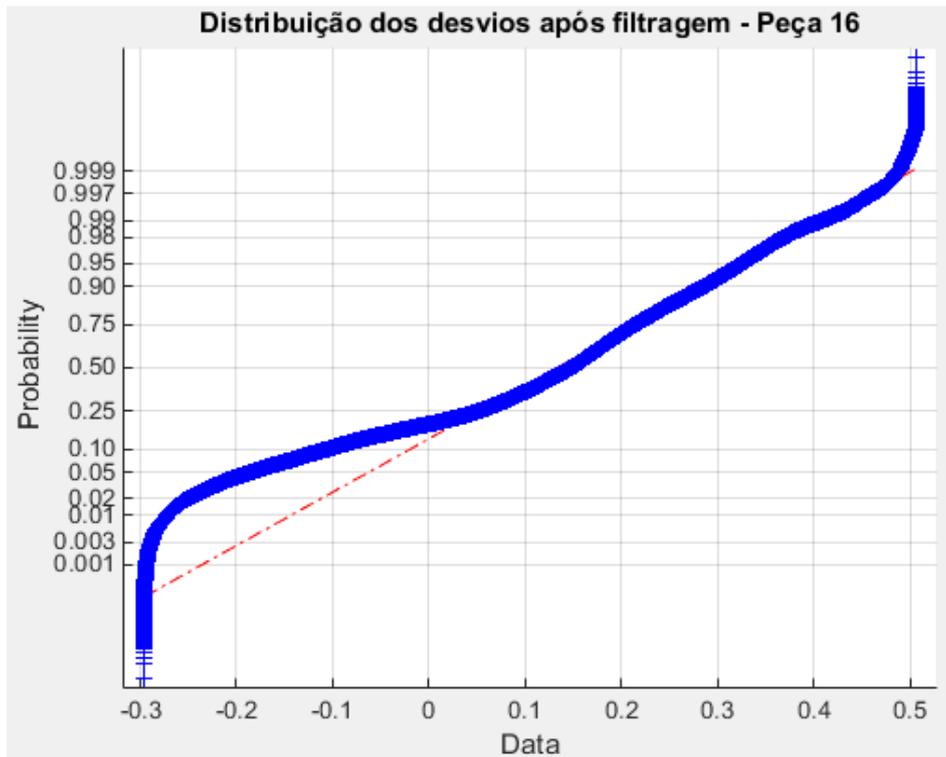
Histograma sem filtro



Boxplot



Distribuição dos desvios com filtro



Histograma com filtro

