

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

VINÍCIUS CARTANA BOHRER - 00206475

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA A
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE
FUROS**

Porto Alegre
2021

VINÍCIUS CARTANA BOHRER - 00206475

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA A
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE
FUROS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA) apresentado à COMGRAD-CCA da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Bacharel em Eng. de Controle e Automação*.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

CO-ORIENTADOR(A):

Eng. Yachel Rogério Mileski

Porto Alegre
2021

VINÍCIUS CARTANA BOHRER - 00206475

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA A
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE
FUROS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Heraldo José de Amorim, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Prof. Dr. Eduardo André Perondi, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Marcelo Götz
Coordenador de Curso
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, maio de 2021.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Heraldo Amorim e Yachel Mileski por toda a confiança e dedicação que depositaram em mim e neste trabalho. Obrigado por terem aceitado me orientar em uma situação tão adversa.

Aos meus pais, Eduardo Bohrer e Sandra Cartana, a quem dedico este trabalho, por todo o apoio que sempre me deram, tanto nos momentos bons quanto nos momentos mais difíceis. Agradeço também aos meus demais familiares que, de alguma forma, ajudaram no meu desenvolvimento.

Aos meus amigos por todos os momentos de estudo e diversão que compartilhamos. Em especial, agradeço à Camila Emer que, além de ser uma grande amiga, também considero co-orientadora deste trabalho.

RESUMO

Métodos de inspeção automatizados para o controle de qualidade são cada vez mais utilizados no setor industrial. Dentre as técnicas empregadas com esse propósito, sistemas de visão computacional destacam-se por propiciarem inspeções precisas e não-destrutivas. Este trabalho tem o propósito de avaliar a qualidade furos circulares por meio de um sistema de visão computacional. Para isso, elaborou-se algoritmos capazes de extrair características de imagens digitais que auxiliem a avaliação da qualidade de furos, como diâmetro, desvio de circularidade e delaminação. Com o objetivo de fornecer imagens mais adequadas para os algoritmos, utilizou-se técnicas de pré-processamento e segmentação. Para realizar a validação dos resultados obtidos, o sistema foi aplicado tanto para imagens reais de furos quanto para formas geométricas circulares. As imagens foram adquiridas utilizando-se um sistema de aquisição de baixo custo (câmera de celular) em um ambiente controlado desenvolvido para esta aplicação.

Palavras-chave: Visão Computacional, Qualidade de Furos, Circularidade, Tolerância Dimensional, Delaminação.

ABSTRACT

Automated inspection methods for quality control are increasingly used in modern industry. Among the techniques employed for this purpose, computer vision systems stand out for providing accurate and non-destructive inspections. This work has the purpose of evaluating the quality of holes through a computer vision system. For this, algorithms were developed for extracting characteristics from digital images that may aid in the quality assessment of machined holes: diameter, circularity deviation, and delamination. Pre-processing and segmentation techniques were used to provide more suitable images for the algorithms developed. In order to validate the results obtained, the system was applied in images of machined holes (acquired from a digital camera) and for digital-native images of circular geometric shapes. The images from the machined holes were acquired with a low-cost acquisition system (cell phone camera), in a controlled environment developed for this application.

Keywords: Computer Vision, Hole Quality, Roundness, Dimensional Tolerance, Delamination.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Avaliação da Qualidade de Furos	11
2.1.1 Circularidade	11
2.1.2 Afastamento e Tolerância Dimensional	12
2.1.3 Delaminação	13
2.2 Processamento Digital de Imagens	15
2.2.1 Imagem Digital	15
2.2.2 Sistema de Visão Artificial	16
2.2.2.1 Aquisição	17
2.2.2.2 Pré-processamento	18
2.2.2.3 Segmentação	18
2.2.2.4 Extração de Características	19
2.2.2.5 Reconhecimento e Interpretação	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Apresentação do Sistema	21
3.2 Aquisição e Calibração da Câmera	22
3.3 Pré-Processamento da Imagem	23
3.4 Detecção dos Furos	24
3.5 Avaliação da Qualidade do Furo	25
3.5.1 Cálculo do Erro de Circularidade	25
3.5.2 Identificação do Afastamento	28
3.5.3 Cálculo do Fator de Delaminação	29
4 RESULTADOS	32
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE A - SEGMENTAÇÃO DA ZONA DE DELAMINAÇÃO PARA OS FUROS REAIS	41

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Círculo circunscrito e círculo inscrito no perfil circular.	12
2	Dimensão nominal e dimensões máxima e mínima.	13
3	Representação convencional de um campo de tolerância.	13
4	Delaminação nos lados de entrada e saída da ferramenta.	14
5	Representação da zona danificada referente à delaminação.	14
6	Eixo de coordenadas de uma imagem digital.	15
7	Relações de vizinhança de um pixel.	16
8	Etapas de um Sistema de Visão Artificial.	17
9	Representação da Transformada de Hough para círculos.	19
10	Etapas do sistema proposto.	21
11	Ambiente controlado para a realização dos testes.	22
12	Imagem do padrão xadrez utilizado na calibração da câmera.	23
13	Imagens do furo.	24
14	Segmentações do furo.	24
15	Furo detectado pela transformada de Hough para círculos.	25
16	Comprimentos radiais do furo com espaçamento de 45°.	26
17	Região de interesse para a segmentação da delaminação.	29
18	Equalização do histograma da imagem.	30
19	Zona de delaminação segmentada.	31
20	Formas geométricas circulares com a delaminação simulada.	32
21	Aquisição das imagens dos furos utilizados para a avaliação.	33
22	Delaminação no Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm.	41
23	Delaminação no Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm.	41
24	Delaminação no Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm.	42
25	Delaminação no Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm.	42

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros de calibração do sistema desenvolvido.	22
2	Valores medidos para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm. . .	33
3	Valores medidos para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm. . .	34
4	Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm.	34
5	Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm.	34
6	Valores medidos para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm. .	35
7	Valores medidos para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm. .	35
8	Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm.	35
9	Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm.	36
10	Valores medidos para o círculo impresso.	36
11	Valores medidos para a elipse impressa.	36
12	Cálculos dos parâmetros dimensionais para as formas circulares impressas.	37
13	Fator de delaminação obtido para as formas circulares impressas. . .	37

LISTA DE ABREVIATURAS

MDF *Medium-Density Fiberboard*

RGB *Red, Green and Blue*

1 INTRODUÇÃO

A área de controle de qualidade vem passando por uma grande evolução a partir do final do século XX, com o advento de novas tecnologias e o aprimoramento de métodos. Dentre os critérios aplicados ao controle de qualidade, a metrologia destaca-se por sua larga utilização no setor industrial, mais precisamente em processos de manufatura. Nesses processos, diversos fatores devem ser avaliados para determinar a conformidade de peças, como as tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas, ajustagem, incertezas e defeitos de fabricação (FELICIANO et al., 2005).

No setor de manufatura, as operações de furação são muito utilizadas, em sua maioria para fins de montagem. Em função disso, necessita-se muitas vezes que inspeções rigorosas sejam realizadas, no intuito de avaliar se os parâmetros dimensionais dos furos estão dentro das tolerâncias estabelecidas. Além do mais, a avaliação da conformidade de furos é importante devido aos vários tipos de danos que podem ser causados à peça durante o processo de furação, que podem diminuir a sua vida útil (SILVA et al., 2014).

Métodos automatizados para inspeção de conformidade de furos apresentam vantagens em relação aos métodos manuais convencionais, pois apresentam menores riscos às peças, maior produtividade e podem apresentar medições mais precisas e confiáveis, além de eliminar atividades tediosas relacionadas à medição manual. Nesse contexto, os métodos de visão computacional apresentam forte potencial de aplicação, tendo capacidade de detectar falhas e imprecisões nos processos de fabricação utilizando imagens digitais, ou seja, sem contato físico com a peça. Esses sistemas se tornam essenciais nas atividades que necessitam ser automatizadas, no intuito de aumentar a precisão e/ou evitar trabalhos tediosos (COSTA; CESAR, 2009).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema para avaliar a qualidade de furos usinados. Para isso, serão avaliados alguns parâmetros referentes aos furos, como o diâmetro médio, a circularidade e a delaminação. Essa avaliação será realizada por meio de um sistema que utilizará métodos de visão computacional, no qual as imagens dos furos serão adquiridas e, posteriormente, processadas com a utilização de algoritmos implementados no software Matlab.

Inicialmente será apresentada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos utilizados neste trabalho, sendo eles: critérios de avaliação da qualidade de furos e métodos de processamento digital de imagens. Em seguida, será apresentada a metodologia desenvolvida e o procedimento experimental utilizado para a avaliação dos furos. Nessa etapa, serão descritos os processos de aquisição, pré-processamento e segmentação das imagens dos furos. Além disso, serão apresentados os algoritmos desenvolvidos no Matlab para o cálculo da circularidade, desvio dimensional e fator de delaminação dos furos por meio de técnicas de processamento digital de imagens. Por fim, será realizada a validação e discussão dos resultados obtidos através do procedimento experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos utilizados neste trabalho. Na Seção 2.1, são abordados os conceitos a respeito de furos e processos de furação, além dos parâmetros mais usuais para a avaliação da qualidade dos furos. Na Seção 2.2, é apresentado o conceito de imagem digital e as principais etapas associadas ao processamento digital de imagens, com enfoque nos métodos utilizados neste trabalho.

2.1 Avaliação da Qualidade de Furos

A furação é um dos processos mais utilizados na manufatura para a produção de furos de montagem (PARK et al., 2017). Em determinadas aplicações, é necessário evitar desalinhamentos durante o processo de furação, visto que uma qualidade ruim dos furos pode gerar falhas na estrutura, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção (GIASIN; AYVAR-SOBERANIS, 2016).

Segundo Kurt et al. (2008), a performance da furação e a qualidade do furo dependem dos parâmetros de corte e das ferramentas utilizadas. Para compostos laminados, as condições ideais de furação para a obtenção de furos de boa qualidade são alta rotação da ferramenta e baixa velocidade de avanço, enquanto que para alumínio as condições ideais são alta rotação da ferramenta e alta velocidade de avanço (PAWAR et al., 2015).

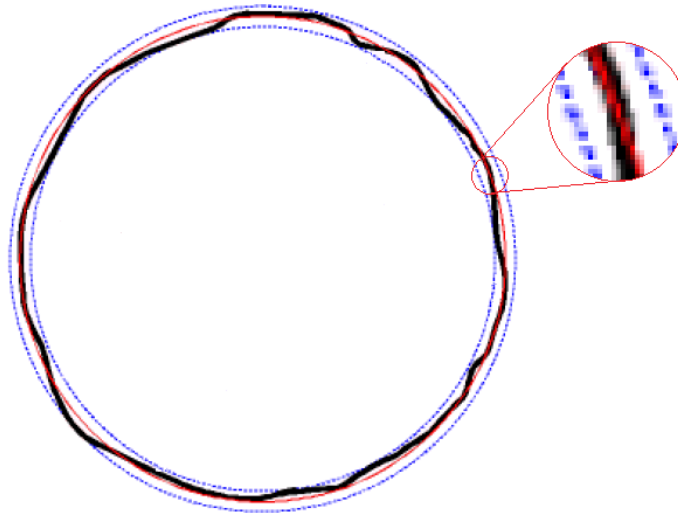
Dentre os principais parâmetros avaliados durante a análise da qualidade de furos, destacam-se a variação nas dimensões do furo, a circularidade, a rigidez da superfície, a formação de rebarba e a delaminação (PARK et al., 2017).

2.1.1 Circularidade

A circularidade é uma das características básicas de formas geométricas circulares. Em processos de manufatura, variações na circularidade podem ocorrer em função de imperfeições na rotação da ferramenta, erros nas operações de corte, lubrificação inadequada, desgaste da ferramenta, peças defeituosas de máquinas, trepidações, desalinhamentos, entre outros (CHEN, M., 2002).

De acordo com Giasin e Ayvar-Soberanis (2016), a circularidade é uma tolerância radial bidimensional que descreve o quão próxima de um círculo perfeito está uma peça com uma seção transversal diametral. Essa seção pode ser interna, no caso de furos, ou externa, no caso de peças como eixos e rolamentos, por exemplo. A Figura 1 apresenta um exemplo de um perfil circular imperfeito, no qual é possível traçar outros dois círculos concêntricos. O círculo externo é o círculo de maior raio que pode ser circunscrito fora do perfil circular. Já o círculo interno possui o maior raio de um círculo que pode ser inscrito dentro do perfil circular.

Figura 1: *Círculo circunscrito e círculo inscrito no perfil circular.*



Fonte: Adaptado de Feliciano et al. (2005)

Com base nesses dois círculos concêntricos traçados a partir de um perfil circular imperfeito, pode-se calcular o erro de circularidade, o qual é um parâmetro usualmente utilizado na avaliação da circularidade de peças. O erro de circularidade e_c pode ser calculado conforme a Equação (1).

$$e_c = R_{max} - R_{min} \quad (1)$$

Sendo R_{max} o raio do círculo circunscrito no perfil circular e R_{min} o raio do círculo inscrito no perfil circular.

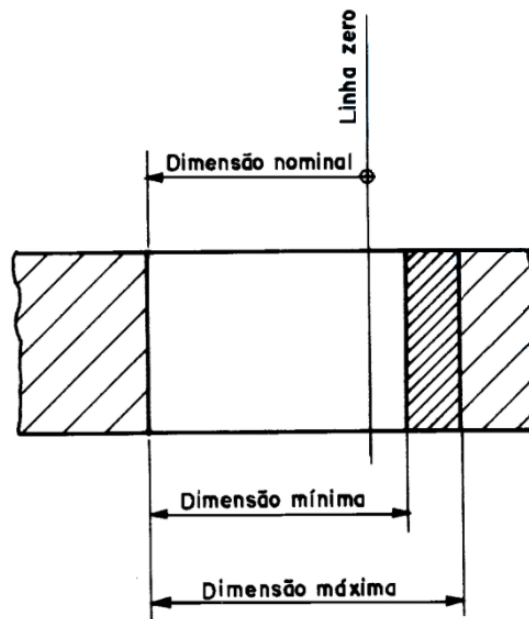
2.1.2 Afastamento e Tolerância Dimensional

O afastamento em furos é um parâmetro de tolerância dimensional relacionado ao diâmetro. Erros nas dimensões do furo podem ocorrer devido à vibração da ferramenta, trepidações e altas temperaturas, principalmente quando o processo de furação ocorre em velocidades elevadas (KURT et al., 2008).

De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995), os afastamentos fundamentais correspondem à diferença entre uma dimensão e a dimensão nominal correspondente. A dimensão do elemento obtida através de medição é chamada de dimensão efetiva. Além disso, pode-se definir uma dimensão efetiva local como a dimensão medida entre quaisquer dois pontos opostos do elemento. A dimensão efetiva deve estar dentro das dimensões extremas permissíveis, que são chamadas de dimensões limites. As dimensões limite máxima e mínima correspondem às maiores e menores dimensões admissíveis de um elemento, respectivamente. A Figura 2 mostra um exemplo de uma peça com o indicativo das dimensões nominal, mínima e máxima.

A dimensão nominal é definida como a dimensão da qual derivam as dimensões limites pela aplicação dos afastamentos superior e inferior. O afastamento superior corresponde à diferença entre a dimensão máxima e a dimensão nominal correspondente. Por outro lado, o afastamento inferior consiste na diferença entre a dimensão mínima e a dimensão nominal correspondente. A tolerância pode ser definida como a diferença entre a dimensão máxima e a dimensão mínima ou, ainda, a diferença entre o afastamento superior e o afastamento

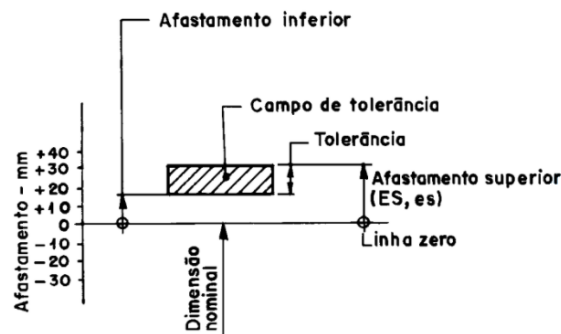
Figura 2: Dimensão nominal e dimensões máxima e mínima.



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995)

inferior, conforme mostra a Figura 3. O afastamento correspondente à dimensão efetiva deve estar dentro da tolerância, ou seja, deve ser maior que o afastamento inferior e menor do que o afastamento superior.

Figura 3: Representação convencional de um campo de tolerância.



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995)

2.1.3 Delaminação

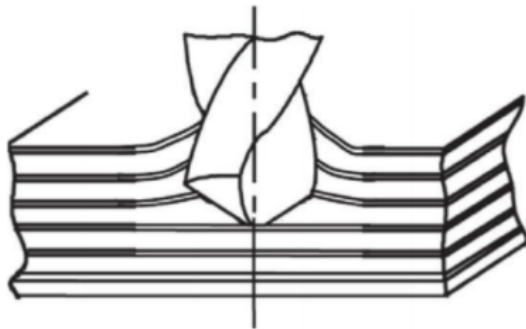
A delaminação é um defeito de fabricação que ocorre em processos de furação de compostos laminados. Esse defeito ocorre devido ao fato dos compostos laminados serem não-homogêneos e anisotrópicos, além de suas fibras reforçadas serem altamente abrasivas (J.BABU et al., 2016).

Segundo Haeger et al. (2016), a delaminação consiste na separação das camadas de compostos laminados devido à formação de fissuras entre as lâminas. Esse efeito acontece tanto no lado de entrada da ferramenta quanto no lado de saída, conforme ilustra a Figura 4. No lado de entrada da ferramenta, a delaminação ocorre devido ao descolamento das fibras, principalmente por conta de uma força de descolamento que puxa o material em

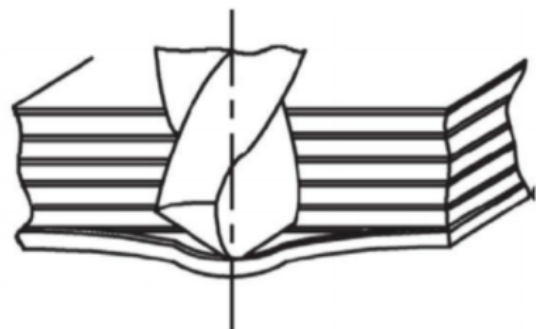
uma direção perpendicular à aresta de corte na interface com a parede do furo. No lado de saída, onde geralmente são observados os danos mais graves, a aresta transversal da ferramenta, não afiada, empurra as últimas camadas de material para baixo próximo do final do comprimento a ser furado. Entre os efeitos causados pela delaminação pode-se citar a baixa tolerância de montagem, a redução da integridade estrutural e o potencial de afetar o desempenho de peças a longo prazo.

Figura 4: Delaminação nos lados de entrada e saída da ferramenta.

(a) Delaminação de entrada



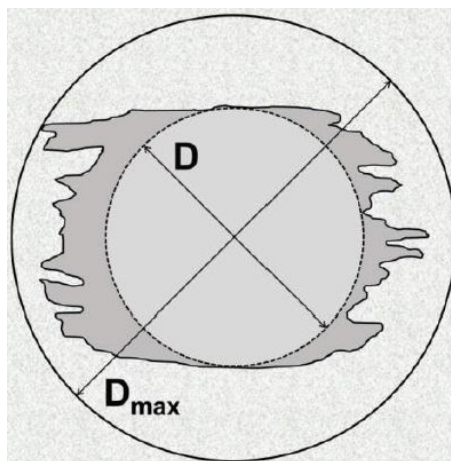
(b) Delaminação de saída



Fonte: Lissek, Tegas e Kaufeld (2016)

Métodos não-destrutivos são de grande interesse na caracterização da delaminação em processos de furação em função do impacto estrutural causado por esse efeito. Tais métodos têm como objetivo a detecção do tamanho, forma e localização dos danos relacionados à delaminação. A Figura 5 ilustra uma representação da delaminação ao redor de um furo, com indicações de seu diâmetro e do diâmetro máximo da região danificada.

Figura 5: Representação da zona danificada referente à delaminação.



Fonte: Haeger et al. (2016)

Visando analisar de forma objetiva o grau de delaminação durante o processo de furação em compostos laminados, W. Chen (1997) propõe o conceito de fator de delaminação F_d . Este parâmetro é calculado conforme a Equação (2).

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (2)$$

Onde D_{max} é o diâmetro máximo da zona danificada e D o diâmetro do furo.

2.2 Processamento Digital de Imagens

De acordo com Gonzalez e Woods (2008), o processamento digital de imagens é uma área que engloba processos cujas entradas e saídas são imagens e, adicionalmente, processos que extraem características das imagens e realizam o reconhecimento de objetos individuais. O processamento digital de imagens pode ser dividido em três níveis, sendo eles o processamento de baixo nível, o processamento de nível médio e o processamento de alto nível. O processamento de baixo nível caracteriza-se por operações primitivas, relacionadas ao pré-processamento da imagem. Nesse nível, tanto a entrada como a saída do processo são imagens. O processamento de nível médio é composto por operações como segmentação, descrição de objetos e classificação de cada objeto. Em geral, a entrada de processos de nível médio são imagens, porém suas saídas são características extraídas dessas imagens. O processamento de alto nível, por sua vez, consiste na análise do significado de um conjunto de objetos reconhecidos, executando tarefas cognitivas geralmente associadas ao sistema de visão.

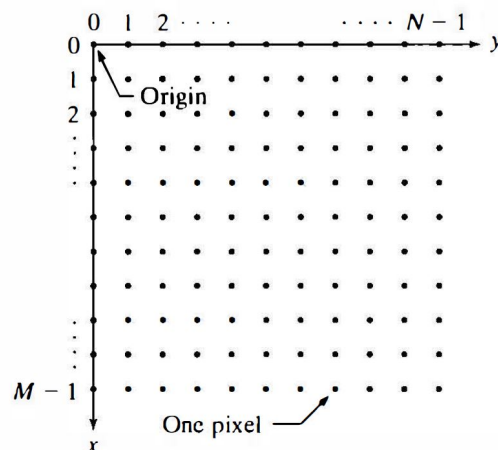
2.2.1 Imagem Digital

Gonzalez e Woods (2008) definem uma imagem digital como uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y são valores das coordenadas espaciais, finitos e discretos, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamada de intensidade ou nível de cinza, igualmente assumindo valores finitos e discretos. A imagem digital é composta por um número finito de elementos, chamados pixels. Cada pixel possui uma localização e um valor. Com isso, uma imagem digital pode ser representada através de uma matriz $M \times N$, conforme a Equação (3), onde $a_{i,j} = f(x = i, y = j)$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \dots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

A origem do sistema de coordenadas de uma imagem digital se localiza no canto esquerdo superior, com o valor das coordenadas do eixo x aumentando para baixo e o valor das coordenadas do eixo y aumentando para a direita, conforme a Figura 6.

Figura 6: Eixo de coordenadas de uma imagem digital.



Fonte: Gonzalez et al. (2009)

Em uma imagem digital monocromática, o valor da intensidade, ou nível de cinza, l de um pixel em uma determinada coordenada (x, y) , pode ser apresentado conforme a Equação (4).

$$l = f(x_0, y_0), \quad \text{onde } \{L_{min} \leq l \leq L_{max}\} \quad (4)$$

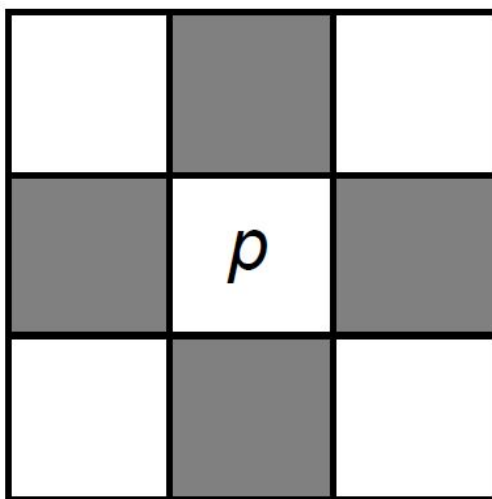
O intervalo $[L_{min}, L_{max}]$ é chamado de escala de cinza ou escala de intensidade, sendo que L_{min} deve ser um valor positivo e L_{max} deve ser um valor finito. É comum a prática de deslocar o intervalo para $[0, L - 1]$, no qual $l = 0$ é considerado preto e $l = L - 1$ é considerado branco. Os valores intermediários são tons de cinza que variam do preto para o branco.

Imagens digitais coloridas podem ser representadas através de modelos de cores, também chamados de espaços de cores ou sistema de cores. Um dos modelos mais utilizados para representar imagens digitais coloridas é o sistema RGB, no qual a imagem é formada por três componentes (vermelho, verde e azul) que, quando combinadas, geram a imagem colorida.

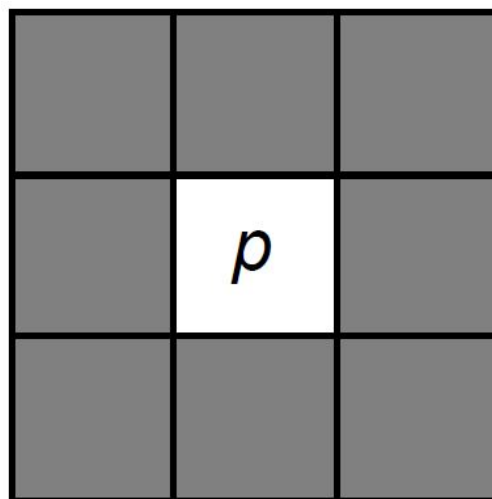
A Vizinhança de um Pixel é uma relação importante entre pixels de uma imagem digital. Um pixel p nas coordenadas (x, y) possui quatro pixels vizinhos na horizontal e vertical, cujas coordenadas são dadas por $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$ e $(x, y - 1)$. Esse conjunto de pixels, denotado por $N_4(p)$, é chamado 4-conectados de p . Além disso, o pixel p possui vizinhos diagonais, denotados por $N_D(p)$, cujas coordenadas são dadas por $(x + 1, y + 1)$, $(x + 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$ e $(x - 1, y - 1)$. O conjunto desses pixels junto com os pixels 4-conectados é chamado de 8-conectados de p , denotado por $N_8(p)$. A Figura 7 mostra as relações de vizinhança de um pixel.

Figura 7: Relações de vizinhança de um pixel.

(a) 4-conectados do pixel p



(b) 8-conectados do pixel p

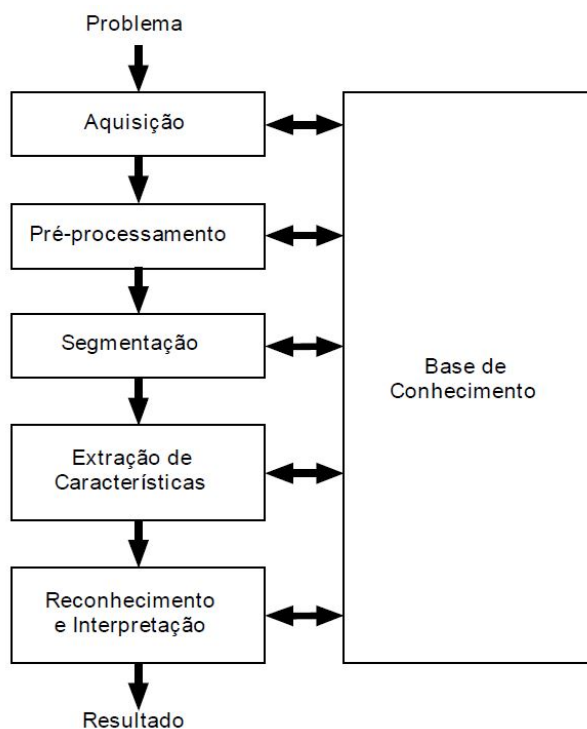


Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

2.2.2 Sistema de Visão Artificial

Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999), um Sistema de Visão Artificial consiste em um sistema computadorizado que realiza a aquisição, processamento e interpretação de imagens correspondentes a cenas reais. As principais etapas de um Sistema Visão Artificiais são mostradas na Figura 8.

Figura 8: *Etapas de um Sistema de Visão Artificial.*



Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

2.2.2.1 Aquisição

O processo de aquisição consiste na conversão de uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital. A aquisição da imagem é composta por um dispositivo físico sensível a uma faixa de energia eletromagnética, o qual produz um sinal elétrico proporcional ao nível de energia detectado, e um digitalizador, cujo objetivo é converter o sinal elétrico analógico em um sinal digital (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Uma imagem é gerada a partir da combinação de uma fonte de iluminação e a reflexão ou absorção da energia eletromagnética pelos elementos da cena. Essa imagem é captada através de um sensor, o qual realiza a transformação da energia luminosa em níveis de tensão (MISHRA et al., 2017).

O sistema de iluminação é um fator muito importante para o processo de aquisição de uma imagem. O objetivo desse sistema é otimizar o contraste de uma imagem, através da maximização da escala de níveis de intensidade do objeto e contraste da região de interesse em relação ao plano de fundo da imagem. Além disso, o sistema de iluminação deve proporcionar uma iluminação homogênea em toda a região de interesse (FERRON, 2000).

A digitalização da imagem compreende os processos de amostragem e quantização do sinal analógico gerado pelo sensor. Esses processos são responsáveis pelas discretizações espacial e em amplitude, respectivamente. O processo de amostragem tem como objetivo converter a imagem analógica em uma matriz $M \times N$, conforme a Equação 3, onde cada elemento representa um pixel. Por outro lado, no processo de quantização, cada pixel assume um valor inteiro, na faixa de 0 a $2^n - 1$, sendo n o número de bits que são utilizados para representar os pixels (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

2.2.2.2 Pré-processamento

Na etapa de pré-processamento ocorre a melhoria da qualidade da imagem para as etapas seguintes. As operações realizadas nessa etapa trabalham diretamente com os valores de intensidade dos pixels (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

A técnicas de pré-processamento podem ser divididas em duas categorias: métodos que operam no domínio espacial, os quais são baseados em filtros que atuam no plano da imagem, e métodos que operam no domínio da frequência, os quais são baseados em filtros que atuam no espectro da imagem (ESQUEF et al., 2003).

Uma técnica de pré-processamento muito utilizada é a conversão de uma imagem colorida para uma imagem em níveis de cinza. Isso se deve ao fato de que a maioria das operações de processamento manipulam imagens em níveis de de cinza (GONZALEZ et al., 2009).

Filtros no domínio espacial também são técnicas bastante utilizadas na etapa de pré-processamento. Esses filtros consistem em operações realizadas em pixels baseadas em suas vizinhanças. O resultado das operações de filtragem espacial é um novo valor para cada pixels. Dentre as operações de filtragem, pode-se destacar a suavização, cujo principal objetivo é a redução de ruídos na imagem, e o realce, que tem o propósito de destacar as transições em intensidade (GONZALEZ; WOODS, 2008).

É comum na etapa de pré-processamento a análise do histograma, que consiste na contagem dos níveis de cinza da imagem. A partir do histograma, têm-se a distribuição dos pixels da imagem dentro de uma escala de cinza. Com isso, é possível obter informações a respeito do contraste e dos níveis de iluminação da imagem (ESQUEF et al., 2003).

2.2.2.3 Segmentação

De acordo com Gonzalez e Woods (2008), o processo de segmentação é responsável por subdividir a imagem no intuito de detectar os objetos e regiões de interesse. A maioria das técnicas de segmentação são baseadas na similaridade ou descontinuidade dos valores de intensidade dos pixels. Técnicas baseadas na similaridade têm como objetivo dividir a imagem em regiões, a partir de um determinado critério de similaridade entre *pixels*. Por outro lado, técnicas baseadas na descontinuidade realizam a segmentação de acordo com variações abruptas nos valores de intensidade dos *pixels*.

Uma das técnicas mais utilizadas em processos de segmentação baseados na similaridade é a binarização, cujo resultado é uma imagem que possui apenas dois níveis de luminância, sendo eles preto e branco. A binarização é realizada a partir de um limiar, ou *threshold*, para separar os *pixels* do objeto daqueles que compõem o plano de fundo da imagem (ESQUEF et al., 2003).

Segundo Costa e Cesar (2009), a detecção de bordas é uma das principais técnicas de segmentações baseadas na descontinuidade entre pixels. Procedimentos de detecção de bordas para imagens em níveis de cinza baseiam-se no gradiente, que consiste em uma derivada de primeira ordem, ou no Laplaciano, que consiste em uma derivada de segunda ordem. No caso do gradiente, as bordas são detectadas de acordo com um limiar de magnitude, ou *threshold*, do gradiente da imagem. Já no caso do Laplaciano, a detecção das bordas ocorre nos pontos onde o Laplaciano da imagem é nulo.

Existem diversos métodos de detecção de bordas baseadas no gradiente. Um dos mais populares é o operador de Sobel, onde o gradiente é aproximado por máscaras de convolução aplicadas aos pixels da imagem. A partir disso, as bordas são detectadas aplicando-se um *threshold* aos gradientes calculados para cada pixel, o qual é mostrado

em branco se apresentar um gradiente maior do que o *threshold* e preto caso apresentar um gradiente menor do que o *threshold* (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Outro método de detecção de bordas bastante utilizado é o detector de bordas de Canny, que consiste em um algoritmo mais complexo do que operador de Sobel, porém apresenta um desempenho superior. Assim como o operador de Sobel, o detector de bordas de Canny utiliza uma máscara de convolução para obter uma aproximação dos gradientes da imagem. Em seguida, é realizado o processo de supressão de não-máximos, ou seja, a supressão dos pixels que não apresentarem valores máximos locais na direção normal à borda. Esse procedimento é utilizado no intuito de obter bordas com largura de apenas um pixel. Por fim, é realizada uma limiarização dupla, que consiste no processo de aplicar um limiar de histerese aos gradientes da imagem, com o objetivo de minimizar falsos positivos e falsos negativos (GONZALEZ; WOODS, 2008).

2.2.2.4 Extração de Características

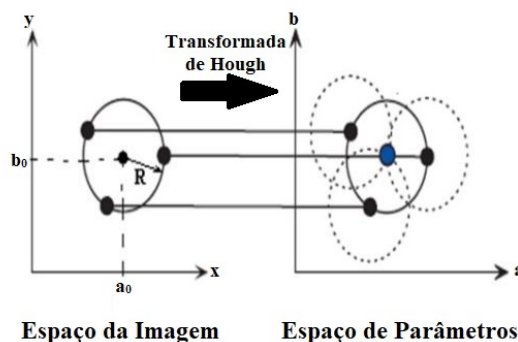
Esquef et al. (2003) definem a extração de características como a etapa do sistema de processamento responsável por extrair informações numéricas úteis a respeito da imagem processada. A extração de características possui uma etapa intermediária, na qual ocorre a rotulação das regiões de interesse, detectadas na etapa de segmentação.

As características extraídas nesta etapa podem ser da imagem completa ou de uma região específica. Exemplos do primeiro caso são a identificação do número de objetos ou a área total dos objetos. Por outro lado, a extração de características de uma região específica pode ser utilizado para a identificação da área de cada objeto, seu perímetro, forma, entre outros.

Dentre os métodos utilizados na etapa de extração de características, pode-se citar a transformada de Hough, o qual consiste em um procedimento para detectar curvas que possam ser parametrizadas, como retas e círculos. A partir da Transformada de Hough é possível identificar parâmetros a respeito dos elementos detectados (MILESKI, 2017).

A transformada de Hough realiza o mapeamento dos pontos no espaço da imagem em um espaço de parâmetros, ou seja, um espaço cujos eixos são definidos pelos parâmetros da curva a ser detectada (GONZALEZ; WOODS, 2008). Para a detecção de círculos, é utilizada a transformada de Hough para círculos, a qual localiza as coordenadas do centro do círculo a partir de um raio predefinido. Considerando um círculo de raio R cujas coordenadas do centro são dadas por (a_0, b_0) , a transformada em cada ponto (x_i, y_j) no espaço da imagem, pertencente à borda detectada na etapa de segmentação, gera um círculo no espaço de parâmetros, com centro em (x_i, y_j) e raio R , conforme mostra a Figura 9.

Figura 9: Representação da Transformada de Hough para círculos.



Fonte: Adaptado de Cherabit et al. (2012)

O centro do círculo, ou seja, o ponto (a_0, b_0) , é detectado a partir das interseções dos círculos traçados no espaço de parâmetros (CHERABIT et al., 2012).

2.2.2.5 *Reconhecimento e Interpretação*

O reconhecimento e interpretação consistem nas duas últimas etapas do sistema de visão. Na etapa de reconhecimento, ocorre a atribuição de rótulos aos objetos a partir das características extraídas. Já a etapa de interpretação é responsável por atribuir significados aos objetos detectados (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

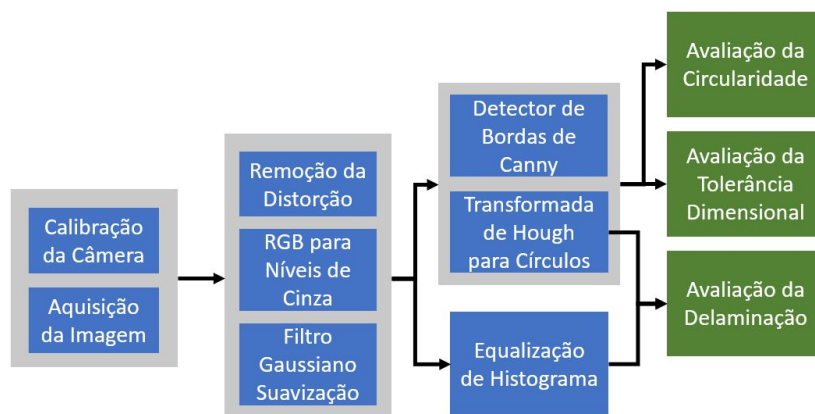
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como a metodologia e o procedimento experimental aplicados no desenvolvimento do projeto. Na Seção 3.1, é mostrada uma visão geral a respeito do sistema implementado. Nas seções 3.2 e 3.3, são apresentados o ambiente montado para a aquisição das imagens dos furos, o método de calibração da câmera utilizado e as técnicas de pré-processamento aplicadas às imagens. A Seção 3.4 descreve a metodologia aplicada à detecção dos furos presentes na imagens. Por fim, a Seção 3.5 apresenta os algoritmos desenvolvidos para as avaliações da circularidade, afastamento e delaminação dos furos.

3.1 Apresentação do Sistema

O sistema proposto tem como objetivo detectar a presença de furos em uma imagem, utilizando métodos de processamento digital de imagens, e extrair informações a respeito de parâmetros úteis para a avaliação da qualidade desses furos. Para a extração dessas informações, desenvolveu-se algoritmos que foram implementados no software Matlab. O fluxo dos processos do sistema segue o modelo de Sistema de Visão Artificial apresentado na Seção 2.2.2. As etapas do sistema são apresentadas na Figura 10.

Figura 10: Etapas do sistema proposto.



Fonte: Autor

O sistema desenvolvido tem o propósito de ser um procedimento automatizado para a inspeção da qualidade de furos usinados em qualquer material. Entretanto, devido a fatores como a diferença na cor e refletância da superfície do material e limitações inerentes dos métodos de processamento utilizados, o sistema requer que alguns parâmetros sejam

calibrados de acordo com a quantidade e dimensão dos furos que serão avaliados na imagem e o material no qual eles foram usinados. A Tabela 1 apresenta a lista de todos os parâmetros de calibração do sistema.

Tabela 1: *Parâmetros de calibração do sistema desenvolvido.*

Parâmetro de calibração
Número de Furos
Intervalo de raio dos furos
<i>Threshold</i> do método de detecção de bordas
Diâmetros nominais dos furos
Afastamento superior
Afastamento inferior
<i>Threshold</i> de binarização para segmentação da delaminação

Fonte: Autor

É importante notar que, a partir da calibração do sistema, todas as imagens devem ser adquiridas sob os mesmos parâmetros de câmera e iluminação.

3.2 Aquisição e Calibração da Câmera

Conforme apresentado na Seção 2.2.2.1, o sistema de aquisição é constituído por um dispositivo óptico e um sistema de iluminação. O sistema óptico utilizado consiste na câmera de um celular modelo Samsung Galaxy A70, a qual possui resolução de 32 Megapixels. Essa câmera foi escolhida devido ao baixo custo e, principalmente, à disponibilidade. A câmera foi configurada para o modo de foco manual, devido ao fato do sistema requerer a calibração dos parâmetros da câmera.

O sistema de iluminação é composto por três lâmpadas de diodos emissores de luz (LEDs) brancos e um filtro utilizado para homogeneizar a luz emitida na cena, reduzindo as regiões com brilho excessivo e realçando os objetos de interesse na imagem. Além do sistema de iluminação, geralmente utiliza-se um plano de fundo para estabelecer um maior contraste nas regiões de interesse. Para isso, o fundo do ambiente foi revestido na cor preta. Esse procedimento também auxilia na obtenção de um histograma da imagem com mais repetibilidade. A Figura 11 apresenta um ambiente controlado para a realização dos testes.

Figura 11: *Ambiente controlado para a realização dos testes.*



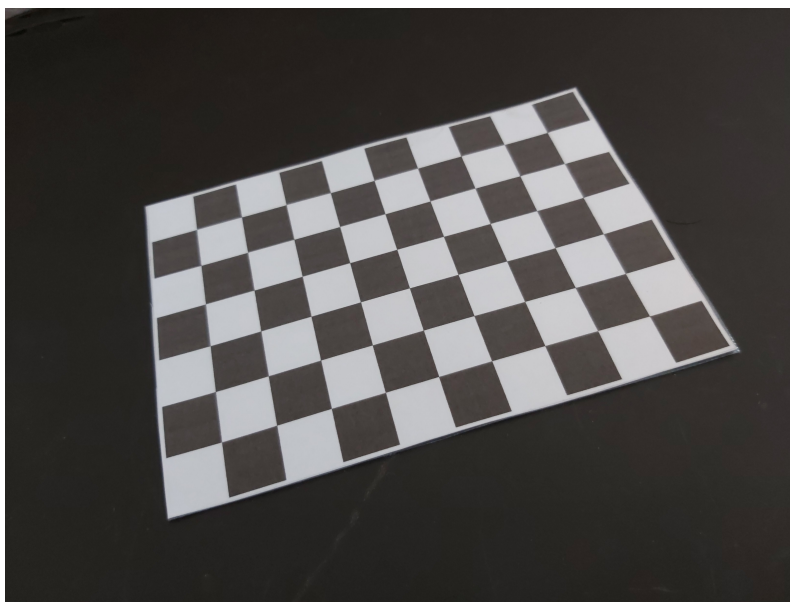
Fonte: Autor

A calibração da câmera é realizada a fim de relacionar os pontos no sistema de coordenadas da imagem e os pontos no sistema de coordenadas global. Para isso, utilizou-se o método de calibração por meio de um padrão xadrez, proposto por Zhang (2000). Este método requer a aquisição de fotografias em diferentes ângulos de um padrão xadrez plano, cujo tamanho dos quadrados é conhecido.

3.3 Pré-Processamento da Imagem

Com a calibração, obtém-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Os parâmetros intrínsecos consistem em características internas da câmera, como a distância focal, distorção, entre outros. Por outro lado, os parâmetros extrínsecos descrevem a posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas global. O procedimento de calibração adotado é descrito detalhadamente por Mileski (2017). Para este projeto, foram utilizadas 20 fotografias do padrão xadrez, como a da Figura 12.

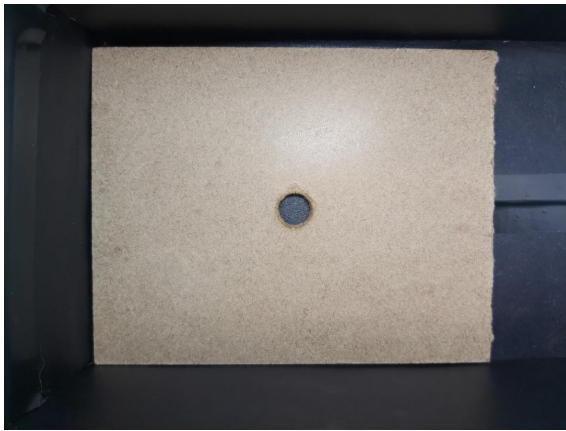
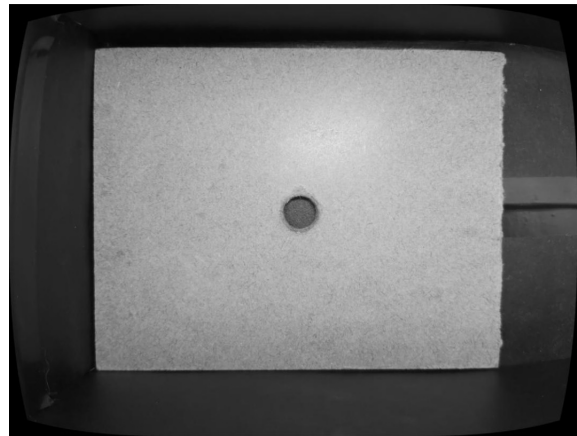
Figura 12: Imagem do padrão xadrez utilizado na calibração da câmera.



Fonte: Autor

A partir da aquisição da imagem digital dos furos e da calibração da câmera, realiza-se os procedimentos de pré-processamento, com o objetivo de adequar a imagem para os processos subsequentes. O primeiro passo consiste na correção da distorção da imagem através dos parâmetros intrínsecos da câmera obtidos pelo processo de calibração. Essa distorção se deve às características da lente da câmera que, no presente caso, causam uma leve distorção radial. Em seguida, a imagem é convertida do sistema de cores RGB para níveis de cinza. Essa conversão é realizada devido ao fato de que as técnicas de segmentação utilizadas se baseiam em imagens neste espectro.

Por fim, aplica-se um filtro gaussiano de suavização, com o propósito de atenuar os ruídos da imagem e, conseqüentemente, facilitar a detecção das bordas dos furos. A Figura 13 mostra a comparação de uma imagem de um furo antes e depois da etapa de pré-processamento.

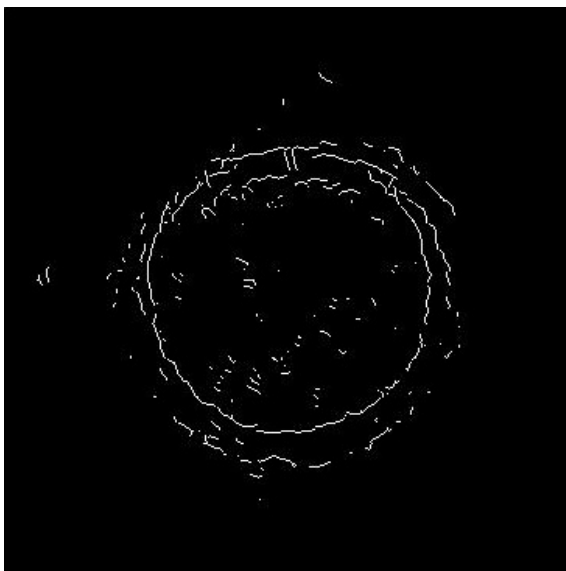
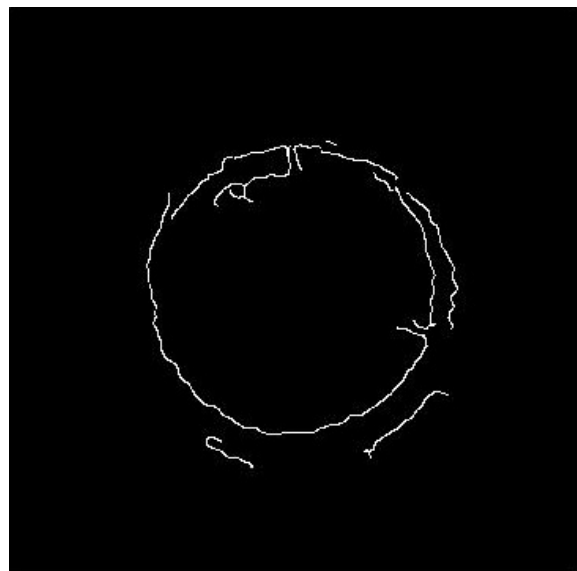
Figura 13: *Imagens do furo.***(a)** *Imagem original***(b)** *Imagem após o pré-processamento*

Fonte: Autor

3.4 Detecção dos Furos

A metodologia desenvolvida para a detecção dos furos pode ser dividida em duas etapas: a segmentação dos furos e a aplicação da transformada de Hough para círculos. A partir desses procedimentos, obtém-se os valores das coordenadas do centro de cada furo, bem como seus respectivos raios.

A etapa de segmentação tem o objetivo de detectar as bordas do furo. Para isso, foram realizados testes para analisar o desempenho dos métodos de Sobel e de Canny. A Figura 14 mostra as imagens binarizadas obtidas por meio dos dois métodos de detecção de bordas testados.

Figura 14: *Segmentações do furo.***(a)** *Detector de bordas de Sobel***(b)** *Detector de bordas de Canny*

Fonte: Autor

O detector de bordas de Canny, apesar de requerer um maior custo computacional devido à sua complexibilidade, apresentou bordas mais definidas e uma menor quantidade de ruído na imagem binarizada.

A partir da detecção das bordas, realiza-se a transformada de Hough para círculos, com o objetivo de detectar todos os furos presentes na imagem. Essa transformada necessita que os raios dos círculos sejam informados. Porém, devido à inviabilidade de se conhecer o valor exato do raio de cada furo, é realizada uma varredura em um intervalo de valores próximos ao raio nominal dos furos. É importante notar que o tamanho desse intervalo interfere diretamente na performance do sistema no que diz respeito à rapidez no processamento. Quanto maior for o intervalo, mais demorado será a execução do algoritmo da transformada. Portanto, no caso de uma imagem com mais de um furo, o sistema desenvolvido é mais recomendado, porém não mandatório, para furos com diâmetros similares. Além disso, é necessário informar a quantidade de furos presentes na imagem, a fim de selecionar um número específico de candidatos apontados pela transformada de Hough para círculos. A transformada retorna os valores das coordenadas do centro de cada furo e seus respectivos raios, dados em pixels. A Figura 15 apresenta uma representação da borda do furo por meio de um círculo traçado a partir dos valores encontrados pela transformada.

Figura 15: Furo detectado pela transformada de Hough para círculos.



Fonte: Autor

A circunferência dada pela transformada de Hough para círculos representa a borda ideal do furo, cujo raio é constante para qualquer ângulo. Em função disso, todos os parâmetros dados através da transformada de Hough para círculos (centro e raio do furo) e a borda traçada por meio desses valores são considerados ideais.

3.5 Avaliação da Qualidade do Furo

Para a inspeção da qualidade dos furos, realiza-se medições e cálculos no intuito de avaliar a circularidade, o afastamento dimensional e a delaminação do furo.

3.5.1 Cálculo do Erro de Circularidade

A circularidade dos furos é avaliada através do cálculo do erro de circularidade. Conforme foi apresentado na Seção 2.1.1, deve-se identificar os raios dos círculos circunscrito e inscrito no perfil circular do furo. Para isso, necessita-se obter os comprimentos radiais

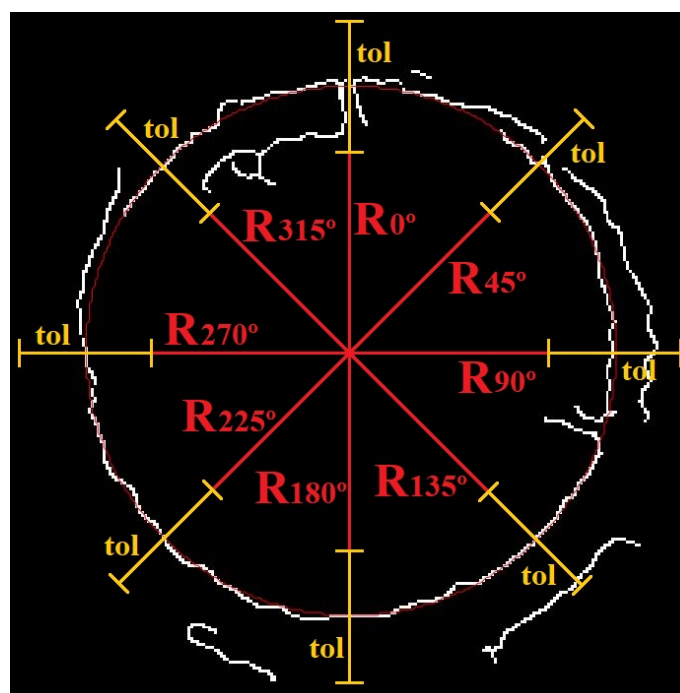
ao longo de toda a circunferência do furo, a fim de encontrar o maior e o menor raio do perfil circular. Como, na prática, não há variações significativas no comprimento radial de furos para ângulos muito próximos, decidiu-se avaliar a borda do furo com um passo de 45° , obtendo-se o comprimento radial em oito pontos da circunferência.

Para a obtenção dos oito comprimentos radiais, elaborou-se um algoritmo no qual são computadas as distâncias do centro do furo até a borda, detectada através da aplicação do detector de bordas de Canny, para os diferentes ângulos. Este algoritmo é aplicado sobre a imagem binarizada e sua resposta é dada em pixels. A extração destas características gera uma representação unidimensional de uma fronteira.

Como o detector de bordas utilizado realiza a binarização da imagem de modo que os pixels referentes às bordas tenham o valor 1 (brancos), o algoritmo procura pelos pixels que tenham esse valor ao longo da reta. Para cada pixel analisado, verifica-se o seu valor e os valores dos pixels 8-conectados à ele. Caso seja encontrado um pixel branco, é realizado o cálculo da distância entre o mesmo e o centro do furo. Esta distância, então, é comparada com o raio ideal obtido através da transformada de Hough para círculos. O pixel que mais se aproximar do raio ideal, é considerado como borda do furo. Esse procedimento é realizado para que possíveis pixels brancos na reta, detectados devido à sombras ou peculiaridades da superfície do material, não sejam considerados como borda do furo.

A fim de diminuir o tempo de processamento e a detecção de pontos não significativos, o algoritmo mencionado anteriormente é aplicado para pontos próximos da borda do furo ideal. Desta forma, a varredura ocorre em uma faixa de $\pm 25\%$ de R_{ideal} , a partir da borda ideal, onde R_{ideal} é o raio do círculo identificado pela transformada de Hough para círculos. Em função disso, furos com distorções muito significativas em sua circularidade não terão suas bordas detectadas pelo algoritmo e serão automaticamente rejeitados. A Figura 16 mostra uma representação visual das retas nas quais os valores dos pixels são avaliados, além das tolerâncias para cada uma delas.

Figura 16: Comprimentos radiais do furo com espaçamento de 45° .



Fonte: Autor

A detecção dos pontos da borda ao longo da circunferência pode ser dividido em duas categorias com base na similaridade dos códigos. Uma das categorias é referente às quatro retas horizontais e verticais (R_{0° , R_{90° , R_{180° , R_{270°) e a outra referente às quatro retas diagonais (R_{45° , R_{135° , R_{225° , R_{315°). Para as retas da primeira categoria, mantém-se sempre uma das coordenadas fixa, sendo ela a coordenada x para as retas horizontais e a coordenada y para as retas verticais. A outra coordenada é variada com o objetivo de encontrar os pixels brancos correspondentes à borda do furo. A partir disso, a detecção da borda ao longo das retas horizontais e verticais é realizada conforme o seguinte procedimento:

1. Se o pixel da coordenada atual está dentro da tolerância, verifica-se se ele ou algum pixel 8-conectado a ele é branco.
2. Se algum dos pixels avaliados for branco, calcula-se a distância euclidiana do pixel da coordenada atual até o centro e é computada a diferença em relação ao raio ideal.
3. Se a diferença calculada no item 2 for a menor até o momento, atribui-se as coordenadas do pixel atual às coordenadas da borda.
4. Incrementa-se em 1 a coordenada e repete-se o procedimento.

O algoritmo para as retas diagonais é semelhante, com a diferença de que a variação ocorre nas duas coordenadas na mesma proporção, alterando apenas se a coordenada está sendo incrementada ou decrementada, de acordo com o sentido da linha. Ao final do procedimento para cada reta, obtém-se as coordenadas de um ponto na imagem correspondente à borda do furo naquela direção. Os algoritmos 1 e 2 mostram as rotinas para a obtenção das coordenadas da borda do furo em 0° e 45° , respectivamente.

Algoritmo 1: Coordenadas da borda do furo em 0°

Entrada: imagemBinarizada, xCentro, yCentro, raioFuro

Saída: xBordaReal, yBordaReal

início

$tolerancia \leftarrow round(raioFuro \times 0.25);$

$xBorda \leftarrow (xCentro - raioFuro);$

$yBorda \leftarrow yCentro;$

$diferenca \leftarrow tolerancia;$

$xBordaReal \leftarrow 0;$

$yBordaReal \leftarrow yBorda;$

para $xAux \leftarrow (xBorda - tolerancia)$ **até** $(xBorda + tolerancia)$ **faça**

se $imagemBinarizada(xAux, yBorda) = 1$ **então**

se $abs(xBorda - xAux) < diferenca$ **então**

$diferenca \leftarrow abs(xBorda - xAux);$

$xBordaReal \leftarrow xAux;$

fim

fim

fim

fim

Algoritmo 2: Coordenadas da borda do furo em 45°**Entrada:** imagemBinarizada, xCentro, yCentro, raioFuro**Saída:** xBordaReal, yBordaReal**início**

```

    tolerancia ← round(raioFuro × 0.25);
    xBorda ← round(xCentro - sin(45°) × raioFuro);
    yBorda ← round(yCentro + cos(45°) × raioFuro);
    diferenca ← tolerancia;
    xBordaReal ← 0;
    yBordaReal ← 0;

    para p ← -tolerancia até tolerancia faça
        se imagemBinarizada(xBorda - p, yBorda + p) = 1 então
            comprimento ←
                hypot(xCentro - (xBorda - p), (yBorda + p) - yCentro);
            se abs(raioFuro - comprimento < diferenca então
                diferenca ← comprimento;
                xBordaReal ← xBorda - p;
                yBordaReal ← yBorda + p;
            fim
        fim
    fim
fim

```

Em seguida, realiza-se a conversão do ponto da borda no sistema de coordenadas da imagem para um ponto no sistema de coordenadas global, por meio dos parâmetros extrínsecos dados pela calibração da câmera. A partir disso, obtém-se a distância da borda até o centro medida em mm. Devido à possibilidade de ocorrerem variações no centro do furo ideal em relação ao centro do furo real, realizou-se uma adaptação para o cálculo do erro de circularidade apresentado na Seção 2.1.1. Para isso, são calculados os diâmetros do furo em quatro direções, a partir dos comprimentos radiais encontrados. Sendo assim, $D_1 = R_{0^\circ} + R_{180^\circ}$, $D_2 = R_{45^\circ} + R_{225^\circ}$, $D_3 = R_{90^\circ} + R_{270^\circ}$ e $D_4 = R_{135^\circ} + R_{315^\circ}$. O erro de circularidade adaptado e_{ca} é calculado conforme a Equação (5).

$$e_{ca} = D_{max} - D_{min} \quad (5)$$

Sendo D_{max} e D_{min} o maior e o menor diâmetro dentre os diâmetros calculados.

3.5.2 Identificação do Afastamento

Para analisar se as dimensões do furo estão dentro ou fora da tolerância dimensional, deve-se calcular o afastamento do diâmetro efetivo do furo. Para isso, relaciona-se a dimensão efetiva e a dimensão nominal do diâmetro. Na prática, os furos não possuem bordas formadas por um círculo perfeito, ou seja, existem variações no comprimento radial do furo ao longo da circunferência. Devido a esse fato, deve-se obter uma aproximação do diâmetro por meio do valor médio das medições em diferentes direções. Utilizando os diâmetros obtidos aplicando o procedimento apresentado na Seção 3.5.1, pode-se calcular o diâmetro médio do furo, conforme a Equação (6).

$$D_{m\u00e9dio} = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{4} \quad (6)$$

A partir do diâmetro médio do furo, calcula-se o seu afastamento E , conforme a Equação (7).

$$E = D_{\text{médio}} - D \quad (7)$$

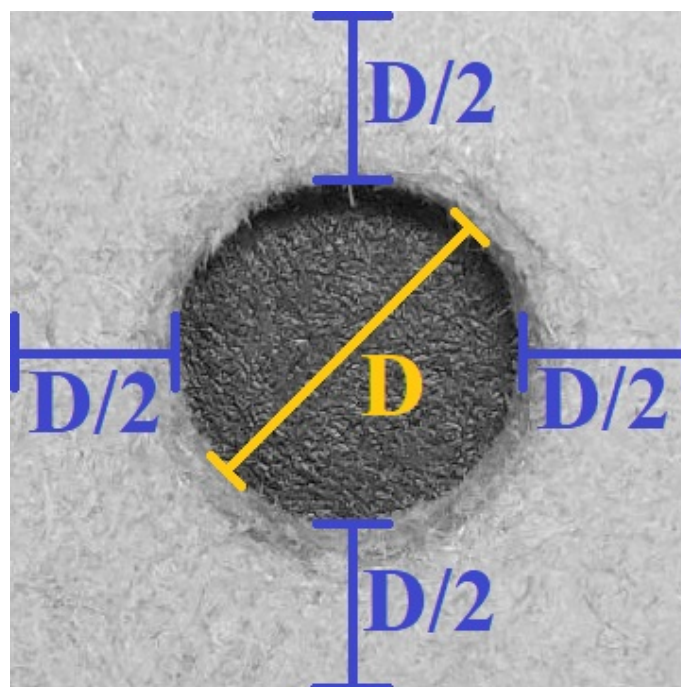
Sendo D o diâmetro nominal do furo. A tolerância dimensional do furo é definida de acordo com os afastamentos superior ES e inferior EI . As dimensões do furo estão dentro da tolerância se $EI < E \leq ES$.

3.5.3 Cálculo do Fator de Delaminação

O principal desafio para a avaliação da delaminação de furos é a segmentação da zona danificada. Isso se deve ao fato de que o comportamento da delaminação é diferente para cada material. Além disso, em diversos casos, os níveis de cinza da área danificada não possuem um contraste muito acentuado com o resto da superfície do material. Em geral, as pesquisas realizadas a respeito do tema focam na análise para um material específico. Tendo isso em vista, este trabalho propõe um sistema automatizado para detecção da delaminação em furos, através da calibração de um *threshold* para a binarização da imagem.

Inicialmente, é definida uma região de interesse dentro na imagem, na qual os procedimentos para inspeção da delaminação serão aplicados. Com isso, é possível reduzir o custo computacional do algoritmo, visto que a região de interesse possui uma quantidade de pixels significativamente menor quando comparada à imagem inteira. A região de interesse foi definida como um quadrado, concêntrico ao furo, com lado equivalente ao dobro do diâmetro do mesmo, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17: Região de interesse para a segmentação da delaminação.

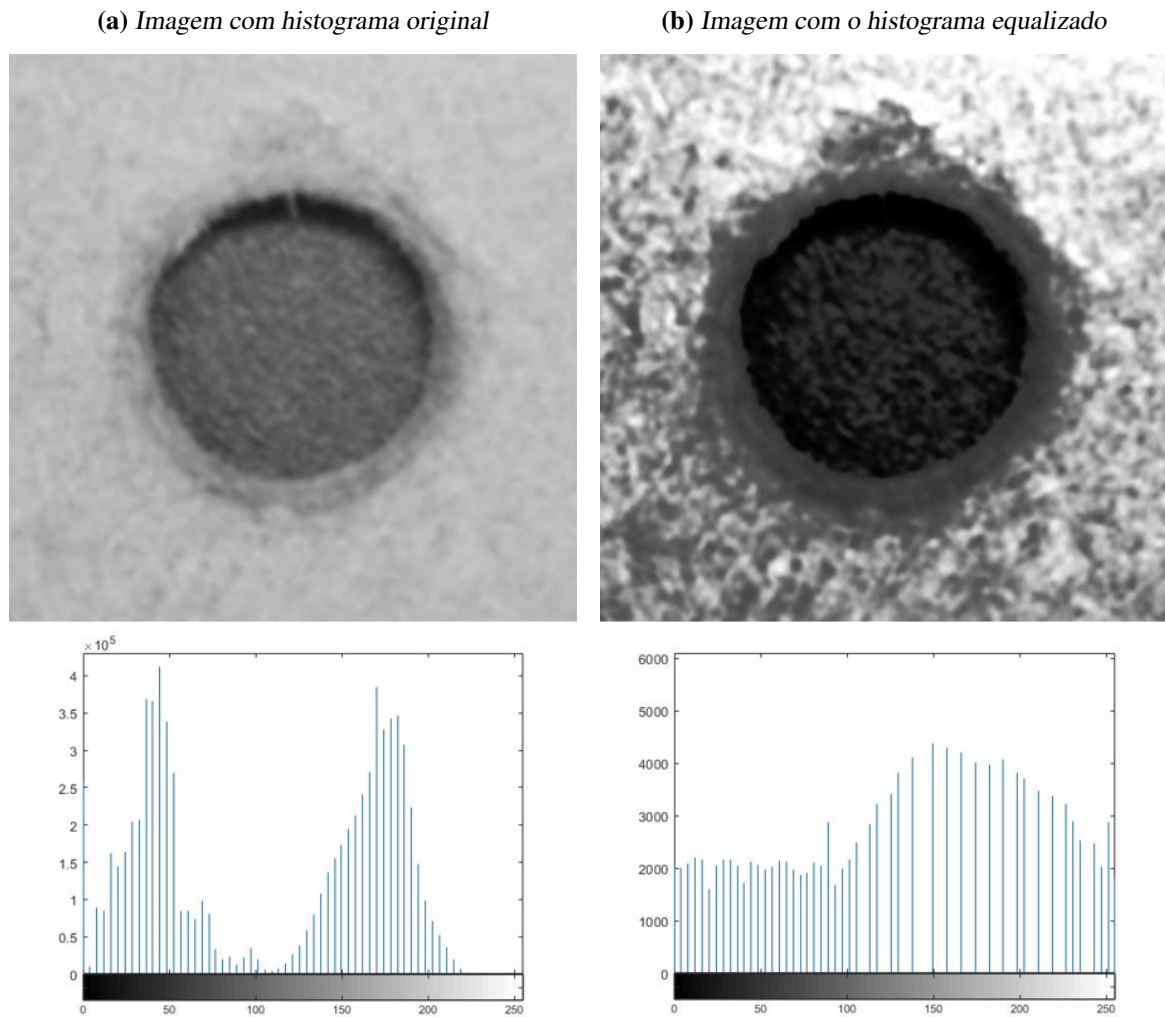


Fonte: Autor

Antes de realizar a segmentação, aplica-se uma equalização no histograma da imagem em tons de cinza na região de interesse, com o objetivo de aumentar o contraste entre a zona de delaminação e o resto da superfície do material. Como o plano de fundo foi revestido na cor preta, a grande maioria dos níveis de cinza da imagem ficam concentrados

em dois pontos específicos do histograma. Um desse pontos tem valor próximo de zero, representando os tons mais escuros provenientes do plano de fundo. O outro ponto tem o valor do nível de cinza correspondente à superfície do material. No momento em que o histograma é equalizado, os níveis de cinza se espalham ao longo de toda a escala. Esse processo faz com que regiões com níveis de cinza parecidos ganhem um contraste mais destacado. A Figura 18 mostra um exemplo da equalização do histograma na imagem de um furo.

Figura 18: Equalização do histograma da imagem.



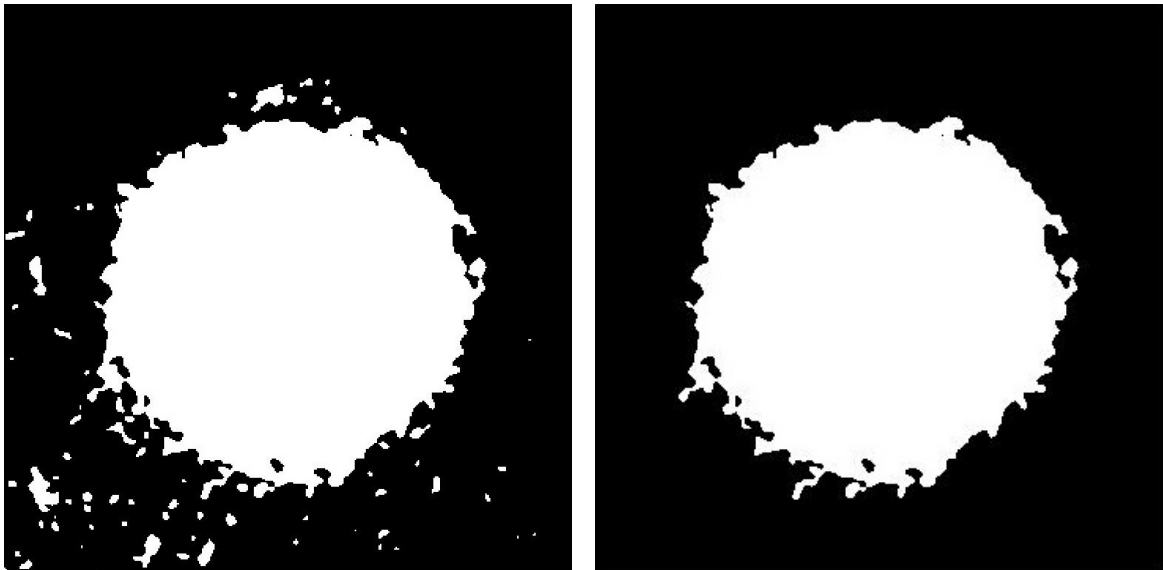
Fonte: Autor

O método para detectar a zona de delaminação baseia-se na binarização da imagem em tons de cinza utilizando um *threshold* fixo, calibrado na inicialização do sistema. Para eliminar regiões menores que são indesejáveis na segmentação, aplica-se um filtro de área na imagem binarizada, no qual os objetos cujas áreas são menores que um valor mínimo ou maiores que um valor máximo são descartados. O intuito desse filtro é gerar uma imagem binarizada em que apenas a região do furo e a região da delaminação sejam brancas. Para isso, a área mínima do filtro foi definida como a área do círculo ideal dado pela transformada de Hough para círculos, enquanto que a área máxima equivale à área da região de interesse. A Figura 19 mostra a segmentação da zona de delaminação antes e depois da aplicação do filtro de área.

Figura 19: Zona de delaminação segmentada.

(a) Antes da aplicação do filtro de área

(b) Após da aplicação do filtro de área



Fonte: Autor

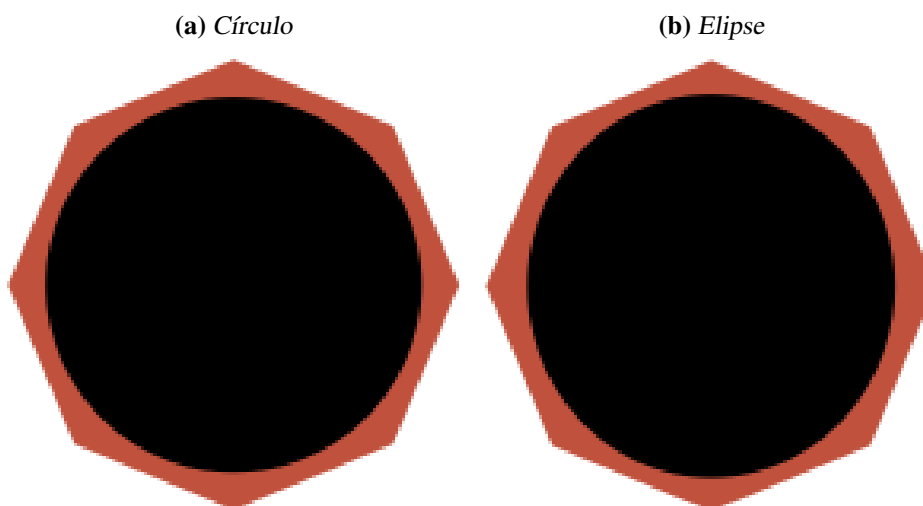
A partir da imagem com a região de delaminação segmentada, deve-se encontrar o valor de D_{max} , que representa a maior distância dentre todos os pontos da delaminação em relação ao centro do furo. Para isso, realiza-se uma varredura em todos os pixels brancos e calcula-se a distância euclidiana de cada um desses pixels até o centro do furo. A maior distância encontrada através desse procedimento é utilizada para o cálculo do fator de delaminação, conforme apresentado na Seção 2.1.3.

A seguir é apresentado o procedimento realizado para a validação dos algoritmos desenvolvidos para a avaliação da qualidade de furos.

4 RESULTADOS

Para a análise e validação dos resultados, realizou-se a avaliação de quatro furos usinados utilizando uma furadeira de bancada. As furoções foram executadas em duas chapas de MDF. Esse material foi escolhido devido ao seu baixo custo e à sua disponibilidade. Em uma das chapas, foram usinados dois furos com diâmetro nominal de 10 mm. Na outra chapa, foram usinados mais dois furos, dessa vez com diâmetro nominal de 10,5 mm. Adicionalmente, foram avaliadas duas formas geométricas circulares impressas em uma folha de papel, que têm como objetivo simular furos. Uma das formas consiste em um círculo com diâmetro de 10 mm, enquanto a outra consiste em uma elipse, cujos eixos maior e menor possuem dimensões de 10,2 mm e 9,8 mm, respectivamente. Ao redor das formas circulares, foi simulada uma região de delaminação, através de um octógono concêntrico à forma circular, cuja maior diagonal tem o valor de 12 mm. As formas circulares foram impressas utilizando uma impressora com resolução 4800 dpi (pontos por polegada). As formas circulares são mostradas na Figura 20.

Figura 20: Formas geométricas circulares com a delaminação simulada.



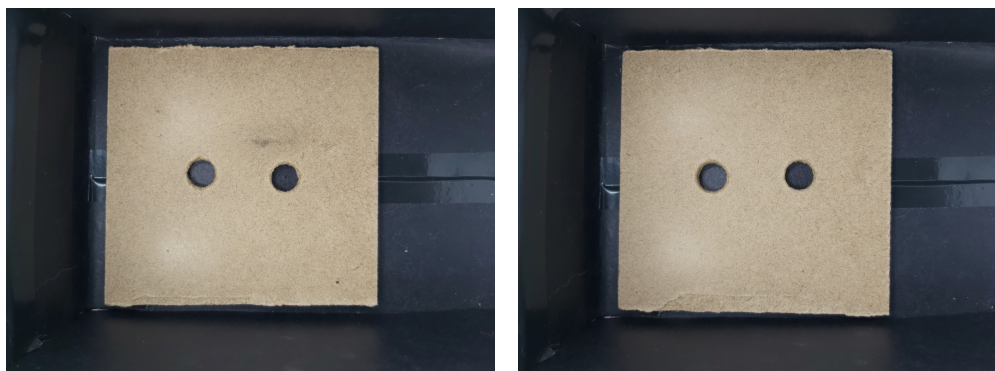
Fonte: Autor

As chapas e a folha impressa foram posicionada no sistema de aquisição a uma distância de 13,5 cm da câmera. O procedimento de calibração da câmera foi realizado utilizando uma distância focal que proporcionasse o máximo de nitidez para a imagem. Foram realizadas três aquisições de cada chapa e da folha impressa, a fim de obter uma média dos valores medidos, bem como as incertezas de medição relacionadas. A Figura 21 mostra uma das aquisições realizadas para cada chapa e para a folha impressa.

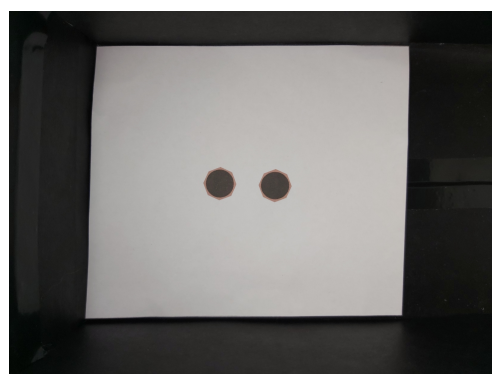
A circularidade é avaliada de acordo com os diâmetros D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , conforme

Figura 21: Aquisição das imagens dos furos utilizados para a avaliação.

(a) Furos com diâmetro nominal de 10 mm (b) Furos com diâmetro nominal de 10,5 mm



(c) Formas circulares impressas



Fonte: Autor

descrito na Seção 3.5.1. Esses diâmetros foram medidos em cada furo por meio do sistema desenvolvido, conforme o algoritmo descrito na Seção 3.5.1, e através de um paquímetro analógico. Para analisar se as dimensões dos furos estão dentro da tolerância dimensional, considerou-se um afastamento inferior de $-0,25$ mm e um afastamento superior de $0,25$ mm. As tabelas 2 e 3 apresentam os valores obtidos para os furos com diâmetro nominal de 10 mm, sendo D_{np} os valores medidos utilizando o paquímetro e D_{ns} os valores medidos por meio do sistema desenvolvido.

Tabela 2: Valores medidos para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm.

Diâmetro	Medição	Medição	Medição	Média	Desvio	Incerteza
D_n	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	(mm)	Padrão (mm)	Tipo A (mm)
D_{1p}	10,12	10,18	10,20	10,1668	0,0416	0,0240
D_{1s}	9,83	9,78	9,83	9,8133	0,0289	0,0167
D_{2p}	10,16	10,10	10,10	10,1200	0,0346	0,0200
D_{2s}	9,73	9,81	9,73	9,7567	0,0462	0,0267
D_{3p}	10,28	10,26	10,30	10,2800	0,0200	0,0115
D_{3s}	9,71	9,71	9,77	9,7300	0,0346	0,0200
D_{4p}	10,12	10,14	10,12	10,1268	0,0115	0,0067
D_{4s}	9,87	9,79	9,79	9,8167	0,0462	0,0267

Fonte: Autor

Tabela 3: Valores medidos para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm.

Diâmetro D_n	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Incerteza Tipo A (mm)
D_{1p}	10,12	10,16	10,18	10,1533	0,0305	0,0176
D_{1s}	9,90	9,91	9,85	9,8867	0,0321	0,0186
D_{2p}	10,18	10,12	10,18	10,1600	0,0346	0,0200
D_{2s}	9,91	9,92	9,91	9,9133	0,0058	0,0033
D_{3p}	10,22	10,18	10,20	10,2000	0,0200	0,0115
D_{3s}	9,75	9,65	9,81	9,7367	0,0808	0,0467
D_{4p}	10,02	10,04	10,00	10,0200	0,0200	0,0115
D_{4s}	9,82	9,83	9,82	9,8233	0,0058	0,0033

Fonte: Autor

As maiores diferenças encontradas entre a medição realizada pelo sistema e com auxílio de um paquímetro foram de 0,55 mm para o Furo 1 e 0,46 mm para o Furo 2. O erro de circularidade e a medição do afastamento efetivo para os furos com diâmetro nominal de 10 mm são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm.

Medição	Erro de circularidade adaptado (mm)	Diâmetro médio (mm)	Afastamento (mm)	Tolerância
Paquímetro	0,1600	10,1734	0,1734	Dentro
Sistema	0,0867	9,7792	-0,2208	Dentro

Fonte: Autor

Tabela 5: Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm.

Medição	Erro de circularidade adaptado (mm)	Diâmetro médio (mm)	Afastamento (mm)	Tolerância
Paquímetro	0,1800	10,1333	0,1333	Dentro
Sistema	0,1766	9,8400	-0,1600	Dentro

Fonte: Autor

As tabelas 6 e 7 mostram os valores dos diâmetros obtidos para os furos com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Tabela 6: Valores medidos para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Diâmetro D_n	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Incerteza Tipo A (mm)
D_{1p}	10,56	10,48	10,50	10,5133	0,0416	0,0240
D_{1s}	10,15	10,15	10,16	10,1533	0,0058	0,0033
D_{2p}	10,54	10,50	10,48	10,5068	0,0305	0,0176
D_{2s}	10,19	10,19	10,27	10,2167	0,0462	0,0267
D_{3p}	10,52	10,54	10,52	10,5268	0,0115	0,0067
D_{3s}	10,04	9,99	9,82	9,9500	0,1153	0,0666
D_{4p}	10,50	10,48	10,54	10,5068	0,0305	0,0176
D_{4s}	10,10	10,02	10,02	10,0467	0,0462	0,0267

Fonte: Autor

Tabela 7: Valores medidos para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Diâmetro D_n	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Incerteza Tipo A (mm)
D_{1p}	10,48	10,54	10,56	10,5268	0,0416	0,0240
D_{1s}	10,18	10,18	10,12	10,1600	0,0346	0,0200
D_{2p}	10,54	10,52	10,58	10,5468	0,0305	0,0176
D_{2s}	10,15	10,22	10,38	10,2500	0,1179	0,0681
D_{3p}	10,60	10,56	10,56	10,5733	0,0231	0,0133
D_{3s}	10,35	10,30	10,46	10,3700	0,0818	0,0473
D_{4p}	10,52	10,54	10,54	10,5333	0,0115	0,0067
D_{4s}	10,13	10,13	10,21	10,1568	0,0462	0,0267

Fonte: Autor

As maiores diferenças entre a medição do sistema e do paquímetro foi de 0,58 mm para o Furo 1 e de 0,38 mm para o Furo 2. As tabelas 8 e 9 apresentam o erro de circularidade e a medição do afastamento efetivo para os furos com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Tabela 8: Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Medição	Erro de circularidade adaptado (mm)	Diâmetro médio (mm)	Afastamento (mm)	Tolerância
Paquímetro	0,0200	10,5134	0,0134	Dentro
Sistema	0,2667	10,1967	-0,3033	Fora

Fonte: Autor

Tabela 9: Cálculos dos parâmetros dimensionais para o Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

Medição	Erro de circularidade adaptado (mm)	Diâmetro médio (mm)	Afastamento (mm)	Tolerância
Paquímetro	0,0465	10,5450	0,0450	Dentro
Sistema	0,2132	10,2340	-0,2660	Fora

Fonte: Autor

Tendo em vista as dimensões esperadas para a impressão das formas circulares, foi considerado que os erros relativos à resolução da impressora utilizada são muito baixos, logo, não há a necessidade de realizar medições utilizando paquímetro. Os valores dos diâmetros obtidos, por meio do sistema, para as formas circulares são mostrados nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Valores medidos para o círculo impresso.

Diâmetro D_n	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Incerteza Tipo A (mm)
D_{1s}	10,04	10,05	10,05	10,0467	0,0058	0,0033
D_{2s}	10,12	10,12	10,13	10,1233	0,0058	0,0033
D_{3s}	10,03	10,04	10,05	10,0400	0,0100	0,0058
D_{4s}	10,11	10,11	10,12	10,1133	0,0058	0,0033

Fonte: Autor

Tabela 11: Valores medidos para a elipse impressa.

Diâmetro D_n	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Incerteza Tipo A (mm)
D_{1s}	9,90	9,85	9,90	9,8833	0,0289	0,0167
D_{2s}	9,91	9,91	9,99	9,9368	0,0462	0,0267
D_{3s}	10,23	10,24	10,24	10,2368	0,0058	0,0033
D_{4s}	9,90	9,97	9,97	9,9468	0,0404	0,0233

Fonte: Autor

A Tabela 12 mostra o erro de circularidade e a medição do afastamento efetivo para as formas circulares impressas.

Tabela 12: Cálculos dos parâmetros dimensionais para as formas circulares impressas.

Forma circular	Erro de circularidade adaptado (mm)	Diâmetro médio (mm)	Afastamento (mm)	Tolerância
Círculo	0,0833	10,0808	0,0808	Dentro
Elipse	0,3535	10,0009	0,0009	Dentro

Fonte: Autor

Para a validação do sistema no que diz respeito à delaminação, utilizou-se apenas as medições obtidas das formas circulares impressas, devido à inviabilidade de realizar medições nos furos reais utilizando microscopia. A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para o fator de delaminação das formas circulares impressas.

Tabela 13: Fator de delaminação obtido para as formas circulares impressas.

Forma circular	Fator de delaminação (Medição 1)	Fator de delaminação (Medição 2)	Fator de delaminação (Medição 3)	Média
Círculo	1,2344	1,2438	1,2435	1,2406
Elipse	1,2218	1,2446	1,2198	1,2287

Fonte: Autor

Por meio da Equação 2 é possível constatar que o valor esperado para o fator de delaminação, tanto para o círculo quanto para a elipse, é de 1,2, visto que o diâmetro de ambas as formas circulares tem o valor de 10 mm e o diâmetro máximo das regiões de delaminação simuladas possui o valor de 12 mm. Portanto, a medição para o círculo apresentou um erro de 3,38% e a medição para elipse apresentou um erro de 2,39%.

5 CONCLUSÃO

O sistema para a avaliação de furos proposto apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista que foi desenvolvido utilizando materiais de baixo custo e durante um período em que o acesso aos laboratórios não foi possível. Os valores obtidos para as formas geométricas circulares foram próximos dos valores esperados. A partir disso, pode-se concluir que o método de calibração da câmera utilizado se mostrou eficiente. Para os furos, o sistema apresentou algumas discrepâncias nas medições, principalmente no que diz respeito à análise das tolerâncias dimensionais. Um dos motivos para isso foi a medição com paquímetro, que não é uma alternativa adequada para a medição do diâmetro dos furos.

Outro fator que influencia nos erros de medição do sistema é a iluminação. Apesar de o sistema de iluminação desenvolvido ter apresentado bons resultados, não foi possível eliminar todas as sombras na região de interesse, sobretudo na área interna do furo, o que gera dificuldades na etapa de segmentação. Além disso, as aquisições foram realizadas sem um suporte apropriado para a câmera, podendo haver pequenas variações em sua posição e orientação para diferentes ensaios.

Devido à impossibilidade de realizar medições utilizando microscopia, não foi possível validar os resultados obtidos para a análise de delaminação nos furos. No entanto, o método desenvolvido para a sua segmentação se mostrou capaz de identificar a região danificada de maneira satisfatória. A técnica de equalização do histograma foi fundamental para aumentar o contraste entre a zona de delaminação e o restante da superfície do material.

Para trabalhos futuros, propõe-se que sejam realizados ensaios para diferentes tipos de materiais, como metais (para a avaliação de rebarbas) e fibra de carbono, material que motivou a realização deste trabalho mas que, por conta do acesso restrito aos laboratórios da universidade, não pôde ser utilizado. Além disso, é interessante que seja montado um sistema de aquisição de imagens mais confiável, com o objetivo de realizar medições mais adequadas. Propõe-se também o desenvolvimento de um aplicativo de celular capaz de avaliar a qualidade de furos, propiciando uma maneira rápida e eficiente de realizar as inspeções em pequenas e médias empresas.

REFERÊNCIAS

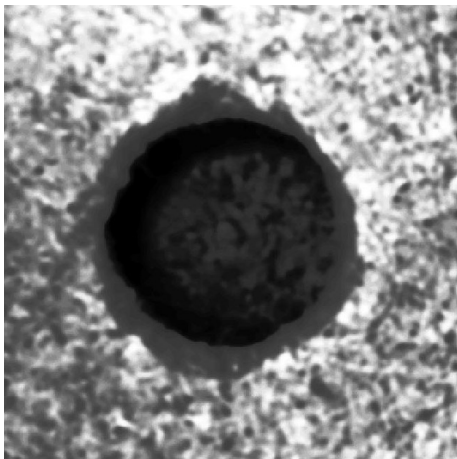
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6158 - Sistema de tolerâncias e ajustes*. [S.l.], 1995. p. 1–79.
- CHEN, M. Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions, p. 185–197, 2002.
- CHEN, W. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (cfrp) composite laminates, p. 1097–1108, 1997.
- CHERABIT, N. et al. Circular Hough Transform for Iris localization, p. 114–121, 2012.
- COSTA, L. F.; CESAR, R. M. *Shape Classification and Analysis. 2. ed.* Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 612.
- ESQUEF, I. A. et al. *Processamento Digital de Imagens*, p. 1–12, 2003.
- FELICIANO, F. F. et al. Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações sobre sua Exatidão, p. 38–50, 2005.
- FERRON, A. E. *Theory and Application of digital Image Processing*, p. 1–50, 2000.
- GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S. An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA, p. 745–760, 2016.
- GONZALEZ, R. et al. *Digital Image Processing. 3. ed.* 3 Apple Hill Drive, Natick, MA: Gatesmark Publishing, 2009. p. 826.
- GONZALEZ, R.; WOODS, R. *Digital Image Processing. 3. ed.* Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. p. 954.
- HAEGER, A. et al. Non-Destructive Detection of Drilling-induced Delamination in CFRP and its Effect on Mechanical Properties, p. 130–142, 2016.
- J.BABU et al. Digital Image Analysis to Evaluate Delamination Factor after Drilling GFRP Composites using a Kevlar Drill Bit, p. 1–7, 2016.
- KURT, M. et al. Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy, p. 1051–1060, 2008.
- LISSEK, F.; TEGAS, J.; KAUFELD, M. Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination. *Procedia Engineering*, v. 149, p. 16, dez. 2016.
- MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. *Processamento Digital de Imagens*. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. p. 307.
- MILESKI, Y. Aplicação de Sistemas de Visão no Referenciamento de Peças em Centros de Usinagem CNC, p. 31, 2017.

- MISHRA, V. et al. Image Acquisition and Techniques to Perform Image Acquisition, p. 1–4, 2017.
- PARK, S. Y. et al. Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate, p. 684–698, 2017.
- PAWAR, O. A. et al. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates, p. 350–365, 2015.
- SILVA, D. et al. Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites, p. 1919–1928, 2014.
- ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE*, Redmond, WA, USA, p. 1330–1334, 2000.

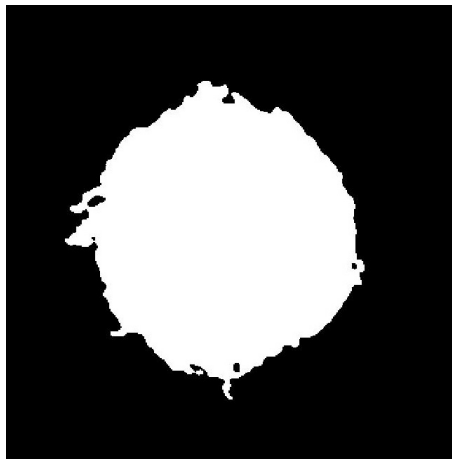
APÊNDICE A - SEGMENTAÇÃO DA ZONA DE DELAMINAÇÃO PARA OS FUROS REAIS

Figura 22: Delaminação no Furo 1 com diâmetro nominal de 10 mm.

(a) Histograma equalizado



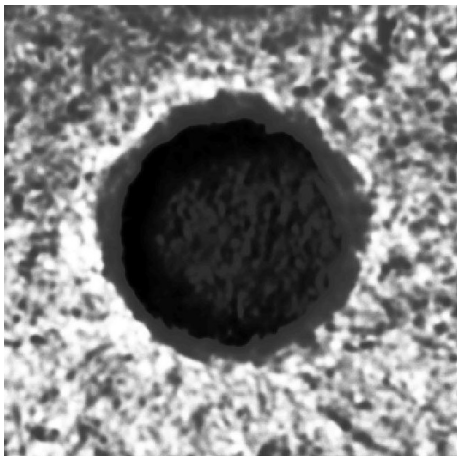
(b) Zona de delaminação segmentada



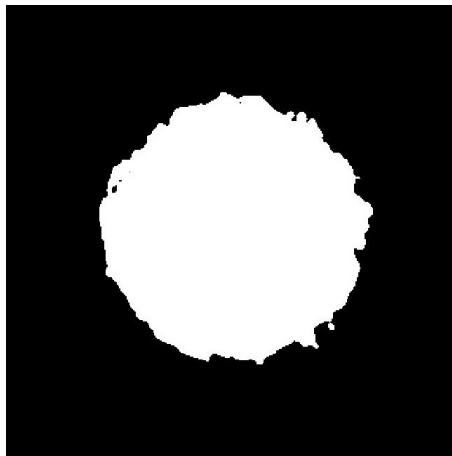
Fonte: Autor

Figura 23: Delaminação no Furo 2 com diâmetro nominal de 10 mm.

(a) Histograma equalizado



(b) Zona de delaminação segmentada

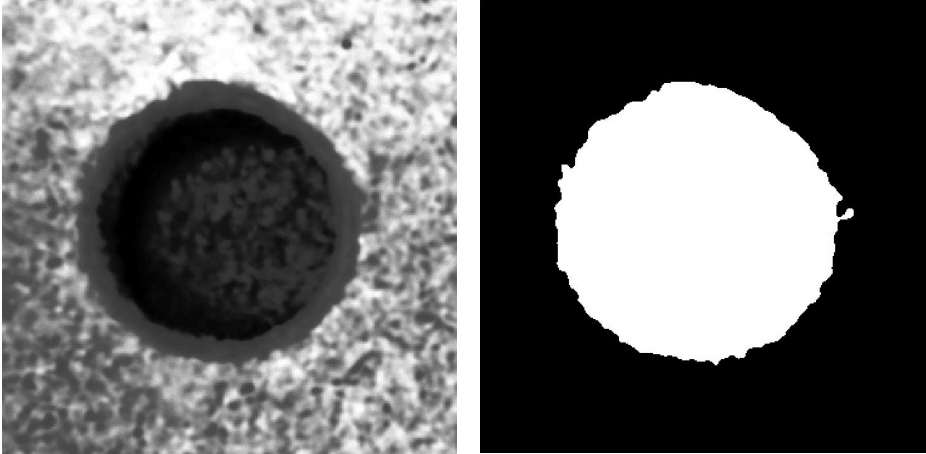


Fonte: Autor

Figura 24: Delaminação no Furo 1 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

(a) Histograma equalizado

(b) Zona de delaminação segmentada

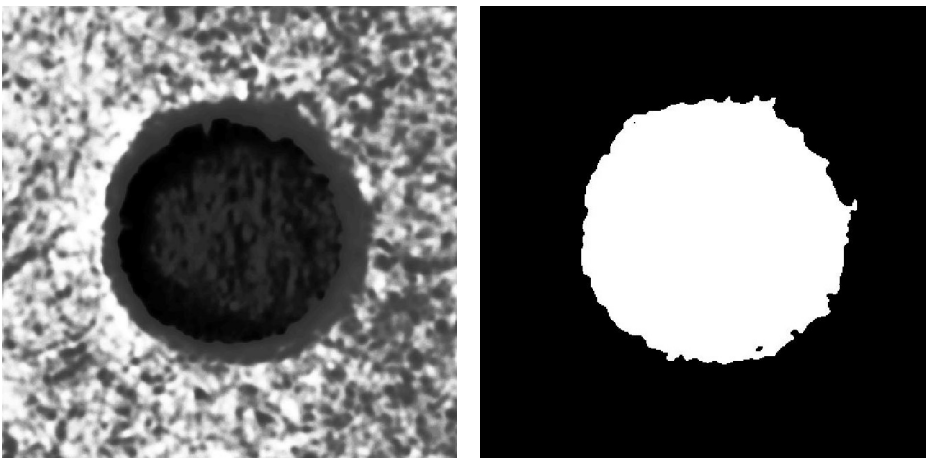


Fonte: Autor

Figura 25: Delaminação no Furo 2 com diâmetro nominal de 10,5 mm.

(a) Histograma equalizado

(b) Zona de delaminação segmentada



Fonte: Autor