

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO REIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DA  
MANUFATURA POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO VISÃO DE MÁQUINA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

RODRIGO REIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DA  
MANUFATURA POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO VISÃO DE MÁQUINA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Walter Luis Mikos

Coorientador: Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto

CURITIBA

2016

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Desenvolvimento de um sistema de monitoramento da manufatura por impressão 3D utilizando visão de máquina”, realizado pelo aluno Rodrigo Reis, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Walter Luis Mikos

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Orientador

Prof. Me. Sidney Carlos Gasoto

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Prof. Me. David Kretschenk

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 17 de junho de 2016.

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)

## RESUMO

REIS, Rodrigo. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento da manufatura por impressão 3D utilizando visão de máquina. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para utilização na impressão 3D, de forma a detectar dois problemas apresentados durante impressões, que podem resultar desperdícios de material, tempo e até peças defeituosas. O primeiro problema é o descolamento de peças da mesa de impressão, que ocorre com peças que possuem uma geometria desfavorável para a fixação. O segundo problema é a falta de deposição de material, que acontece quando o filamento polimérico não é extrudado durante a impressão, fazendo com que a máquina continue se movendo sem formar a peça. Para a detecção dos problemas durante o processo, aplicou-se um sistema de visão de máquina, através do uso de um programa desenvolvido em um módulo do ambiente de programação *LabVIEW*, o *Vision Builder*, com câmera, fixação e iluminação apropriadas, para monitorar a impressão das peças. O desenvolvimento do sistema de monitoramento se deu por um processo iterativo de criação e testes, que foram realizados durante a impressão de peças de dimensões e cores variadas, até que uma solução simples e funcional fosse obtida. O resultado é um sistema de monitoramento que se utiliza de visão de máquina e tem capacidade de detectar automaticamente o descolamento de peças e a falta de deposição de material.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, Visão de máquina, Sistema de monitoramento.

## ABSTRACT

REIS, Rodrigo. Development of a monitoring system for 3D printing manufacturing using machine vision. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The present work presents the development of a monitoring system to be used on the 3D printing process in order to detect two problems during the printing, which can result in waste of material, time and even defective parts. The first problem is the part detachment from the printing table that happens with unfavorable geometry parts to fixture. The second problem is the lack of material deposition, which happens when the polymeric filament is not extruded during the printing, causing the machine to continue moving without forming the part. To detect the problems along the process, a machine vision system was applied, using a software developed in a *LabVIEW* module, *Vision Builder*, with the appropriate camera, fixture and illumination, to track the printing of a part. The development of the monitoring system happened through an iterative process of creation and testing, during the printing of parts with different colors and dimensions, until a functional and simple solution was obtained. The result is a monitoring system using machine vision with the capability of automatically detecting the detachment of parts and the lack of material deposition.

**Keywords:** 3D Printing, Machine Vision, Monitoring System.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Resultado final da imagem com vértices e centro de furos marcados. ....	15
Figura 2 – Representação esquemática da detecção em tempo real. ....	16
Figura 3 – Material polimérico desperdiçado devido descolamento da peça .....	17
Figura 4 - Eixo escalonado, dimensões em mm.....	19
Figura 5 – Processo genérico do CAD à peça em 8 etapas.....	21
Figura 6 – Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada. ....	22
Figura 7 – Impressora 3D profissional 3D Cloner DH+. ....	24
Figura 8 – Modelo adotado para os componentes de um sistema de visão.....	27
Figura 9 – Câmeras industriais para visão de máquina. ....	28
Figura 10 – <i>Vision Builder</i> para inspeção automatizada. ....	30
Figura 11 – Esquema de processamento com transformada de imagens .....	32
Figura 12 – Ruídos:(a) baixo nível; (b)nível moderado; (c)alto nível de ruído .....	33
Figura 13 – (a) Exemplo de imagem; (b) Histograma da imagem. ....	33
Figura 14 – Exemplo de equalização; (a)imagem original; (b)imagem equalizada ...	34
Figura 15 – Exemplo de reconhecimento de bordas. ....	35
Figura 16 – Fluxo óptico extraído de duas imagens de um vídeo com movimento. ...	36
Figura 17 – Fluxograma das etapas do projeto. ....	37
Figura 18 – Fluxograma do processo iterativo de desenvolvimento.....	38
Figura 19 - Webcam logitech c920.....	40
Figura 20 - Módulo led smd5050 ligado à fonte de alimentação .....	41
Figura 21 - Diagrama de estados do sistema de monitoramento.....	43
Figura 22 - Sequência de operações do estado de detecção da peça.....	44
Figura 23 – <i>Script</i> com sequência de operações do <i>Vision Assistant</i> .....	45

Figura 24 - Vision assistant; (a) imagem original; (b) adequação do ângulo; (c) extração do plano de cor; (d) equalização. ....	46
Figura 25 - Detecção de peça escura .....	47
Figura 26 - Detecção de peça e, estágio inicial de inspeção.....	47
Figura 27 - Função <i>Logic Calculator</i> .....	48
Figura 28 - Sequência de operações dos estados de avaliação da borda .....	49
Figura 29 - Aplicação da detecção da borda.....	50
Figura 30 - Operação do estado de peça reprovada.....	51
Figura 31 - Função <i>custom overlay</i> .....	52
Quadro 1 - Relação dos testes realizados.....	52
Figura 32 - Impressão de um modelo de capacete .....	54
Figura 33 - Exemplo de foco da imagem.....	55
Figura 34 - Deslocamento da região de avaliação de borda para cima .....	56
Figura 35 – Câmera e módulo de led presos ao suporte .....	57
Figura 36 –Comparações de iluminação;(a) iluminação frontal;(b) iluminação ambiente do laboratório.....	58
Figura 37 - Comparação do contraste obtido em um fundo claro e um escuro. ....	59
Figura 38 - Interferência do fundo da imagem na detecção de borda. ....	60
Figura 39 - Chaveiro em forma de coruja.....	60
Figura 40 – Cubo com 2cm de aresta .....	61
Figura 41 - Deposição indevida de material durante impressão de um cubo.....	62
Figura 42 -Impressão com baixo acabamento superior .....	62
Figura 43 – Peça com diminuição de área; dimensões em mm; .....	63
Figura 44 – Falha na detecção de borda.....	64
Figura 45 - Parâmetros de impressão das simulações de falta de deposição.....	65
Figura 46 - Impressão do cubo; (a)cubo não detectado; (b)borda detectada.....	66
Figura 47 - Detecção da falta de deposição de material .....	67

Figura 48 - Indicação de falha em peça sendo impressa corretamente .....	68
Figura 49 - Detecção de peça descolada .....	69
Figura 50 – Dimensões dos triângulos impressos (Dimensões em mm).....	70
Figura 51 –Descolamento no início da impressão.....	70
Figura 52 – Detecção do descolamento no final da impressão .....	71
Figura 53 - Peça Escalonada .....	72
Figura 54 - Exemplos de falhas do programa na impressão de degraus .....	72
Quadro 2 -Características funcionais do sistema de monitoramento.....	72
Figura 55 - Estrutura interna de uma peça .....	74
Figura 56 – Painel frontal .....	75
Figura 57 – Função de simulação de clique com o mouse .....	77



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho Auxiliado por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FDM	Moldagem Por Fusão e Deposição
NI	<i>National Instruments</i>
NUFER	Núcleo de Prototipagem e Ferramental
PLA	Ácido Polilático
STL	<i>STereoLithography</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VI	Virtual Instrument

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Contexto do Tema .....	14
1.2	Caracterização do Problema .....	16
1.3	Objetivos .....	18
1.3.1	Objetivo Geral .....	18
1.3.2	Objetivos Específicos .....	18
1.4	Justificativa .....	18
1.5	Etapas do trabalho .....	20
2	Fundamentação Teórica .....	21
2.1	Impressão 3D .....	21
2.1.1	Etapas do processo .....	21
2.1.2	Tecnologia de impressão 3D por extrusão de material .....	23
2.1.3	Vantagens e desvantagens .....	25
2.2	Visão de máquina .....	26
2.2.1	Componentes de um sistema de visão de máquina .....	26
2.2.2	<i>Software</i> .....	29
2.2.3	Imagem .....	31
2.2.4	Profundidade de cor .....	31
2.2.5	Processamento de imagens .....	31
2.2.6	Detecção de movimento .....	35
3	Materiais e métodos .....	37
3.1	Descrição do Método .....	37
3.2	Descrição dos materiais .....	39
4	DESENVOLVIMENTO .....	42
4.1	ESTRUTURA DO PROGRAMA .....	42
4.1.1	Detectar peça .....	43
4.1.2	Avaliar a borda .....	49
4.1.3	Peça reprovada .....	51
5	RESULTADOS e discussões .....	53
5.1	Testes realizados .....	53
5.1.1	Teste de configuração da câmara .....	54
5.1.2	Teste de fixação .....	55

5.1.3	Teste de iluminação .....	57
5.1.4	Teste de contraste .....	58
5.1.5	Teste de fundo da imagem .....	59
5.1.6	Teste de deposição irregular .....	61
5.1.7	Teste de peça com diminuição de área .....	63
5.1.8	Simulação de falta de material.....	64
5.1.9	Simulação de descolamento de peça .....	69
5.1.10	Teste de impressão de degraus .....	71
5.2	Características funcionais do sistema de monitoramento.....	73
5.3	Migrando a inspeção para o <i>LabVIEW</i> .....	74
5.3.1	Adicionando funções ao programa .....	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	78
6.1	Conclusões .....	78
6.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	79
7	Referências.....	81
	APÊNDICE A .....	86
	APÊNDICE B .....	87

## 1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D é um processo de fabricação que surgiu na década de 1980, desenvolvida inicialmente sob o nome de estereolitografia (TAKAGAKI, 2012, p.29), por Charles Hull (nascido em 12 de maio de 1939, Colorado, EUA), que utilizava a solidificação do polímero através de um efeito fotoquímico. Logo passou a utilizar o princípio da manufatura aditiva, adicionando o material em camadas de acordo com um modelo previamente definido no CAD (desenho auxiliado por computador).

Segundo o relatório publicado pela Canalys (CANALYS, 2015), empresa que realiza consultorias e estudos de mercado para a área tecnológica, o mercado de impressão 3D se encontra em acelerado crescimento. Estima-se um aumento de 56% no mercado apenas em 2015, podendo valer mais de US\$ 5,2 bilhões, incluindo a venda de impressoras, materiais para impressão e serviços associados.

O crescimento rápido do mercado de impressão 3D nos últimos anos já era esperado, conforme analisado no relatório da Canalys, impulsionado por avanços na área, melhorias nos tempos de impressão, surgimento de novos materiais e métodos de manufatura aditiva, combinados com um grande aumento no número de fornecedores, especialmente na Ásia, gerando competição com os produtos americanos e alemães.

A tendência para os próximos anos é de um aumento ainda maior nas vendas, sendo que em 2019 a previsão é de que as vendas mundiais de impressoras 3D chegarão a 5,6 milhões de unidades, segundo Pete Basiliere (MEULEN, 2015), vice-presidente de pesquisas da Gartner, uma companhia de consultoria e pesquisa sobre tecnologia da informação.

Com a popularização da impressão 3D e a grande versatilidade de aplicações possíveis, cresce também a preocupação com o desempenho do processo, como, por exemplo, velocidade de impressão e ausência de falhas.

Uma tecnologia utilizada geralmente em setores industriais e na engenharia de controle de qualidade é, segundo Rios (2010, p.6), a visão de máquina. Com ela é possível detectar componentes fora do padrão durante os processos produtivos e então tomar as atitudes necessárias para garantir a qualidade.

Ainda segundo Rios (2010, p.6), a realização de inspeções utilizando visão de máquina é uma das aplicações mais antigas da visão computacional, tendo se iniciado em meados dos anos 90.

De acordo com Victoriano *et al.* (2012, p.1), a visão computacional é uma área multidisciplinar da engenharia, englobando a visão de máquina, sendo que compreende os processos de aquisição, reconhecimento e tratamento de imagens. A grande vantagem da visão computacional é a possibilidade de substituição da visão humana, elevando o grau de automação dos processos e possibilitando tomadas de decisões mais rápidas, o que gera uma redução de custos.

A inspeção de qualidade e o monitoramento de componente em processos produtivos, quando feitos utilizando visão de máquina, são caracterizados pelo uso de câmeras para captura de imagens, sendo que, o reconhecimento e processamento das imagens obtidas é realizado através de programas apropriados (VICTORIANO *et al.*, 2012, p.1).

Os avanços da tecnologia dos últimos anos possibilitaram um crescimento da utilização de visão de máquina na indústria, assim como houve com a utilização da impressão 3D. Com o crescimento da capacidade de processamento dos computadores, análises de imagem podem ser feitas de maneira mais eficiente, o que atrai mais usuários, principalmente somando esse fato com o barateamento do custo de câmeras e o surgimento de uma variedade de ambientes de programação, que facilitam o trabalho de configuração dos sistemas de visão.

A previsão é que o uso de visão de máquina deve aumentar muito nos próximos anos, uma vez que o mercado de visão de máquina era avaliado em 15,70 bilhões de dólares em 2014 e deve chegar a marca de 28,50 bilhões de dólares em 2021, crescendo a uma taxa de aproximadamente 8,4% ao ano entre 2015 e 2021 (TRANSPARENCY MARKET RESEARCH, 2015).

Mesmo com a grande previsão de crescimento, a evolução no uso da visão de máquina para fins industriais esbarra em uma característica desse tipo de sistema, que é o fato de não existirem soluções genéricas ou padrões. De acordo com Feliciano (2005, p.2) os sistemas que se utilizam de imagem são específicos e configurados de acordo com cada aplicação. Isso torna desafiador o desenvolvimento de sistemas de visão que possuam a robustez e exatidão

necessária, sendo importante a escolha correta de equipamentos, programas e métodos adequados a cada aplicação.

Atualmente existem vários tipos de programas para realizar análise computadorizada de imagens em aplicações de visão de máquina. Segundo Victoriano *et al.* (2012, p.11), algumas análises demandam programas mais eficientes para garantir o controle do processo. Dentre as principais opções comerciais, se encontram os produzidos pela *National Instruments*, o *LabVIEW* e o *NI Vision*.

A *National Instruments* é uma das maiores fornecedoras de equipamentos para a utilização de visão de máquina, fornecendo o *NI Vision* em duas versões, que pode ser a simplificada, para facilitar a configuração e aplicação, ou uma biblioteca para desenvolvimento, que pode ser utilizada em conjunto com diversas linguagens de programação, incluindo a do *LabVIEW*.

O *LabVIEW* é descrito pela *National Instruments* como um ambiente de desenvolvimento voltado para engenharia, que se utiliza de uma sintaxe de programação gráfica para proporcionar redução nos tempos de programação e testes de sistemas de visão de máquina.

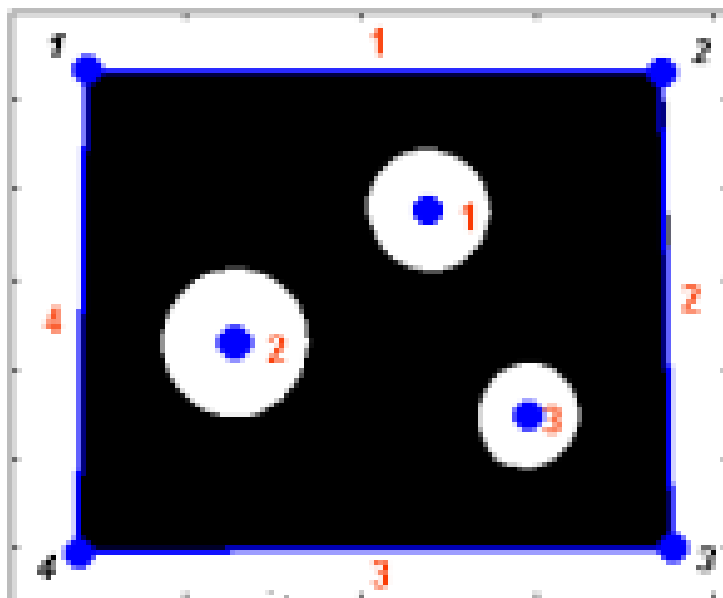
Considerando a versatilidade do *LabVIEW*, torna-se possível o desenvolvimento de sistemas de visão de máquina de diversas aplicações, como por exemplo, no monitoramento de impressões 3D, possibilitando a detecção de anomalias durante o processo e proporcionando uma melhora no controle de impressões.

## 1.1 Contexto do Tema

Na indústria, a visão de máquina é muito utilizada na metrologia e inspeção de qualidade de produtos, substituindo a visão humana e realizando as análises de conformidade automaticamente.

Podem ser realizadas medições de várias características de componentes mecânicos, como por exemplo, os aspectos dimensionais e geométricos (FELICIANO, 2005, p.43). Através de uma imagem da peça, podem-se conseguir suas medidas, como na figura 1, em que a placa foi mapeada possibilitando a

medição dos furos (diâmetro e posição) e das tolerâncias geométricas (retitude e circularidade dos furos).



**Figura 1 – Resultado final da imagem com vértices e centro de furos marcados.**

**Fonte - Feliciano *et al.* (2005, p.6).**

O uso de visão de máquina para a detecção de movimentos pode ser exemplificado por um estudo da Universidade de Michigan, elaborado por Krishnan *et al.* (2015), onde foi utilizada uma *webcam* para desenvolver um detector de movimentos em tempo real de baixo custo. O movimento estudado no caso é do corpo humano (figura 2).

Com a utilização de uma *webcam* e de um algoritmo de processamento de imagens desenvolvido no LabVIEW, foi possível avaliar participantes saudáveis, conforme exemplificado na figura 2, e comprovar a eficácia da avaliação, comparando com equipamentos médicos apropriados. O grande ganho com isso é a redução de custos, uma vez que equipamentos destinados a este tipo de avaliação são extremamente caros, quando comparados com o custo do sistema de visão desenvolvido.



**Figura 2 – Representação esquemática da detecção em tempo real.**  
**Fonte - Krishnan et al. (2015 p. 545)**

Da mesma forma, infere-se que é possível utilizar uma tecnologia análoga para monitorar uma peça sendo impressa, ao invés de um paciente, sendo possível desenvolver um sistema de monitoramento de custo reduzido.

## 1.2 Caracterização do Problema

Dois modos de falha foram detectados durante a impressão 3D, fazendo com que o processo não apresente o resultado desejado.

Um dos modos de falha que ocorre ocasionalmente é o descolamento da peça da plataforma de fabricação da impressora, no processo de extrusão de material, principalmente quando a geometria do componente não permite um apoio adequado, o que compromete todo o processo de impressão, problema observado no núcleo de prototipagem e ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Esse descolamento durante o processo causa uma movimentação indesejada da peça, fazendo com que ela saia da posição de impressão e o material seja depositado de forma incorreta, “em vazio”, gerando desperdícios, como na figura 3, onde o resultado do descolamento foi o desperdício de material polimérico.





**Figura 3 – Material polimérico desperdiçado devido descolamento da peça.  
Fonte – Autoria própria<sup>1</sup>**

Um segundo modo de falha verificado é a não deposição de material, que ocorre quando o filamento de material não é corretamente tracionado para o bico extrusor, assim a impressora continua se movendo normalmente, porém sem depositar material, não formando a peça como deveria.

Nenhum procedimento é realizado para evitar a não deposição de material, enquanto para evitar o descolamento, são verificadas na prática algumas formas de amenizar o problema, por exemplo, utilizando suportes presos diretamente na peça, algo que pode causar marcas e prejudicar sua qualidade, com o aumento da rugosidade e até deformações.

Outro exemplo de ação para evitar o modo de falha por descolamento é aumentar a temperatura nas primeiras camadas de material depositadas na base de impressão, visando garantir maior adesão. Esse processo é realizado na prática, porém nem sempre apresenta o resultado esperado, não evitando o descolamento em muitos casos.

---

<sup>1</sup> Figuras e quadros sem indicação de autoria são de autoria própria.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem a finalidade de desenvolver um sistema para o monitoramento da impressão 3D, assim foram definidos os objetivos, geral e específicos, a serem alcançados ao longo do desenvolvimento.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de baixo custo de visão de máquina para detectar o descolamento de peças ou a falta de deposição de material durante o processo de manufatura por impressão 3D.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para desenvolver o sistema, todos os subsistemas que o compõem devem ser determinados e combinados da melhor forma possível, para isso os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- Determinar a iluminação adequada para o sistema de visão de máquina;
- Determinar o sistema óptico adequado;
- Desenvolver o controle do sistema através do módulo *Vision Builder*;
- Determinação do melhor *layout* para o sistema de visão de máquina;
- Construção de um protótipo do sistema de monitoramento.

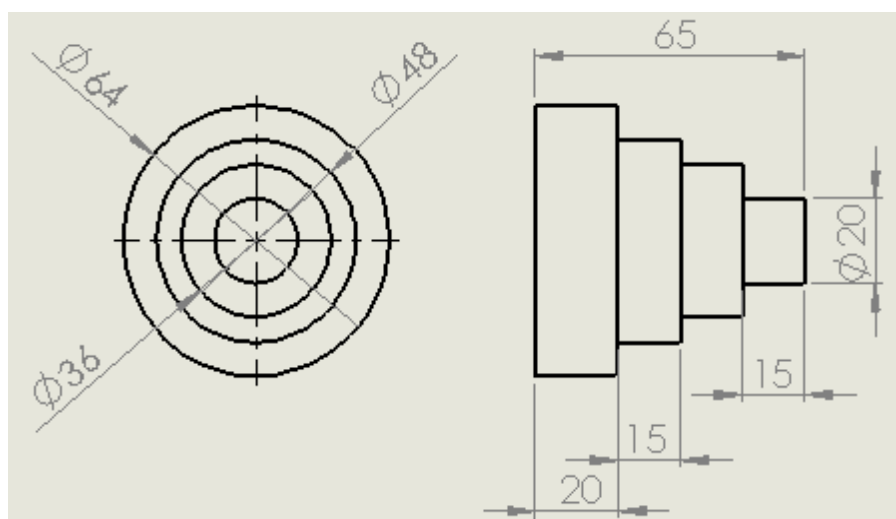
### 1.4 Justificativa

Tanto a impressão 3D quanto a visão de máquina possuem boas projeções de crescimento no mercado mundial e serão cada vez mais utilizadas na indústria. O presente trabalho utilizará a visão de máquina para melhorar o processo de manufatura por impressão 3D visando a redução no desperdício de material.

Um dos focos da engenharia na indústria é a redução de desperdícios, como nos processos de manufatura, por exemplo. Detectar o descolamento de peças ou a deposição em vazio durante a impressão permite pausar o processo evitando perdas de material.

Considerando que as impressoras 3D depositam camadas muito finas, mesmo componentes pequenos exigem muitas camadas de material, o que gera longos tempos de impressão. Segundo Takagaki (2012, P. 32) o número de horas necessárias para se gerar um objeto sólido pode ser muito elevado, variando de acordo com a precisão exigida para a peça.

Por exemplo, a impressão de um eixo escalonado, com as dimensões apresentadas na figura 4, levou aproximadamente 1 hora e 45 minutos, utilizando uma espessura de camada de 0,4mm e um preenchimento interno de 5%.



**Figura 4 - Eixo escalonado, dimensões em mm.**

Usualmente, o processo é iniciado no laboratório e continua sem o acompanhamento de um responsável, sendo impressa a peça durante a noite para a retirada no dia seguinte, de forma a aproveitar ao máximo a impressora 3D.

Porém com os problemas presentes no processo, o descolamento da peça ou a falta de deposição de material, a impressão pode continuar de forma inadequada por horas, gerando perdas de material, tempo e energia.

A fim de evitar o desperdício causado pelos modos de falha de impressão, propõem-se o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar as peças durante o processo de fabricação por impressão 3D, para que a detecção de falhas tenha a possibilidade de ser feita de forma automática, sem a necessidade de supervisão de um responsável durante todo o processo de impressão.

O sistema proposto tem grande potencial para ser utilizado pela maioria das máquinas que trabalham com a tecnologia de extrusão de material.

### **1.5 Etapas do trabalho**

O presente trabalho é composto de seis capítulos, iniciando pela introdução, que apresenta uma contextualização sobre o tema de estudo e os objetivos que devem ser alcançados durante o projeto.

O segundo capítulo, de fundamentação teórica, visa a apresentação de conceitos e processos que serão utilizados ao longo do desenvolvimento do sistema de monitoramento, como a impressão 3D, a visão de máquina e o processamento de imagens.

O capítulo três descreve a metodologia utilizada, bem como os materiais necessários para a elaboração do projeto.

O quarto capítulo trata do desenvolvimento do sistema de monitoramento, apresentando como o programa foi elaborado no *Vision Builder*.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos durante os testes do sistema de monitoramento, seguido das características funcionais do sistema e da transferência do programa para o *LabVIEW*.

Por fim, são apresentadas as considerações finais acerca do trabalho, seguidas das referências utilizadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Impressão 3D

A impressão 3D é definida como um processo de manufatura caracterizada pela fabricação de um objeto tridimensional a partir de um modelo virtual, através da deposição de material, utilizando um bico ou cabeçote de impressão, entre outras tecnologias (AMERICAN..., 2013, p.1). A deposição das camadas de material é realizada sucessivamente, caracterizando um processo aditivo, como descrito por Azevedo (2013, p.11).

#### 2.1.1 Etapas do processo

Segundo Gibson *et al.* (2009, p.3), a maioria dos processos envolvendo manufatura aditiva irá conter as etapas genéricas apresentadas na figura 5:



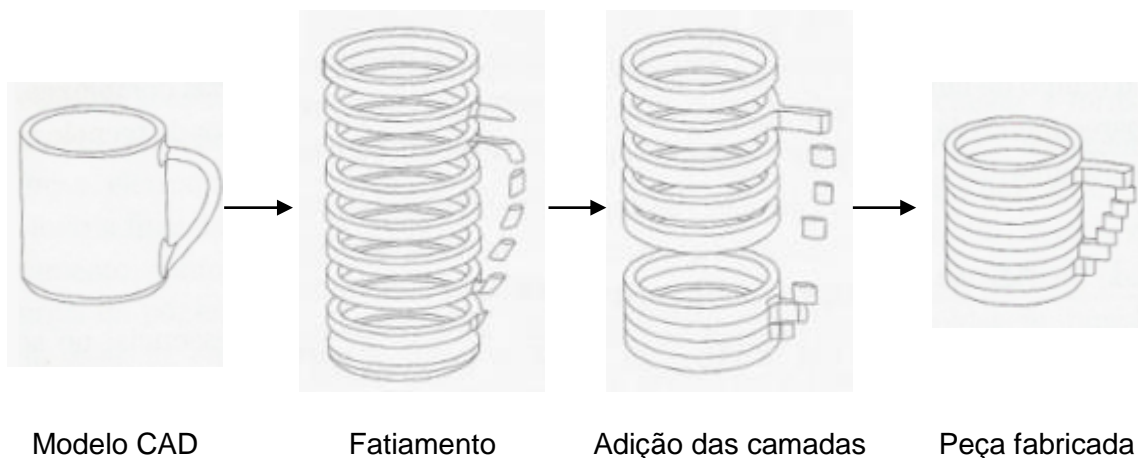
Figura 5 – Processo genérico do CAD à peça em 8 etapas.

Fonte – Adaptado de Gibson *et al.* (2009, p.4).

Inicialmente, qualquer peça que será impressa parte de um modelo que representa sua geometria em três dimensões, podendo esse modelo ser gerado a partir de um programa CAD 3D ou por escaneamento de um componente pronto, por exemplo.

O arquivo do modelo será então convertido para o formato STL (*STereoLithography*), padrão das máquinas de manufatura aditiva. Esse formato foi criado em 1988, pela *Albert Consulting Group*, sendo uma forma robusta e simples para a representação de objetos, através do uso de triângulos de formato irregular que recobrem o modelo da peça, formando uma malha, de acordo com Volpato *et al.* (2007, p.106)

Após a conversão do modelo tridimensional do componente no arquivo STL, são definidas curvas de níveis bidimensionais, que demarcam as camadas de material que serão depositadas. Esse processo de “fatiamento” do componente é exemplificado na figura 6:



**Figura 6 – Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada.**  
**Fonte – Adaptado de Volpato *et al.* (2007, p.4).**

O arquivo é então enviado à impressora, sendo realizados os ajustes de alguns parâmetros de construção, de forma a iniciar a construção da peça.

A construção da peça se dá de forma automática, através da adição de camadas de material. Uma vez concluída, a peça deverá ser removida da mesa.

Depois de retiradas da máquina, as peças podem passar por um pós-processamento quando necessário, que corresponde à remoção de suportes e por

vezes pintura dos componentes, de forma que possam ser utilizados adequadamente.

### **2.1.2 Tecnologia de impressão 3D por extrusão de material**

Existem diversos sistemas de manufatura aditiva no mercado atualmente, sendo possível classificá-los em grupos que possuem características similares, como adotado por Volpato *et al.* (2007, p.56). Considerando o estado da matéria-prima no início da impressão, os processos podem ser agrupados como baseados em material líquido, na forma de pó ou sólidos.

Outra forma de classificação dos processos de manufatura aditiva foi proposta pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), de acordo com a norma ASTM F2792 (2013), os processos foram agrupados em sete categorias: extrusão de material (o material é extrudado e depositado através de um bico ou orifício), jato de material (gotículas de material são depositadas e curadas com luz ultravioleta), jato aglutinante (processo onde um agente líquido promove a união de partículas de pó formando um sólido), laminação em folhas (folhas de material são coladas para formar a peça), fotopolimerização (polímero líquido em uma cuba é curado por luz polimerizadora, formando a peça), fusão em leito de pó (uso de energia térmica para fundir material em pó), deposição com energia dirigida (uso de energia térmica focada para fundir materiais combinando com a inserção de material em pó) (MONTEIRO, 2015, p.33).

O equipamento disponível no NUFER se utiliza da tecnologia de extrusão de material, que é baseada em matéria-prima na forma de filamento inicialmente em estado sólido. A figura 7 apresenta a impressora 3D modelo 3D CLoner DH+, da fabricante brasileira Microbras.



**Figura 7 – Impressora 3D profissional 3D Cloner DH+.**  
**Fonte – e.tech Brasil.**

Na impressora 3D Cloner DH+ o filamento de material sólido é fundido em uma cabeça de extrusão, que se movimenta nos eixos x-y, e é depositado na forma de um fino filamento sobre uma plataforma, que se movimenta no sentido do eixo z.

De acordo com Takagaki (2012, p.3) o material utilizado por essa tecnologia é geralmente ABS (acrilonitrila butadieno estireno) ou o PLA (ácido poliláctico). É possível ainda realizar modificações nas máquinas, de forma que possam utilizar como matéria-prima materiais inusitados, como chocolate ou queijos, por exemplo.

Volpato *et al.* (2007, p.69) aponta como vantagens do processo de impressão por extrusão de material o fato de ser possível realizar impressões em ambiente de escritório, devido à não utilização de lasers durante o processo e não necessitar de pós-cura dos materiais. Algumas desvantagens dessa tecnologia são: a precisão não muito elevada (pois depende da espessura da camada, que pode chegar à ordem de 0,1mm), a velocidade lenta do processo e a necessidade de utilizar suporte em regiões suspensas.

A simplicidade tecnológica do processo por extrusão de material aliada ao fato dos componentes impressos em ABS possuírem uma resistência comparável a peças injetadas desse mesmo material, foram fatores que contribuíram para a proliferação no mercado das impressoras 3D pessoais.



### 2.1.3 Vantagens e desvantagens

O processo de impressão 3D se difere de outras formas de fabricação por usinagem, pois não é um processo de remoção de material, o que, ainda segundo Azevedo (2013), tem como vantagem a pouca ou até nenhuma sobra de material.

Outras vantagens do processo de impressão, listadas por Silva e Maia (2014, p.1), são: a possibilidade de se trabalhar com formas complexas de componentes, modulação da densidade do material utilizado na impressão, incluindo a combinação de materiais diferentes, elaboração de partes móveis sem a necessidade de recursos de montagem. Isso proporciona uma grande variedade de aplicações, indo além do setor industrial, sendo utilizada em áreas acadêmicas e sociais, como na medicina, por exemplo, onde podem ser impressas órteses e próteses personalizadas (CONCEIÇÃO JÚNIOR E MARQUES, 2013, p.4).

Pode-se salientar ainda que no processo de impressão 3D as peças são fabricadas utilizando um único equipamento, passando apenas por um pós processamento quando necessário, sendo a construção completa realizada em um único processo. Em processos de usinagem, podem ser necessárias etapas posteriores, como afirma Volpato et al (2007, p.11).

A impressão 3D possui algumas desvantagens quando comparada com outros processos de fabricação. Na injeção plástica, uma característica do processo é a elevada produtividade, que mesmo com a necessidade de confecção de um molde para início do processo supera grandemente a produtividade da impressão 3D, e ao se comparar peças impressas com as injetadas, do mesmo material, a resistência mecânica das peças impressas é menor, pois, de acordo com Azevedo (2013, p.12), podem sofrer rupturas quando tracionadas, devido ao descolamento das camadas de material causado por esforços mecânicos.

Quando comparado com processos de usinagem, como a usinagem CNC, por exemplo, os processos de manufatura aditiva geram peças com precisão e acabamento superficial inferiores. Segundo Volpato *et al.* (2007, p.11) está presente na superfície dos componentes o serrilhado, geralmente em superfícies inclinadas ou curvas, proveniente da adição de camadas planas de material.

Outro aspecto negativo da impressão 3D é a baixa robustez das impressoras, quando comparadas às máquinas de usinagem convencional, necessitando de mais

interrupções no processo para manutenções. Porém, a manutenção em si, é muito mais simples nas impressoras, podendo ser executada por pessoal com baixo conhecimento técnico ou treinamento.

As propriedades mecânicas dos componentes fabricados pela impressão 3D não são uniformes, uma vez que o processo de adição de camadas gera anisotropia, isto é, as propriedades podem variar de acordo com a direção da peça (SCHLEPERS, 2014, p.5).

Apesar da possibilidade de construir geometrias complexas, o processo de impressão 3D possui algumas limitações quanto à forma do componente, como, por exemplo, em casos que a peça possua pontes, conforme afirma Takagaki (2012, p.32), esse tipo de componente não pode ser impresso diretamente, sendo necessário prever apoio para a construção das partes suspensas.

## **2.2 Visão de máquina**

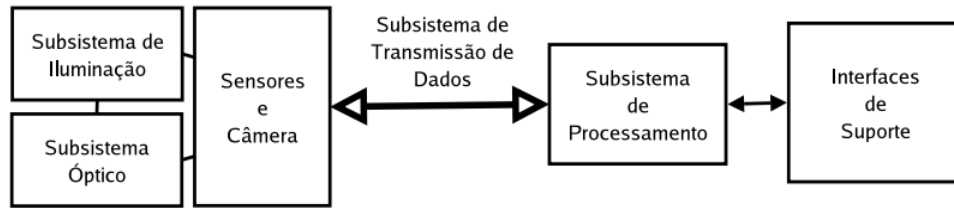
Segundo Shin e Lee (2010, p.1) a visão de máquina pode ser definida como o uso de dispositivos para o sensoriamento ótico e sem contato, utilizado para receber e interpretar automaticamente uma imagem de uma cena real, obtendo informações ou controlando máquinas e processos. O foco principal da visão de máquina é a resolução de problemas de engenharia.

Por ser fundamentalmente de utilização prática, a visão de máquina se difere da visão computacional. De acordo com Zibetti (2011, p.8), em visão computacional são utilizados algoritmos complexos, muitas vezes associados à inteligência artificial e aprendizado de máquina.

### **2.2.1 Componentes de um sistema de visão de máquina**

Um sistema de visão pode ser entendido como um sistema completo utilizado na resolução de um problema, englobando os dispositivos físicos e *softwares*.

Segundo Deschamps (2004, p. 21) o sistema de visão realiza as etapas de aquisição e processamento de imagens, análise dos resultados e tomada de decisões, sendo os componentes gerais de um sistema de visão ilustrados na figura 8.



**Figura 8 – Modelo adotado para os componentes de um sistema de visão.**  
**Fonte – Deschamps (2004, p.23).**

### **2.2.1.1 Subsistema Óptico**

O subsistema óptico de um sistema de visão é responsável pelo correto dimensionamento e direcionamento dos feixes luminosos provenientes do objeto para o sensor óptico (PAVIM, 2005, p.48).

Para a formação da imagem do objeto e o realce das características posteriormente analisadas, o subsistema óptico pode conter prismas, filtros, espelhos, lentes e tubos extensores, por exemplo. (DESCHAMPS, 2004, p.23)

### **2.2.1.2 Subsistema de iluminação**

De acordo com Stemmer (2005, p.6) o subsistema de iluminação projeta a iluminação necessária sobre o objeto que será analisado, realçando as características de interesse e possibilitando o melhor funcionamento do sensor óptico.

O ajuste da iluminação deve ser feito de acordo com o subsistema óptico utilizado, para garantir um bom funcionamento em conjunto dos componentes do sistema.

### **2.2.1.3 Sensores e câmeras**

A câmera é utilizada no sistema para direcionar e coletar a radiação do objeto analisado para o sensor de aquisição, que pode ser de vários tipos, fornecendo então a imagem para o sistema.

A câmera será formada, entre outros componentes, pela lente, que irá focar a luz refletida pelo objeto (ZIBETTI, 2011, p.12) e enviará a um sensor, que converte o

sinal de radiação recebido para poder ser utilizado pela unidade de processamento (STEMMER, 2005, p.6).

O tipo de câmera utilizada varia muito com a aplicação do sistema de visão, podendo-se utilizar desde câmeras de baixo custo e resolução, como uma *webcam* convencional, por exemplo, ou pode ser necessário o uso de câmeras especiais, que possuem custo maior ao mesmo tempo que permitem imagens de resolução e qualidade superiores, além de possuírem maiores taxas de aquisição de imagens. Na figura 9 são apresentados exemplos de câmeras industriais:



**Figura 9 – Câmeras industriais para visão de máquina.**  
**Fonte – National Instruments.**

#### **2.2.1.4 Subsistema de transmissão de dados**

Realiza a transmissão dos dados recolhidos pelos sensores ou câmeras utilizadas e os envia para o subsistema de processamento.

O desempenho do sistema de visão de máquina pode ser limitado de acordo com a forma que os dados de imagem são transferidos, uma vez que a realização da transmissão das imagens por sinais elétricos para o sistema de processamento determina a taxa máxima de imagens que pode ser adquirida e processada.

#### **2.2.1.5 Subsistema de processamento**

Executa o pré-processamento e o processamento propriamente dito dos dados recebidos pelo subsistema de transmissão de dados.

É composto pelo dispositivo de aquisição de sinal de vídeo transmitido pelo sensor ou câmera, por bibliotecas de processamento de imagem e visão computacional e pelo aplicativo desenvolvido a partir das bibliotecas, de acordo com Deschamps (2004, p.25).

O subsistema de processamento é o responsável pela tomada de decisão a ser realizada com base nos dados processados, atuando de acordo com as diretrizes previamente estabelecidas na aplicação desenvolvida.

O *hardware* do subsistema de processamento pode ser determinado da forma mais conveniente para o projeto a ser desenvolvido. O uso de um computador pessoal pode ser útil por apresentar uma elevada flexibilidade e facilidade para o armazenamento de dados, entretanto, não são indicados para ambiente industrial.

Caso o ambiente exija um equipamento mais robusto, devido à variação de temperatura, presença de vibrações ou sujeira, por exemplo, podem-se utilizar controladores dedicados, uma vez que cada processo possui suas particularidades.

#### **2.2.1.6 Interfaces de suporte**

Segundo Deschamps (2004, p.26) incluem-se nas interfaces todos os dispositivos essenciais para o funcionamento adequado do sistema, como as interfaces com sensores, com sistemas de controle e com sistemas de bancos de dados, para realização de registros, por exemplo.

#### **2.2.2 Software**

Uma parte importante do sistema de visão de máquina é o programa utilizado. Segundo Zibetti (2011, p.22) o programa é responsável pela conversão das informações obtidas nas imagens em informações utilizáveis pelo controle.

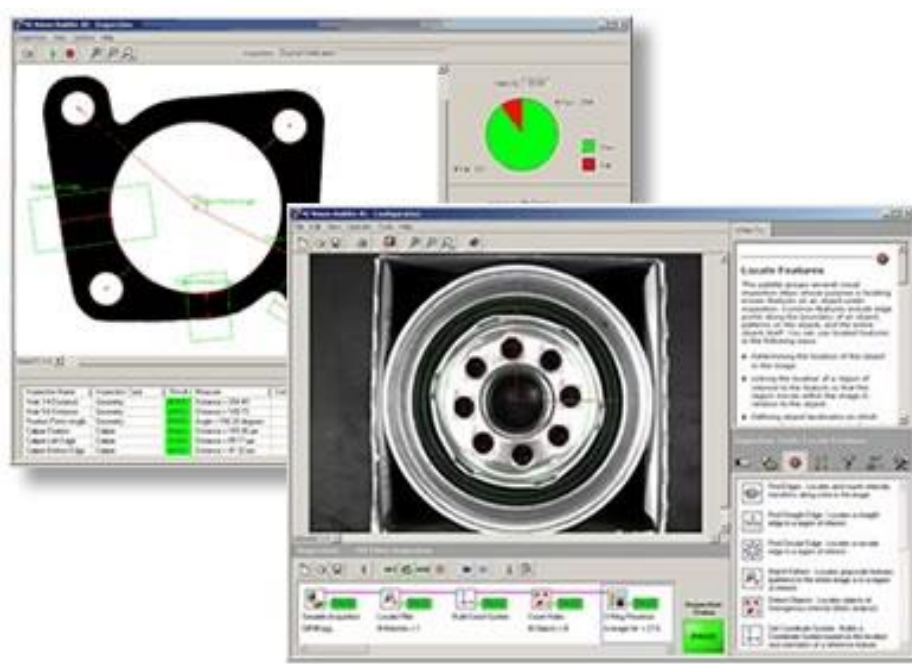
O desenvolvimento de *softwares* para sistemas de visão de máquina pode ser feito de diversas formas, utilizando-se de linguagens de programação variadas, como o C++, *Microsoft Visual Basic*, Java e MATLAB, por exemplo. Algo comum a essas linguagens, de acordo com Ding *et al.* (2014, p.2) é a necessidade de utilização de códigos longos e complexos para elaboração das aplicações, exigindo grande conhecimento da linguagem de programação utilizada e muito tempo de programação.

Existem alternativas que visam facilitar o processo de elaboração de programas computacionais, simplificando a programação. Dentre as opções presentes no mercado, está o ambiente de programação *LabVIEW*, que permite uma

diminuição dos tempos através de uma rica interface gráfica e uma linguagem de programação simplificada, que se torna mais acessível por se basear no arraste e posicionamento de ícones gráficos, ao invés de códigos (DING *et al.*, 2014, p.2).

Baseados no ambiente *LabVIEW* estão outros programas da mesma fabricante, a *National Instruments*, que permitem o desenvolvimento de aplicações de visão de máquina, como o módulo *NI Vision Builder AI (Automated Inspection)*.

O *Vision Builder* possui diversas ferramentas, como o reconhecimento de padrões, detecção de caracteres, avaliação de precisão e alinhamento e detecção de presença, por exemplo. Apesar de apresentar menos flexibilidade do que uma programação em C++ ou no próprio *LabVIEW*, o *Vision Builder* permite configurar facilmente aplicações de visão de máquina, sendo compatível com vários modelos de câmeras e outros dispositivos industriais, pois se utiliza de protocolos comuns de comunicação, como a rede Ethernet, por exemplo. A figura 10 apresenta a interface do *Vision Builder*.



**Figura 10 – *Vision Builder* para inspeção automatizada.  
Fonte – *National Instruments* (2015).**

### 2.2.3 Imagem

Uma imagem pode ser considerada como uma função matemática da intensidade luminosa, podendo o valor dessa intensidade ser alocado a coordenadas espaciais (x, y).

Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999, p.25) uma imagem digital pode ser interpretada como uma matriz, em que as coordenadas de coluna e linha indicam um ponto na imagem, com valor correspondente ao nível de cinza no ponto. Assim, cada ponto que forma a imagem possui um valor de intensidade, e é chamado de pixel (*picture element*), sendo representado por um ou mais valores numéricos.

### 2.2.4 Profundidade de cor

Segundo Marques (2011, p.25) uma forma de se representar imagens coloridas é através do uso de três matrizes bidimensionais sobrepostas, sendo uma para cada canal: o vermelho, azul e verde, formando uma imagem RGB (do inglês, *red, green, blue*). Nesse sistema cada pixel é representado por um número de 24 bits, sendo que cada canal de cor apresenta 8 bits, que indicam a intensidade do azul, verde ou vermelho no ponto, variando numa escala de 0 a 255.

Em uma imagem colorida, a profundidade de cor é a propriedade que permite a apresentação de determinada variação de tons, sendo que quanto maior a profundidade, maior será a possibilidade de variar os tons, e vice-versa. O uso de uma profundidade de pixel de 24 bits permite 16,8 milhões de combinações de cor em uma imagem.

Ainda segundo Marques (2011, p.25), pode-se usar uma matriz extra, conhecida como canal alfa, que fornecerá uma medida da transparência de cada pixel, originando assim uma imagem com profundidade de 32 bits.

### 2.2.5 Processamento de imagens

Segundo Marengoni e Stringhini (2009, p.3), muitas vezes as imagens que serão utilizadas necessitam ser convertidas, para algum formato ou tamanho específico, ou precisam ser filtradas, para realçar suas características.

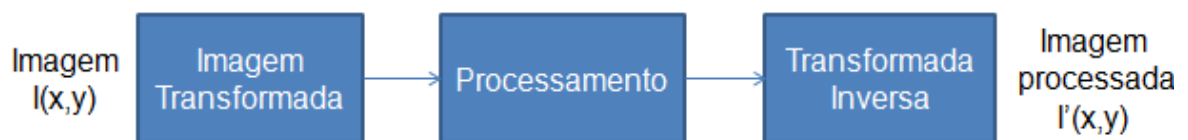
Essas etapas de adequação são realizadas no processamento das imagens, coletadas pela câmera ou sensor, através do programa do sistema de visão de máquina. Exemplos de operações de processamento serão abordados a seguir.

### 2.2.5.1 Pré-processamento de imagens

O pré-processamento realizado é uma etapa que tem como objetivo melhorar a qualidade das imagens com o uso de técnicas que diminuem o ruído, corrigem o brilho, o contraste, entre outras correções que compreendem o processo de realce.

Entre as várias técnicas de pré-processamento de imagens destacam-se as filtragens espacial e no domínio da frequência, que geram imagens que serão posteriormente utilizadas no sistema de visão de máquina.

A filtragem espacial se utiliza de máscaras, que são pequenas matrizes bidimensionais, que operam diretamente sobre os pixels de uma imagem, alterando sua intensidade de acordo com o desejado. Já no domínio da frequência, a imagem é primeiramente convertida do domínio espacial para o de frequências, as alterações são realizadas por meio de funções matemáticas e então ocorre o processo de reversão, retornando a imagem para o domínio espacial (VIOLA, 2006, p.34), conforme esquematizado na figura 11:



**Figura 11 – Esquema de processamento com transformada de imagens.**

**Fonte – Adaptado de Viola (2006, p.34).**

Os ruídos são interferências que prejudicam a interpretação das imagens, normalmente oriundos dos processos de aquisição. Uma imagem com ruídos apresenta variações na intensidade de pixels em regiões que deveriam ser idealmente uniformes na cena original, como afirmam Russ e Neal (2015, p.33). A figura 12 exemplifica a presença de ruído em uma imagem, exibindo a mesma imagem com baixo, moderado e alto ruído.



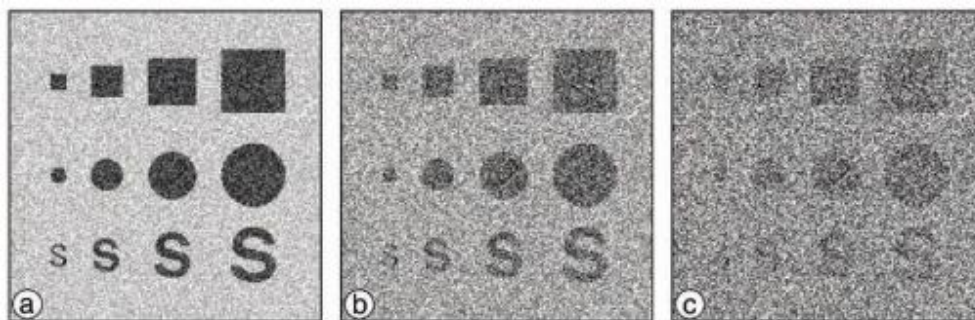


Figura 12 – Ruídos:(a) baixo nível; (b) nível moderado; (c) alto nível de ruído.  
Fonte – Adaptado de Russ e Neal (2015, p.33).

### 2.2.5.2 Manipulação de histograma

O histograma da imagem é uma ferramenta que representa a distribuição estatística das intensidades dos pixels ao longo da imagem, na forma de um gráfico, de acordo com Aboud Neta et al. (2008, p.1). Possui grande utilidade por permitir uma verificação rápida das características da imagem e por fornecer opções de processamento global na imagem. A figura 13 apresenta um exemplo de imagem acompanhada de seu histograma.

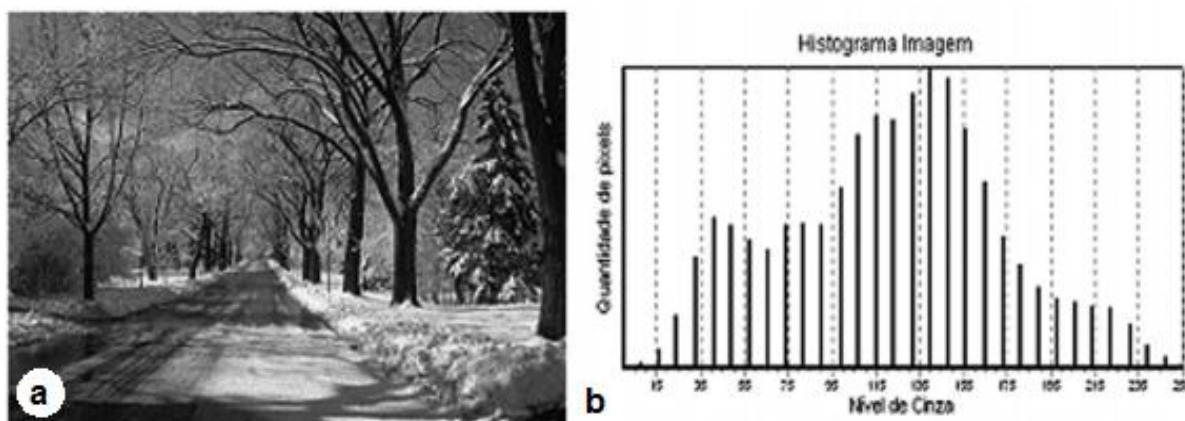


Figura 13 – (a) exemplo de imagem; (b) histograma da imagem.  
Fonte – Nunes (2006, p.86).

De acordo com Nunes (2006, p.86) é possível uma grande variedade de alterações na imagem a partir do histograma, como por exemplo: alterações no brilho, pela soma ou subtração de valores constantes de intensidade em todos os pixels da imagem; *splitting*, onde o contraste é aumentado; equalização da imagem,

onde é realizado o espalhamento dos níveis de cinza da imagem, uniformizando o histograma. Um exemplo de equalização da imagem é apresentado na figura 14.



Figura 14 – Exemplo de equalização; (a) imagem original; (b) imagem equalizada.

Fonte – Nunes (2006, p.90).

### 2.2.5.3 Segmentação

O processo de segmentação da imagem visa à identificação e extração de regiões de interesse, para a localização de objetos, geralmente.

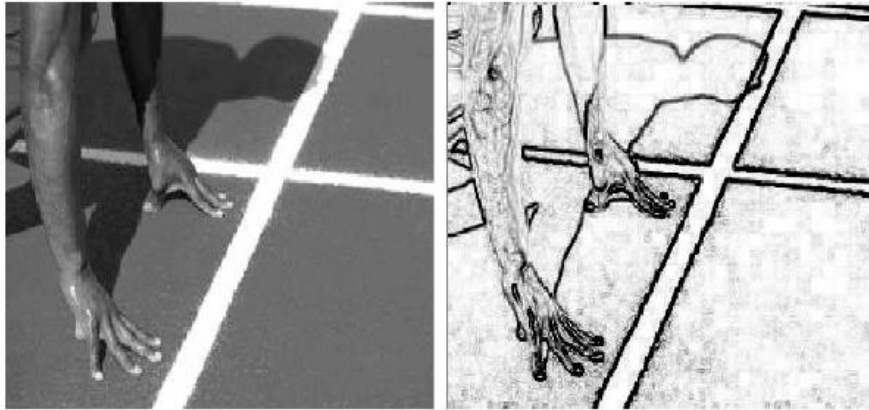
Segundo Zibetti (2011, p.32) o resultado dessa etapa de processamento é o mapa da região do objeto, sendo possível então distingui-lo do restante da imagem.

Determinada a região de interesse, podem ser realizadas mais análises sobre a imagem, como, por exemplo, análise da intensidade ou textura dentro da região.

#### 2.2.5.3.1 Detecção de bordas

Durante a segmentação é realizada a detecção de bordas, que muitas vezes é utilizada para a detecção de objetos em uma imagem, através de análises de mudanças abruptas no brilho, pois isso pode determinar mudanças nas características do que se vê (RIOS,2010, p.3).

O reconhecimento de objetos é feito através da comparação entre as bordas da imagem obtida e as bordas do objeto em uma imagem de referência. A figura 15 apresenta uma imagem que passou por um realce para que fosse possível identificar as bordas presentes mais facilmente.



**Figura 15 – Exemplo de reconhecimento de bordas.**  
**Fonte – Rios (2010, p.3).**

#### **2.2.5.4 Reconhecimento e interpretação**

Nessa etapa se realiza o processamento e interpretação das informações obtidas das imagens.

Zibetti (2011, p.35) afirma que o processamento nas informações obtidas é realizado de duas formas, inferindo informações a partir do que foi extraído da imagem e informando ao controle ou reconhecendo objetos na imagem indiretamente, comparando com padrões já determinados.

#### **2.2.6 Detecção de movimento**

A detecção do movimento de objetos em uma cena pode ser realizada de várias formas, de acordo com a necessidade de cada processo, porém sempre partindo de um mesmo princípio que é, segundo Rios (2010, p.5), o de se observar quais pontos se moveram em uma imagem e com qual velocidade.

Uma técnica utilizada para estimar movimento em imagens, ilustrada na figura 16, é o fluxo óptico. Segundo Oliveira Neto e Gomes (2007, p.1), o fluxo óptico pode ser definido como a representação do movimento aparente, projetado no plano de imagem.



**Figura 16 – Fluxo óptico extraído de duas imagens de um vídeo com movimento.**

**Fonte – Rios (2010, p.5).**

O movimento na imagem é medido em pixels, sendo possível descobrir a velocidade do objeto de acordo com a velocidade da movimentação dos pixels na imagem, em conjunto com outros fatores, por exemplo, a distância entre o objeto e a câmera, visto que quanto mais distante mais lenta parecerá a movimentação.

Outra forma de detectar o movimento é localizar o objeto na imagem, e não os pixels, como realizado no fluxo óptico. De acordo com Rios (2010, p.6), esse método, chamado de vídeo *tracking*, permite a detecção de movimentos de translação e rotação de um objeto, utilizando um modelo para comparação e determinação do objeto nas imagens.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema de monitoramento, descrevendo as etapas realizadas ao longo do projeto e os materiais usados.

#### 3.1 Descrição do Método

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de monitoramento será adaptada da metodologia de projeto de produtos de Forcellini (2002, p.18).

Na figura 17 é apresentado um fluxograma com as ações realizadas ao longo de todo o desenvolvimento do sistema de monitoramento.

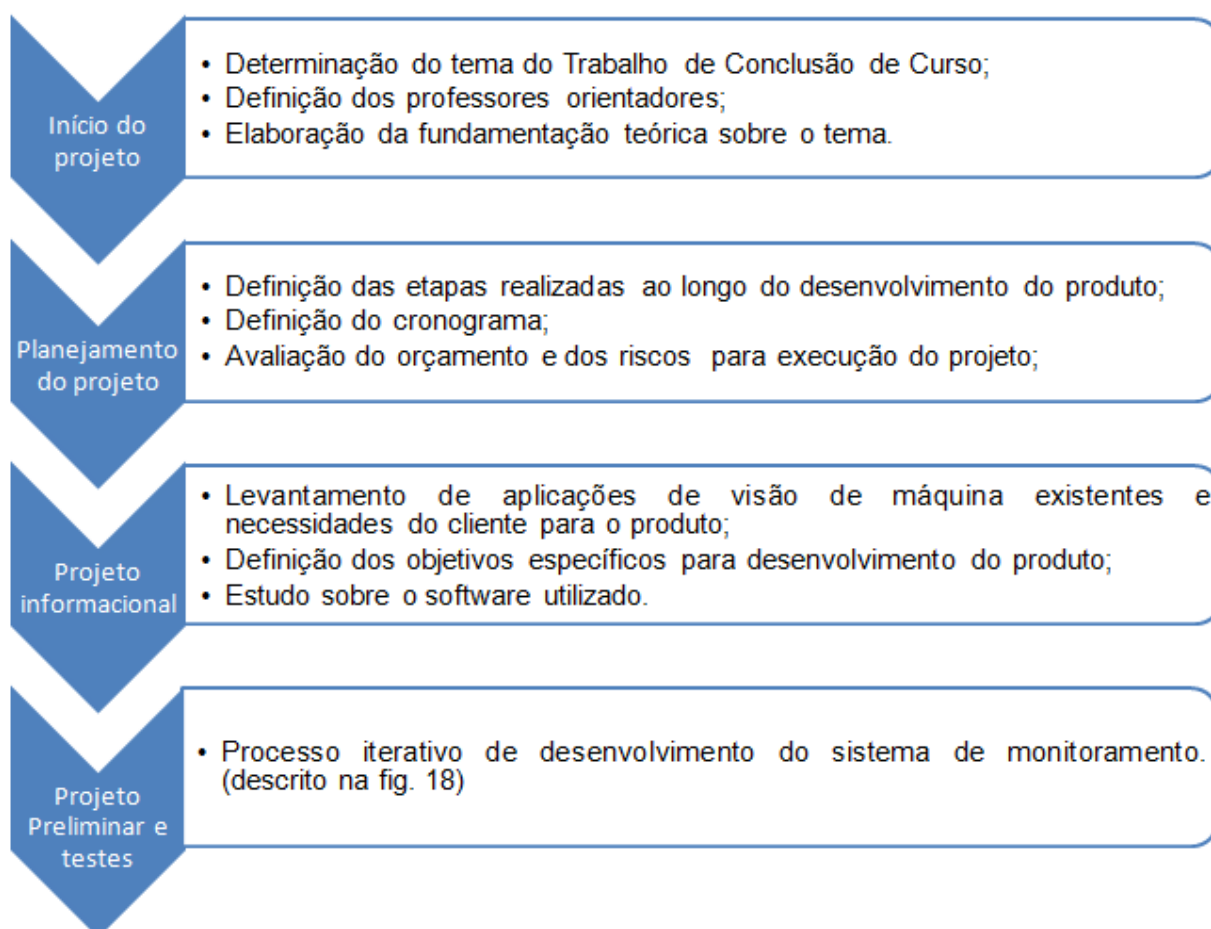
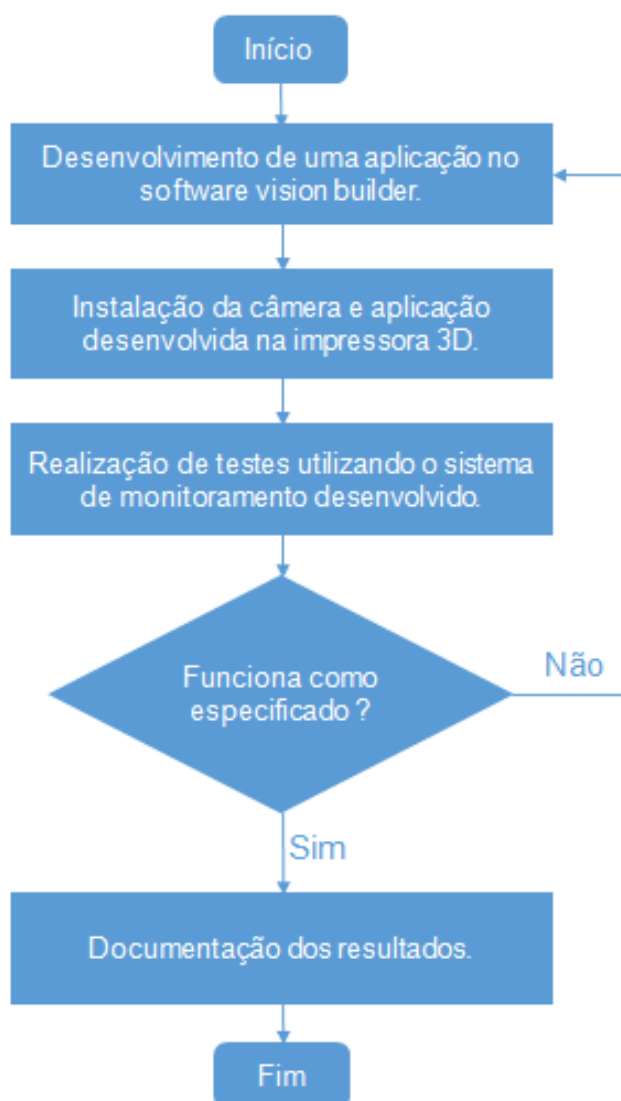


Figura 17 – Fluxograma das etapas do projeto.

Considerando que o programa utilizado no desenvolvimento do sistema de monitoramento foi previamente definido, algumas etapas comuns da metodologia de projeto de produtos serão adaptadas de uma forma mais conveniente ao uso do *Vision Builder*. Assim, as etapas dos projetos conceitual, preliminar e de protótipo serão combinadas em um processo iterativo de desenvolvimento, onde serão elaborados conceitos e layouts para o sistema à medida que se realizam os testes, conforme o fluxograma apresentado na figura 18:



**Figura 18 – Fluxograma do processo iterativo de desenvolvimento.**

Durante a realização do projeto, algumas etapas podem ser realizadas simultaneamente, por exemplo, o planejamento ocorrendo desde o início do projeto,

visando garantir a realização do desenvolvimento no prazo esperado e podendo ser adaptado à medida que novas informações são obtidas.

Os objetivos específicos são definidos nas etapas iniciais do projeto, definindo o que se espera alcançar com o projeto e qual a necessidade existente que deve ser suprida.

O sistema de visão de máquina pode conter muitas variações, de acordo com a aplicação a que se destina, contando com diferentes subsistemas de iluminação, tipos e posicionamentos de câmera, subsistemas ópticos e softwares, que podem ser programados de muitas formas diferentes, sendo mais ou menos eficientes.

Para obter a melhor combinação dentre as opções possíveis, foram realizadas no desenvolvimento do produto variações entre o posicionamento dos componentes (câmera, iluminação) e entre funções na aplicação desenvolvida no *Vision Builder*, sendo escolhida ao final a configuração que melhor atenda aos objetivos previamente definidos.

### **3.2 Descrição dos materiais**

Para a construção do protótipo durante a realização do projeto, utilizou-se: um programa computacional, para desenvolvimento do controle do sistema de visão, uma câmera para a captura de imagens, sistema de iluminação com módulos led e a impressora 3D.

O programa para desenvolvimento do sistema de processamento de visão de máquina é o módulo *NI Vision Builder* (ilustrado na figura 10), para inspeção automatizada utilizando *Windows*.

Com o objetivo de manter o baixo custo do sistema de monitoramento desenvolvido, optou-se pelo uso de uma *webcam* convencional para a obtenção de imagens.

Levando em consideração a qualidade das imagens obtidas e a disponibilidade prévia da *webcam* no laboratório, optou-se pela utilização de uma *webcam* Logitech c920, com resolução de 15 Megapixels. A figura 19 apresenta o modelo de *webcam* utilizado durante o desenvolvimento.





**Figura 19 - Webcam logitech c920.  
Fonte - Logitech.**

A impressora que se destina o sistema de monitoramento é fabricada pela Microbras Indústria e Comércio de Eletrônicos Ltda., sendo o modelo 3D Cloner DH+ (figura 7), utilizada no laboratório do NUFER.

Para o sistema de iluminação, foram utilizados três módulos de led quádruplos, modelo smd5050, da fabricante starlux.

Cada módulo possui uma potência de 0,96W e operam com uma tensão de 12V em corrente contínua. Foram escolhidos por fornecerem uma iluminação adequada ao sistema de monitoramento e pelas dimensões reduzidas, pois cada lado do módulo possui apenas 36mm de comprimento.

Para fornecer energia aos leds foi utilizada uma fonte de alimentação de 12V e 1A. A fonte e os módulos são apresentados na figura 20.





Figura 20 - Módulo led smd5050 ligado à fonte de alimentação.

## 4 DESENVOLVIMENTO

No processo iterativo de desenvolvimento do sistema de visão de máquina realizaram-se várias versões e testes até que fosse possível detectar os modos de falha, na impressão de peças diversas. A estrutura da versão final do programa desenvolvido será apresentada a seguir.

### 4.1 ESTRUTURA DO PROGRAMA

A estruturação de uma inspeção no ambiente *Vision Builder* é feita através de um diagrama de estados, que é composto de estados e transições, que irão definir o fluxo da inspeção, podendo ser usado um único estado ou vários, de acordo com a complexidade necessária, conforme verificado ao longo do desenvolvimento do programa.

O diagrama de estados do sistema de monitoramento é apresentado na figura 21.

Cada estado, representados por elipses, contém um número determinado de funções de inspeção, enquanto as transições, representadas pelas setas, determinam quando a inspeção sai de um estado e continua em outro.

As transições denominadas como *Default* são padrões e automáticas, o fluxo de inspeção passará por essas transições se as funções dentro de cada estado foram cumpridas e não houver nenhuma outra condição para outra transição. Quando uma transição *Default* é ligada no estado em que se origina, é possível formar um *loop* na inspeção, em que o estado realiza suas funções repetidamente, até que a condição de outra transição seja atingida.

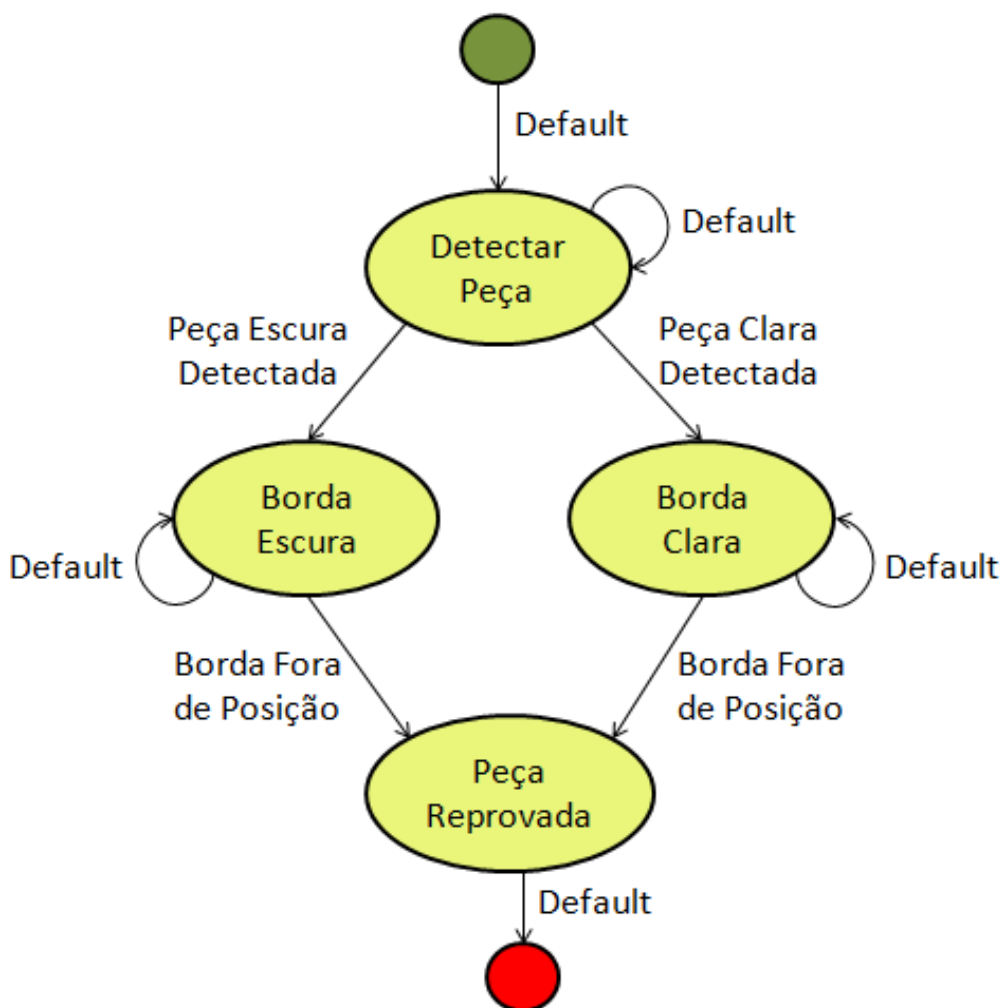
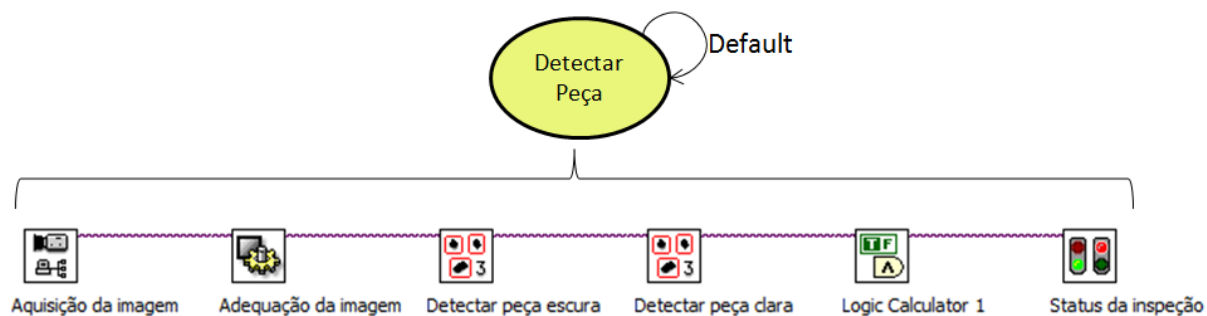


Figura 21 - Diagrama de estados do sistema de monitoramento.

Para o sistema de monitoramento foram utilizados quatro estados no diagrama, de forma a garantir a menor complexidade possível para o sistema. Após a iniciação do programa, tem-se um estado para a detecção da peça sendo impressa, dois estados para a avaliação da borda da peça e um terceiro para o caso de uma peça fora de posição. Cada um dos estados, suas funções e respectivas transições serão descritos a seguir.

#### 4.1.1 Detectar peça

Dentro de cada estado do diagrama são determinadas as ações a serem realizadas na inspeção de forma sequencial. Para o primeiro estado, chamado detectar, os passos realizados são apresentados na figura 22.



**Figura 22 - Sequência de operações do estado de detecção da peça.**

Cada ação realizada dentro do estado será detalhada a seguir, na ordem que atuam no estado.

#### **4.1.1.1 Aquisição da imagem**

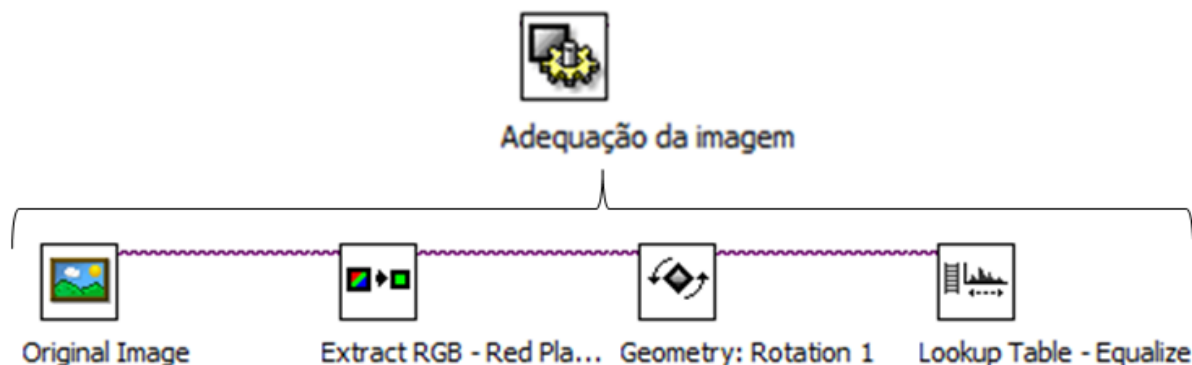
A primeira etapa realizada é a aquisição da imagem que será analisada posteriormente, através de uma câmera.

Nesse passo, é realizado o ajuste dos parâmetros da imagem obtida, como o foco, brilho e contraste, por exemplo, de forma que se obtenha uma imagem com a melhor qualidade possível, facilitando a execução dos processos na sequência.

#### **4.1.1.2 Adequação da imagem**

O segundo passo é a adequação da imagem obtida, para isso é utilizado um software em conjunto com o ambiente *Vision Builder*, que é um módulo integrado com funções específicas de processamento de imagem, chamado de *NI Vision Assistant*.

Uma vez iniciado o *Vision Assistant*, é possível gerar uma nova sequência de operações, para realização do processamento de imagens, similar a sequência realizada em um estado do diagrama de estados. Essa sequência, também chamada de *Script*, é apresentada na figura 23:



**Figura 23 – Script com sequência de operações do *Vision Assistant*.**

A etapa utilizando o *Vision Assistant* visa dois objetivos principais: converter a imagem e melhorar o contraste.

A imagem obtida pela câmera possui uma profundidade de cor de 32 bits, porém muitas funções do *Vision Builder* operam somente com imagens em uma profundidade de 8 bits, por isso se faz necessária a conversão. Nesse caso a conversão é feita pela função *Extract RGB*, que irá extrair um plano de cor da imagem e gerar uma imagem de 8 bits como resultado.

Muitas vezes a imagem aparece inclinada, devido a fixação inadequada da câmera na impressora. Assim aplica-se a função de rotação da imagem, para garantir que a borda da peça sendo impressa fique posicionada horizontalmente.

O último recurso utilizado no *Vision Assistant* foi a equalização da imagem, que visa ajustar o brilho e o contraste automaticamente.

Um exemplo do funcionamento do script do *Vision Assistant* é apresentado na figura 24, utilizando uma imagem da impressora 3D em operação, obtida em um dos testes realizados.

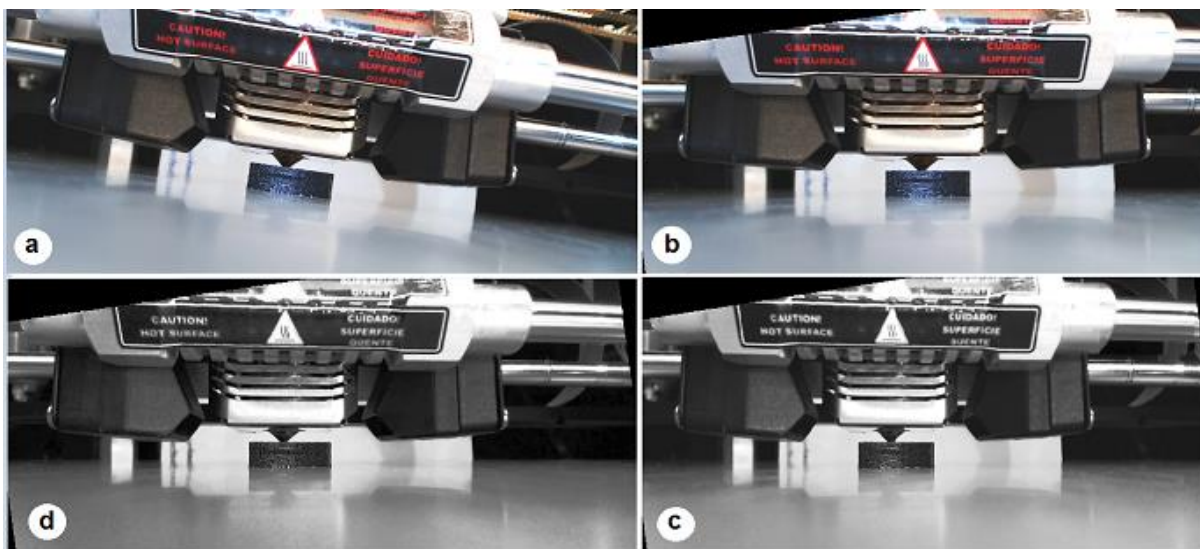


Figura 24 - Vision Assistant; (a) imagem original; (b) adequação do ângulo; (c) extração do plano de cor; (d) equalização.

#### 4.1.1.3 Detectar presença da peça

O próximo passo é detectar a presença da peça sendo impressa, objetivando que o programa não inicie a inspeção quando não há uma peça ou quando ela ainda possui dimensões muito pequenas.

A detecção será feita pela análise dos pixels na região da imagem, que uma vez submetida à adequação, não apresentarão cores, variando então em uma escala de intensidade de cinza que vai de 0 a 255, sendo que quanto menor o valor mais escuro é o pixel e quanto maior, mais claro.

Para detectar peças impressas em um material escuro utiliza-se a função nomeada como detectar peça escura, que procura por pixels de baixa intensidade (variando entre 0 e 50) que indicarão a presença da peça.

Um exemplo de detecção de peça escura é apresentado na figura 25, onde a intensidade dos pixels que devem ser detectados neste teste varia entre 0 e 100.

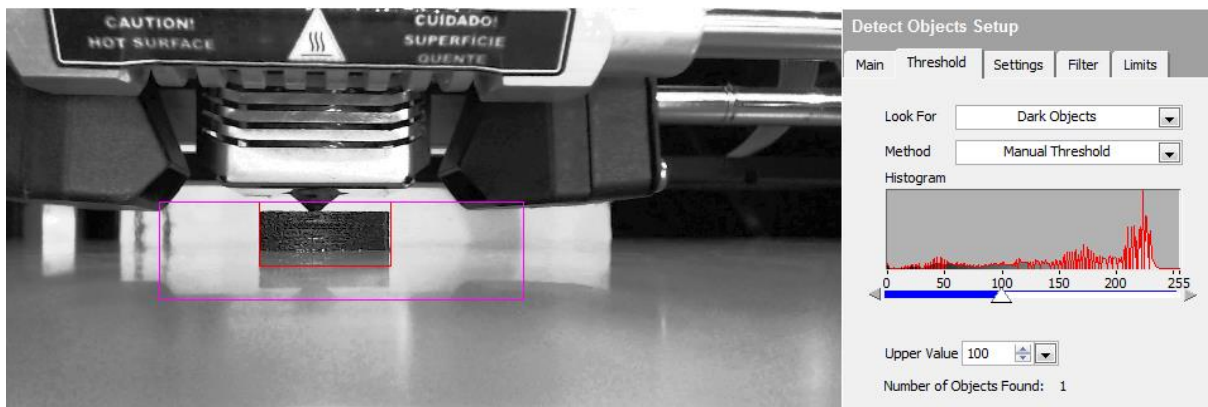


Figura 25 - Detecção de peça escura.

Analogamente, na detecção de peças claras é feita a procura por pixels de alta intensidade (variando entre 235 e 255).

Enquanto a peça não possuir dimensões mínimas para que a borda possa ser analisada, a detecção não será aprovada, como mostrado na figura 26.

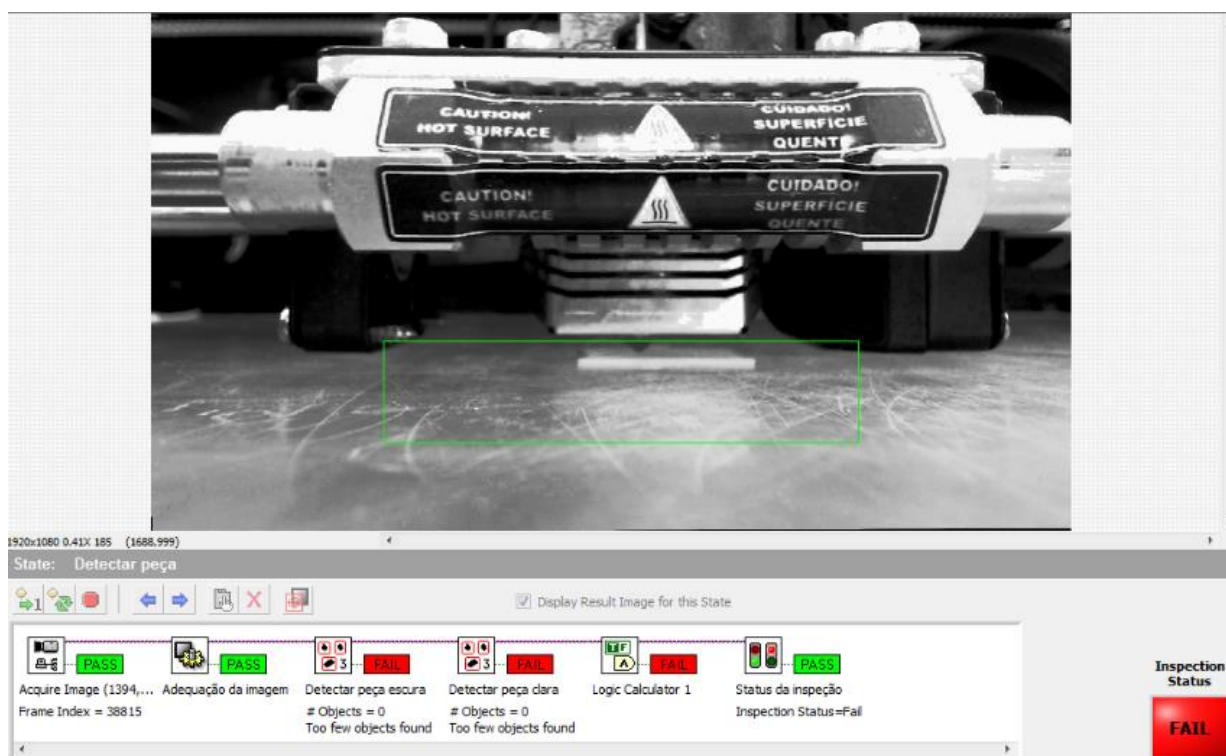


Figura 26 - Detecção de peça em estágio inicial de inspeção.



#### 4.1.1.4 Logic calculator

A função *logic calculator* garante que a inspeção seja aprovada quando pelo menos uma das funções de detecção de peças (detectar peça escura ou detectar peça clara) possuir status positivo, através de uma operação lógica. Como uma peça será enquadrada apenas em uma das categorias (clara ou escura), uma das funções sempre indicará falha na inspeção, como demonstrado na figura 27.

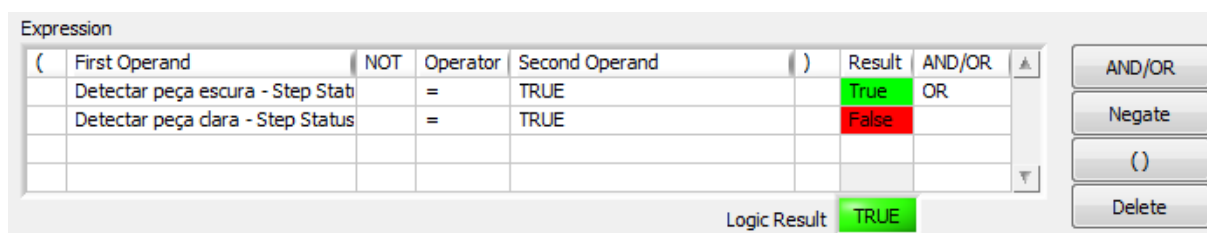


Figura 27 - Função Logic Calculator.

Dessa forma, mesmo se uma das funções de detecção tiver um status negativo, a função *logic calculator* irá atribuir status positivo à inspeção (exibindo a palavra *true* em verde em *Logic Result*), sendo preciso que ambas as funções de detecção falhem para gerar o status negativo.

#### 4.1.1.5 Status da inspeção e transição

O último passo do primeiro estado é a função de status da inspeção, que irá definir se as atividades do estado foram concluídas corretamente ou não. Se a peça for detectada, essa função indica a aprovação do estado com a cor verde e, caso contrário, indica a reprovação com a cor vermelha.

A transição para o próximo estado da inspeção ocorrerá assim que a peça sendo impressa atingir o tamanho mínimo para ser detectada, passando a inspeção para um estado diferente se a peça for clara ou escura, ou então o primeiro estado se repetirá continuamente até que uma peça seja detectada, uma vez que a transição *default* do estado gera a repetição enquanto a inspeção não for aprovada.



#### 4.1.2 Avaliar a borda

Enquanto o objetivo no primeiro estado é verificar a presença da peça, os próximos estados visam avaliar a borda superior da peça em busca de não conformidades.

A avaliação é feita pela análise da horizontalidade da borda na imagem, permitindo a detecção dos modos de falha da impressão 3D, como no caso do descolamento de componentes, em que a peça sai de posição e fica inclinada.

A sequência de operações realizada nos estados borda clara e borda escura é apresentada na figura 28, sendo que o único passo em que há diferenças na configuração entre os dois é o avaliar borda.

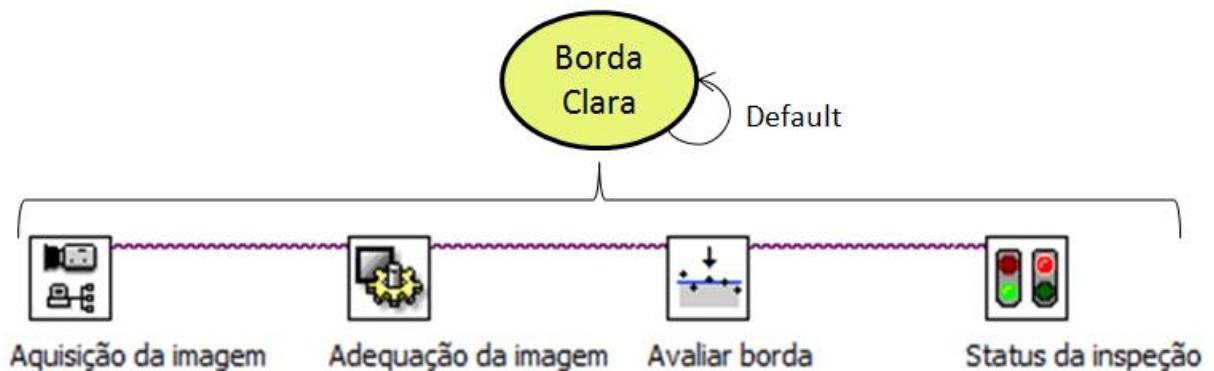
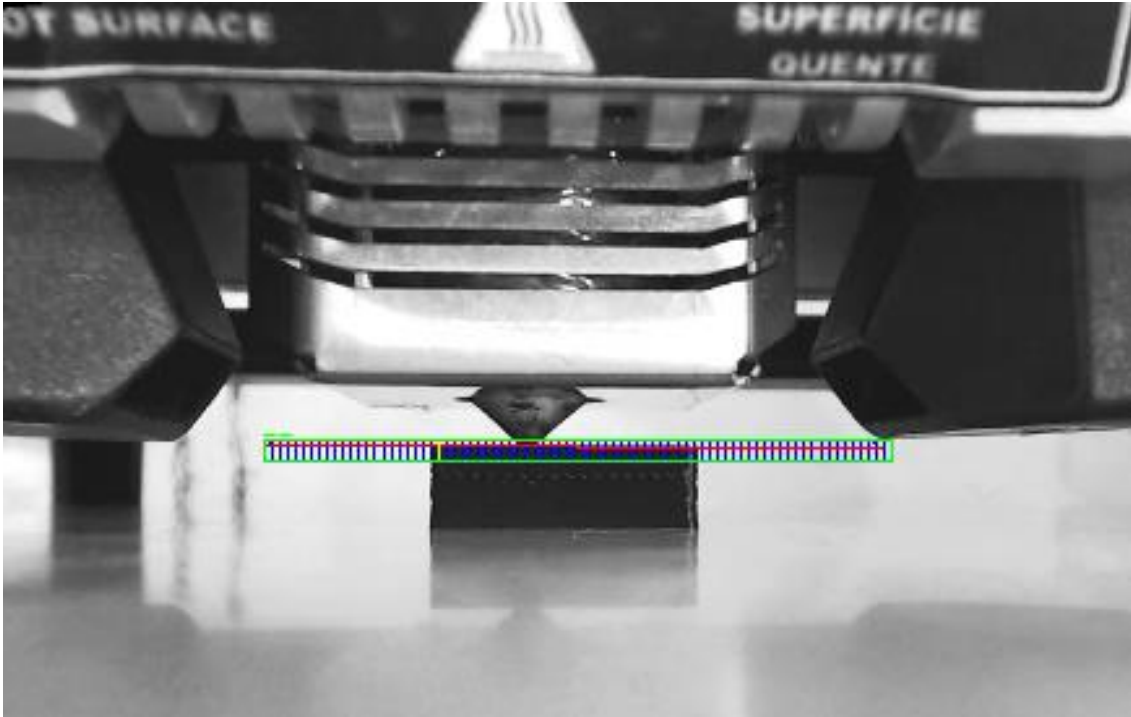


Figura 28 - Sequência de operações dos estados de avaliação da borda.

Pode-se verificar que os dois primeiros passos são similares aos definidos no estado de detecção, repetindo o processo de obtenção e adequação de imagens, nesse caso visando intensificar ainda mais o contraste entre a peça e o plano de fundo.

##### 4.1.2.1 Avaliar borda

No terceiro passo ocorre a avaliação da borda por meio da função *find straight edge*, conforme exemplificado na figura 29.



**Figura 29 - Aplicação da detecção da borda.**

A região de interesse será fixada junto à ponta do bico extrusor para permitir que a borda seja avaliada em peças de qualquer altura. Considerando que o bico extrusor se move apenas no eixo x e y, enquanto a mesa se moverá para baixo no eixo z após cada camada de material aplicada, a borda da peça sempre estará contida na região de interesse para impressões em funcionamento adequado.

A função detecta uma variação brusca na intensidade dos pixels da imagem, caracterizando assim a presença de uma borda. No estado borda clara, o programa irá detectar uma mudança brusca na intensidade dos pixels, indo dos de alta para os de baixa intensidade, enquanto no estado borda escura, apenas uma transição de pixels escuros para claros será avaliada. Nos dois estados, a busca da variação de intensidade ocorre de baixo para cima, utilizando a melhor borda encontrada (maior variação presente dentro da região de interesse).

Para que a peça seja aprovada, a borda detectada pode ter uma inclinação máxima de mais ou menos  $1^\circ$  e estar contida na região de interesse delimitada.

#### 4.1.2.2 Status da inspeção e transição

O último passo irá informar o status da inspeção, identificando se os passos contidos no segundo estado do diagrama foram aprovados ou não na inspeção.

A transição desse estado para o último só vai ocorrer caso seja detectado um problema na borda da peça, caso contrário, o processo é repetido, fazendo com que o fluxo da impressão vá pela transição *default* do estado, tanto no de borda clara quanto escura. Dessa forma, uma vez detectada a peça no primeiro estado, a borda será constantemente avaliada até a impressão termine ou que se encontre um problema.

#### 4.1.3 Peça reprovada

O último estado do diagrama é destinado a informar a detecção de um problema na impressão da peça e a função realizada nesse estado é apresentada na figura 30.

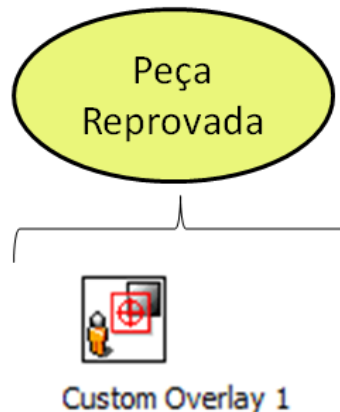


Figura 30 - Operação do estado de peça reprovada.

A função *custom overlay* irá exibir na tela de inspeção uma mensagem determinada, no caso indicará que a peça está fora de posição, conforme ilustrado na figura 31.

Após exibida a mensagem de erro, ocorre a transição do estado de peça reprovada para o fim do programa, sendo parada sua execução.



Figura 31 - Função *custom overlay*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Testes realizados

Foram realizados testes na impressora 3D Cloner DH+, no NUFER da UTFPR, identificando aspectos funcionais e limitações do sistema de monitoramento nos testes apresentados no quadro 1, desenvolvendo-se então soluções para melhorar seu funcionamento. O material utilizado na impressora em todos os testes é o PLA, variando apenas a coloração.

Teste	Objetivo
Teste de configuração da câmera	Determinar o posicionamento da câmera e das funções do programa.
Teste de fixação	Determinar a fixação e avaliar a influência vibração da impressora.
Teste de iluminação	Determinar o subsistema óptico e de iluminação adequados.
Teste de contraste	Avaliar influência do contraste entre peça e fundo na detecção de borda.
Teste de fundo da imagem	Avaliar influência do fundo da imagem na detecção da borda.
Teste de deposição irregular	Avaliar o sistema quando há material irregular sobre a peça.
Teste de peça com diminuição de área	Avaliar o sistema na detecção da redução gradual na borda.
Simulação de falta de material	Avaliar a detecção do modo de falha por falta de deposição de material.
Simulação de descolamento da peça	Avaliar a detecção do modo de falha por descolamento da peça.
Teste de impressão de degraus	Avaliar o desempenho do sistema no monitoramento de peças com degraus.

**Quadro 1 – Relação dos testes realizados.**

### 5.1.1 Teste de configuração da câmera

Foram realizados testes durante a impressão de um modelo de capacete, em PLA azul, para avaliar o posicionamento da câmera na máquina e também os posicionamentos das funções de detectar peça e avaliar borda, no programa. A figura 32 apresenta o modelo sendo impresso.



**Figura 32 - Impressão de um modelo de capacete.**

Concluiu-se nesse teste que o posicionamento da câmera deve ser feito de forma que ela seja fixada frente à peça sendo impressa e na altura do bico extrusor. O posicionamento deve permitir que a borda superior da peça seja exibida na forma de uma linha horizontal, pois os modos de falha da impressão serão detectados pela inclinação da borda.

A região de interesse da função avaliar borda deve ser posicionada logo abaixo do bico extrusor da impressora 3D, conforme a figura 29, sendo possível assim detectar o problema de falta de deposição de material, indicado pelo deslocamento da borda da peça para uma região abaixo da região de interesse.

Para que a câmera opere corretamente, não se deve utilizar a função de foco automático, pois a movimentação do bico extrusor faz com que o foco seja ajustado a todo momento, causando variações nas imagens obtidas e, por consequência, falhas no sistema de monitoramento.

A utilização de uma distância de foco definida, de forma a manter nítida a peça na imagem durante todo o processo de impressão, elimina os efeitos negativos do foco automático. Um exemplo de utilização do foco fixo na peça é apresentado na figura 33, onde a peça está sempre em foco, enquanto o bico perde o foco de acordo com a sua movimentação.

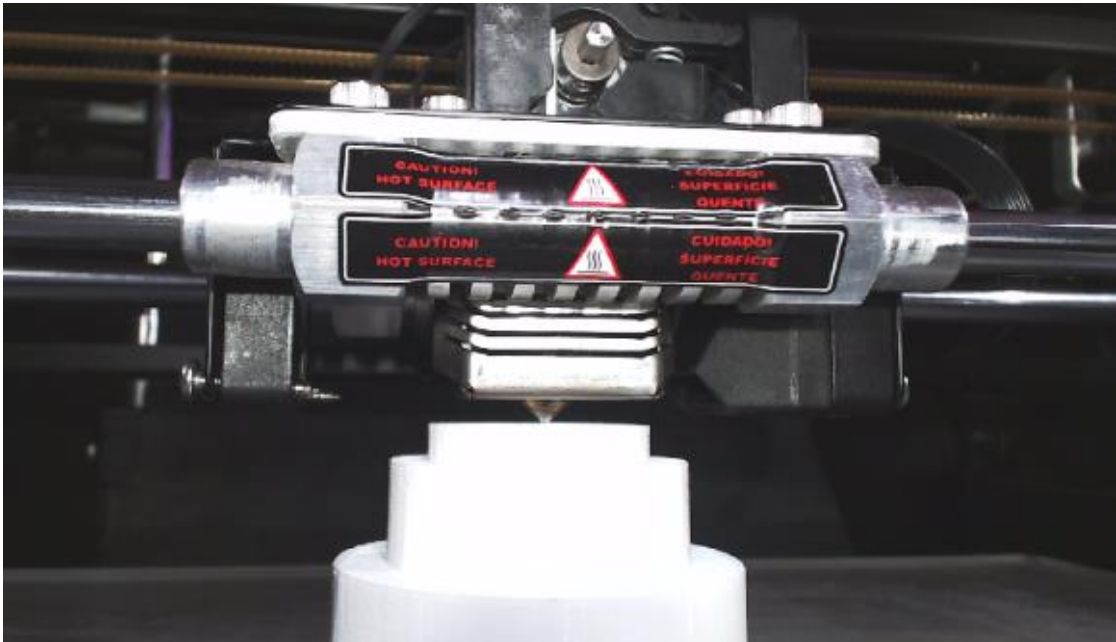


Figura 33 - Exemplo de foco da imagem.

As imagens obtidas pela câmera podem ser feitas tanto em cores, quanto em escala de cinza, pois serão modificadas para funcionar corretamente pelas funções de adequação de imagem presentes no programa.

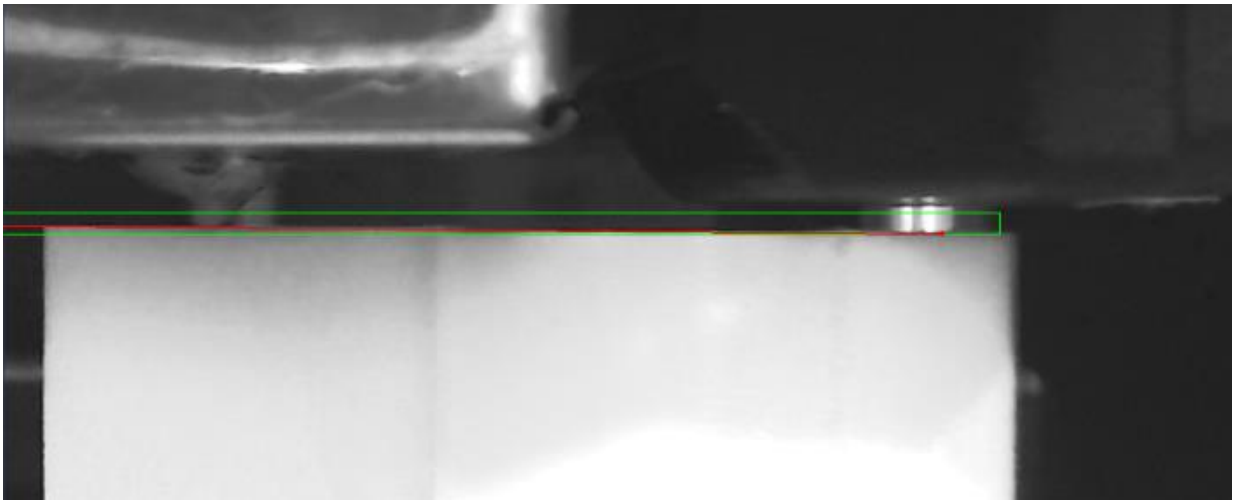
### 5.1.2 Teste de fixação

A fixação adequada da câmera é uma característica fundamental para o funcionamento do sistema de monitoramento, pois as posições de detecção de peças e avaliação da borda são fixas, não podendo ser alteradas automaticamente ao longo da impressão, algo que torna o sistema muito sensível a movimentações da câmera.

Verificou-se que com a vibração da máquina ao longo da impressão a câmera pode se deslocar, o que leva a um reposicionamento da região de interesse de

detecção de borda impedindo a detecção da borda corretamente, levando a falhas do sistema.

Esse efeito da vibração pode ser observado na figura 34, em que a região de interesse se desloca para cima durante a inspeção de um componente sendo impresso em PLA branco, fazendo com que, à medida que o deslocamento ocorre, o programa passe a indicar falhas mesmo na impressão de peças sem problemas.



**Figura 34 - Deslocamento da região de avaliação de borda para cima.**

Outro ponto importante para o funcionamento do sistema é que a câmera seja posicionada com a menor inclinação possível, pois uma das características chaves do sistema de monitoramento é a detecção da inclinação da borda da peça sendo impressa, algo que é prejudicado havendo uma inclinação inesperada da imagem.

Além do cuidado com a fixação correta, foi adicionada ao programa a função de rotação da imagem, que pode ser ajustada para compensar uma pequena inclinação indesejada e que eventualmente não pôde ser evitada com a fixação, garantindo que a borda de uma peça sendo impressa corretamente esteja horizontal na imagem.

Para obter uma fixação mais adequada, desenvolveu-se um suporte para a câmera e para os leds do sistema de iluminação, que pode ser colado na porta da impressora. A figura 35 apresenta o suporte.





**Figura 35 – Câmera e módulo de led presos ao suporte.**

O suporte foi impresso na 3D Cloner DH+, durante os testes do sistema de monitoramento, utilizando PLA. As dimensões do suporte são apresentadas no apêndice A.

Com o uso do suporte, verificou-se uma diminuição drástica na influência da vibração da máquina sobre o sistema de monitoramento, garantindo maior estabilidade em seu funcionamento.

### **5.1.3 Teste de iluminação**

Foram realizados testes do sistema de monitoramento durante a impressão de uma órtese em PLA amarelo.

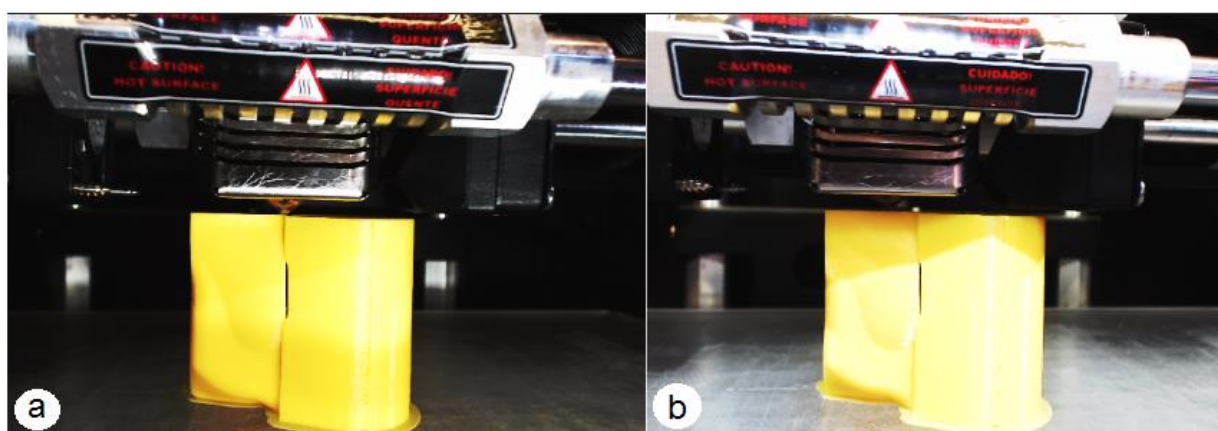
Notou-se uma influência da iluminação sobre o sistema de monitoramento quando utilizada a luz ambiente do laboratório como única fonte de iluminação. À medida que o bico extrusor se move no processo de impressão, varia a intensidade da luz sobre a peça, pois a luz era projetada de cima da máquina, gerando sombras.

Em alguns testes, essa variação na luminosidade foi suficiente para impedir o funcionamento do sistema de monitoramento, pois o mesmo depende de contrastes

adequados entre peça e fundo, evidenciando a necessidade do uso de um sistema de iluminação.

A instalação do sistema de iluminação, com módulos de led, permitiu que a luminosidade sobre a peça fosse sempre constante e adequada ao funcionamento do sistema, melhorando a qualidade das imagens e o desempenho do programa.

Instalando os leds frontalmente à peça foi possível notar a remoção das sombras causadas pela iluminação ambiente, conforme exemplificado na figura 35.



**Figura 36 –Comparações de iluminação: (a) iluminação frontal;(b) iluminação ambiente do laboratório.**

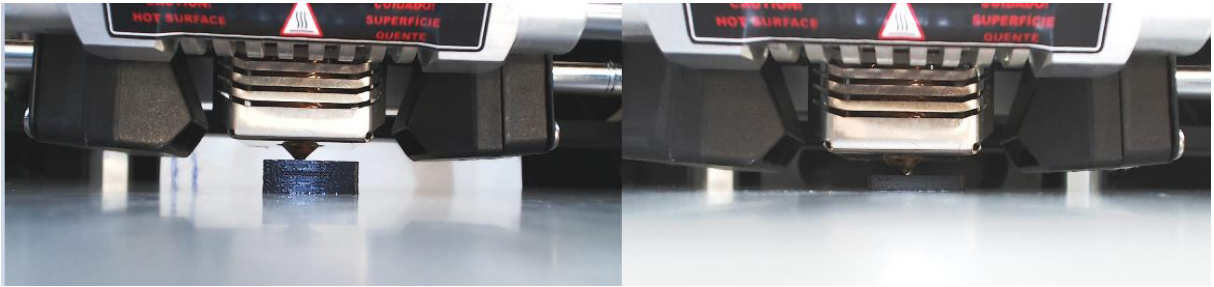
Outra vantagem no uso da iluminação frontal na impressão foi não necessitar de um subsistema óptico para o direcionamento da luz, pois a incidência direta sobre a peça foi suficiente para garantir a iluminação adequada, diminuindo a complexidade do sistema.

#### **5.1.4 Teste de contraste**

Foram impressas seis peças em PLA preto, para verificar o funcionamento do sistema no caso de baixo contraste.

Nesse caso, a avaliação da borda não foi realizada corretamente, pois detecção da borda é realizada com base no contraste entre a peça e o fundo da imagem, logo é necessário garantir que esse contraste seja o maior possível.

Deve-se então adaptar o fundo da imagem de acordo com a coloração da peça, utilizando um fundo branco no caso da impressão de peças de cor escura ou utilizando um fundo escuro, para peças claras. Uma comparação entre a utilização de fundos diferentes é apresentada na figura 37.



**Figura 37 - Comparação do contraste obtido em um fundo claro e um escuro.**

Com a adaptação do fundo da imagem não foram observadas falhas do sistema de monitoramento devido a problemas de contraste, havendo a detecção da borda de maneira eficaz.

#### **5.1.5 Teste de fundo da imagem**

Realizou-se a impressão de um chaveiro, em forma de coruja, em PLA amarelo, para a realização de testes.

A presença de objetos no fundo da imagem, como componentes da própria impressora, por exemplo, pode prejudicar o funcionamento do programa, uma vez que esses objetos podem interferir na função de detecção de borda, como demonstrado na figura 38.

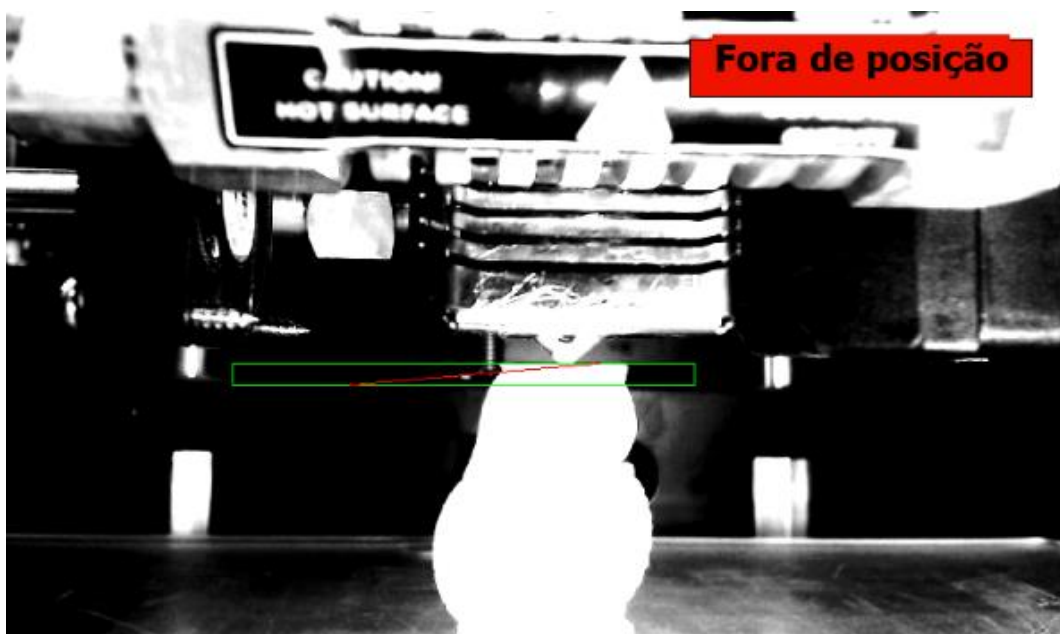


Figura 38 - Interferência do fundo da imagem na detecção de borda.

Verificou-se que a presença de um objeto iluminado, mesmo que muito pequeno, é suficiente para prejudicar a detecção da borda, indicando falha de posicionamento em uma peça que era impressa corretamente, conforme resultado da impressão na figura 39.



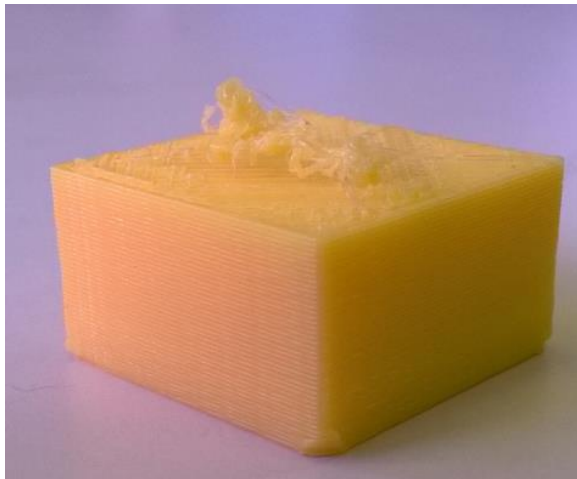
Figura 39 - Chaveiro em forma de coruja

Para que essa falha não se repetisse, adotou-se a utilização de um fundo uniforme, sem variações de cor ou textura, garantindo que a detecção da borda ocorra corretamente.

### 5.1.6 Teste de deposição irregular

Foram realizadas a impressão de dois cubos, um com 1cm e outro com 2cm de aresta, com o sistema de monitoramento atuando ao longo o processo.

A impressão do cubo de 1cm de aresta aconteceu sem problemas, porém, durante a impressão do cubo com 2cm de aresta, o filamento de material se esgotou, fazendo com que a impressora continuasse funcionando sem depositar material. À medida que o material se esgotava, o que sobrava era depositado irregularmente sobre a peça, resultando em uma impressão defeituosa, com dimensões abaixo do especificado e material sobreposto, como apresentado na figura 40.



**Figura 40 – Cubo com 2cm de aresta.**

O modo de falha foi devidamente detectado durante a impressão pelo sistema de monitoramento, em um primeiro momento ao analisar a borda dentro da região de interesse, verificou-se a presença do material irregular pela inclinação da borda; uma segunda forma de detecção ocorreu pela continuação da impressão sem material, que manteve o deslocamento da mesa da máquina para baixo, fazendo com que a borda da peça saísse da região de interesse.

A figura 41 apresenta a detecção da falha de impressão pelo sistema de monitoramento.

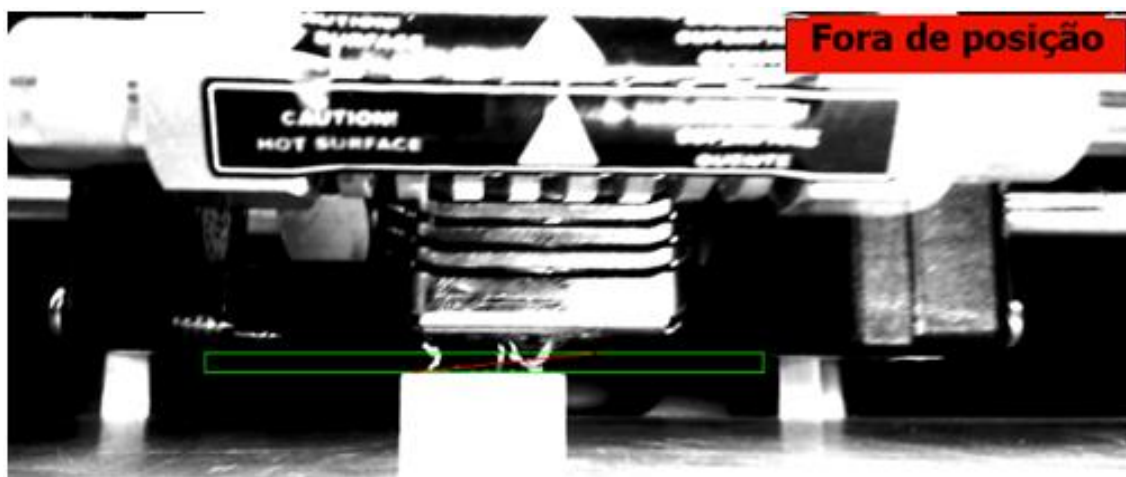


Figura 41 - Deposição indevida de material durante impressão de um cubo.

Para que a detecção do material depositado indevidamente seja realizada, é necessário que ele possua dimensões suficientes para interferir na função de avaliar borda. Caso o material depositado seja de dimensões muito pequenas, ou mesmo existam problemas no acabamento da peça que gerem a presença de material sobreposto (ocasionados pela escolha de parâmetros de impressão grosseiros), não são detectados pelo sistema de monitoramento, como exemplificado na figura 42, que ilustra um teste em que a impressão foi realizada corretamente, mesmo com a presença de material acima da borda.



Figura 42 - Impressão com baixo acabamento superior.

### 5.1.7 Teste de peça com diminuição de área

Para avaliar o desempenho do sistema no monitoramento de peças que possuem uma diminuição de área ao longo da direção de empilhamento das camadas, foi impressa uma peça em PLA branco com as dimensões apresentadas na figura 43.

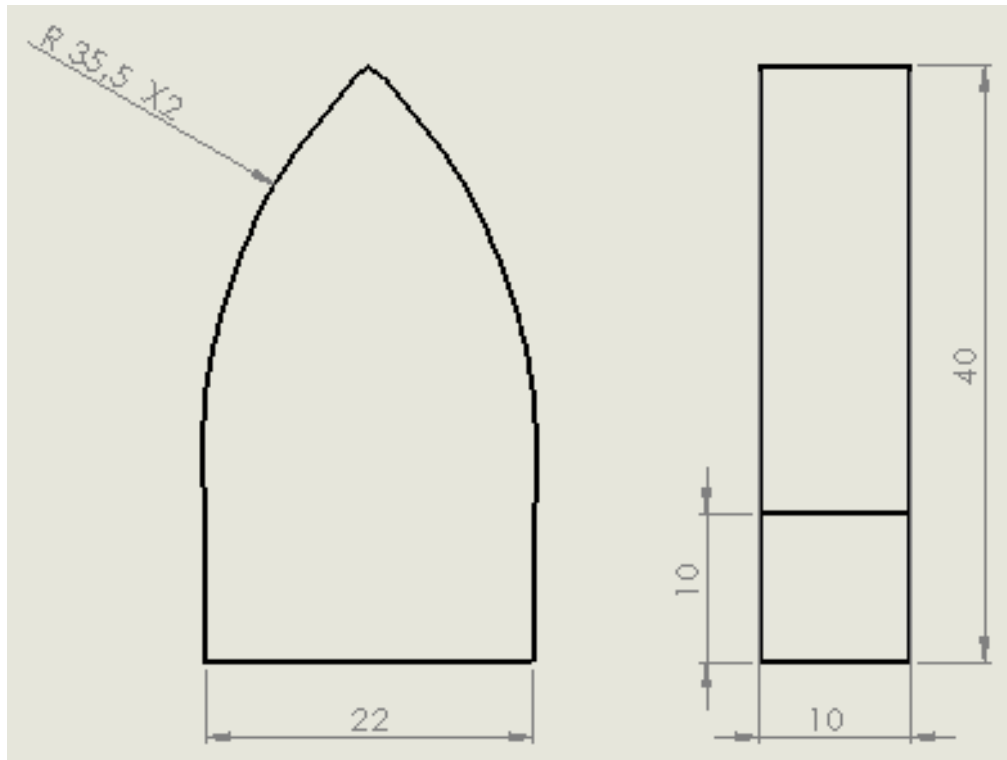
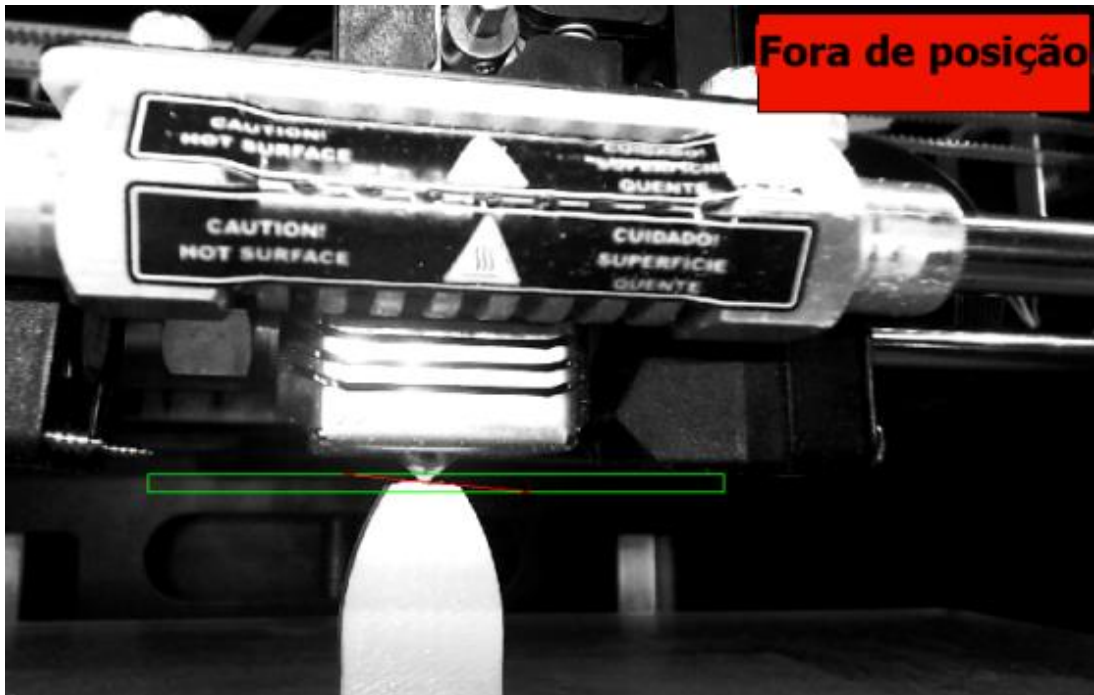


Figura 43 – Peça com diminuição de área, dimensões em mm.

A detecção da borda do componente foi realizada adequadamente até que a largura do componente fosse reduzida a aproximadamente 10 mm, a partir daí o sistema não pode continuar a detecção, indicado uma falha na peça, mesmo que a impressão continuasse corretamente, como ilustrado na figura 44.





**Figura 44 – Falha na detecção de borda.**

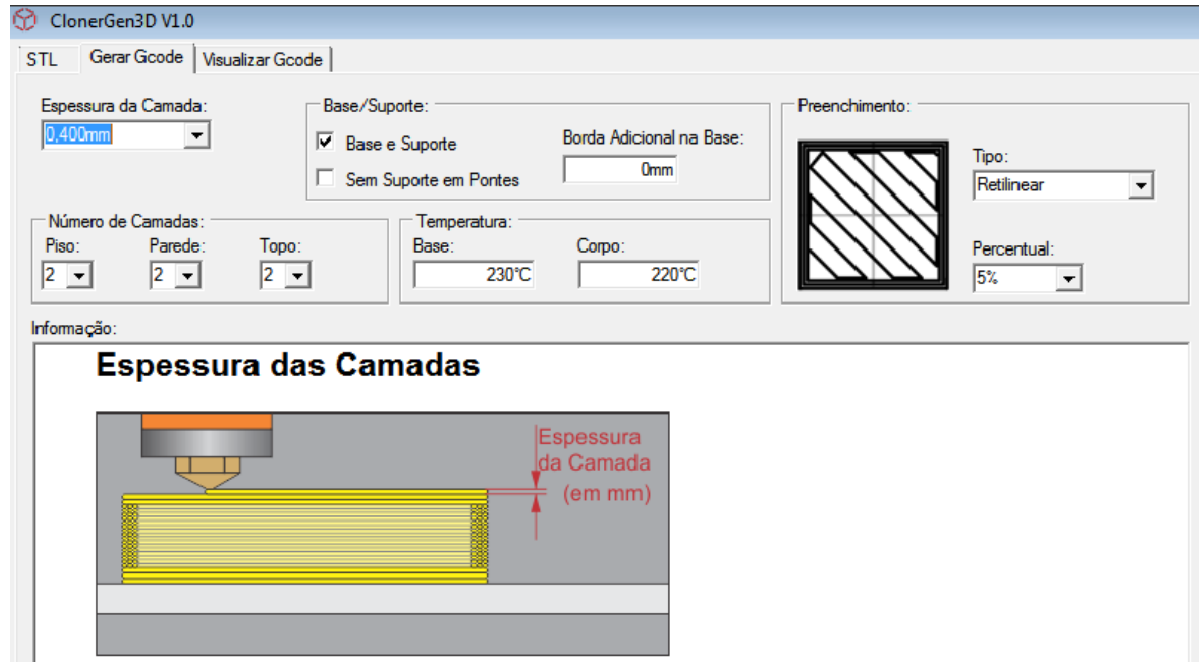
Para garantir a funcionalidade do sistema de monitoramento é necessário se atentar ao tamanho da borda que deverá ser analisada, de aproximadamente 12mm para peças com diminuição de área. Dessa forma, a probabilidade de falhas do sistema é diminuída, permitindo um melhor funcionamento do sistema.

#### **5.1.8 Simulação de falta de material**

Para realizar a simulação do problema de falta de deposição de material foi novamente utilizado o modelo do cubo com 2cm de aresta, devido a sua simplicidade, impresso em PLA branco.

Os parâmetros de impressão foram configurados visando a economia de material e redução no tempo, acelerando então os testes. Os parâmetros são definidos no software da impressora, sendo ilustrada a janela de configuração da impressora na figura 45.





**Figura 45 - Parâmetros de impressão das simulações de falta de deposição.**

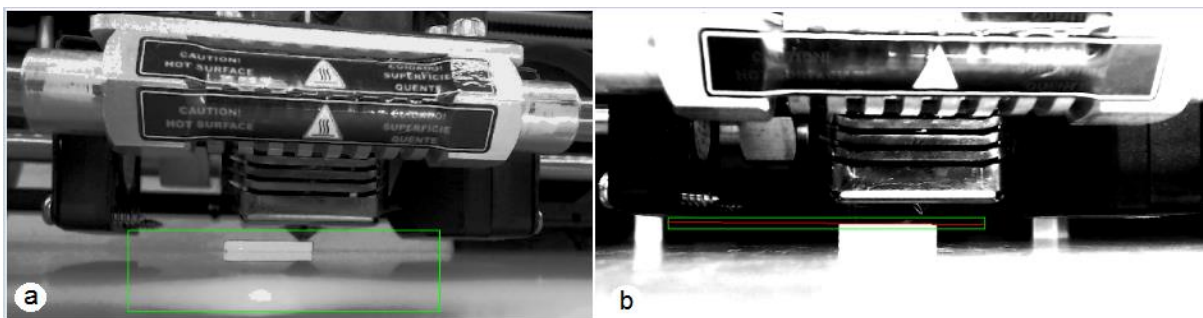
Conforme apresentado, a espessura de camada utilizada foi de 0,4mm e o preenchimento interno de material foi de 5%.

A espessura de camada pode variar entre 0,05mm até 0,4mm, sendo que o valor mais comum de trabalho da impressora é 0,25mm, variando de acordo com as dimensões da peça. A escolha pela máxima espessura de camada foi feita para facilitar a visualização do deslocamento da mesa da impressora, no caso de não haver deposição de material.

Utilizando os parâmetros descritos, foram realizadas 6 impressões do modelo e, durante a impressão, a alimentação de material da impressora foi interrompida, retirando-se o filamento de material do bico extrusor. A impressora continuava se movendo, sem depositar o material, como no problema de falta de deposição.

O primeiro cubo foi impresso até 90% antes da interrupção do abastecimento de material, permitindo um tempo maior para adequação do sistema de visão e iluminação na posição correta, sendo necessários apenas pequenos ajustes ao longo das impressões subsequentes.

Para os demais cubos, apenas 30% da impressão foi realizada, o suficiente para o que o cubo possuísse as dimensões mínimas para ser detectado (aproximadamente 6mm de altura). A figura 46 apresenta o estágio inicial dos testes.



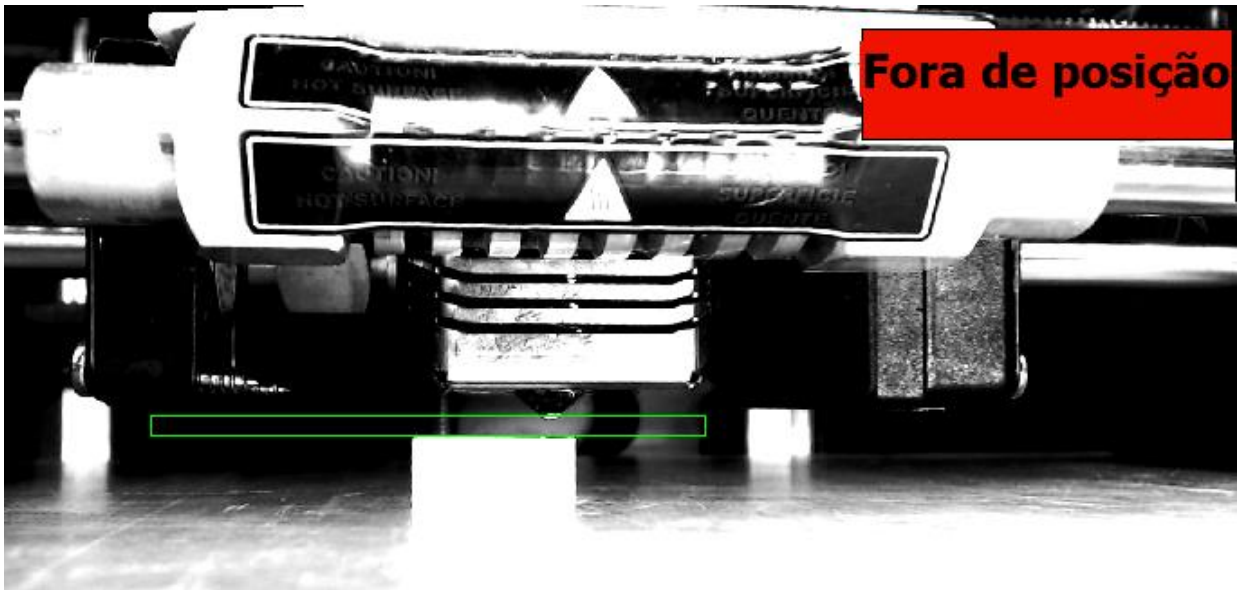
**Figura 46 - Impressão do cubo; (a) cubo não detectado; (b) borda detectada.**

O aumento de contraste percebido na figura 46 (b) ocorre pela função de adequação da imagem, do estado de detecção de borda clara, aumentando o máximo possível o contraste do cubo em relação ao fundo.

Após a interrupção de material, foram necessários três deslocamentos da mesa da máquina para baixo, o que seria equivalente a perda de três camadas de material sobre a peça, para que a peça deixasse a região de interesse da função de detecção de borda, apontando então a falha.

Podem ser necessários mais deslocamentos da mesa até que a falta de deposição de material seja detectada pelo sistema de acordo com a espessura de camada utilizada na impressão, sendo que quanto menor a espessura, mais tempo decorre entre a interrupção de material e a detecção pelo sistema de monitoramento.

A figura 47 apresenta a detecção da falha da peça assim que a borda avança para fora da região de interesse.

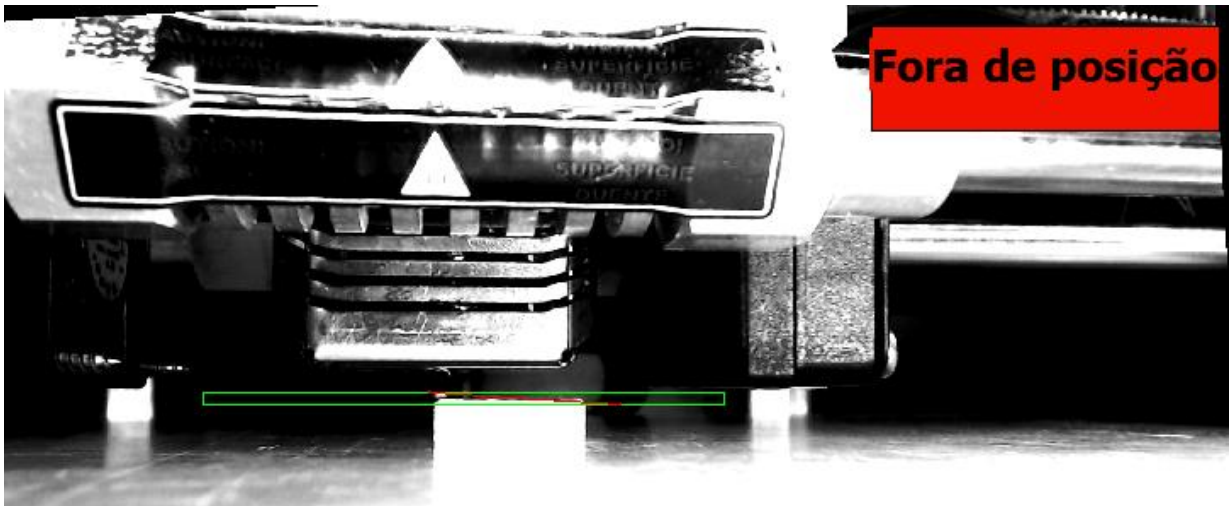


**Figura 47 - Detecção da falta de deposição de material.**

É possível notar a olho nu a distância entre o bico de extrusão e a peça, indicando a falta de material. Visando então diminuir essa distância com um número menor de deslocamentos da mesa necessários para a detecção, foram realizadas variações no tamanho da função de avaliar borda, bem como de seu posicionamento. Quando a constatação do problema é realizada com apenas uma camada de material perdida, pode-se, em alguns casos, continuar a impressão, pausando o processo e realimentando a impressora, algo que não é possível quando a falta de deposição de material é verificada após vários deslocamentos da mesa.

Reposicionando a função mais acima, de forma que a borda da peça fique mais próxima ao limite inferior da função, foi possível diminuir o número de deslocamentos para dois, sendo que o mesmo ocorreu ao diminuir a espessura da região de interesse da função avaliar borda.

Todavia, tanto o reposicionamento quanto o redimensionamento da região de interesse influenciaram negativamente no desempenho do sistema de monitoramento, pois apesar de permitirem a detecção da falha em um menor número de deslocamentos da mesa, a indicação de falha ocorreu também enquanto a peça era impressa corretamente, conforme apresentado na figura 48.



**Figura 48 - Indicação de falha em peça sendo impressa corretamente.**

Nota-se na imagem que a ocorrência da falha do sistema de monitoramento se deu pela alta claridade da ponta do bico de extrusão, que foi detectado juntamente com a borda, gerando uma angulação "falsa" e superior aos limites tolerados pelo programa. Isso foi possível pois o reposicionamento da região de interesse mais acima diminuiu a porção clara da peça na região, tornando assim o bico extrusor mais relevante para o programa durante a avaliação.

Outra parcela das falhas do sistema de monitoramento nesses casos ocorreu pela vibração da impressora e, também, aleatoriamente, causando indicações de erros de impressão indevidamente.

Deve-se atentar então para as características da função avaliar borda, visto que quanto mais estreita ou posicionada mais próxima a borda, maior foi a incidência de erros do sistema de monitoramento, erros que não foram observados nos testes com a região de interesse maior e com a borda da peça centralizada no início. Devido a sensibilidade do sistema de visão, dificilmente seria possível detectar o problema com a perda de uma única camada, algo que poderia permitir a continuação do processo de impressão.

Com a realização das simulações, verificou-se que o sistema de monitoramento pode detectar o problema de falta de deposição de material automaticamente e de maneira eficaz, após alguns deslocamentos da mesa.

### 5.1.9 Simulação de descolamento de peça

Para a realização de simulações do descolamento de peças, foram realizadas 5 impressões de uma esfera de 25mm de diâmetro. A esfera foi escolhida por apresentar uma área de contato com a mesa muito pequena, o que aumentariam as chances de ocorrer o descolamento durante a impressão.

Utilizou-se durante os testes um valor de preenchimento interno de 20%, enquanto o valor da espessura de camada foi variado de 0,25mm até 0,4mm. Não foi utilizada borda adicional na base, visando facilitar o descolamento das esferas.

Durante a impressão, as peças descolaram, sendo isso verificado pelo sistema de monitoramento assim que apresentadas inclinações de borda elevadas, conforme ilustrado na figura 49.

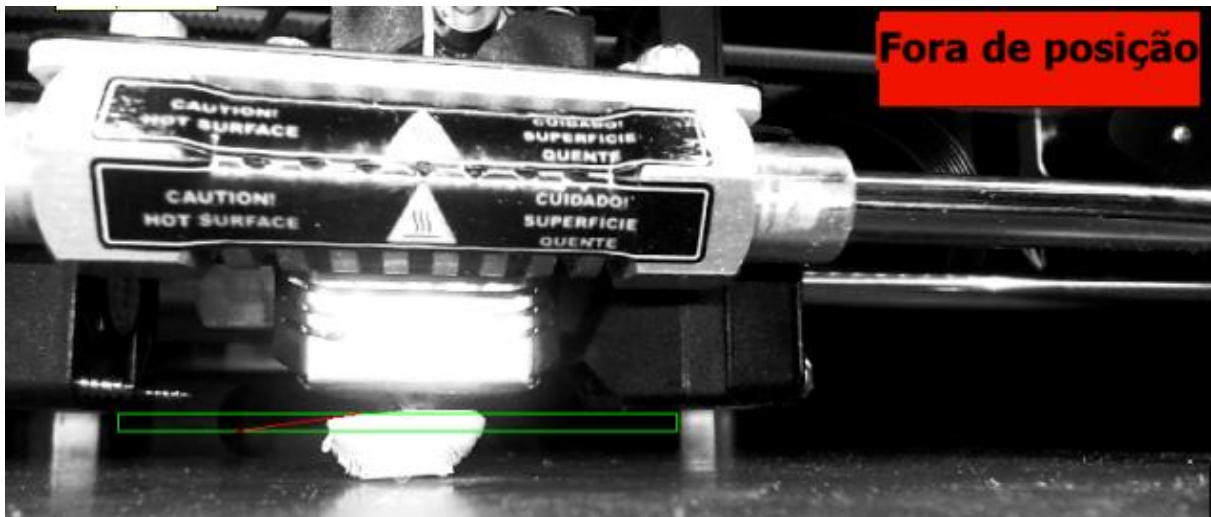


Figura 49 - Detecção de peça descolada.

Uma vez que a peça se desprende da mesa, verifica-se uma inclinação elevada, superior a  $10^\circ$ , detectada pelo programa já no momento da movimentação, indicando a não conformidade.

No caso de um pequeno deslocamento parcial da peça, se não gerar uma inclinação na borda ou movimentação da peça, não será detectado pelo sistema de monitoramento.

Para avaliar o funcionamento do sistema de monitoramento no caso de peças de maior largura, foram impressos dois triângulos com as dimensões apresentadas na figura 50.

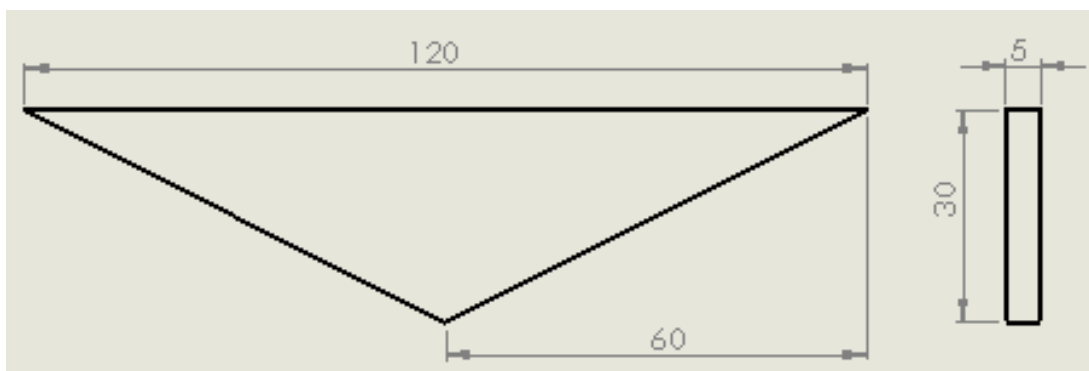


Figura 50 – Dimensões dos triângulos impressos, dimensões em mm.

Na impressão do primeiro triângulo o descolamento ocorreu logo no início da impressão, sendo prontamente detectado pelo sistema de monitoramento, conforme apresentado na figura 51.

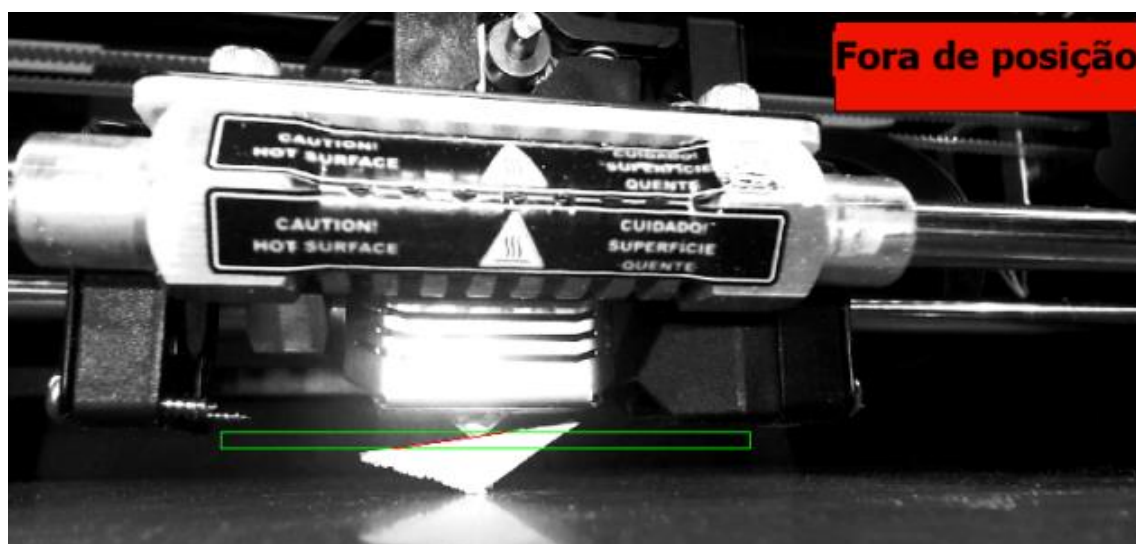
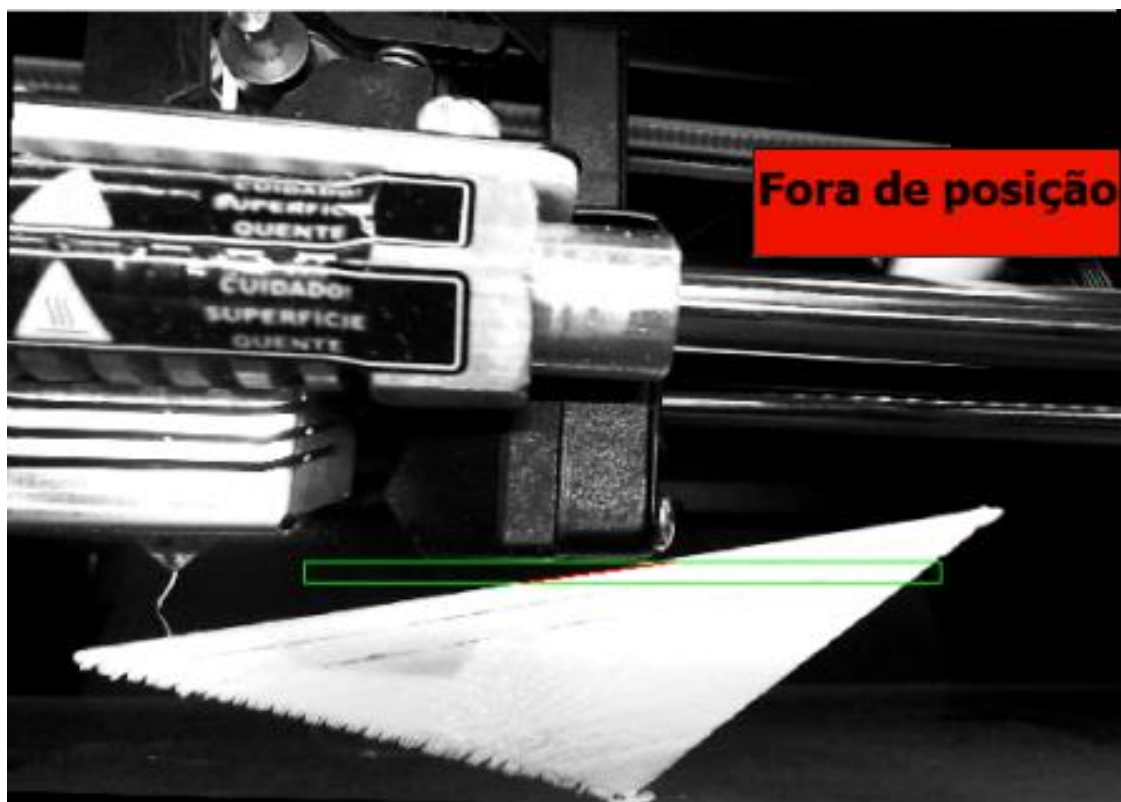


Figura 51 –Descolamento no início da impressão.

Para garantir que o descolamento ocorresse apenas quando a peça estivesse na fase final da impressão, foi adicionada uma borda adicional na base do triângulo de 3mm, aumentando a estabilidade do processo de impressão.



Nesse caso, o descolamento ocorreu quando a borda analisada já era maior que a região de interesse da função de avaliação, fator que não interfere no funcionamento do sistema de monitoramento, uma vez que o descolamento foi detectado da mesma maneira na peça de maiores dimensões, como apresentado na figura 52.



**Figura 52 – Detecção do descolamento no final da impressão.**

Verificou-se com os testes que o único requisito necessário para a detecção do descolamento é que pelo menos uma parte da borda da peça esteja contida na região de interesse da função de avaliação da borda, independente do tamanho da peça sendo impressa.

#### **5.1.10 Teste de impressão de degraus**

Para verificar o comportamento do sistema de monitoramento durante a impressão de degraus, realizou-se a impressão de uma peça escalonada, apresentada na figura 53:



Figura 53 - Peça Escalonada.

Enquanto a impressão dos degraus se iniciava, o programa interpretava a borda de maneira equivocada, gerando a detecção de inclinações falsas, que indicariam problemas na impressão de uma peça sem defeitos. Exemplos das inclinações obtidas podem ser verificados na figura 54.

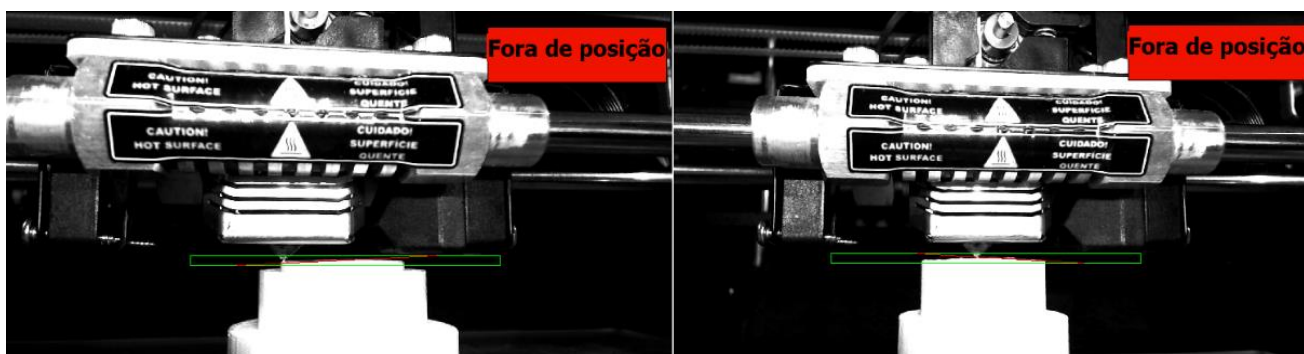


Figura 54 - Exemplos de falhas do programa na impressão de degraus.

Mesmo com alterações na função de detecção de borda o erro persiste, visto que a inclinação encontrada supera a inclinação máxima permitida programada para que não seja considerado como um descolamento.



Entretanto, o erro do funcionamento do programa pôde ser reduzido com a modificação do valor máximo de angulação permitida, de mais ou menos 1°, para um valor de mais ou menos 5°.

Essa alteração não prejudica a funcionalidade do programa, uma vez que se verificou nos testes que peças que descolam e aparecem inclinadas na tela apresentam uma inclinação muito superior aos 5° estabelecidos. Dessa forma, pode-se utilizar o sistema de monitoramento para avaliar a impressão de peças com degraus sem que o sistema apresente falhas.

## 5.2 Características funcionais do sistema de monitoramento

Considerando as peculiaridades do sistema de monitoramento identificadas durante os testes, pode-se identificar características ou requisitos para que o sistema funcione corretamente.

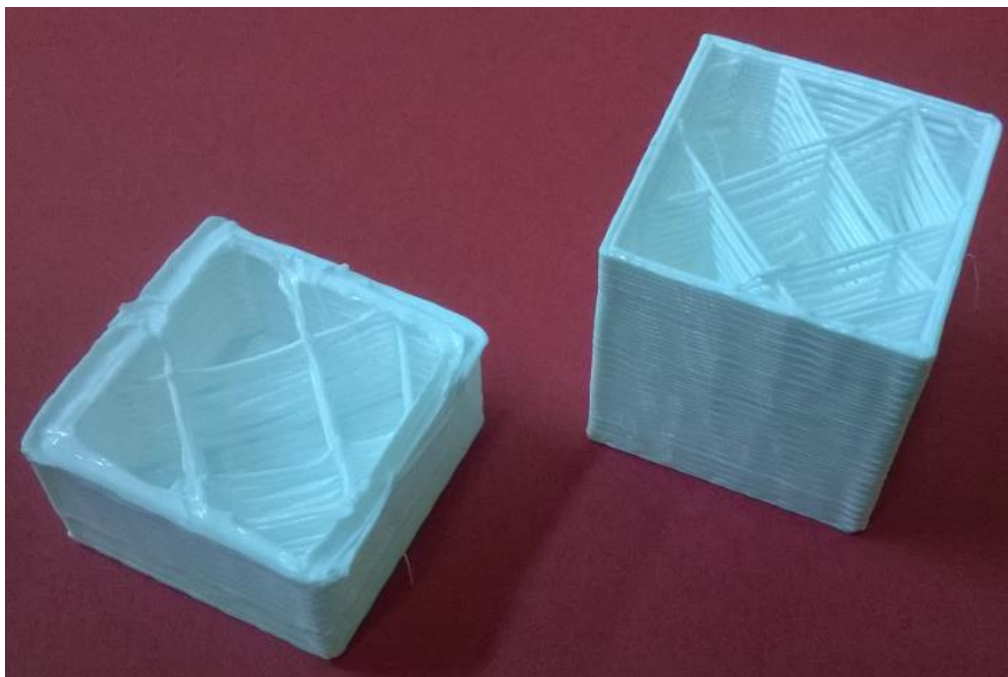
Os requisitos de funcionamento serão resumidos e agrupados no quadro 2.

<b>Característica</b>	<b>Instrução de operação</b>
Fixação da câmera/iluminação	Fixar suporte na porta, na altura do bico extrusor.
Modelo da câmera	Webcam <i>Logitech</i> c920; Resolução 15 Megapixels.
Posicionamento da câmera	Posicionar a câmera na altura da peça, mantendo a borda da peça na horizontal na imagem.
Foco da câmera	Configurar o foco fixo e sobre a peça.
Iluminação	Manter luzes do laboratório ligadas durante impressões.
Subsistema de iluminação	Utilizar os módulos led posicionados em frente a peça sendo impressa.
Subsistema óptico	Verificou – se desnecessário quando aplicado o subsistema de iluminação.
Plano de fundo	Utilizar um fundo claro na impressão de peças escuras e um fundo escuro, na impressão de peças claras. Preferência por fundos sem mudanças de cor ou textura.
Inclinação máxima	Utilizar uma inclinação de + ou - 5° para as funções de avaliação de borda.
Ajuste do programa	Posicionar adequadamente as funções de detecção de peças e de avaliação de bordas.

**Quadro 2 – Características funcionais do sistema de monitoramento.**

Outra característica relevante sobre a utilização do sistema de monitoramento é que ele não detecta falhas internas.

Quando o preenchimento de uma peça não é maciço, podem ser impressas internamente estruturas de auxílio para a impressão, que servirão de base para a casca externa, como ilustrado na figura 55.



**Figura 55 - Estrutura interna de uma peça.**

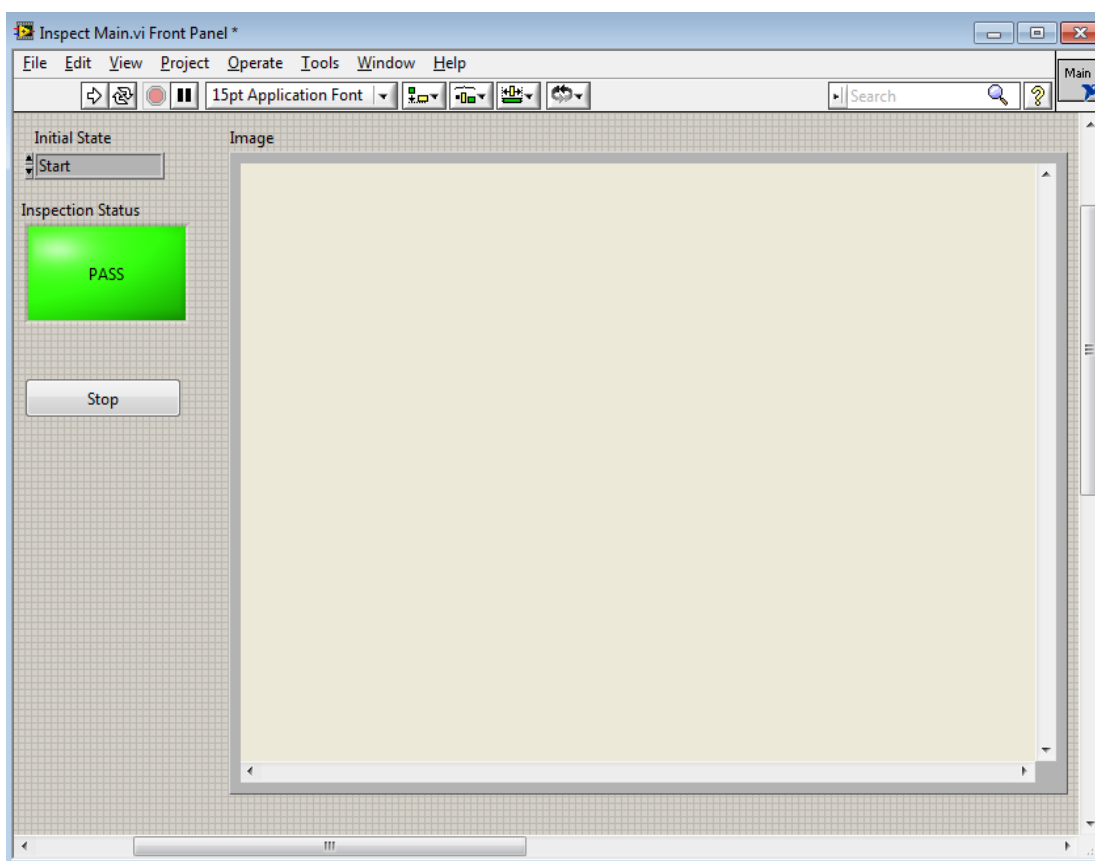
No caso da existência de falhas nas estruturas internas, somente serão detectadas quando interferirem na formação da borda superior da peça, caso contrário não serão detectadas.

### **5.3 Migrando a inspeção para o *LabVIEW***

Uma vez desenvolvidos os *scripts* do sistema de monitoramento no *Vision Builder*, é possível migrar a inspeção para o *Labview*, sendo possível realizar um grande número de modificações, de acordo com o desejado. A transferência pode ser feita de forma automática, utilizando a função *Migrate Inspection to labVIEW* presente no *Vision Builder*.

Assim são gerados os programas em *LabVIEW*, também chamados de *Virtual Instruments* (VI), que são formados por um painel frontal (que exibe a interface do programa) e pelo diagrama de blocos, que corresponde aos códigos gráficos do programa, onde é possível realizar as alterações funcionais no programa que será exibido no painel frontal (RUFINO, 2014, p.2).

O diagrama de blocos e o painel frontal do programa do sistema de monitoramento desenvolvido são apresentados no apêndice B e na figura 56, respectivamente.



**Figura 56 – Painel frontal.**

No diagrama de blocos são adicionadas todas as funções necessárias para o funcionamento do sistema de monitoramento, desde a aquisição e processamento das imagens, até a avaliação da borda e indicação de falha.

O painel frontal é o que faz a comunicação com o usuário, exibindo a imagem obtida pela câmera e o status da inspeção, indicando com a exibição de uma

mensagem caso a peça não esteja em uma posição adequada de impressão. O usuário pode parar a inspeção sempre que desejar, apertando o botão *stop*.

A funcionalidade do sistema de monitoramento se mantém, independentemente de estar operando pelo *LabVIEW* ou pelo *Vision Builder*, porém apenas migrando o programa é possível inserir funções adjacentes e modificar a interface do programa, aumentando muito a versatilidade do sistema e possibilitando a interação com outros softwares ou equipamentos.

Uma possibilidade de utilização do sistema no *LabVIEW* é a integração com funções da impressora 3D, o que tornaria possível uma parada automática da máquina no caso da detecção de problemas de impressão.

### 5.3.1 Adicionando funções ao programa

O site da *National Instruments* apresenta vários exemplos de utilização do *LabVIEW*, através de estudos de caso, fóruns e apresentação de dúvidas de usuários. Por exemplo, podem ser verificados exemplos de controle do mouse do computador, que utilizam o *LabVIEW* para controlar funções do Windows relacionadas ao posicionamento e acionamento do cursor do mouse (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

Pode-se adicionar funções extras ao programa do sistema de monitoramento no *LabVIEW* alterando o diagrama de blocos; por exemplo, foi adicionada ao programa a capacidade de controlar o mouse e clicar em um determinado ponto da tela no caso de falha de impressão, como no botão de parada da impressora presente em seu software, possibilitando uma parada de impressão automática.

O diagrama de blocos para a função do clique é apresentado na figura 57, sendo adicionado ao diagrama do sistema de monitoramento de forma a ser ativado assim que indicada a falha na inspeção.

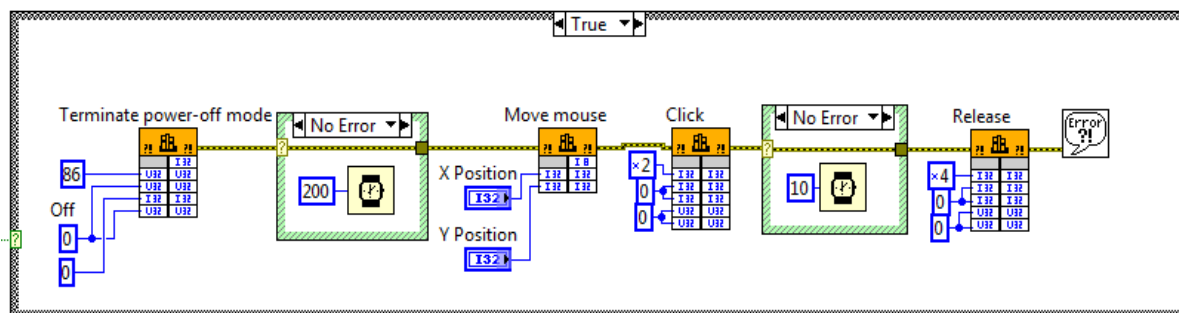


Figura 57 – Função de simulação de clique com o mouse.

Quando solicitada, a função irá acionar o mouse, mover o cursor para uma posição na tela pré-determinada (definida a coordenada x e y dos pixels da tela), acionar o mouse e então liberar, realizando um clique cada vez que solicitado pelo sistema de monitoramento.

Mantendo o software da impressora exibido na tela, é possível programar as coordenadas do clique para o botão de parar impressão do software, dessa forma pode-se realizar a parada automática da impressão 3D quando detectados os modos de falha por falta de deposição de material ou descolamento, gerando possibilidades de redução de desperdícios no processo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

Foram realizados diversos testes utilizando um protótipo do sistema de monitoramento, visando à definição de suas características funcionais, modos de operação e a verificação da detecção dos modos de falha da impressão 3D.

A cada teste, eram variados parâmetros do sistema de monitoramento, como mudanças no posicionamento dos componentes, utilização ou não de iluminação e variações no programa, por exemplo, até que fosse obtido o layout mais eficaz.

A inserção de um subsistema de iluminação se mostrou necessária durante os testes, assim, foram utilizados 3 módulos de led quádruplos, posicionados em frente a peça sendo impressa, garantindo o aumento no contraste da peça com o fundo e a luminosidade adequada ao bom funcionamento do sistema.

A utilização da iluminação frontal se mostrou eficaz, tornando desnecessário o desenvolvimento de um subsistema óptico para o direcionamento da luz, diminuindo assim os custos e simplificando a instalação e utilização do sistema de monitoramento.

A operação do sistema utilizando um suporte para a câmera e iluminação, desenvolvido e produzido durante os testes na própria impressora 3D, forneceu grande estabilidade ao processo de inspeção, reduzindo drasticamente a influência das vibrações da impressora na detecção de borda.

O módulo *Vision Builder* foi adequado ao desenvolvimento do sistema, sendo intuitivo e possuindo uma grande variedade de funções de inspeção, várias delas que poderiam ser utilizadas no sistema de monitoramento. As funções usadas foram escolhidas de forma que o programa funcionasse adequadamente e de forma mais simples possível, facilitando a alteração de parâmetros das funções sempre que necessário.

O sistema foi configurado especificamente para atuar no modelo de impressora 3D Cloner DH+, presente no NUFER, o que implica que para a utilização desse sistema em impressoras diferentes faz-se necessário um novo *layout*, que leve em conta as peculiaridades da impressora. A cada mudança no posicionamento da câmera, por exemplo, a região de interesse para detecção da peça e para a

avaliação da borda devem ser reposicionadas, pois foram programadas de maneira fixa na tela.

A transferência do programa realizado no Vision Builder para o LabVIEW acrescenta um grande potencial de utilização e integração do sistema de monitoramento, uma vez que o LabVIEW é um ambiente de programação versátil e permite a inserção de diversas funções extras ao programa.

Para avaliar a possibilidade de integração posterior do sistema de monitoramento, foi adicionada ao programa a função de simulação de clique, que seria acionada no momento que o sistema detectasse um modo de falha, clicando no botão de parada de máquina no software da impressora. A integração dessa função ao protótipo do sistema pode permitir a parada da máquina automaticamente, comprovando o potencial futuro de automatização do processo de parada de impressão.

O sistema de monitoramento proposto é capaz de detectar automaticamente os modos de falha de impressão 3D analisados, sejam falhas de descolamento de peças ou de falta de deposição de material, desde que consideradas suas características funcionais, através de uma solução simples e de custo reduzido, podendo ser utilizado em projetos futuros de melhoria do processo de impressão 3D.

## **6.2 Sugestões de trabalhos futuros**

Durante o desenvolvimento do sistema de monitoramento, verificou-se uma limitação na utilização da impressora 3D, não sendo possível realizar alterações no hardware, comprometendo a integração com o sistema de monitoramento, sendo realizada a parada apenas por uma simulação de clique no botão de controle presente no software da impressora.

Com a combinação do sistema de monitoramento com um sistema que realize o acionamento da impressora 3D e permita a parada da máquina, é possível conseguir uma redução de desperdícios no processo ao pausar as impressões automaticamente no momento que os erros são detectados pelo sistema de visão.

Segue então como sugestão o desenvolvimento de um sistema que realize a integração do sistema de monitoramento com a impressora de forma permanente,

através de modificações no hardware e software da impressora ou ainda, pela utilização de linguagens de programação como o C, C++ e o próprio LabVIEW na união do sistema de monitoramento ao controle da impressora.



## 7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2013). **ASTM F2792 – 12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.**

ABOUD NETA, S. R.; DUTRA, L. V.; ERTHAL, G. J. (2008). **Limiarização Automática em Histogramas Multimodais.** 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

AZEVEDO, F. M. (2013). **Estudo e Projeto de Melhoria em Máquina de Impressão 3D.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de São Paulo . São Carlos.

CANALYS. **3D Printing Market.** (2015). Disponível em: <<http://www.canalys.com/newsroom/global-3d-printing-market-reach-202-billion-2019>> Acesso em: 5 set. 2015.

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O., & MARQUES, D. M. (2013). **Impressoras 3D: Redução de Custo e Tempo no Desenvolvimento de Produtos.**

DESCHAMPS, F. (2004). **Contribuições para o Desenvolvimento de um Sistema de Visão Aplicado ao Monitoramento do Desgaste de Ferramenta de Corte - O Sistema Toolspy.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina . Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

DING, Z.; ZHANG, R.; KAN, Z. (2014). **Quality and Safety Inspection of Food and Agricultural Products by LabVIEW IMAQ Vision.** Food Analytical Methods, 8 , 290 - 301.

FELICIANO, F. F.; SOUZA, I. L.; LETA, F. R. (2005). **Visão computacional aplicada à metrologia dimensional automatizada: considerações sobre sua exatidão**. Engevista , 38 - 50.

FORCELLINI, F. A. (2002). **Desenvolvimento de Produtos**. Apostila do curso de pós graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis

GIBSON, I., ROSEN, D., & STRUCKER, B. (2009). **Additive Manufacturing Technologies**. Springer Verlag.

E.TECH BRASIL.(2015). **Impressoras 3D 3Dcloner**. Disponível em: <<http://www.etechsi.com.br/index>> Acesso em: 2 nov. 2015.

KRISHNAN, C.; WASHABAUG, E. P.; SEETHARAMAN, Y. (2015). **A low cost real-time motion tracking approach using webcam technology**. Journal of Biomechanics , pp. vol. 48, 544-548.

MARENGONI, M.; STRINGHINI, D. (2009). **Tutorial: Introdução à Visão Computacional usando OpenCV**. Revista de Informática Teórica e Aplicada, v. 16 .

MARQUES, O. (2011). **Practical Image and Video Processing Using MATLAB**. New Jersey: Wiley-IEEE Press.

MARQUES FILHO, O; VIEIRA NETO, H. (1999). **Processamento Digital de Imagens** . Rio de Janeiro: Brasport.

MEULEN, R. V. (2015). **Gartner Says Worldwide Shipments of 3D Printers to Reach More Than 490,000 in 2016**. Disponível em: <<http://www.gartner.com/newsroom/id/3139118> > Acesso em: 5 out. 2015.

MONTEIRO, M. T. (Junho de 2015). **A Impressão 3D no Meio Produtivo e o Design: um estudo na fabricação de jóias**. Dissertação de Pós-Graduação - Universidade do Estado de Minas Gerais . Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

NATIONAL INSTRUMENTS (2013). **10 Importantes Considerações ao Escolher um Software de Visão.**, disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/2957/pt/>> Acesso em: 11 out. 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS (2015). **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>> Acesso em: 15 set. 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. (2008). **How can I programmatically simulate a mouse click?** Disponível em: <<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/9BB3211F3469623649257360000E272C>> Acesso em: 29 abril 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS (2015). **Sistemas de visão da NI**. Disponível em: <<http://www.ni.com/vision/pt/>> Acesso em: 15 set. 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS (2015). **Vision Builder for Automated Inspection.**, disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/11700#productlisting>> Acesso em: 11 out. 2015.

NUNES, F. L. (2006). **Introdução ao Processamento de Imagens Médicas para Auxílio ao Diagnóstico**. Atualizações em informática, 1ed. , 73 - 126.

OLIVEIRA NETO, V. J.; GOMES, D. M. (2007). **Comparação de Métodos para Localização de Fluxo Óptico em Sequências de Imagens**. Universidade Federal de Ouro Preto . Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

PAVIM, A. X. (2005). **Contribuições na Otimização de um Sistema de Visão para Detecção, Medição e Classificação Automática do Desgaste de Ferramentas de Corte em Processos de Usinagem**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina . Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. (2015). **Machine Vision Technology Market is expected to reach USD 28.50 billion in 2021**. Disponível em: <http://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/machine-vision-technologies.htm>> Acesso em: 08 de Set. de 2015.

RIOS, L. R. (2010). **Visão Computacional** . Salvador, Bahia, Brasil.

RUFINO, A. S.; SOBRINHO, N. S.; GOMES, M. S. (2014). **Sistema de inspeção de defeitos em perfis de alumínio utilizando a visão computacional**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

RUSS, J. C.; NEAL, F. B. (2015). **The Image Processing Handbook, Seventh Edition**. CRC Press.

SCHLEPERS, M. (2014). **Investigation of the mechanical properties of 3D printed structures of Objet and DLP**. Tese de Bacharelado - University of Twente. Enschede, Holanda.

SHIN, Y.-J.; LEE, J.-B. (2010). **Machine Vision for Digital Microfluidics**. AIP - Review of Scientific Instruments, 81.

SILVA, J. V.; MAIA, I. A. (2014). **Desenvolvimento de Dispositivos de Tecnologia Assistiva Utilizando Impressão 3D**. I Simpósio Internacional de Tecnologia Assistiva . Campinas, São Paulo, Brasil.

STARLUX. (2016). **Módulo LED Diodo Quádruplo SMD5050**. Disponível em: <<http://www.starlux.com.br/produtos/led/modulo-led/modulo-led-diodo-quadruplo-smd5050>> Acesso em: 28 abril 2016.

STEMMER, M. R. (2005). **Apostila de Sistemas de Visão**. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

TAKAGAKI, L. K. (2012). **Tecnologia de Impressão 3D**. Revista Inovação Tecnológica , 28-40.

VICTORIANO, E. R., Santos, D. D.; Maciel, R. (2012). **Reconhecimento de Imagem Através da Visão de Máquina** .

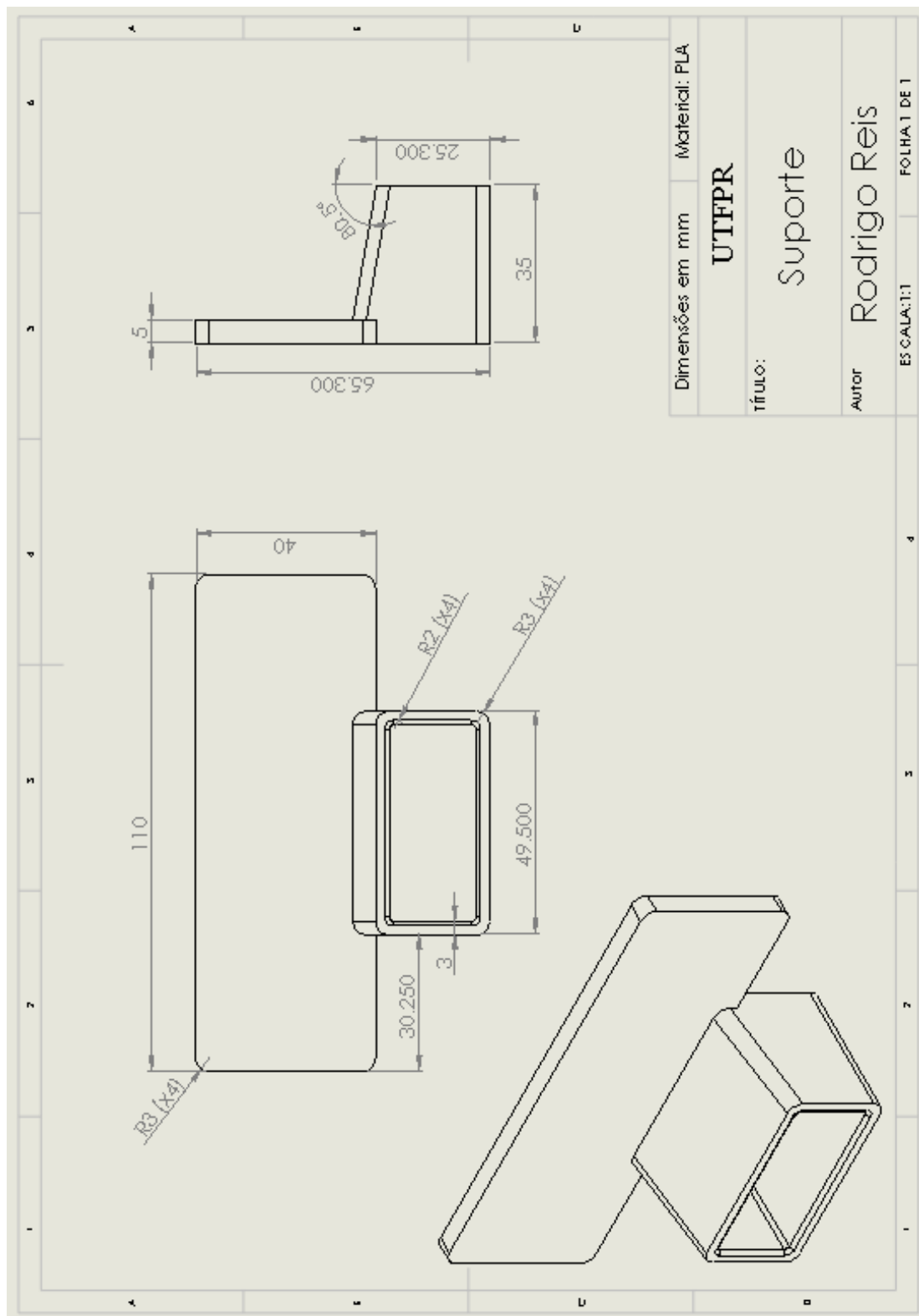
VIOLA, F. M. (2006). **Estudo Sobre Formas de Melhoria na Identificação de Características Relevantes em Imagens de Impressão Digital**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Fluminense . Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

VOLPATO, N. et al. (2007). **Prototipagem Rápida Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Blücher.

ZIBETTI, M. V. (2011). **Visão de máquina e suas Aplicações na Automação Industrial**. Monografia de especialização - Universidade Tecnológica Federal do Paraná . Curitiba, Paraná, Brasil.

## APÊNDICE A

### Dimensões do suporte



# APÊNDICE B

Diagrama de blocos do sistema de monitoramento.

