

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

**FREDERICO DOLGENER CANTÚ**

**APERFEIÇOAMENTO DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL PARA  
DETECÇÃO DE BOLHAS EM LAMINADOS DE FIBRA DE VIDRO**

Joinville

2018

**FREDERICO DOLGENER CANTÚ**

**APERFEIÇOAMENTO DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL PARA  
DETECÇÃO DE BOLHAS EM LAMINADOS DE FIBRA DE VIDRO**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2018



**FREDERICO DOLGENER CANTÚ**

**APERFEIÇOAMENTO DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL PARA  
DETECÇÃO DE BOLHAS EM LAMINADOS DE FIBRA DE VIDRO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 03 de Julho de 2018.

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Gabriel Benedet Dutra  
Orientador

---

Dra. Tatiana Renata Garcia  
Membro 1

---

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Membro 2

---

Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Membro 3

Universidade Federal de Santa Catarina

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Ao decorrer dos anos de graduação fui influenciado por muitas pessoas as quais contribuíram para minha formação, dentre elas, especifico algumas a seguir.

Agradeço aos amigos conquistados desde o primeiro semestre e todos adicionados durante o percurso.

Aos colegas dos laboratórios em que trabalhei.

Às equipes de competição com as quais me envolvi e aos respectivos colegas integrantes, em especial a Holandês Voador, que me proporcionou um grande aprendizado prático e teórico nas diversas áreas da engenharia e das relações humanas.

Aos familiares cujo apoio transcende a distância.

Aos professores que participaram da minha formação, em especial ao professor Gabriel Benedet Dutra que sempre apoiou e acreditou nas minhas ideias.

À banca examinadora que aceitou com carinho meu convite.

À UFSC, minha casa por cinco anos da qual já sinto saudades.

À empresa NAVALCARE e aos respectivos colegas de trabalho que me possibilitaram um estágio na área em que gosto e permitiram visualizar um pouquinho da realidade profissional.

Enfim, a todos os que se envolveram na minha formação de Engenheiro Naval.

## RESUMO

No processo de fabricação em materiais compósitos, diversas variáveis influenciam na qualidade do produto final, algumas possuem dificuldades em serem mensuradas. Um dos problemas existentes é a presença de bolhas de ar oriundas do processo de fabricação, estas influenciam na absorção de água, na integração entre os componentes e na resistência do material. Uma proposta inicial de ensaio foi elaborada por MORAES (2017) baseada na utilização de um escâner de luz branca e no desenvolvimento de um programa para identificação de falhas em fibra de vidro. No trabalho aqui presente, é mostrado um aprimoramento do algoritmo para a identificação de bolhas no laminado e os dados obtidos são utilizados para calcular informações sobre o respectivo material. Duas placas de amostras de três diferentes espessuras são feitas em processos de fabricação distintos: laminação a vácuo e laminação manual em Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro Reforçado (PRFV). Além da utilização do escâner, um aparato de microscopia óptica com luz transmitida também foi utilizado na captação das imagens. A influência das variáveis foi pouco visualizada e diversos problemas no processo foram identificados e listados. O uso de microscopia óptica possui bom desempenho em identificação de bolhas, porém apresenta difícil implementação em escala industrial. Já o uso de escâner, por ser mais simples, permite a atuação em campo, mas com dificuldade na obtenção dos resultados.

**Palavras-chave:** Ensaio não destrutível. Compósitos. Bolhas. Escâner. Microscópio.

## ABSTRACT

In the manufacture process in composites, several variables have effect on the final product quality; some variables have difficulties in being measured. The presence of air bubbles in the material from the manufacturing process is not plummy, which influence on the water absorption, on the connection between components and on the material strength. An initial test was proposed by MOARES (2017), the test was based in using white light scanner and to develop an identify fiberglass faults program. In this paper is shown an enhancement of the algorithm for the bubbles identification in the laminate and the data obtained are used to calculate information about the material. Two three-thickness samples plates are made in made in distinct manufacturing processes, vacuum lamination and manual lamination bough in Fiberglass Reinforced Polyester (PRFV). In addition to the use of the scanner, an optical microscope with transmitted light was also used to capture the images. Little was the variables influence and several problems in the process were identified and listed. The use of optical microscopy has good performance in the identification of bubbles, but to implement on an industrial scale is tricky, since the use of a scanner is simpler and allows the field to perform, but with difficulty in obtaining the results.

**Keywords: Non-destructive testing. Composite. Scanner. Blister. Microscope.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Composição de material compósito.....	17
Figura 2 - Tipos de tecidos .....	18
Figura 3 - Processo de laminação manual .....	19
Figura 4 - Camadas do processo de laminação a vácuo .....	21
Figura 5 - Processo de laminação a vácuo .....	21
Figura 6 - Formas de transmissão de calor importantes na TIV .....	23
Figura 7 - Dissipação do calor em 1 - peça sem defeito e 2 - peça com defeito .....	24
Figura 8 - Equipamento de TIV .....	25
Figura 9 - Equipamento para experimento shearográfico .....	26
Figura 10 - Possíveis excitações para o ensaio, (a) carregamento vibracional, (b) carregamento a vácuo, (c) carregamento mecânico e (d) carregamento térmico.....	27
Figura 11 - Exemplo de subtração de imagens, a) imagem em um instante de tempo, b) imagem em outro instante de tempo e c) resultado da subtração entre a e b .....	28
Figura 12 - Princípio de subtração de imagens da Shearografia .....	29
Figura 13 - Influência do uso do prisma Shearográfico a) imagem sem prisma e b) imagem com prisma.....	29
Figura 14 - Equipamento DANTEC de Shearografia portátil.....	30
Figura 15 – a) Imagem original, b) tratada para tons de cinza e c) para preto e branco .....	31
Figura 16 - Prática de laminação manual: a) Preparação do molde, b) pré corte das fibras, c) processo de laminação em andamento e d) acabamento .....	35
Figura 17 – Prática de laminação a vácuo: a) Preparação do molde, b) Processo de vácuo em andamento, c) pressão de vácuo e d) bomba de vácuo utilizada.....	36
Figura 18 - Amostras de PRFV obtidas com as respectivas identificações .....	36
Figura 19 - Equipamento multifuncional utilizado para escanear as amostras .....	37
Figura 20 - Equipamento para obtenção de imagens aproximadas .....	38
Figura 21 - Exemplo de imagem em tons de cinza .....	39
Figura 22 - Transformação de imagem escaneada em desfocada .....	40
Figura 23 - (1) Imagem dilatada, (2) imagem retraída .....	40
Figura 24 - Detecção dos círculos .....	41
Figura 25 – Defeito superficial sobrepondo bolha, imagem obtida por microscopia óptica....	55
Figura 26 – Defeito superficial por linhas paralelas, imagem obtida por microscopia óptica .	55

Figura 27 - Laminado com superfície não polida, imagem obtida por microscopia óptica com luz transmitida .....	56
Figura 28 – Aglomerado de bolhas que atrapalham suas identificações, imagem obtida por microscopia óptica.....	57
Figura 29 – Bolhas cilíndricas não identificáveis pelo algoritmo, imagem obtida por microscopia óptica.....	57
Figura 30 – Bolhas superficiais não esféricas, imagem obtida por microscopia óptica.....	58
Figura 31 - Comparação entre 1 - bolha esférica interna e 2 - bolha superficial não esférica, imagem obtida por microscopia óptica através de luz refletida .....	58
Figura 32 – Bolha superficial em contato com meio exterior, imagem obtida por microscopia óptica com uso de luz transmitida .....	59
Figura 33 - Mesma região de um laminado, porém com foco em 1 - próximo à superfície inferior e 2 - próximo à superfície posterior, imagem obtida por microscopia óptica através de luz transmitida.....	60
Figura 34 – Mesma região fotografado com microscópio óptico comparando 1 – luz refletida, 2 – mistura de luz refletida com transmitida e 3 – luz transmitida .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Variáveis dos corpos de prova .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabela 2 - Quantidade de material para fabricação das amostras .....	33
Tabela 3 – Pesos e frações das laminações .....	44
Tabela 4 - Espessuras obtidas em cada amostra.....	45
Tabela 5 - 1- imagens obtidas por microscopia óptica e 2 - resultado gráfico gerado para cada amostra .....	47
Tabela 6 - 1 - imagem obtida por escâner e 2 - - resultado gráfico gerado para cada amostra	49
Tabela 7 – Dados obtidos pelo programa das amostras captadas por escâner e microscópio..	51

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

END – Ensaios não destrutíveis

CCD - Charge Coupled Device

TIP – Termografia por infravermelho

PRFV – Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro

JPEG – Joint Photographic Experts Group

CIS - Contact image sensors

PPI – Pixels por polegadas / Pixels per inch

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Materiais compósitos .....	17
2.1.1	<b>Laminação Manual .....</b>	<b>18</b>
2.1.2	<b>Laminação a vácuo.....</b>	<b>20</b>
2.2	Testes em compósitos .....	22
2.2.1	<b>Ensaio não destrutivos.....</b>	<b>22</b>
2.2.2	<b>Termografia infravermelha.....</b>	<b>23</b>
2.2.3	<b>Shearografia.....</b>	<b>25</b>
2.2.4	<b>Luz Branca de alta intensidade.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1	Fabricação das amostras.....	32
3.2	Obtenção de dados pelo scanner .....	37
3.3	Obtenção dos dados pelo microscópio óptico .....	37
3.4	Análise numérica das amostras .....	38
3.4.1	<b>Importando dados .....</b>	<b>38</b>
3.4.2	<b>Desfocando imagem .....</b>	<b>39</b>
3.4.3	<b>Dilatação e retração .....</b>	<b>40</b>
3.4.4	<b>Identificação dos círculos .....</b>	<b>41</b>
3.4.5	<b>Cálculo de área e volume das bolhas .....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	Amostras fabricadas .....	44
4.2	Resultados obtidos pelo algoritmo .....	45
4.2.1	<b>Relatório impresso pelo programa .....</b>	<b>45</b>

<b>4.2.2</b>	<b>Imagens obtidas pelo programa.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Dados obtidos pelo programa .....</b>	<b>51</b>
4.3	Problemas encontrados.....	53
<b>4.3.1</b>	<b>Tamanho das bolhas .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Defeitos superficiais das amostras .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Bolhas muito próximas ou sobrepostas .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Formato das bolhas .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Espessura das amostras .....</b>	<b>59</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Influência dos aparatos de captação de imagem .....</b>	<b>60</b>
4.4	Comparativo entre análise com microscópio e escâner .....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Fácil fabricação e manutenção, boa relação peso por resistência a tensão, resistente ao impacto, boa absorção de vibrações, resistente à corrosão e baixo custo são os benefícios dos materiais compósitos e explicam a importância e o grande uso no setor naval no Brasil e no mundo (GREENE, 1999). Devido a ampla utilização desta classe, a tecnologia destes materiais vem crescendo de modo a facilitar a fabricação, melhorar características finais e facilitar os métodos de detecção de falhas.

Material compósito consiste na união de dois materiais de naturezas diferentes resultando em um material de performance superior aos originários, geralmente integrado por matriz polimérica e reforço fibroso (PEREIRA, 2003). Reforço corresponde ao material responsável por resistir elevadas trações mecânicas, como a fibra de vidro, enquanto a matriz é encarregada de transmitir os esforços entre as fibras e garantir a rigidez do sistema.

Entretanto, mesmo possuindo inúmeras vantagens, esta classe de materiais está sujeita a falhas, provenientes desde a confecção da matéria prima até o processamento dos laminados. Uma destas falhas é a aparição de bolhas no laminado. Este defeito atrapalha na união entre matriz e reforço, auxilia na difusão de água no laminado e concentra tensão dos esforços sofridos (LANDOWSKI, 2013).

As falhas sofridas no processo de fabricação e durante a operação das peças precisam ser identificadas e mensuradas para que os devidos reparos e substituições aconteçam. Comumente, quando o material analisado não pode ser danificado na verificação, utiliza-se métodos de Ensaio Não Destrutível (END). Existem vários testes não destrutíveis que podem ser aplicados em materiais compósitos tais como martelo especial, tomografia computadorizada de raio X, emissões ultrassônicas, holografia e entre outros. Cada técnica possui suas vantagens e desvantagens de acordo com material, geometria e tipos de falhas envolvidas (KIM et al, 2012). Destaca-se neste trabalho duas técnicas ENDS que possuem similaridades com o ensaio aqui proposto: Termografia Infravermelha e Shearografia.

A Termografia Infravermelha é uma técnica que visa identificar defeitos abaixo da superfície do material ao se observar a temperatura superficial da peça após ser aquecida. Geralmente um impulso luminoso é responsável pelo aquecimento homogêneo da camada próxima ao ar do elemento, uma câmera infravermelha grava o resfriamento que varia de acordo

com os defeitos próximos à superfície, o resultado é obtido através de uma imagem gráfica. A condutividade térmica do material é a grande responsável por este fenômeno, uma vez que o exterior é aquecido, o calor tende a ser absorvido pela peça e é retardado pelos defeitos de baixa condutividade térmica, bolhas de ar, delaminações e trincas. Como a câmera infravermelha grava a temperatura, as regiões que apresentam falhas se encontram mais quentes e salientes na imagem fornecida pelo equipamento fotográfico.

Outro método de análise fotográfica é a Shearografia, o material a ser observado é excitado de forma que sofra tensões e conseqüentemente pequenos deslocamentos ao longo de sua superfície. Uma câmera, com a ajuda de um laser, obtém imagens sequenciais do momento em que o objeto está se deformando, as informações obtidas são processadas e com elas é gerado uma representação gráfica da superfície do material salientando regiões de maior deslocamento. Isso ocorre, pois, regiões próximas a superfície que apresentam defeito são potencialmente concentradores de tensão os quais afetam no deslocamento da camada externa. Este fenômeno pode ser mensurado pelo uso do equipamento Shearográfico.

Assim com a Termografia e Shearografia, o método de escâner com luz branca proposto por (MORAES 2017) também se enquadra em END e utiliza análise de imagem computacional para a identificação de defeitos em materiais compósitos. A análise consiste em escanear um laminado PRFV e através de tratamentos manual e numérico das imagens se obtém uma imagem em preto e branco onde a cor clara representa vazios. É calculada a fração volumétrica dos mesmos e comparada a outros trabalhos acadêmicos para verificação.

Motivado pelo método de MORAES, este trabalho visa o aperfeiçoamento da técnica de detecção de vazios através da identificação de bolhas esféricas PRFV. Com o uso da linguagem de programação Python, um algoritmo foi otimizado para localizar bolhas e calcular fração volumétrica de laminados. Amostras obtidas por dois métodos de fabricação diferentes, laminação manual e laminação a vácuo, assim como a variação de três espessuras em cada fabricação serviram de objeto de estudo para o método aqui proposto.

## 1.1 OBJETIVOS

Com intuito de evoluir na pesquisa sobre ensaio não destrutível para determinação do índice de vazios em compósitos, proposto por (MORAES, 2017), propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Melhoramento e estudo sistemático da técnica de ensaio não destrutiva de luz refletida para detecção de bolhas esféricas em placas PRFV.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Aprimorar algoritmo de cálculo focando em identificar bolhas esféricas em FVRP;
- Realizar análise com o uso de escâner de luz branca utilizando algoritmo desenvolvido;
- Realizar análise com o uso de microscópio óptico utilizando algoritmo desenvolvido;
- Verificar influência da espessura do laminado e método de fabricação no tipo de ensaio ensaio;
- Comparar resultados e concluir viabilidade do método.

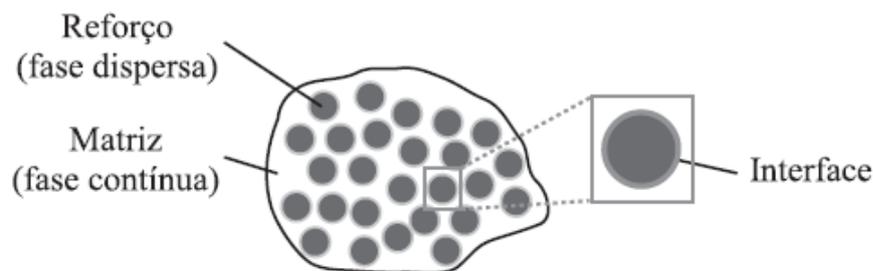
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento da teoria, prática e compreensão do estudo, é exposta uma pesquisa abordando os principais temas e fontes utilizados neste trabalho. Desde processos de fabricação de materiais compósitos, métodos END existentes, desenvolvimento matemático de algoritmos para detecção de falhas e princípios físicos dos equipamentos trabalhados.

### 2.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos são a união de dois ou mais materiais diferentes onde juntos possuem características que agregam desempenho ao sistema (MENDONÇA, 2005), geralmente trabalha-se com fibras cerâmicas e resinas poliméricas. A Figura 1 mostra os dois principais constituintes dos materiais compósitos.

Figura 1- Composição de material compósito



Fonte: ANGÉLICO (2009)

Para a compreensão deste grupo de materiais, é abordado uma breve introdução sobre reforços e matrizes e processos de fabricação como laminação manual e à vácuo, importantes para este trabalho.

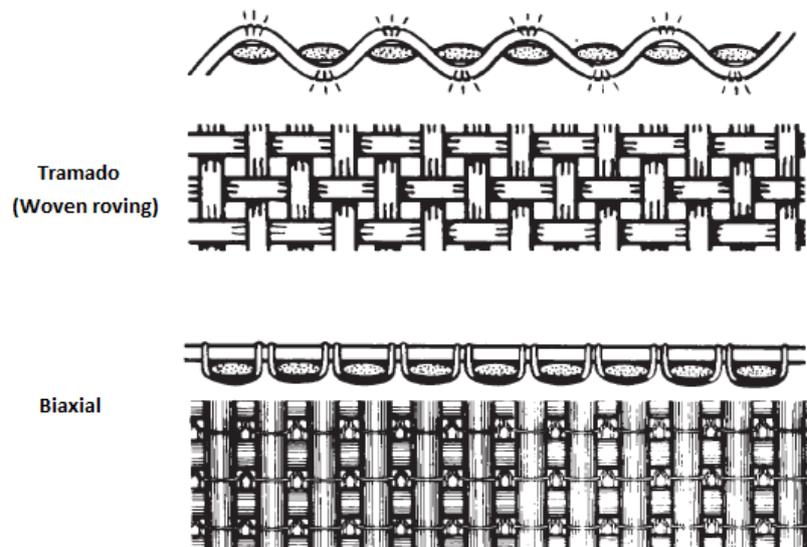
Matriz é responsável por unir os reforços em uma unidade rígida e com utilidade para engenharia. Em se tratando de construção naval, estes componentes costumam ser polímeros termorrígidos e se apresentam geralmente em estado líquido antes da conformação do material, e sólido após sua fabricação. O processo de endurecimento é chamado de cura, ocorre com

ajuda de um aditivo que acelera a reação de polimerização, liberando calor e unindo radicais livres, gerando um material sólido.

A matriz pode ser de diversos materiais poliméricos, onde as mais usuais na área naval são resinas epóxi, poliéster e Ester vinílicas. A diferença entre elas são a densidade, módulo de elasticidade, viscosidade, tempo de cura, dureza, absorção de água, preço e entre outros. Neste trabalho é utilizado resina de poliéster devido o amplo uso em embarcações.

O componente que garante a resistência mecânica nos materiais compósitos é o reforço. Geralmente sendo de fibras cerâmicas, o pequeno diâmetro inibe característica de fragilidade do material, porém mantém a alta resistência a tração CALLISTER (2013). Mais de 90% do reforço utilizado na indústria naval é a fibra de vidro, ela possui boas características de alongamento, relação resistência a tração por peso baixo custo (GREENE 1999). Estas fibras são encontradas em diversas formas, em rolos, tecidos, mantas, combinados e entre outros. A Figura 2, mostra dos tipos de tecidos usuais na fabricação de barcos.

Figura 2 - Tipos de tecidos



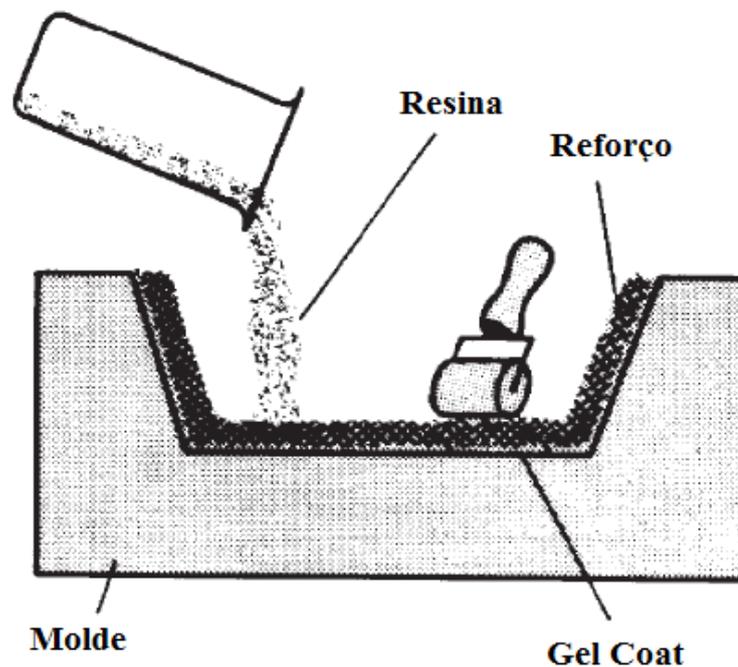
Fonte: (GREENE, 1999)

### 2.1.1 Laminação Manual

A laminação manual é o método mais simples e muito usual em fabricação de embarcações em compósito. O laminador impregna manualmente a matriz polimérica com o reforço utilizando algumas ferramentas (NASSEH, 2008).

A mistura já polimerizada de resina é aplicada com uma trincha ou rolo de lã de carneiro em cima do molde preparado e seguidas de camadas de reforços. Em cada camada, o operador impregna a resina na fibra com a ajuda de rolo tira bolhas o qual também tem a função de minimizar a quantidade de bolhas do laminado. A proporção de resina e fibra no processo ocorre de acordo com experiência do aplicador, tempo disponível de trabalho e geometria da peça construída (GREENE, 1999). A Figura 3 exemplifica o processo de laminação manual.

Figura 3 - Processo de laminação manual



Fonte: GREENE (1999)

Para realização do processo de laminação manual é necessário alguns materiais, no Quadro 1 são listados estes itens e respectivas funções.

Quadro 1 - Materiais necessários para laminação manual

<b>Item:</b>	<b>Função:</b>
Molde	Geometria da superfície a ser copiada
Desmoldante	Passado no molde com intuito do laminado não grudar no mesmo e assim sair com facilidade.
Gel Coat	Primeira camada do laminado, tem a função de proteger a peça e melhorar o acabamento estético.

Iniciador	Aumentar a velocidade da reação de endurecimento da resina
Resina	Unir os reforços em um sólido único
Fibra	Dar resistência mecânica a peça
Trincha	Auxiliar na impregnação da resina da fibra.
Rolo de lã de carneiro	O mesmo que a trincha, porém, atua em maior área
Rolo tira bolhas	Rolo em alumínio que comprime o combinado com intuito de auxiliar na modelagem de geometrias complexas e diminuir a quantidade de vazios.

Fonte: Autor (2018)

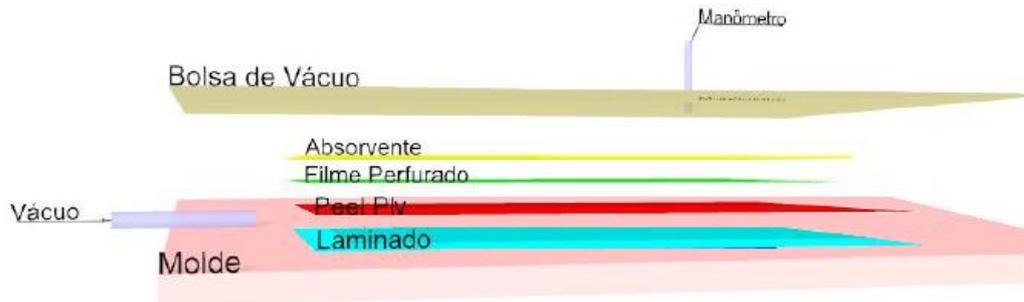
O processo de laminação manual possui um baixo custo de ferramental atribuído, simples de ser aplicado e produz diversos tamanhos de peças. Com um bom laminador pode-se obter boa produtividade e qualidade (GREENE, 1999).

Este processo de fabricação geralmente resulta em laminados com elevada fração volumétrica de resina e maior quantidade de vazios.

### **2.1.2 Laminação a vácuo**

Propriedades mecânicas podem ser adicionadas ao material composto ao se utilizar a técnica de laminação a vácuo. Bolhas de ar e excesso de resina são removidos para produzir um material com alta proporção de reforço. Após o laminado ser preparado de maneira manual, um filme flexível de plástico, chamado bolsa de vácuo, é disposto acima de todas camadas de laminado e selado com fita emborrachada para este fim. Entre a bolsa de vácuo e laminado podem ser adicionados três camadas de materiais, Figura 4, que auxiliam no processo, Peel ply, filme perfurado e absorvente (GREENE, 1999).

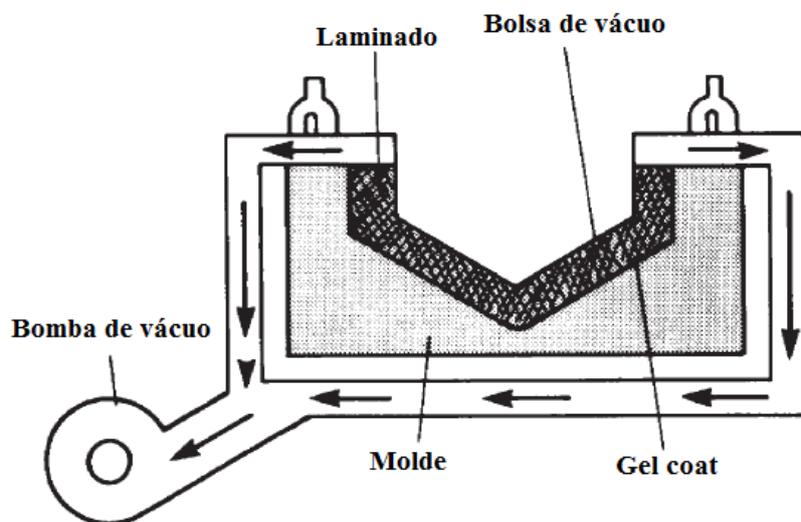
Figura 4 - Camadas do processo de laminação a vácuo



Fonte: Autor (2018)

Vácuo é gerado com uma bomba para este fim e conectado com tubulação para debaixo da bolsa de vácuo, deste modo o ar é retirado forçando o filme comprimir o laminado no molde como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Processo de laminação a vácuo



Fonte: GREENE (1999)

Os materiais utilizados no processo com suas respectivas funções são descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Materiais necessários para laminação a vácuo

<b>Componente</b>	<b>Descrição e função</b>
Bolsa de vácuo	Filme plástico flexível de material polimérico que não dilui com a presença da resina. Tem a função de garantir a estanqueidade do vácuo e pressionar o laminado.
Breather ou absorvente	Tecido esponjoso que absorve o excesso de resina.
Plástico perfurado	Película plástica com micro furos, regula a saída de resina do laminado. Uso nem sempre necessário.
Peel Ply	Tecido de nylon que permite a travessia de resina sem a adesão entre os dois materiais.
Fita de vedação	Fita de borracha que garante a vedação entre o molde e bolsa de vácuo.
Conectores de vácuo	Mangueiras, joelhos, conexões e válvulas que compõem o sistema de vácuo.
Bomba de vácuo	Equipamento responsável por retirar ar do laminado e diminuir a pressão do sistema.

Fonte: Autor (2018)

## 2.2 Testes em compósitos

Existem vários ensaios que ajudam a detectar possíveis falhas em materiais compósitos, desde simples inspeções visuais até complexas análises experimentais e numéricas em campo ou laboratório. Em alguns casos, não danificar a peça estudada é requisito da análise e por isso temos os ENDs, ensaios não destrutíveis.

### 2.2.1 Ensaios não destrutíveis

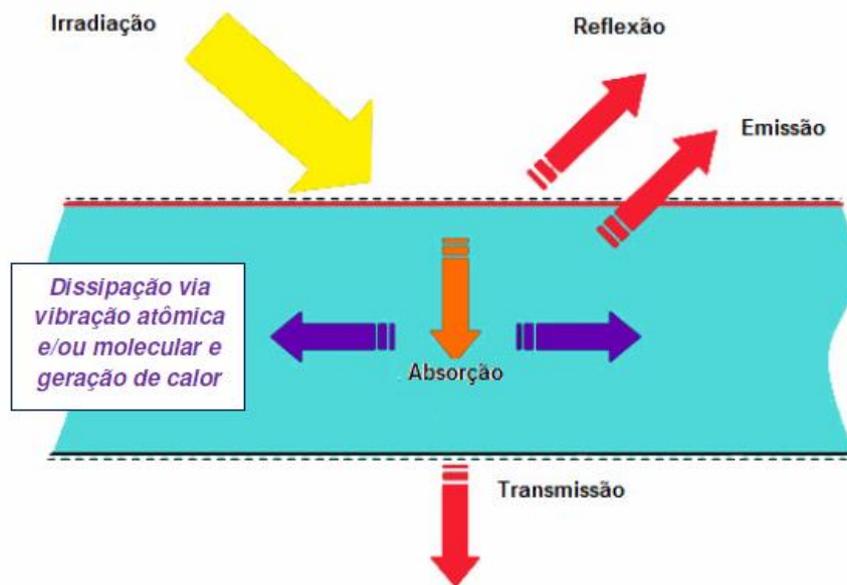
Dentre os diversos ensaios de materiais existentes, podem ser divididos em ensaios destrutivos e ensaios não destrutíveis. O primeiro se identifica por inutilizar a peça observada após o ensaio. O segundo se constitui em estudar a material sem que ele perca sua funcionalidade inicial, como a identificação de bolhas em cascos de embarcações recém construídas ou em utilização, cujo objetivo é identificar falhas para posterior reparo.

A seguir, são definidos três ENDs que possuem similaridades com o aqui proposto, Termografia infravermelha (TIV), shaerografia e escâner de luz branca proposto por (MORAES, 2017).

### 2.2.2 Termografia infravermelha

A termografia é um ensaio que utiliza os princípios da dissipação do calor, irradiação, absorção, condução e emissão, para identificar falhas internas em materiais. A Figura 6 exemplifica as formas de transmissão de calor do método estudado.

Figura 6 - Formas de transmissão de calor importantes na TIV



Fonte: Miranda (2011)

Um corpo aquecido emite radiação infravermelha, este fenômeno é explicado melhor em:

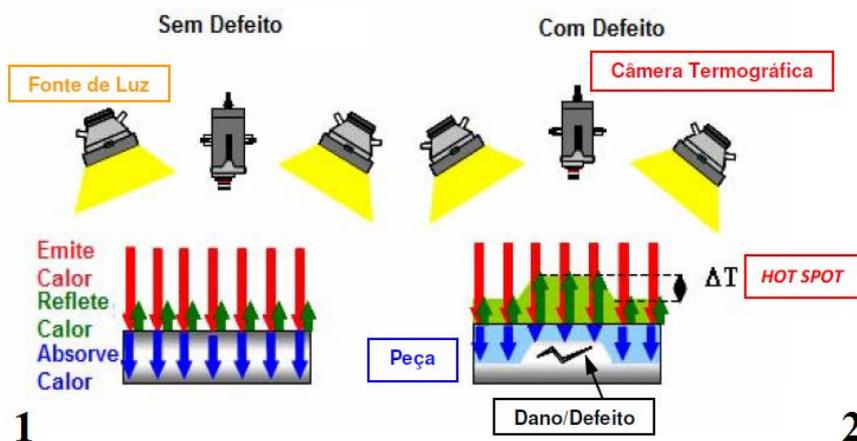
Rigorosamente falando, todos os objetos emitem radiação infravermelha como uma função de sua temperatura absoluta. Energia infravermelha é basicamente gerada pela vibração e rotação dos átomos e das moléculas. Desta forma, quanto mais aquecido está um objeto, maior é a agitação atômica e/ou molecular interna, e, portanto, maior é a energia infravermelha por ele emitida (MIRANDA, 2011).

Para mensurar a radiação infravelha pode ser utilizado uma câmera que capta este comprimento de onda, gerando assim um mapa de calor da peça observada.

Termografia pode ser executada por duas abordagens, passiva e ativa. A termografia passiva é geralmente utilizada na procura de defeitos em materiais que possuem temperatura diferente do ambiente inserido, enquanto em ativos, flashes óticos, holofotes de luz quente a armas de frio ou calor são usados para induzir os contrastes térmicos. Normalmente o método mais utilizado é ativo com pulso luminoso quente (YANG, 2013).

O contraste térmico é evidenciado devido as diferenças de absorção de calor dos materiais, condutividade térmica e capacidade térmica. Quando um material polimérico apresenta poros ou vazios sua condutividade térmica diminui localmente não deixando o calor se dissipar na peça, fazendo com que a superfície localizada do material permaneça mais tempo com o calor fornecido pelo pulso e denunciando a posição do defeito. A Figura 7 demonstra o comportamento das transmissões de calor no ensaio.

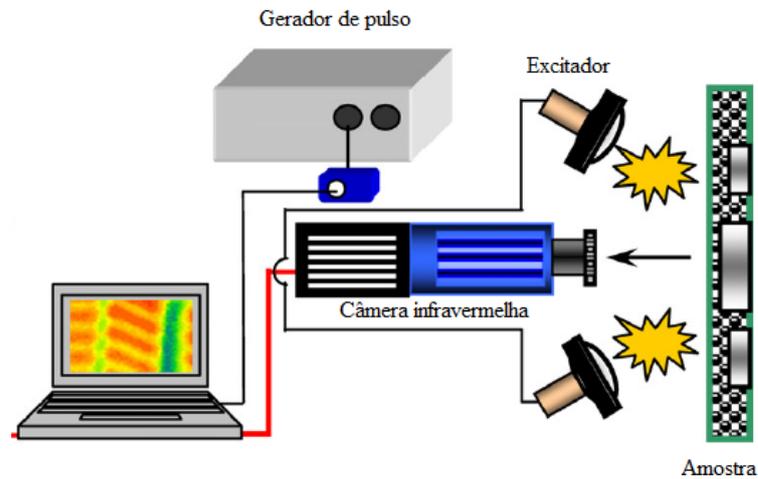
Figura 7 - Dissipação do calor em 1 - peça sem defeito e 2 - peça com defeito



Fonte: Miranda (2011)

O equipamento de TIV geralmente é composto por um amplificador associado a um gerador de pulso luminoso infravermelho para esquentar a superfície do material, uma câmera infravermelha e um computador para analisar a imagem obtida em regime transiente e gerar o mapa de calor como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Equipamento de TIV



Fonte: MIRANDA (2011)

MIRANDA (2011) descreveu algumas vantagens e desvantagens do método:

1 Vantagens:

- Rapidez de inspeção;
- Interpretação simples das imagens;
- Análise em tempo real;
- Inspeção global da peça;
- Não sensível a geometria da peça;
- Acesso a apenas um lado da peça.

2 Desvantagens:

- Requer uniformidade de aquecimento;
- Custo do equipamento é elevado;
- Detecção de defeitos pouco profundos, a profundidade de defeitos é proporcional ao seu tamanho;
- Variação de emissividade de uma mesma peça.

### 2.2.3 Shearografia

A shearografia é uma técnica END de medição de defeitos em placas através da observação dos deslocamentos sofridos pelas superfícies ao serem excitadas por fonte externa.

Defeitos em materiais são responsáveis por pontos de concentração de tensão quando submetidos a esforços. Pela Lei de Hooke, diferenças de tensões acarretam em deslocamentos

mecânicos diferenciados no local das falhas. A análise superficial pela Shearografia gera uma imagem mostrando a variação das deformações superficiais, onde existe falha ocorrerá nas proximidades variação de tensão que altera a deformação e conseqüentemente resalta a região da imagem gerada pelo ensaio (YANG e HUNG, 2004).

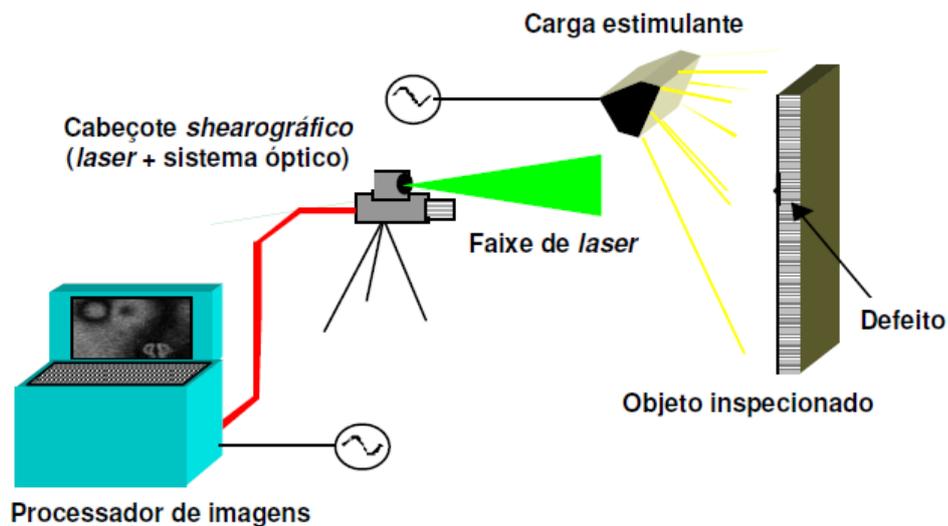
O nome Shearografia se remete a cisalhamento em inglês, *shear*. No sistema óptico do equipamento um prisma divide a imagem em duas com um pequeno deslocamento  $\Delta$  entre elas para melhorar o isolamento das falhas, esta divisão é o *shear* (MIRANDA, 2011).

Esta técnica possui grande potencial em identificação de defeitos superficiais como a delaminação em materiais compósitos sendo de maior utilização na indústria aeroespacial. Possui uma rápida análise em grande área de material, mais de um  $m^2$  por minuto, contribuindo para utilização em escala industrial.

O equipamento (Figura 9) é composto por:

- 1 - Feixe de laser;
- 2 - Carga estimulante;
- 3 - Sistema óptico;
- 4 - Processador de imagens.

Figura 9 - Equipamento para experimento shearográfico

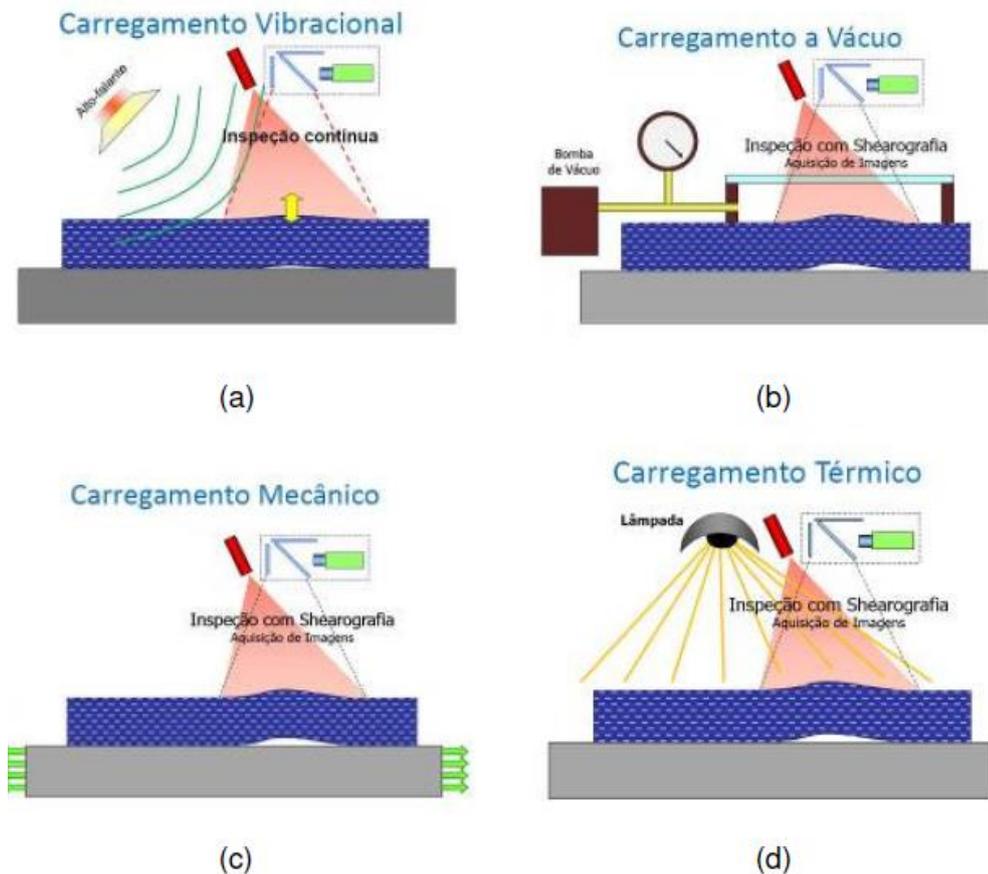


Fonte: Miranda (2011)

Um feixe de laser ilumina e reflete na região analisada sendo captado pelo sistema óptico. A carga estimulante excita mecanicamente a superfície estudada a qual se deforma de acordo com o fluxo de tensões do material.

Podem ser aplicadas diversos tipos de cargas estimulantes, uma vez que o objetivo é excitar concentrações de tensões superficiais. A Figura 10 mostra quatro tipos de estímulos.

Figura 10 - Possíveis excitações para o ensaio, (a) carregamento vibracional, (b) carregamento a vácuo, (c) carregamento mecânico e (d) carregamento térmico



Fonte: Miranda (2011)

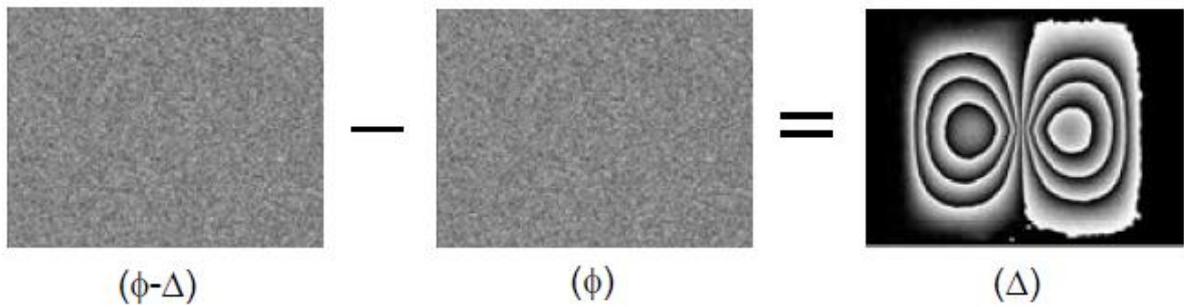
Repetidas imagens são tomadas em um curto período de tempo logo após a excitação. As imagens são processadas, subtraídas entre si, feitas médias dos resultados e amplificadas para contrastar o resultado. A subtração entre as imagens é um método para isolar diferenças entre elas, um simples exemplo é mostrado na Figura 11, subtraindo duas imagens semelhantes é possível descobrir a diferença nem sempre visível a olho nu.

Figura 11 - Exemplo de subtração de imagens, a) imagem em um instante de tempo, b) imagem em outro instante de tempo e c) resultado da subtração entre a e b



Assim, a luz refletida por um ponto da peça é diferente em cada instante devido a mudança do ângulo de reflexão ao longo do tempo. A imagem resultante, após a manipulação computacional dos registros, se compara a curvas de níveis, Figura 12.

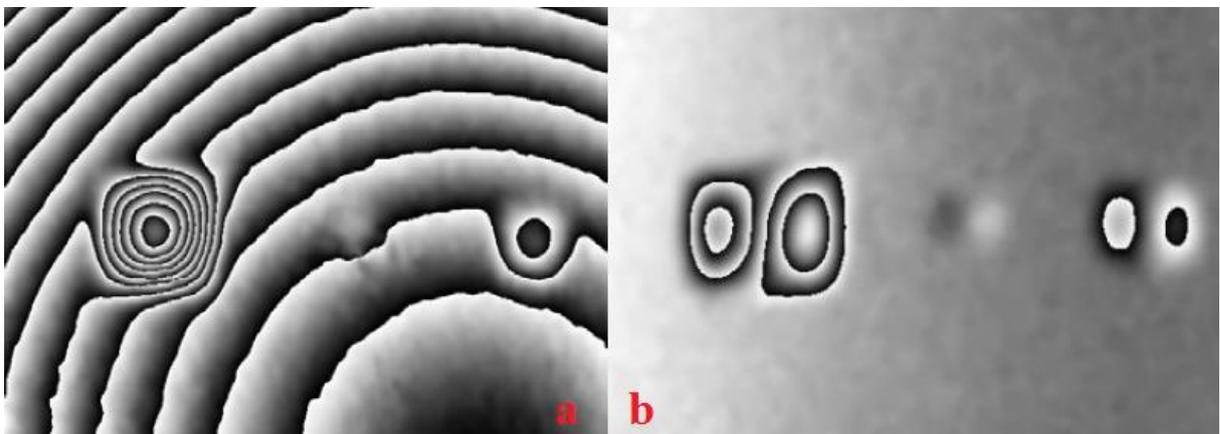
Figura 12 - Princípio de subtração de imagens da Shearografia



Fonte: Adaptado de Yung et all (2004)

A função do prisma cisalhante de imagem é filtrar os grandes deslocamentos, dando-se assim mais ênfase a ordem de grandeza dos defeitos sem que deslocamentos globais atrapalhem na visualização, como consequência, as linhas obtidas na figura final se encontram espelhadas na direção do cisalhamento. A Figura 13 mostra a situação sem e com o uso do prisma shearográfico, esquerda e direita respectivamente.

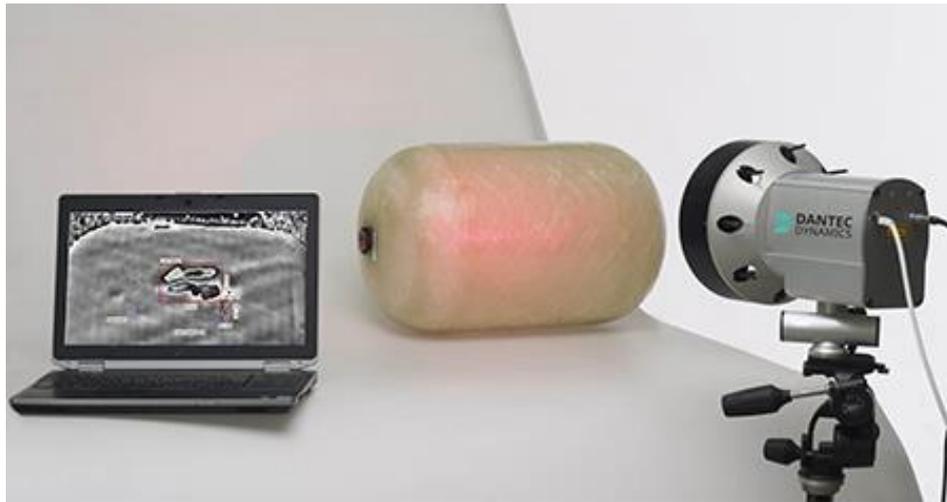
Figura 13 - Influência do uso do prisma Shearográfico a) imagem sem prisma e b) imagem com prisma



Fonte: Yung et all (2004)

Atualmente são desenvolvidos equipamentos shearográficos portáteis de uso comercial. Na Figura 14 é mostrado um equipamento portátil da marca Dantec que pode escanear superfícies de 10cm x 10cm em menos de 30s necessitando-se apenas do sensor e um notebook.

Figura 14 - Equipamento DANTEC de Shearografia portátil



Fonte: dantec.com

MIRANDA (2011) listou vantagens e desvantagens do processo:

1 - Vantagens:

- Inspeção global;
- Sem contato do Sensor;
- Grande sensibilidade;
- Rapidez;
- Capacidade operacional em campo;
- Acesso apenas um lado da peça;
- Adequado para grandes superfícies;
- Elevado grau de automação;
- Customização do sistema de acordo com a necessidade.

2 – Desvantagens:

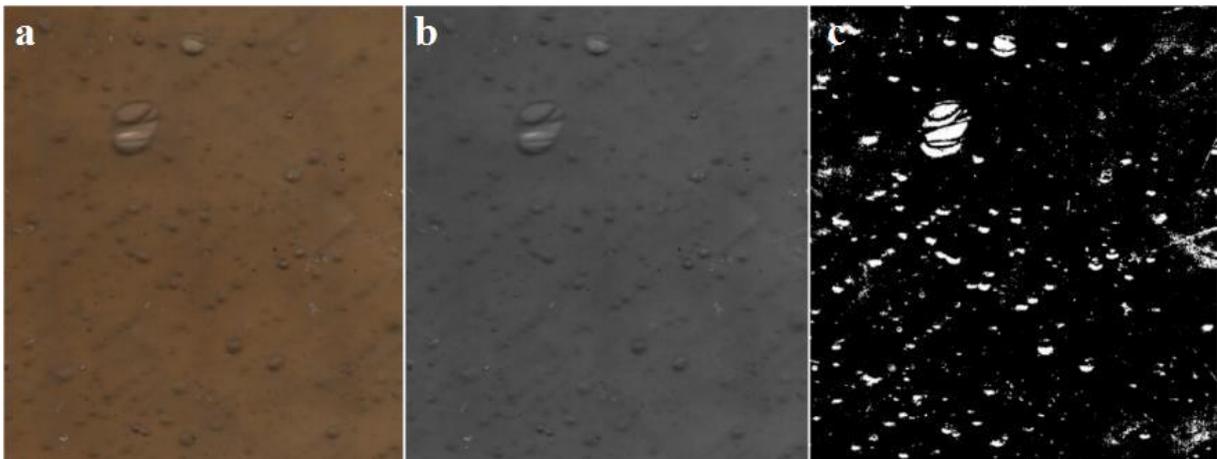
- Defeitos muito profundos não detectáveis;
- Falha deve se comportar como variação de tensão.

### 2.2.4 Luz Branca de alta intensidade

O método END de luz branca de alta intensidade visa encontrar e quantificar bolhas em um laminado de PRFV. Percussor do ensaio aqui estudado, utiliza as mesmas ferramentas para a análise, escâner residencial e um algoritmo de tratamento de imagem e obtenção dos resultados.

O ensaio passa por quatro etapas até se obter os resultados: A primeira etapa se resume em configurar o escâner, colocar a mostra e obter a imagem para o estudo. A segunda etapa seleciona uma região da imagem escaneada que não possui defeitos superficiais que possa a vir a camuflar as bolhas. Por terceiro é utilizado um Software de tratamento de imagem para transforma-la em tons de cinza e posteriormente regular a quantidade de pretos, obtendo-se os resultados mostrados na Figura 15.

Figura 15 – a) Imagem original, b) tratada para tons de cinza e c) para preto e branco



Fonte: Moraes (2017)

Na quarta etapa, um programa desenvolvido em Python conta a quantidade de pixels pretos e brancos e assim a fração de área em vazios é obtida.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo visa explicar de maneira prática todo procedimento efetuado para obtenção dos resultados. Começa com fabricação das amostras, passa por desenvolvimento do algoritmo e desfecha com o cálculos e resultados.

#### 3.1 Fabricação das amostras

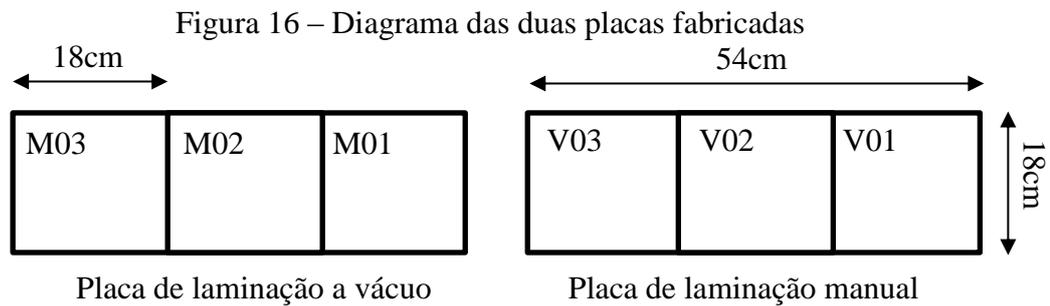
Para a verificação do algoritmo criado neste trabalho foram fabricados seis amostras com a variação de duas características: três espessuras de laminação e dois métodos de fabricação, como mostrado na Quadro 3 **Error! Reference source not found.**

Quadro 3 - Variáveis dos corpos de prova

Identificação das amostras	Composição do laminado	Processo de Fabricação
V 01	1 camada de manta, 1 de tecido	Laminação a Vácuo
V 02	2 camadas de manta, 2 de tecido	Laminação a Vácuo
V 03	3 camadas de manta, 3 de tecido	Laminação a Vácuo
M 01	1 camada de manta, 1 de tecido	Laminação Manual
M 02	2 camadas de manta, 2 de tecido	Laminação Manual
M 03	3 camadas de manta, 3 de tecido	Laminação Manual

Fonte: Autor (2018)

Simplificando a fabricação das amostras, foi definido a laminação de duas chapas, uma de laminação manual contendo as três espessuras e outra com laminação a vácuo contendo a mesma configuração da anterior, mostrado na CXXX. As dimensões do quadrado de 18 cm de lado foi escolhido para que as amostras caibam no compartimento de escâneres usuais. O uso de camadas laminadas combinadas de manta de fibra de vidro 300g/m<sup>2</sup> com tecido de 600g/m<sup>2</sup> reproduz a típica utilização em embarcações. A variação de número de camadas foi escolhida unicamente para testar a variável espessura no algoritmo.



Fonte: Autor (2018)

- Resina de Poliéster isoftálica pré acelerada da distribuidora SAMA;
- Manta de fibra de vidro 300g/m<sup>2</sup>;
- Tecido de vidro Woven Roving 600g/m<sup>2</sup>;
- Iniciador.

Foi definido a quantidade de matéria prima através da área prospectada de cada camada do laminado. Para obtenção da massa de resina, levou-se em consideração que representa 70% da massa total. Observou-se que para cada placa é necessário de 174,96g de reforço e 408,24g de resina de poliéster, mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de material para fabricação das amostras

Camadas	Densidade (g/m <sup>2</sup> ):	Dimensão 1 (m):	Dimensão 2 (m):	Área (m <sup>2</sup> ):	Massa do reforço (g):	Quantidade de resina (g):
Manta I 300	300	0,18	0,54	0,0972	29,16	68,04
Tecido I 600	600	0,18	0,54	0,0972	58,32	136,08
Manta II 300	300	0,18	0,36	0,0648	19,44	45,36
Tecido II 600	600	0,18	0,36	0,0648	38,88	90,72
Manta III 300	300	0,18	0,18	0,0324	9,72	22,68
Tecido III 600	600	0,18	0,18	0,0324	19,44	45,36
<b>Total:</b>	-	-	-	<b>0,3888</b>	<b>174,96</b>	<b>408,24</b>

Fonte: Autor (2018)

Utilizou-se os seguintes materiais na fabricação das amostras com as respectivas funções:

Quadro 4 - Lista de materiais e ferramentas para a prática

Materiais	Função
-----------	--------

Rolo tira bolha	Melhorar a compactação do laminado e diminuir a presença de bolhas no laminado
Espira tubo	Responsável por canalizar o vácuo pela superfície do laminado
Plástico bolha	Alternativa ao absorvedor, lidando com o excesso de resina
Filme plástico de PVC de 0,2mm	Bolsa de vácuo, garantir estanqueidade do processo de fabricação a vácuo
Trinchas	Espalhar e resina e impregnar matriz no reforço
Pipeta de 3ml	Medir a quantidade de iniciador para a resina
Balança de precisão	Medição da quantidade de resina, fibra e verificação da massa final das amostras
Copos PP de 300ml	Recipientes para execução dos testes de gel e preparação da resina
Peel ply	Tecido de nylon que não adere na resina e permite seu fluxo
Fita adesiva transparente	Auxiliar na fixação da bolsa de vácuo na sua posição de operação
Fita crepe	Demarcar região do laminado
Cera de carnaúba	Desmoldante de carnaúba para polir o molde e garantir uma boa desmoldagem do laminado
Estopa	Auxiliar no polimento do molde
Palito	Misturador da solução resina acelerador
Luvas	EPI para proteger as mãos da resina e fibra
Thinner	Limpeza das ferramentas
Acelerador MEKP	Iniciador de reação de polimerização da resina de Poliéster

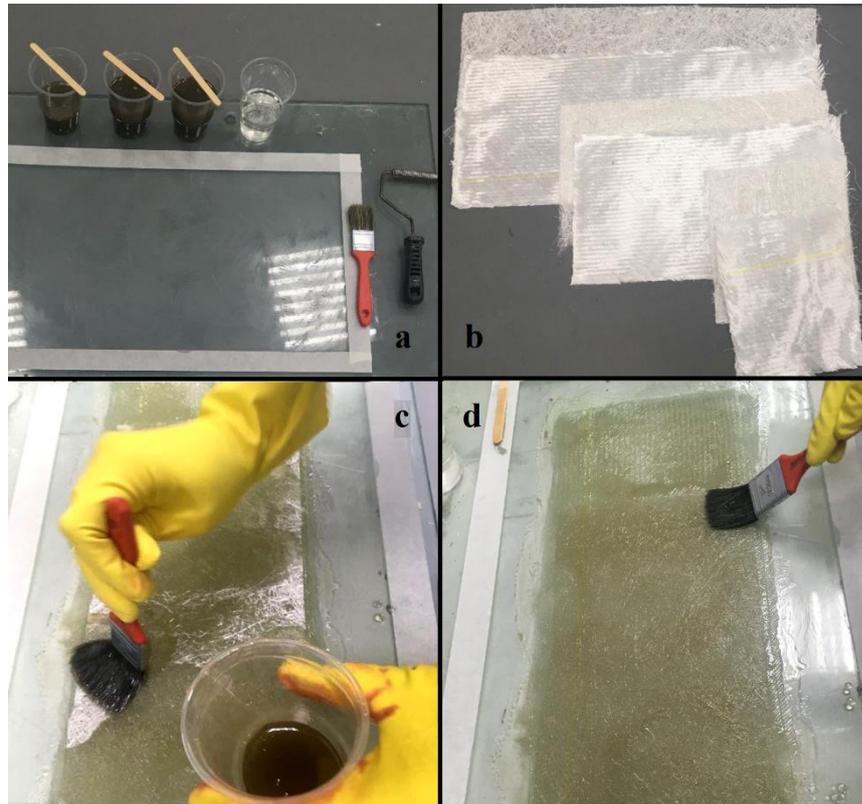
Fonte: Autor (2018)

Antes de ser iniciado o processo de laminação, executou-se um teste de gel para determinar uma boa proporção de MEKP visando maior tempo de trabalho com a resina. Testou-se três potes com 50g de resina cada, foi escolhido o teste 1, com 1% de proporção de iniciador resultando em 16 minutos de trabalho.

O procedimento de laminação iniciou com a preparação dos moldes com três camadas de cera de carnaúba, devidamente polidos entre as passadas, e separação dos materiais, seguido do corte das fibras de vidro nos devidos tamanhos. As resinas foram iniciadas separadamente

de acordo com a demanda do processo e finalizou-se com um trabalho de diminuir a quantidade de bolhas manuseando trincha e rolo. Na Figura 17 é mostrado as etapas descritas do processo.

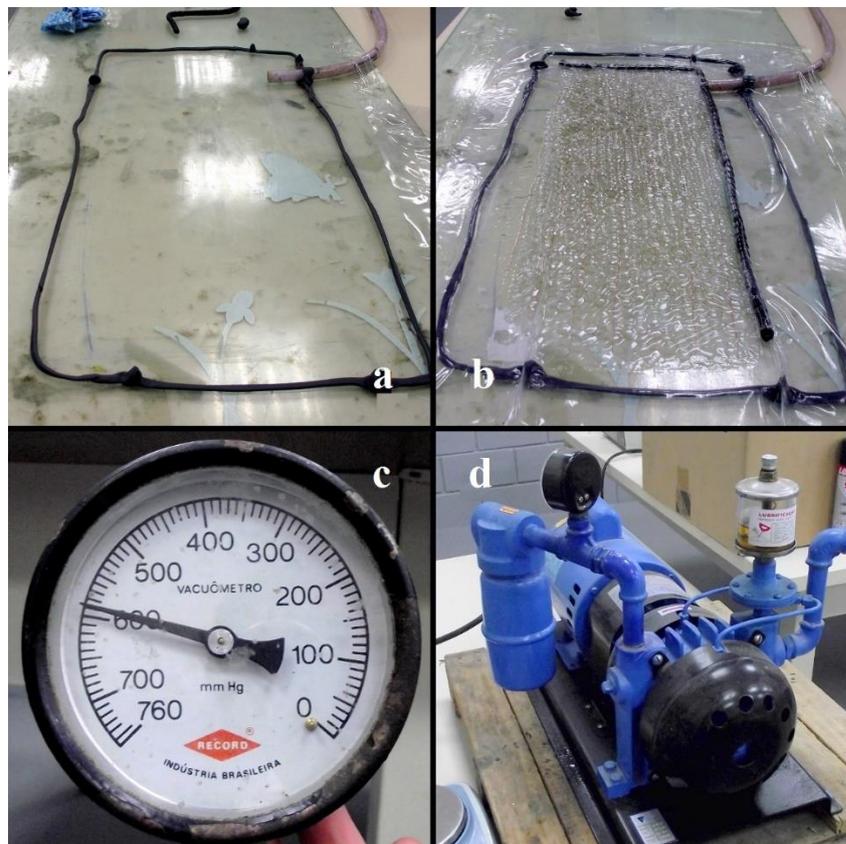
Figura 17 - Prática de laminação manual: a) Preparação do molde, b) pré corte das fibras, c) processo de laminação em andamento e d) acabamento



Fonte: Autor 2018

No processo de laminação a vácuo, o molde foi previamente configurado com polimento, instalado a entrada de vácuo e massa de calafetar (alternativa a fita de vedação). Após laminar manualmente, similar a técnica descrita anteriormente, adicionou-se o espira tubo, a camada de peel ply, o plástico bolha e o filme de PVC, respectivamente, e se deu início ao vácuo. O vácuo foi mantido por 1h a 600 mm Hg. A bomba de vácuo utilizada é uma NOVA de 0,75KW e 235 L/min. Na Figura 18 é mostrado as etapas descritas do processo.

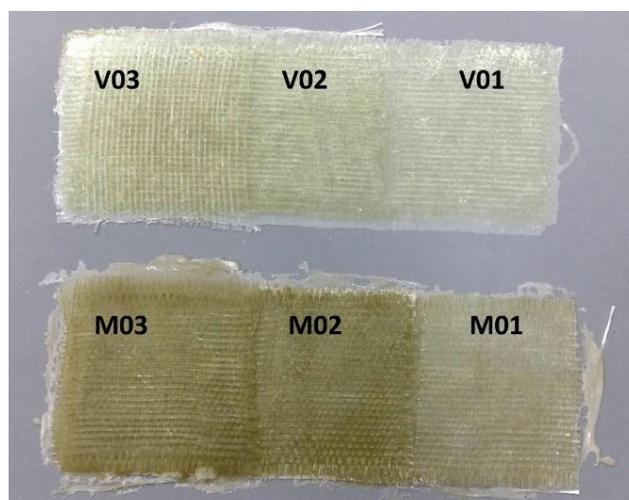
Figura 18 – Prática de laminação a vácuo: a) Preparação do molde, b) Processo de vácuo em andamento, c) pressão de vácuo e d) bomba de vácuo utilizada



Fonte: Autor (2018)

Após a laminação das duas placas, as amostras foram devidamente desmoldadas como mostrado na Figura 19 e cortadas de modo a entrar no compartimento do escâner.

Figura 19 - Amostras de FVRP obtidas com as respectivas identificações



Fonte: Autor (2018)

### 3.2 Obtenção de dados pelo scanner

Para se obter as imagens a serem analisadas pelo método, utilizou-se um escâner de impressora multifuncional residencial HP F4200, Figura 20.

Figura 20 - Equipamento multifuncional utilizado para escanear as amostras



Fonte: <<http://www8.hp.com/br>> Acessado em 2018

Este tipo de escâner utiliza um sensor do tipo Contact Image Sensor (CIS). A densidade destes sensores em série determina a resolução do equipamento, cuja unidade é Pixels Por Polegadas (PPI). Neste estudo foi utilizado a resolução máxima do aparelho, 1200 PPI.

### 3.3 Obtenção dos dados pelo microscópio óptico

Como análise complementar, utilizou-se um aparato com o auxílio de um microscópio óptico para a obtenção de imagens mais aproximadas do laminado. O aparato está mostrado na Figura 21 com as seguintes unidades: (1) microscópio óptico, configurado com lentes objetivas de 5X, 10X, 20X e 40X, (2) câmera Fortel 1,3Mp para transformar imagens em formato digital, (3) Lâmpada fluorescente branca de 15W com objetivo de transpassar a luz através das amostras, (4) amostras a serem observadas e (5) obtenção do resultado na tela do computador.

Figura 21 - Equipamento para obtenção de imagens aproximadas



Fonte: Autor (2018)

As imagens foram salvas em formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) para posteriormente serem analisadas. Com isso, foram captadas imagens para uso do algoritmo desenvolvido e compreensão física do fenômeno de bolhas em laminados.

### 3.4 Análise numérica das amostras

O algoritmo para análise das imagens foi desenvolvido na linguagem de programação Python, mesma utilizada por (MORAES, 2017) porém com outro objetivo, identificar bolhas esféricas. Utilizou-se três bibliotecas de funções disponíveis para python, Numpy, OpenCV e Matplotlib. O programa segue uma sequência de comandos para se obter os resultados, nos itens a seguir é exposto os detalhes de cada função.

#### 3.4.1 Importando dados

A importação das imagens no programa ocorre pela OpenCV. Nesta biblioteca, todas as imagens são abertas em 8 bits, as cores são representadas em 256 intensidades diferentes, variando do preto (0) ao branco (255). A Figura 22 representa a imagem em tons de cinza [[ 0, 127, 194, 255]] impressa em Python.

Figura 22 - Exemplo de imagem em tons de cinza



Fonte: Autor (2018)

Quando é trabalhado com imagens coloridas, para cada pixel utiliza-se três números, referentes a intensidade das cores primárias, variando novamente de 0 a 255. A Figura 22 também pode ser expressa em RGB (Red, Green, Blue) como [[[ 0, 0, 0], [127, 127, 127], [196, 196, 196], [255, 255, 255]]].

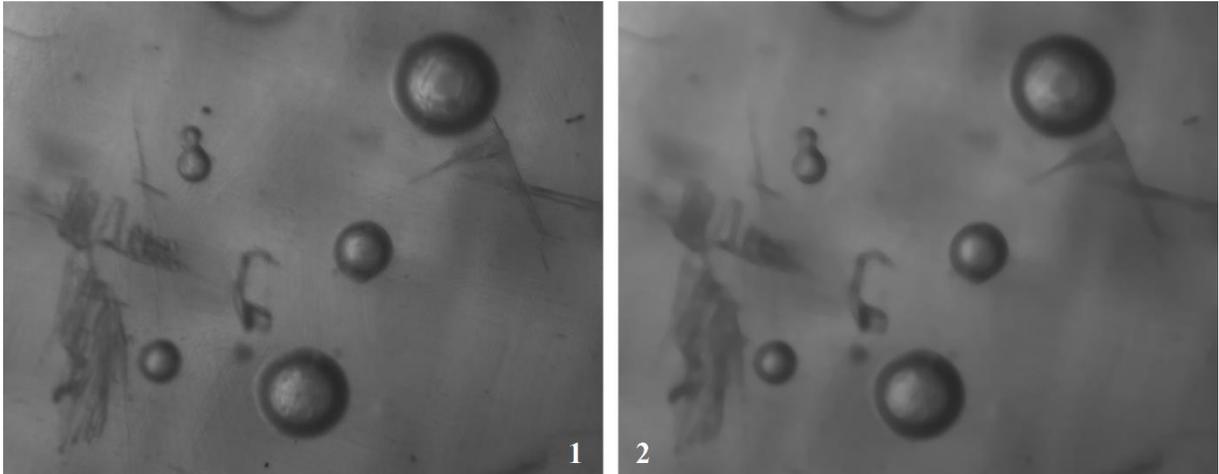
No algoritmo aqui proposto, todas imagens são importadas já convertidas em tons de cinza e 8 bits.

### 3.4.2 Desfocando imagem

Após ser carregada, a imagem é submetida a uma função que mistura os pixels próximos para homogeneizar pequenos detalhes e linha. Pressupõem-se que as bolhas possuem contornos bem definidos e não serão afetadas pela função. Esta etapa garante que círculos não serão encontrados entre padrões lineares oriundos do polimento superficial e marcações do tecido. A intensidade da função foi escolhida para que melhor atendesse aos casos estudados.

Na Figura 23 é mostrado a imagem escaneada (1) e a transformação para desfocada em (2).

Figura 23 - Transformação de imagem escaneada em desfocada

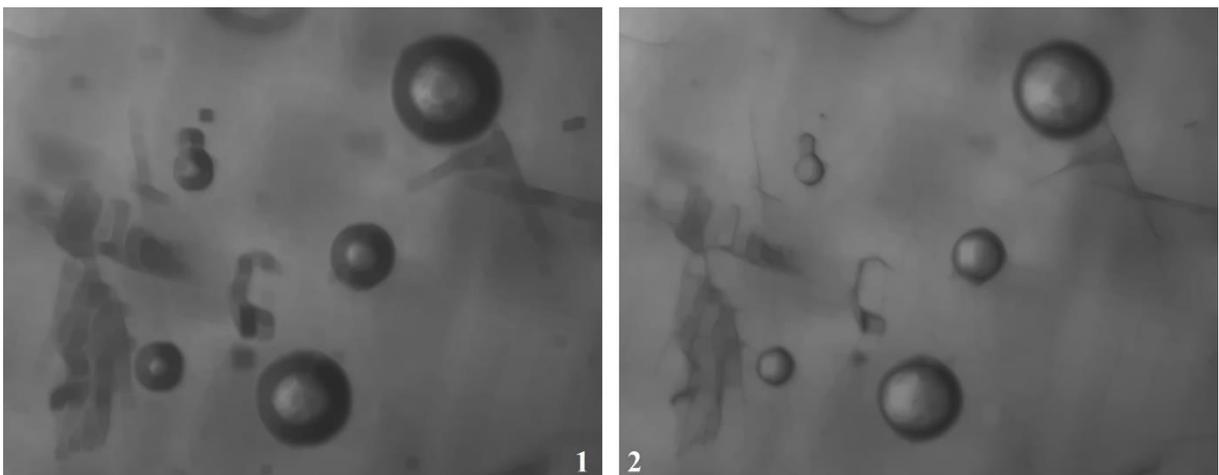


Fonte: Autor (2018)

### 3.4.3 Dilatação e retração

Com intuito de aumentar o detalhe dos contornos das bolhas e filtrar defeitos na imagem que possam atrapalhar na detecção das mesmas, duas funções são aplicadas em sequência, a de dilatação e retração. A dilatação, expressa na Figura 24, expande a região de pixels escuros e, logo após, em (2) os mesmos são retraídos em maior intensidade visando a concentração das grandes manchas escuras e definição dos contornos.

Figura 24 - (1) Imagem dilatada, (2) imagem retraída

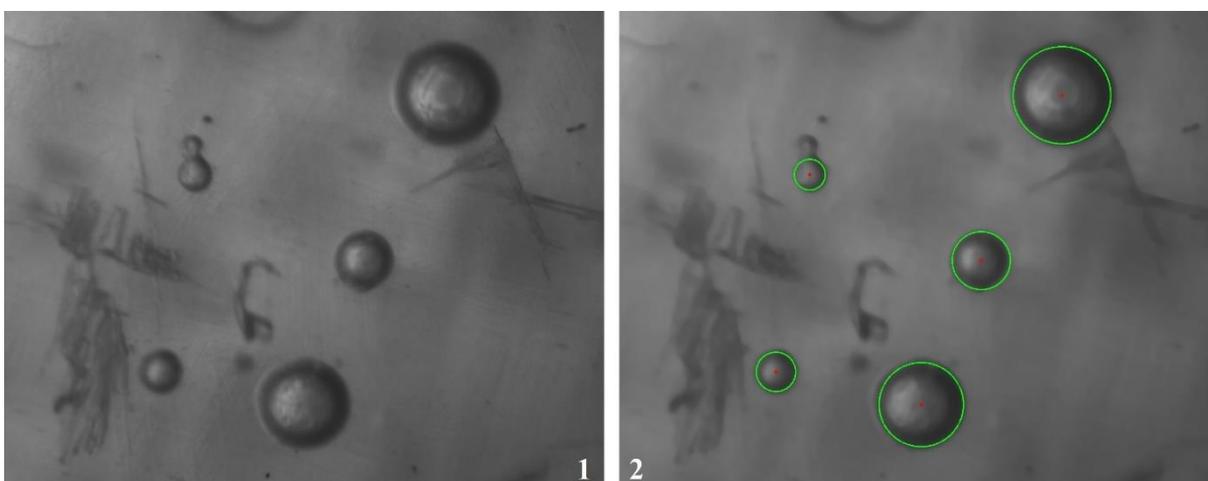


Fonte: Autor (2018)

### 3.4.4 Identificação dos círculos

Com a imagem já manipulada, uma função de detecção de círculos é executada. O algoritmo procura padrões circulares através de parâmetros inseridos como raio mínimo, raio máximo, intensidade do padrão circular e distância entre centros. A informação dos círculos é guardada em uma matriz contendo a posição do centro, número da linha e número da coluna, e o comprimento do raio. Com a matriz dos círculos e imagem analisada, é possível plotar uma Figura 25 da posição das bolhas como em (2).

Figura 25 - Detecção dos círculos



Fonte: Autor (2018)

### 3.4.5 Cálculo de área e volume das bolhas

Com a informação dos raios e posicionamentos de cada círculo é possível efetuar diversos cálculos a agregar valor aos resultados.

Inicialmente é preciso saber qual o comprimento real de cada pixel para obter dados em unidades convencionais. O escâner aqui utilizado foi configurado para a captação de 1200 PPI, assim sabemos que 25,4mm possui 1200 pixels, e cada pixel equivale aproximadamente a 0,02116 mm. No algoritmo, insere-se a resolução do escâner em PPIs para que os cálculos sejam efetuados corretamente. A conversão ocorre pela

$$Pixel = \frac{25,4}{PPI} \quad (1)$$

No uso do microscópio óptico, uma amostra padrão de 1 mm foi utilizada para se obter as escalas em cada lente.

$$Pixel = \frac{25,4}{PPI} \quad (1)$$

É calculado a altura e largura da imagem através do comprimento de cada pixel. Através do número de bolhas encontradas, seus raios e espessura do laminado, área das bolhas, volume das bolhas, média dos raios, porcentagem de área das bolhas e porcentagem volumétrica das mesmas são calculadas pelas equações a seguir. A espessura para a obtenção do volume total do laminado é inserido pelo usuário no programa.

O raio médio das bolhas é obtido pela (2):

$$Rm = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r \quad (2)$$

Os cálculos envolvendo a área superficial são obtidos pelas Equações (3), (4) e (5):

$$Ac = \sum_{k=1}^n \pi r^2 \quad (3)$$

$$At = px * py \quad (4)$$

$$Fav = \frac{Ac}{At} \quad (5)$$

Os cálculos envolvendo a área são obtidos pelas Equações (6), (7) e (8):

$$Vc = \frac{4}{3} \sum_{k=1}^n \pi r^3 \quad (6)$$

$$Vt = px * py * t \quad (7)$$

$$F_{vv} = \frac{V_c}{V_t} \quad (8)$$

Sendo:

- Rm - Raio médio em (mm)
- n - Número de bolhas
- r - Comprimento do raio em (mm)
- Ac - Somatório de áreas das bolhas
- At - Área da região analisada (mm<sup>2</sup>)
- Vc - Volume total das bolhas (mm<sup>3</sup>)
- Vt - Volume total da região analisada (mm<sup>3</sup>)
- Fav - Fração de área dos vazios
- Fvv - Fração volumétrica dos vazios
- px - Largura da imagem em (mm)
- py - Altura da imagem em (mm)
- t - Espessura do laminado (mm)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da metodologia aqui proposta, foram realizadas amostras em FVRP, desenvolvido um programa em Python para detecção de bolhas e testado em corpos de prova. Diversas análises são geradas através destes resultados mostrados a seguir.

### 4.1 Amostras fabricadas

Com as amostras fabricadas foram obtidos os dados da Tabela 2 .

Tabela 2 – Pesos e frações das laminações.

Tabela 2 – Pesos e frações das laminações

	Placa de Laminação Manual	Placa de Laminação a Vácuo
<b>Massa de reforço</b>	175 g	175 g
<b>Massa total</b>	479 g	333 g
<b>Densidade fibra</b>	2,5 g/cm <sup>3</sup>	2,5 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidade da resina</b>	1,08 g/cm <sup>3</sup>	1,08 g/cm <sup>3</sup>
<b>Fração mássica resina</b>	63%	47%
<b>Fração mássica de fibra</b>	37%	53%
<b>Fração volumétrica vidro</b>	20%	32%

Fonte: Autor (2018)

É observável que a laminação a vácuo possui fração volumétrica de reforço superior à laminação manual. Este resultado já era esperado uma vez que é característica destes processos de fabricação. Assim como a fração volumétrica, a espessura de cada corpo de prova também está coerente com os processos e a mesma configuração em laminação manual possui maior espessura do que a obtida por vácuo, vide a Tabela 3.

Tabela 3 - Espessuras obtidas em cada amostra

<b>Espessura das amostras</b>	<b>Uma camada de combinado (M01 e V01)</b>	<b>Duas camadas de combinado (M02 e V02)</b>	<b>Três camadas de combinado (M03 e V03)</b>
<b>Laminação manual</b>	1,8mm	3,9mm	4,5mm
<b>Laminação a vácuo</b>	1,2mm	2,3mm	3,3mm

Fonte: Autor (2018)

## 4.2 Resultados obtidos pelo algoritmo

Com a utilização do algoritmo apresentado no Apêndice B, é obtido um relatório gerado pelo programa e uma imagem ilustrando a posição das possíveis bolhas.

### 4.2.1 Relatório impresso pelo programa

Ao utilizar o programa de detecção de bolhas nas imagens obtidas pelo escâner e microscópio óptico, um relatório padrão é impresso para o usuário informando desde os dados básicos da figura até resultados dos cálculos efetuados. Como exemplo, é mostrado a seguir o relatório emitido pelo programa.

*ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF*

*Imagem analisada m01.jpg*

*Altura 2.03578528827 mm*

*Largura 2.54473161034 mm*

*Foi identificado 8 bolhas na imagem.*

*Área das bolhas 0.07971427893869389 mm<sup>2</sup>*

*Volume da região observada 9.32494891486 mm<sup>3</sup>, sendo 0.006945437064095617 mm<sup>3</sup> volume das bolhas*

*Média dos raios 0.052435387673956266 mm*

*Porcentagem em área de 1.5387290954589845 %*

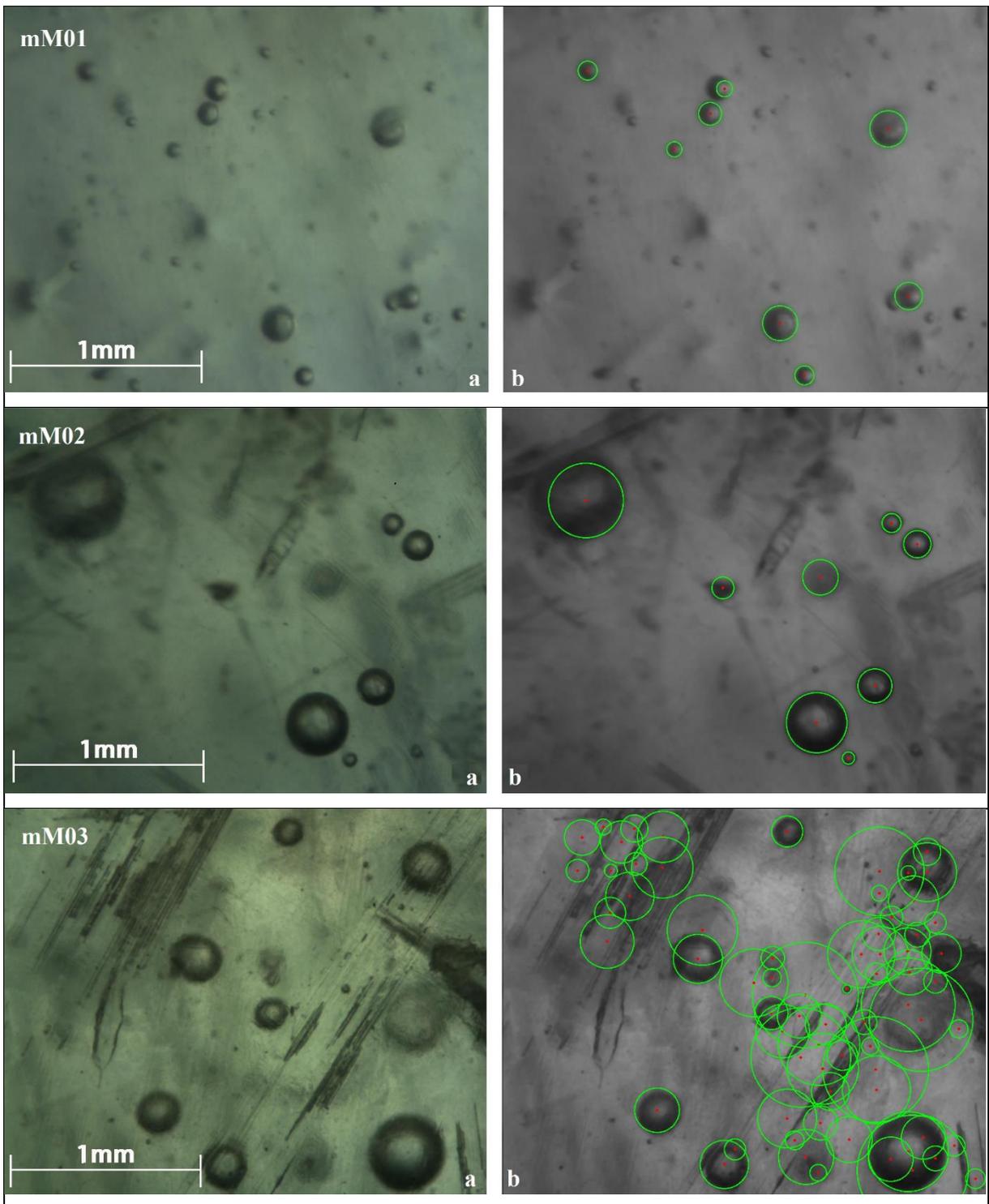
*Porcentagem volumétrica das bolhas 0.07448230684703268 %*

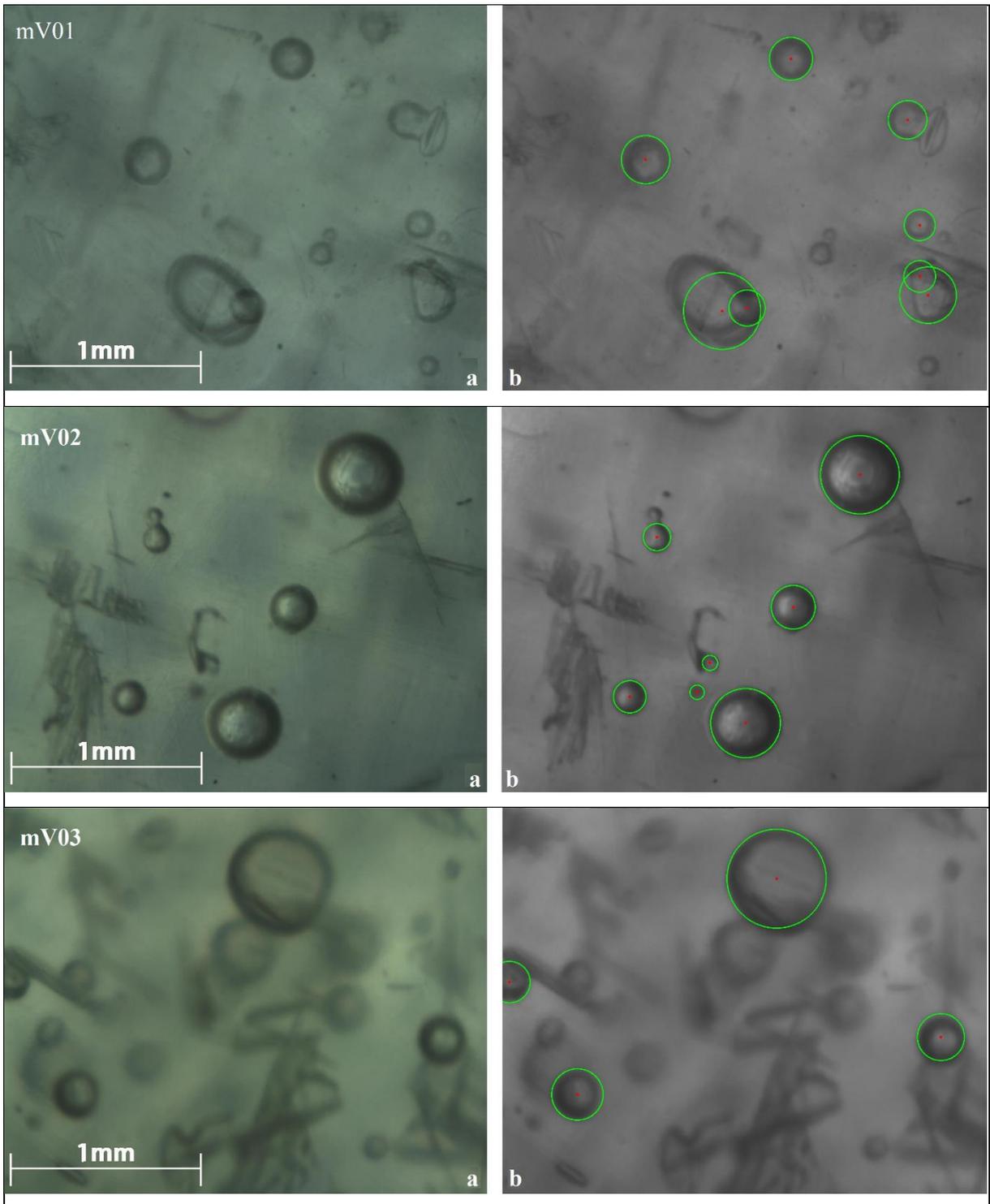
Os relatórios de todas análises efetuadas se encontram no Apêndice C.

#### **4.2.2 Imagens obtidas pelo programa**

Além do relatório, o programa imprime uma imagem mostrando as bolhas que foram identificadas. Na Tabela 4 e Tabela 5, é mostrada a comparação entre a imagem inserida no programa com o resultado obtido. É importante ressaltar que as regiões observadas pelo microscópio óptico e escâner de uma mesma amostra são locais diferentes. A primeira corresponde às imagens obtidas pelo aparato de microscópio óptico e a segunda pelo escâner.

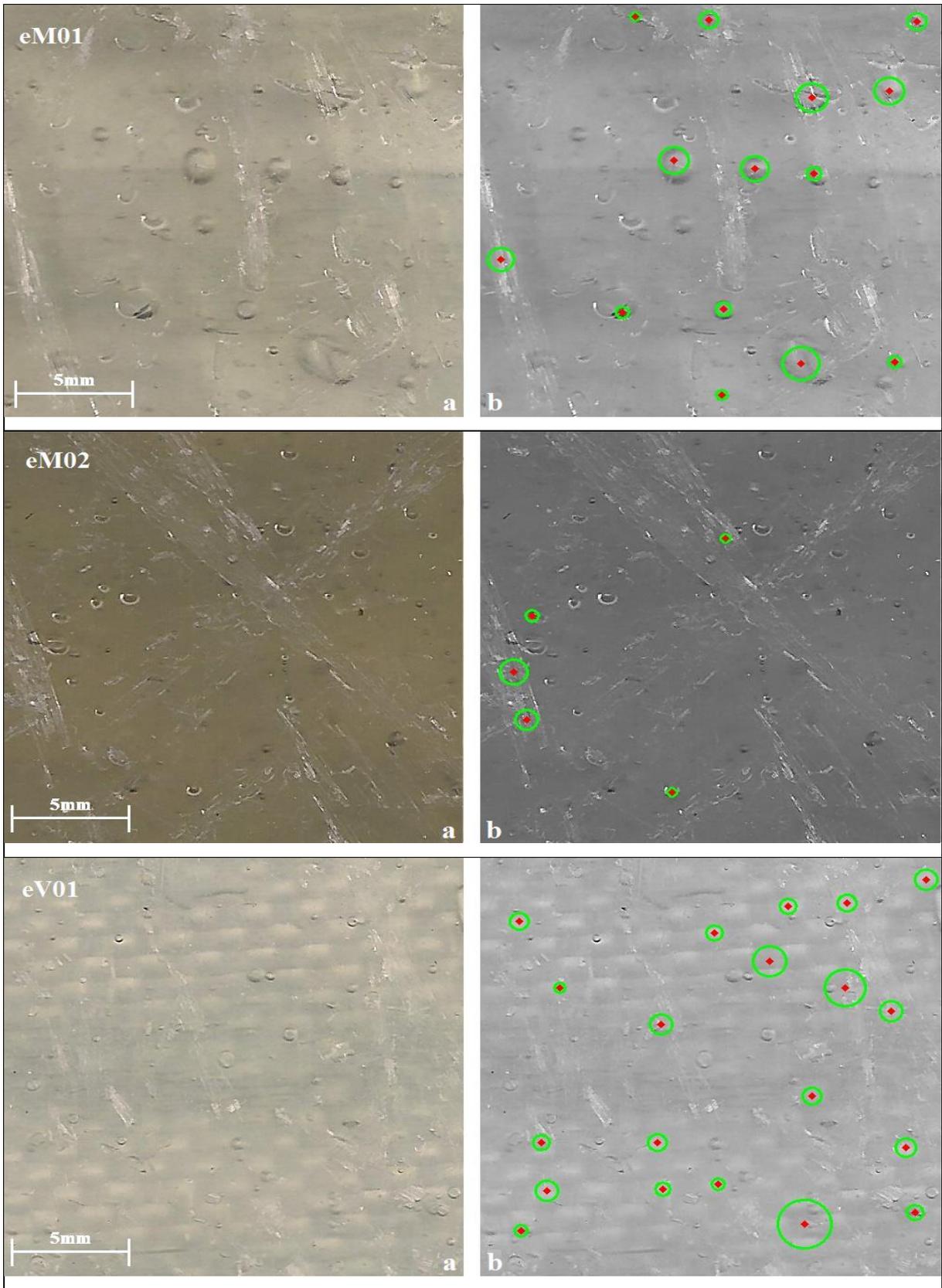
Tabela 4 – a) Imagens obtidas por microscopia óptica e b) resultado gráfico gerado para cada amostra

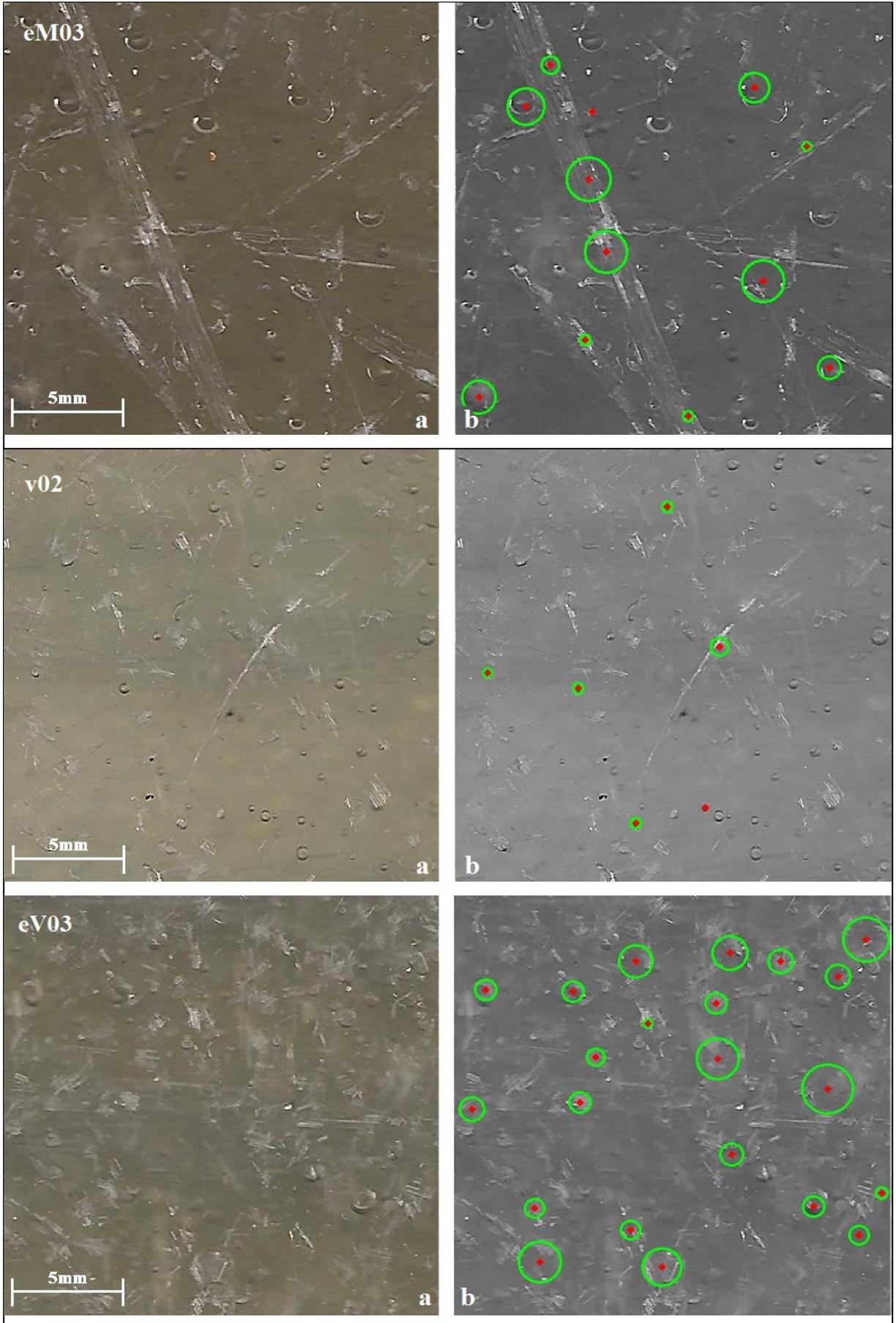




Fonte: Autor (2018)

Tabela 5 – a) Imagem obtida por escâner e b) resultado gráfico gerado para cada amostra





Fonte: Autor (2018)

### 4.2.3 Dados obtidos pelo programa

Computando todos os dados impressos pelo relatório, foi possível criar a Tabela 6 comparativa das informações geradas.

Tabela 6 – Dados obtidos pelo programa das amostras captadas por escâner e microscópio óptico

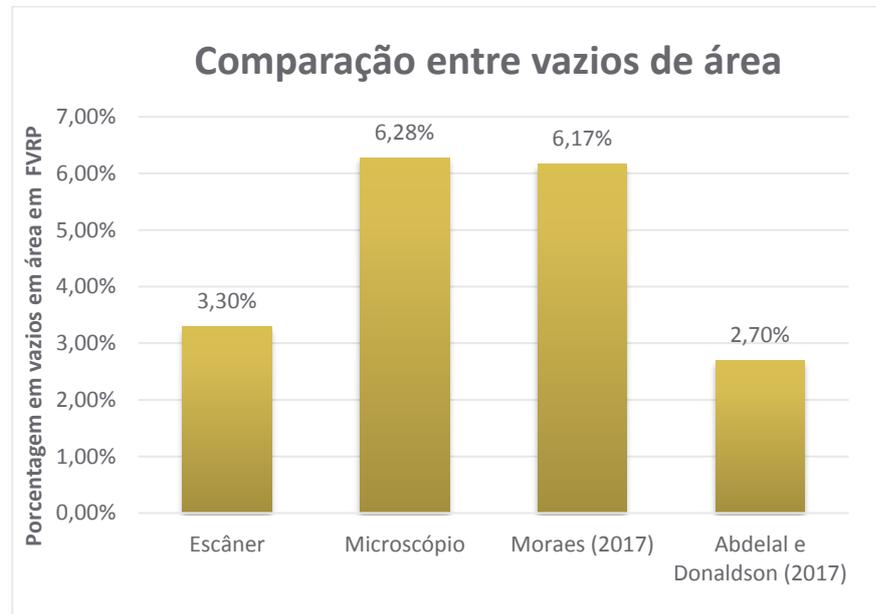
	Espessura da amostra	Número de bolhas	Área das bolhas	Volume das bolhas	Média dos raios	Percentual de Área	Percentual Volumétrico
<b>mM01</b>	1,8mm	8	0,08 mm <sup>2</sup>	0,01 mm <sup>3</sup>	0,05 mm	1,54%	0,07%
<b>mM02</b>	3,9mm	8	0,29 mm <sup>2</sup>	0,06 mm <sup>3</sup>	0,09 mm	5,56%	0,29%
<b>mM03</b>	4,5mm	59	4,62 mm <sup>2</sup>	1,31 mm <sup>3</sup>	0,14 mm	89,11%	5,61%
<b>mV01</b>	1,2mm	8	0,40 mm <sup>2</sup>	0,08 mm <sup>3</sup>	0,11 mm	7,76%	1,31%
<b>mV02</b>	2,3mm	7	0,33 mm <sup>2</sup>	0,07 mm <sup>3</sup>	0,10 mm	6,28%	0,62%
<b>mV03</b>	3,3mm	4	0,35 mm <sup>2</sup>	0,11 mm <sup>3</sup>	0,13 mm	6,79%	0,67%
<b>eM01</b>	1,8mm	14	11,24mm <sup>2</sup>	9,37mm <sup>3</sup>	0,45 mm	2,58%	1,20%
<b>eM02</b>	3,9mm	5	2,29 mm <sup>2</sup>	1,62 mm <sup>3</sup>	0,31 mm	0,53%	0,10%
<b>eM03</b>	4,5mm	12	17,64 mm <sup>2</sup>	20,62 mm <sup>3</sup>	0,59 mm	4,06%	1,05%
<b>eV01</b>	1,2mm	20	17,56 mm <sup>2</sup>	17,30 mm <sup>3</sup>	0,47 mm	4,01%	3,30%
<b>eV02</b>	2,3mm	6	1,27 mm <sup>2</sup>	0,54 mm <sup>3</sup>	0,23 mm	0,29%	0,05%
<b>eV03</b>	3,3mm	22	32,19 mm <sup>2</sup>	36,22 mm <sup>3</sup>	0,62 mm	7,40%	2,52%

Fonte: Autor (2018)

De acordo com os dados da Tabela 6, os valores de percentual volumétrico nas imagens obtidas pelo escâner variam de 0,05% a 3,3%, enquanto os obtidos pelo microscópio óptico variam de 0,07% a 5,61%. Nos dois casos são encontradas variações elevadas, indicando a não coerência dos resultados. Da mesma forma se for comparado às diferenças dos processos de laminação e espessuras dos laminados, não é possível observar uma lógica coerente nos dados.

Mesmo não seguindo uma tendência nas duas variáveis estudadas, é possível observar que existe uma relação com resultados obtidos por outros autores. MORAES (2017), antecessor do método aqui estudado, e ABDEAL e DONALDSON (2017) encontraram resultados de percentual de área próximos aos deste trabalho, a comparação é mostrada no Gráfico 1. Resultados nitidamente destoantes foram retirados do cálculo de média para comparar com os outros autores.

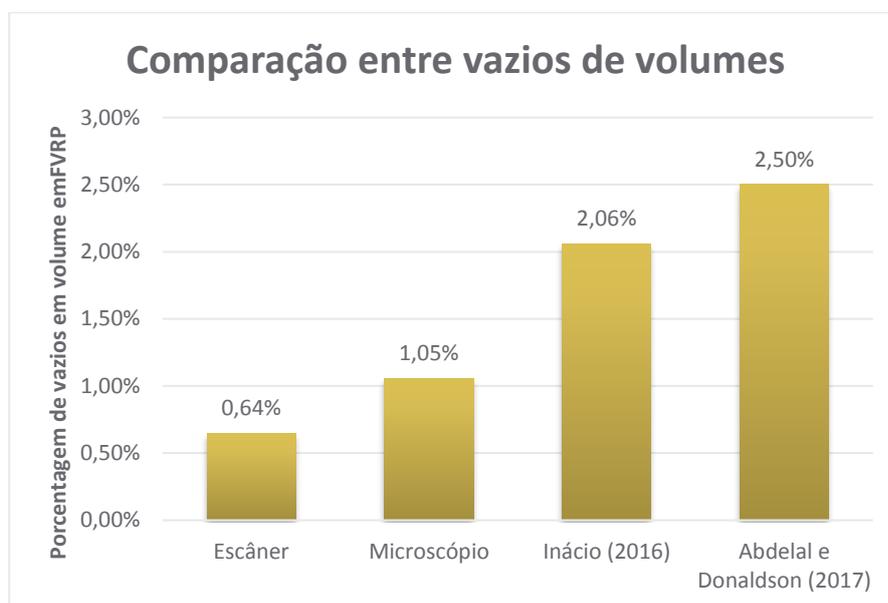
Gráfico 1 – Relação entre resultados obtidos por outros autores de percentual de vazios em área



Fonte: Autor (2018)

Em relação ao percentual de volume de vazios, também é possível traçar relação com dois autores, INÁCIO (2016), que obteve resultado através da absorção de água em FVRP e ABDELAL e DONALDSON (2017), utilizando uma técnica envolvendo raio X. A comparação é mostrada no Gráfico 2. Resultados nitidamente destoantes foram retirados do cálculo de média para comparar com os outros autores.

Gráfico 2 – Relação entre resultados obtidos por outros autores de percentual volumétrico de vazios



Fonte: Autor (2018)

É observável também a diferença dos raios médios obtidos pelos dois métodos de captação de imagem. No escâner o valor médio encontrado foi de 0,46mm enquanto no uso do microscópio o mesmo dado possui 0,11mm. Esta diferença pode ser explicada pela prioridade de captação de bolhas. No uso do escâner, as bolhas superficiais são destacadas pela luz refletida, sendo que estas possuem maior tamanho, já no caso do microscópio, a regulagem focal do equipamento se encontra no interior do laminado, discriminando círculos da face e captando preferencialmente bolhas internas que apresentam menor tamanho.

O fato dos resultados não seguirem uma tendência induz a compreensão da existência de falhas no processo, desta forma, a análise e discussão dos erros são mostrados nos próximos tópicos.

É importante ressaltar que as amostras fabricadas entre os autores não seguem a mesma metodologia.

#### 4.3 Problemas encontrados

Ao observar os resultados obtidos é possível concluir que existem erros no método. Os tópicos a seguir visam catalogar os problemas e discutir sobre sua formação.

### 4.3.1 Tamanho das bolhas

Um dos problemas observados é referente ao tamanho das bolhas. Tanto as pequenas como as grandes podem sofrer problemas de captação pelo programa. As de menor tamanho, são afetadas quando:

- O operador indica o tamanho mínimo do raio das bolhas a serem identificadas. Esta ferramenta pode ser utilizada como filtro para não captar defeitos de ordem de grandeza menor do que os estudados, podendo assim, ignorar algumas bolhas. Em alguns casos, a justificativa para o uso do filtro é que microbolhas pouco influenciam na fração volumétrica final;
- Caso a resolução da imagem não for elevada pode haver dificuldade em determinação de padrões circulares devido a uma baixa concentração de pixels;
- Devido à característica do algoritmo, o programa pode difundir os pixels de pequenas bolhas na tentativa de filtrar erros.

Já em bolhas grandes defeitos ocorrem quando:

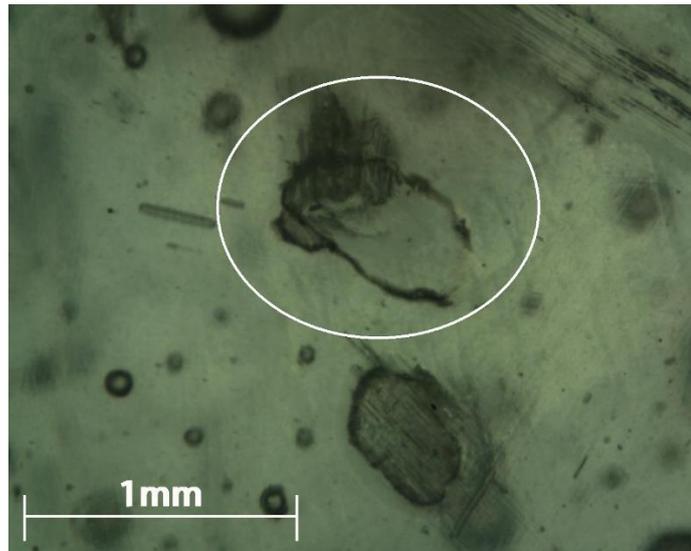
- Existe a possibilidade de identificar um círculo dentro do outro em função dos padrões circulares concêntricos que uma bolha proporciona;
- O operador indica um tamanho máximo referente ao raio do círculo, podendo ser menor do que bolhas existentes na imagem.

### 4.3.2 Defeitos superficiais das amostras

Defeitos superficiais apresentaram-se como grande limitação no método aqui desenvolvido. Segue o que foi observado:

- Defeitos superficiais podem sobrepor bolhas no interior do laminado como mostrado na Figura 26;

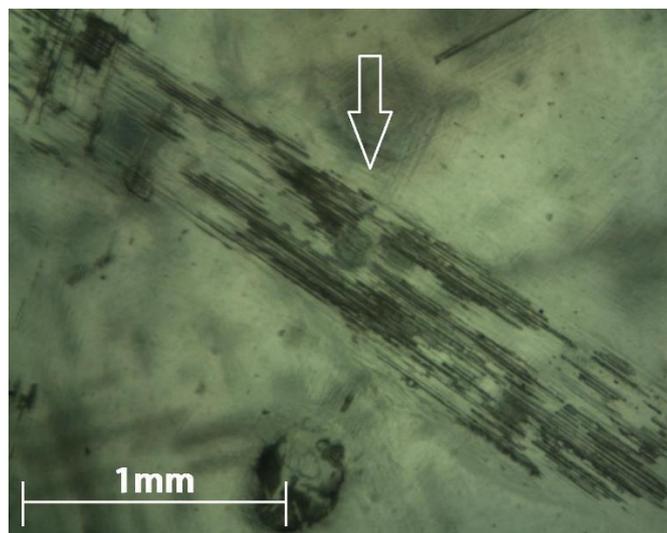
Figura 26 – Defeito superficial sobrepondo bolha, imagem obtida por microscopia óptica



Fonte: Autor (2018)

- Defeitos superficiais em linhas paralelas podem ser resquícios do processo do lixamento, polimento e ou do próprio padrão dos tecidos das fibras os quais podem induzir a identificação de círculos de maneira indesejada. Vide Figura 27;

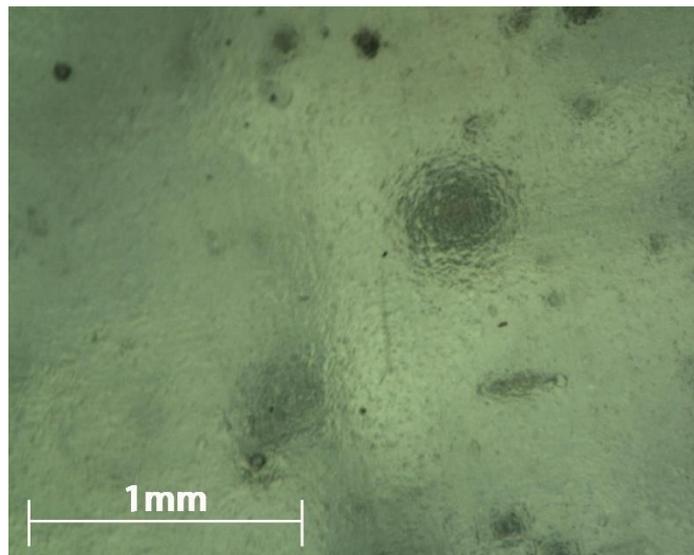
Figura 27 – Defeito superficial por linhas paralelas, imagem obtida por microscopia óptica



Fonte: Autor (2018)

- É necessário que a peça seja polida para que a luz transpasse o material de maneira ordenada, caso contrário, a presença de bolhas é visível apenas a uma fina camada próxima à superfície e todas as posteriores se difundem pelo caminho. Na Figura 28, é pouco perceptível a presença de bolhas devido a rugosidade da peça.

Figura 28 - Laminado com superfície não polida, imagem obtida por microscopia óptica com luz transmitida

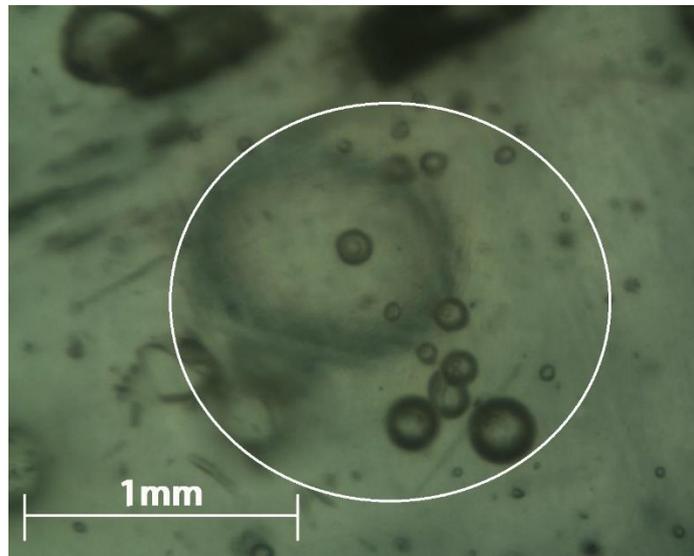


Fonte: Autor (2018)

#### 4.3.3 Bolhas muito próximas ou sobrepostas

Quando as bolhas se encontram muito próximas umas das outras, existe a possibilidade da não identificação de uma parcela. Isso ocorre devido a uma distância mínima entre os centros configurada pelo usuário para diminuir a probabilidade de uma possível identificação simultânea da mesma bolha. O mesmo ocorre quando há bolhas sobrepostas, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Aglomerado de bolhas que atrapalham suas identificações, imagem obtida por microscopia óptica



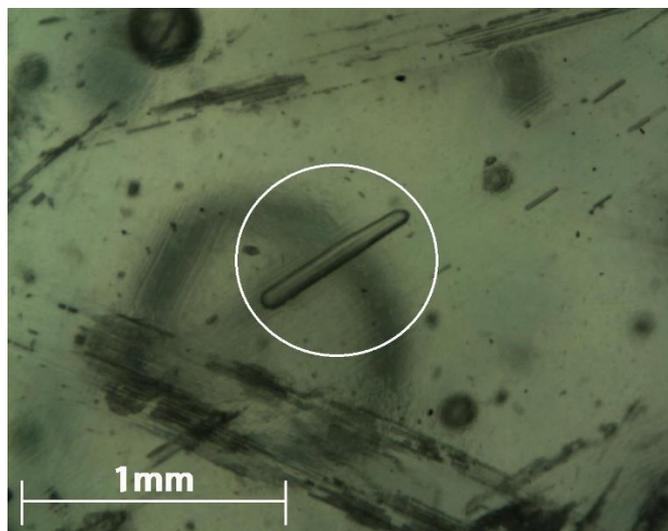
Fonte: Autor (2018)

#### 4.3.4 Formato das bolhas

Nem sempre as bolhas apresentam formato esférico, a existência dos outros formatos pode não ser identificada pelo programa.

- Microbolhas em formato cilíndrico provavelmente oriundas de má impregnação entre as fibras não são identificáveis pelo programa como mostra a Figura 30;

Figura 30 – Bolhas cilíndricas não identificáveis pelo algoritmo, imagem obtida por microscopia óptica



Fonte: Autor (2018)

- Bolhas em formato não esféricas, geralmente encontradas na superfície em contato com o molde do laminado são de difícil identificação pelo algoritmo, vide Figura 31;

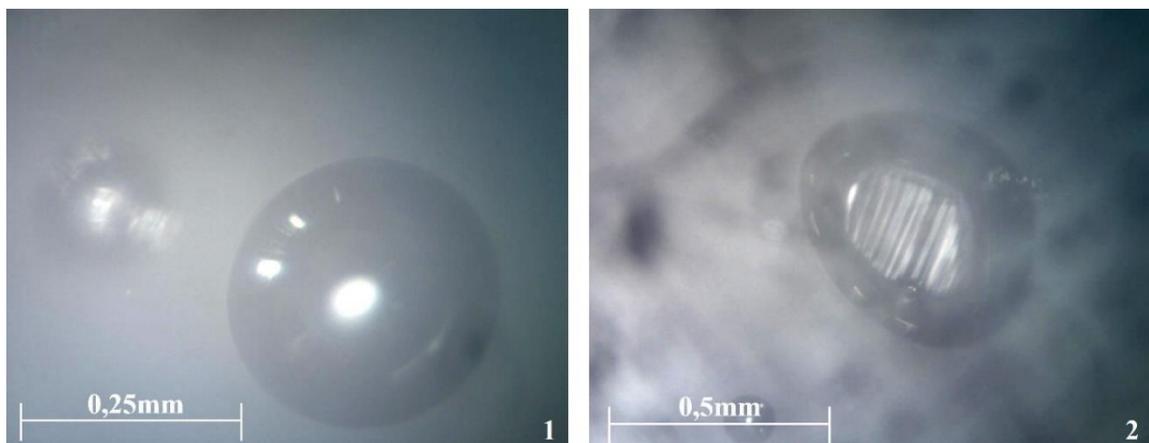
Figura 31 – Bolhas superficiais não esféricas, imagem obtida por microscopia óptica



Fonte: Autor (2018)

- Bolhas superficiais tendem a não possuir formato esférico, divergindo um pouco os resultados de volume calculados como mostrado na Figura 32.

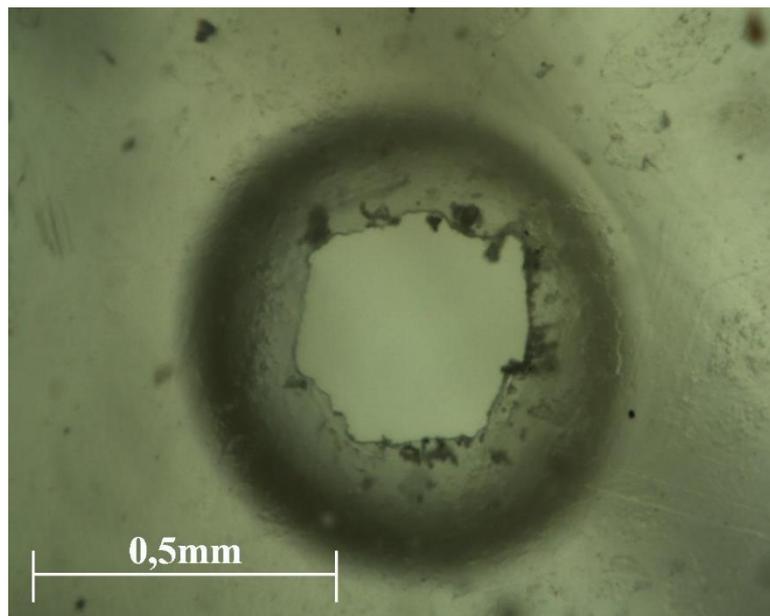
Figura 32 - Comparação entre 1 - bolha esférica interna e 2 - bolha superficial não esférica, imagem obtida por microscopia óptica através de luz refletida



Fonte: Autor (2018)

Além de, na sua grande maioria das amostras analisadas, possuírem tamanhos maiores do que as internas, as bolhas superficiais possuem ligação com a atmosfera como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Bolha superficial em contato com meio exterior, imagem obtida por microscopia óptica com uso de luz transmitida



Fonte: Autor (2018)

A formação de bolhas superficiais pode ser fenômeno reativo entre a resina e alguma impureza presente no molde ou a emissão de voláteis durante a cura da resina, como a saída do estireno. Esta possibilidade poderia explicar a diferença de tamanho destas bolhas em relação às internas e ao fato de possuir ligação com o exterior.

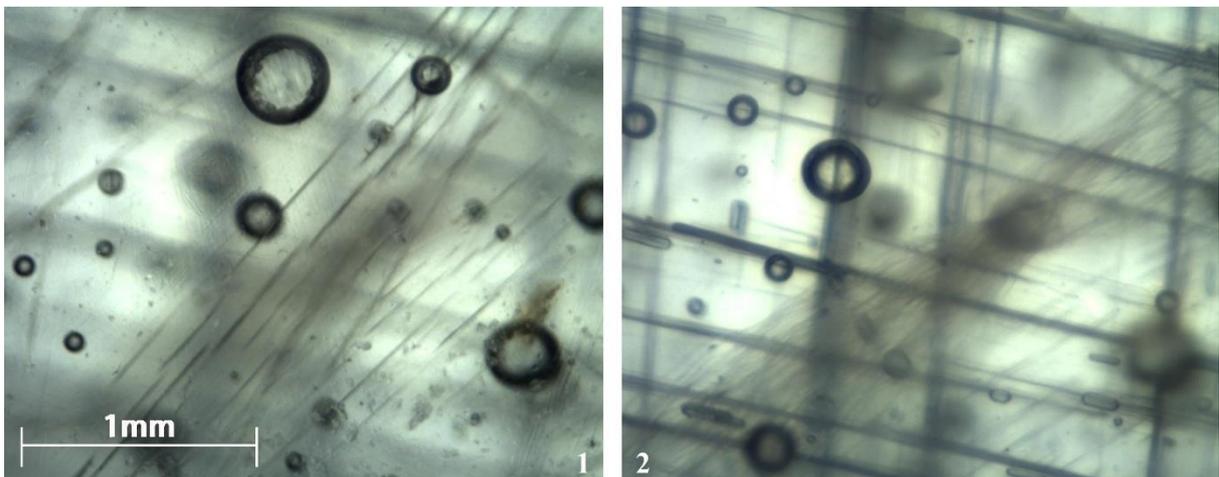
#### 4.3.5 Espessura das amostras

Um fator limitante nas análises com escâner e microscópio é a influência negativa que a espessura elevada das peças representa. Devido a propriedades da luz, como reflexão e refração, determinadas regiões e profundidades do laminado podem ser de difícil observação. Estes problemas são catalogados a seguir:

- Quanto mais espessa a amostra, maior a probabilidade de haver sobreposição de bolhas ou defeitos;

- A influência da coloração da resina faz com que as bolhas posteriores fiquem menos definidas;
- Mesmo com a superfície polida, qualquer irregularidade da mesma afeta na refração da luz podendo difundir bolhas distantes da face frontal;
- Consequência do equipamento de obtenção de imagem, é possível focar apenas em uma região de profundidade de campo definida, inviabilizando a análise em todas as outras profundidades. Este fenômeno é potencializado na análise com microscópio óptico, mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Mesma região de um laminado, porém com foco em 1 - próximo à superfície inferior e 2 - próximo à superfície posterior, imagem obtida por microscopia óptica através de luz transmitida



Fonte: Autor (2018)

#### 4.3.6 Influência dos aparatos de captação de imagem

A captação de imagem pode ser dividida em duas categorias, por imagem transmitida e refletida. O aparato com o microscópio óptico utilizado neste trabalho se encaixa na primeira, sendo que uma fonte luminosa é disposta na face posterior do laminado e a imagem é captada na face contrária, fazendo com que a luz cruze toda espessura do laminado. Já o escâner utiliza o método de luz refletida, a fonte luminosa e o sensor de captação de imagem se encontram na mesma face.

- No uso do método de luz refletida, boa parte da formação da imagem é devido a reflexão superficial do material, minimizando a obtenção de dados internos. A Figura 35 exemplifica este fenômeno;

- Utilizando o método de luz transmitida, é obrigatório a presença de fonte luminosa na face oposta do sensor de captação de imagem, dificultando a operação de inspeção.

Figura 35 – Mesma região obtida com microscópio óptico comparando 1 – luz refletida, 2 – mistura de luz refletida com transmitida e 3 – luz transmitida



Fonte: Autor (2018)

#### 4.4 Comparativo entre análise com microscópio óptico e escâner

Ao observar os resultados e problemas da operação com os aparatos de obtenção de imagem, criou-se um Quadro 5 com uma escala de qualidade em função de variáveis do processo. Utilizou-se os seguintes conceitos: Ruim, Insatisfatório, Aceitável e Bom.

Quadro 5 - Qualificação das variáveis dos equipamentos

Variáveis	Escâner	Microscópio óptico de luz transmitida
Espessura do laminado	Aceitável para laminados de até 2 mm	Ruim no geral, porém bom para laminados de até 0,5mm
Área de obtenção de dados	Aceitável	Insatisfatório
Fonte luminosa	Insatisfatório	Bom
Influência de defeitos	Ruim	Aceitável
Complexidade de operação do equipamento	Bom	Insatisfatório
Tempo de obtenção de dados	Aceitável	Insatisfatório
Aproximação e resolução da imagem	Insatisfatório	Bom

Detecção de bolhas	Ruim	Aceitável
--------------------	------	-----------

Fonte: Autor (2018)

Estaleiros em geral carecem de técnicas de fácil execução com respostas rápidas e confiáveis dos defeitos dos laminados. Com as informações sugeridas pelo Quadro 5 é possível observar que na implementação deste método na indústria naval, a técnica de microscopia óptica pode garantir boa precisão no detalhamento das falhas internas do laminado, entretanto, é de difícil operação. Já a técnica de escâner, apesar de fácil execução apresenta algumas limitações como formato da peça, utilização do gelcoat, baixa detecção de bolhas e fonte luminosa insatisfatória.

## 5 CONCLUSÕES

Para satisfazer os objetivos propostos neste trabalho realizou-se o desenvolvimento de um programa de detecção de bolhas para laminados, fabricação de amostras em PRFV variando espessuras e processos e a realização de testes com dois meios de detecção de imagens diferentes. Por fim, resultados foram analisados e discutidos e as conclusões seguidas aos objetivos são mostradas a seguir.

- Aprimorar algoritmo de cálculo focando em identificar bolhas esféricas em PRFV;

O algoritmo desenvolvido se mostrou capaz de detectar círculos em imagens onde estes se encontram bem definidos e apresentam poucos defeitos superficiais.

- Realizar análise com o uso de escâner de luz branca utilizando algoritmo desenvolvido;

Foi realizado uma análise com as imagens obtidas com o escâner de luz branca e os resultados obtidos não apresentaram convergência esperada devido inúmeros problemas. Defeitos oriundos das amostras como tamanho das bolhas, defeitos superficiais, bolhas próximas e sobrepostas, formato das bolhas, espessura das amostras e características do aparato de captação de imagem influenciaram na análise. As limitações do escâner como a baixa resolução da imagem obtida e uso de luz refletida também foram de grande influência nos resultados. Por fim, limitações do algoritmo por incapacidade de lidar com estes defeitos.

- Realizar análise com o uso de microscópio óptico utilizando algoritmo desenvolvido;

O uso do aparato de microscopia óptica com luz transmitida se mostrou promissor junto a utilização do programa desenvolvido. Os defeitos da captação de imagem são menores neste método, facilitando a obtenção de resultado pelo algoritmo. Entretanto, este aparato ainda possui limitações como incapacidade de analisar grandes áreas, acessibilidade dos dois lados

do laminado, dificuldade de instalação em larga escala, problema de focagem em grandes espessuras e requer superfície polida para a transmissão de luz.

- Verificar influência da espessura do laminado e o processo de fabricação em cada tipo de ensaio;

Não foi possível detectar diferenças de percentual volumétrico ou de área nas variações da espessura das amostras analisadas, mesmo assim, não podemos afirmar que esta variável possua pouca influência. Além dos resultados serem pouco confiáveis, a análise com microscopia óptica mostrou as diversas fontes de erro propiciadas pelo aumento da espessura como sobreposição de defeitos, difusão da luz e dificuldade de focagem. Constatou-se que, apesar dos resultados, laminados mais finos possuem menores fontes de erro deste tipo.

- Comparar resultados e concluir viabilidade do método;

O método estudado apresenta vários problemas de operação e de identificação de bolhas que comprometem o avanço da pesquisa, de qualquer forma, ainda é possível extrair utilidade ao END para implementação na indústria naval. Observou-se que no uso de microscopia óptica com luz transmitida, as imagens obtidas possuem uma ótima qualidade para identificação de círculos com o algoritmo desenvolvido, sendo a dificuldade em focar regiões espessas e a pequena área de observação são os principais problemas deste meio de captação de imagem. Já a extração de dados por escâner, apresenta uma boa área de captação de imagem, sendo o uso da luz refletida o principal empecilho.

De acordo com o que foi discutido, é sugerido para avançar na pesquisa, os seguintes temas:

- Analisar viabilidade do método com uso de escâner e luz transmitida;
- Modificar o algoritmo para melhor identificação de bolhas;
- Testar em laminados com *gelcoat*;
- Sugerir aparato funcional de luz transmitida para o uso em campo;
- Realizar análise estatística em superfície de maior tamanho para validar ensaio por amostragem;
- Criar algoritmo de varredura de bolhas em lote.

## REFERÊNCIAS

ABDELAL, Nisrin; DONALDSON, Steven L. **Comparison of methods for the characterization of voids in glass fiber composites.** *Journal of Composite Materials*, [s.l.], v. 1, n. 1, p.15, 8 jun. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998317710083>.

ANGÉLICO, Ricardo Afonso. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

DANTEC DYNAMICS. FlawExplorer NTD inspection system. <https://www.dantecdynamics.com/products-and-services/flawexplorer-ndt-inspection-system>. Acesso em junho de 2018.

GREENE, Eric. **Marine composites.** 2 Ed. Eric Greene Associates, INC. Anapolis. 1999.

INÁCIO, Eduardo dos Anjos. **Estudo de fibras de laminados usados na indústria náutica.** 2015. 72 f. Trabalho de Conclusão Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

JUNYAN, Liu; LIQIANG, Liu; YANG, Wang. **Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites.** School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China, 2013.

LANDOWSKI, M; BUDZIK, M; IMIELISKA, K. **Water absorption and blistering of glass fibre-reinforced polymer marine laminates with nanoparticle-modified coatings.** *Journal of Composite Materials*, 2014.

LARSSON, Lars; ELIASSON, Rolf. **Principles of yacht design.** London: Adlard coles nautical, 2000.

MENDONÇA, Paulo de Tarso. **Materiais Compostos & Estruturas – Sanduíche.** I Ed. Manole, 2005.

MIRANDA, Marcos. **Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a peças compósitas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas.** 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia e Institutos de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

MORAES, Guilherme Santos. **Proposta de técnica de ensaio não destrutível para determinação do índice de vazios em compósitos.** Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos avançados em construção em .1.** Ed. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2007.

NASSEH, Jorge. **Técnica e prática de laminação em composites. .1.** Ed. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008.

YANG. L. X; HUNG. Y.Y. **Digital shearography for nondestructive evaluation and application in automotive and aerospace industries.** Department of Mechanical Engineering, Oakland University, 2004.

Shearography . <https://en.wikipedia.org/wiki/Shearography>. Acesso em maio de 2018.

.

## APÊNDICE A – Algoritmo de diferenciação de imagens

####DIFERENCA ENTRE IMAGENS, ANALOGIA A SHEAROGRAFIA

```
import cv2    #importando biblioteca de imagem
import numpy  #importando biblioteca de manipulacao numerica
```

#MODIFICACAO MATEMATICA DAS IMAGENS

```
titulo='results'
```

```
img1=cv2.imread('SHElapis1.jpg',1) #abrindo imagem 1
```

```
img2=cv2.imread('SHElapis2.jpg',1) #abrindo imagem 2
```

```
img0 = cv2.subtract(img1, img2)    #subtraindo 1 de 2
```

```
img00= cv2.subtract(img2,img1)    #subtraindo 2 de 1
```

```
img=img00+img0                    #somando resultados para garantir que as subtrações
```

não sejam negativas

#GRAVA E MOSTRA IMAGEM

```
cv2.imshow(titulo,img)
```

```
k=cv2.waitKey(0)                #Continua após clicar qualquer tecla
```

```
cv2.imwrite('SHElapis11.jpg',img) #Grava arquivo
```

```
#cv2.destroyAllWindows()        #Fechar janelas
```

## APÊNDICE B – Programa em Python de detecção de bolhas em laminados

```

import cv2
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt #para histogram
x'x'x'
print 'ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF'

##ENTRADA DE DADOS
name='m01.jpg'; espes=1.8 #M01 #Espessuras dos laminados
name='m02.jpg'; espes=3.9 #M02
name='m03.jpg'; espes=4.5 #M03
name='v01.jpg'; espes=1.2 #V01
name='v02.jpg'; espes=2.3 #V02
name='v03.jpg'; espes=3.3 #V03

img = cv2.imread(name,0) #leitura da imagem em BGR
img = cv2.medianBlur(img,19) #barroar imagem para melhorar na deteccao de
circulos
cimg = cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_GRAY2BGR) #transforma imagem b&w
em colorido

print 'Imagem analisada',name
print

##DILATAÇÃO E RETRAÇÃO
kernel = np.ones((5,5),np.uint8)
erosion = cv2.erode(img,kernel,iterations = 3) #Erudindo contornos
dilation = cv2.dilate(erosion,kernel,iterations = 5)#Exapandindo contornos

cv2.imshow('dilatacao',(dilation)) #Mostrando imagem tratada
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
dilation = cv2.medianBlur(dilation,9) #mais uma embarçada

```

```

cv2.imwrite('transit.jpg',dilation) #Salvando imagem de transição
img = cv2.imread('transit.jpg',0) #Importando imagem de transição para
continuar

```

### ## IDENTIFICAÇÃO DOS CIRCULOS

```

circles = cv2.HoughCircles(img,cv2.HOUGH_GRADIENT,1,70,
param1=27,param2=28,minRadius=2,maxRadius=150)
#param1 quanto menor, mais circulos
#parm2 Quanto menor, mais circulos
circles = np.uint16(np.around(circles))
for i in circles[0,:]:
cv2.circle(cimg,(i[0],i[1]),i[2],(0,255,0),2) #desenha circulo
cv2.circle(cimg,(i[0],i[1]),2,(0,0,255),3) #desenha centro do circulo

```

### #Mostrar imagem

```

cv2.imshow('detected circles',(cimg)) #cimg é a imagem com os circulos
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
cv2.imwrite('v022.jpg',cimg)

```

### ##CALCULOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

```

nlinha=len(img) #número de linhas de pixel na imagem
ncoluna=len(img[0]) #Número de colunas de pixel na imagem
areap=nlinha*ncoluna #Calculando área
#print 'Àrea em pixels ',areap

```

### # Cálculo de area e volume

```

largura=ncoluna*1/float(503) #largura da imagem em mm
altura=nlinha*1/float(503) #altura da imagem em mm
areatotal=altura*largura #area da região estudada em mm2
volumetotal=espes*areatotal #volume da regioao estudada em mm3
nbolhas=len(circles[0]) #

```

```

print 'Altura',altura,'mm'
print 'Largura',largura,'mm'
#print 'Area total',areatotal,'mm2'
#print 'Volume total',volumetotal,'mm3'
print
print 'Foi identificado',len(circles[0]),'bolhas na imagem.'

#Somatório dos dados das bolhas
volumeb=0
areab=0
somaraio=05
for i in range(0,nbolhas-1):
areab=(circles[0,i,2]/float(503))**2*3.1415+areab #soma da are de cada bolha com
correcao de unidade
volumeb=4/float(3)*3.1415*(circles[0,i,2]/float(503))**3+volumeb
somaraio=somaraio+circles[0,i,2]

raiomedio=somaraio/(float(nbolhas))/float(503)

#porcentagem de bolhas
pbolhas=areab/areatotal*100    #Percentual de bolhas em área
pvbolhas=volumeb/volumetotal*100  #Percentual de bolhas em volume

print
print 'Área das bolhas',areab,'mm2'
print 'Volume da região obsrveda',volumetotal,'mm3, sendo',volumeb,'mm3 volume
das bolhas'

print 'Media dos raios',raiomedio,'mm'
print
print 'Porcentagem em area de',pbolhas,'% '
print 'Porcentagem volumétrica das bolhas',pvbolhas,'% '

```

**APÊNDICE C – Relatórios emitidos em todas as amostras****Relatório M01 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada m01.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 8 bolhas na imagem.

Área das bolhas 0.07971427893869389 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 9.32494891486 mm<sup>3</sup>, sendo 0.006945437064095617 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.052435387673956266 mm

Porcentagem em área de 1.5387290954589845 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 0.07448230684703268 %

**Relatório M02 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada m02.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 8 bolhas na imagem.

Área das bolhas 0.2880268112992028 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 20.2040559822 mm<sup>3</sup>, sendo 0.058056385162629245 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.09095427435387674 mm

Porcentagem em área de 5.559797325134278 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 0.2873501499589121 %

### **Relatório M03 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada m03.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 59 bolhas na imagem.

Área das bolhas 4.616536990778985 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 23.3123722872 mm<sup>3</sup>, sendo 1.3089072127580847 mm<sup>3</sup>

volume das bolhas

Media dos raios 0.1374128112679853 mm

Porcentagem em area de 89.11326656341555 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 5.614646148558049 %

### **Relatório V01 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada v01.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 8 bolhas na imagem.

Área das bolhas 0.4022591113359605 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 6.21663260991 mm<sup>3</sup>, sendo 0.08137870611847284 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.1143141153081511 mm

Porcentagem em área de 7.7648296737670925 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 1.3090480204473303 %

### **Relatório V02 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada v02.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 7 bolhas na imagem.

Área das bolhas 0.3251771419198527 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 11.9152125023 mm<sup>3</sup>, sendo 0.07348977549029687 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.10167566032377166 mm

Porcentagem em área de 6.276912193298341 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 0.6167726801009642 %

### **Relatório V03 com microscópio**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS PVRF

Imagem analisada v03.jpg

Altura 2.03578528827 mm

Largura 2.54473161034 mm

Foi identificado 4 bolhas na imagem.

Área das bolhas 0.35195964965673154 mm<sup>2</sup>

Volume da região observada 17.0957396772 mm<sup>3</sup>, sendo 0.11492038614750426 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.13469184890656064 mm

Porcentagem em área de 6.793896408081054 %

Porcentagem volumétrica das bolhas 0.6722165189522 %

### **Relatório M01 com escâner**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP

Imagem analisada M01.jpg

Altura 20.8333333333 mm

Largura 20.875 mm

Foi identificado 14 bolhas na imagem.

Área da região observada 250500 mm<sup>2</sup>, sendo 11.235225694444445 mm<sup>2</sup> área das bolhas

Volume da região observada 782.8125 mm<sup>3</sup>, sendo 9.372384066358027 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.4523809523809524 mm

Porcentagem em área de 2.5834291417165667 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 1.1972706192553166 %

### **Relatório M02 com escâner**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP

Imagem analisada M02.jpg

Altura 20.8333333333 mm

Largura 20.8333333333 mm

Foi identificado 5 bolhas na imagem.

Área da região observada 250000 mm<sup>2</sup>, sendo 2.285223090277778 mm<sup>2</sup> área das bolhas

Volume da região observada 1692.70833333 mm<sup>3</sup>, sendo 1.6219569347993827 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.3083333333333335 mm

Porcentagem em área de 0.5265154 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 0.09582022507122506 %

### **Relatório M03 com escâner**

#### **ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP**

Imagem analisada M03.jpg

Altura 20.8333333333 mm

Largura 20.875 mm

Foi identificado 12 bolhas na imagem.

Área da região observada 250500 mm<sup>2</sup>, sendo 17.63821354166667 mm<sup>2</sup> área das bolhas

Volume da região observada 1957.03125 mm<sup>3</sup>, sendo 20.622153742283945 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.5902777777777778 mm

Porcentagem em área de 4.055732934131736 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 1.05374677804884 %

**Relatório V01 com escâner**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP

Imagem analisada V01.jpg

Altura 20.9583333333 mm

Largura 20.875 mm

Foi identificado 20 bolhas na imagem.

Área da região observada 252003 mm<sup>2</sup>, sendo 17.556403645833335 mm<sup>2</sup> área das bolhas

Volume da região observada 525.00625 mm<sup>3</sup>, sendo 17.30097497106481 mm<sup>3</sup> volume das bolhas

Media dos raios 0.46875 mm

Porcentagem em área de 4.012844489946548 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 3.2953845732436156 %

**Relatório V02 com escâner**

ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP

Imagem analisada V02.jpg

Altura 20.8333333333 mm

Largura 20.875 mm

Foi identificado 6 bolhas na imagem.

Área da região observada 250500 mm<sup>2</sup>, sendo 1.2707803819444445 mm<sup>2</sup> área das bolhas

Volume da região observada 1000.26041667 mm<sup>3</sup>, sendo 0.5372183159722222 mm<sup>3</sup>  
volume das bolhas

Media dos raios 0.2291666666666666 mm

Porcentagem em área de 0.29220339321357286 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 0.05370784517920681 %

### **Relatório V03 com escâner**

#### ANALISE DE BOLHAS EM LAMINADOS FVRP

Imagem analisada V03.jpg

Altura 20.8333333333 mm

Largura 20.875 mm

Foi identificado 22 bolhas na imagem.

Área da região observada 250500 mm<sup>2</sup>, sendo 32.19492100694444 mm<sup>2</sup> área das  
bolhas

Volume da região observada 1435.15625 mm<sup>3</sup>, sendo 36.21602888695988 mm<sup>3</sup>  
volume das bolhas

Media dos raios 0.6231060606060607 mm

Porcentagem em área de 7.4029039920159665 %

Porcentagem volumétrica das bolhas de 2.523490308944401 %