

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

**GUILHERME SANTOS MORAES**

**PROPOSTA DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL PARA  
DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS EM COMPÓSITOS**

Joinville

2017

**GUILHERME SANTOS MORAES**

**PROPOSTA DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL PARA  
DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS EM COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Orientador: Dr. Gabriel Benedet Dutra.

Joinville

2017

**GUILHERME SANTOS MORAES**

**PROPOSTA DE TÉCNICA DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA  
DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS EM COMPÓSITOS**

Este trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville/SC, 01 de dezembro de 2017.

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

---

Professor Dr. Gabriel Benedet Dutra  
Presidente/Orientador

---

Professora Dra. Tatiana Renata Garcia  
Membro 1

---

Professor Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Membro 2

Joinville  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Solange Santos, por todo o companheirismo, parceria e motivação nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai Antônio Moraes, por seu carinho e amor, além de seus exemplos e peripécias.

Aos meus irmãos Victor, Thiago e Alexandre, por serem exemplos de determinação e coragem por enfrentarem com objetividade todos os obstáculos por eles passados. Em especial ao Thiago, por ter convencido os meus pais a deixar eu morar com ele em Joinville.

À minha namorada Giovanna Spada Redivo, por todo o seu amor, carinho, dedicação e compreensão ao longo de toda nossa história.

Aos meus avós João Manoel dos Santos e Carmelita Perito dos Santos, por serem tão acolhedores e motivadores.

Ao meu orientador Professor Dr. Gabriel Benedet Dutra, por sua dedicação, confiança e compartilhamento de seus conhecimentos durante a elaboração do presente trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, e todo seu corpo docente e administrativo, por ter me proporcionado minha formação.

Aos muitos colegas que fiz dentro da UFSC, principalmente aos grupos de amigos Sedentários e Rapeize, por todas as histórias por mim vivida com eles.

Ao meu amigo em especial Evandro Machado, pelo aprendizado adquirido ao longo de quase um ano trabalhando ao seu lado e por todas as histórias vividas nesse período.

À empresa Naval Norte e sua equipe, por terem me proporcionado experiências profissionais e pessoais incríveis, além da amizade construída.

## RESUMO

A produção de embarcação de recreio de fibra no Brasil vem crescendo muito e o principal fator para esse aumento é a utilização de compósitos que proporcionam melhores propriedades mecânicas e redução do peso. Existem diversos tipos de matrizes e de reforços que formam o compósito de maneira a garantir resistência ao laminado. É dever do engenheiro ter o conhecimento adequado de cada componente para que, os combinando, suportem os esforços exigidos. Há inúmeras maneiras dos compósitos apresentarem falhas/danos internos desde a má produção até a utilização inadequada. Com o desenvolvimento em tecnologia, foi possível criar métodos de análise que não comprometem a integridade da peça, conhecidos como ensaios não destrutíveis (END). Estes END buscam por diversos tipos de falhas/danos internos como porosidade, delaminação, quebra da fibra, rachadura da matriz, entre outros, que comprometam a utilização da peça. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma técnica preliminar de END para analisar a porosidade em placas planas de fibra de vidro. A técnica consiste em um scanner que utiliza luz branca de alta intensidade que é transmitida através do corpo de prova que gera uma imagem digitalizada, seguido de um pré-tratamento de imagem via software ImageJ que a transforma em preto e branco. Um código de programação em Python foi desenvolvido para identificar, a partir da imagem tratada, a porcentagem volumétrica de possível porosidade (PVPP) na placa laminada e quantificar a mesma. Realizou-se a verificação da técnica de duas maneiras, a primeira, utilizou-se uma placa plana de fibra de vidro fabricada em laboratório pelo processo de laminação manual e se comparou o resultado com o obtido na literatura. Na segunda, foi checado a capacidade do código desenvolvido de analisar amostras de imagens de outros métodos de ensaios e comparado seus resultados. Todo o desenvolvimento da técnica está disposto no texto e no final são levantadas as vantagens e desvantagens da proposta, assim como sugestões de melhorias. Como resultado, conclui-se que mesmo sendo um desenvolvimento preliminar de um END, a técnica possui potencial de identificação de poros e de calcular o PVPP. Há algumas limitações que precisam ser desenvolvidas como o tamanho do corpo de prova, o pré-tratamento de imagem e a incapacidade de diferenciar entre falha/dano e sujeira superficial.

**Palavras-chave:** Compósito. Falhas internas. Ensaio não destrutível. Scanner. Industria naval.

## **ABSTRACT**

The production of fiber boats in Brazil has been growing a lot over the years. The main factor for its increased production is the use of composites that provides mechanical properties and weight reduction. There are several types of matrix and reinforcement that form the composite in order to guarantee resistance to lamination. It is the engineer's duty to have the appropriate knowledge of each component so that when combined it supports the required efforts. There are numerous ways for the composite to have internal failures/damage, from poor production to improper use. With the development in technology, it was possible to create analysis methods that do not compromise the integrity of the part, known as non-destructive testing (NDT). NDT searches for various types of internal failure/damage such as porosity, delamination, fiber breakage, matrix crack, and others that compromise the use of the part. This work presents a development of a preliminary NDT technique to analyze the porosity of fiberglass flat plates. The technique consists of a scanner that uses white light of high intensity that is transmitted through the specimen that generates a scanned image, followed by an image pretreatment by ImageJ software that turns it into black and white. A programming code in Python was developed to identify, from the treated image, the porosity in the laminated plate and quantify it. The technique was verified in two ways, the first one, using a flat of fiberglass manufactured in the lab by the manual lamination process, and the result was compared with obtained in the literature. In the second, the ability to analyze the code image samples of other test methods was tested and compared its results. The entire development of the technique is provided in text and in the end, the advantages and disadvantages of the proposal are raised, as well as suggestions for improvements. As a result, it is concluded that, even though it is a preliminary development of a NDT, the technique has the potential to identify pores and to calculate the VPPP. There are some limitations that need to be developed such as the size of the specimen, the image pretreatment and the inability to differentiate between failure/damage and surface dirt.

**Keywords:** Composite, Internal failure, Non-destructive test, Scanner, Naval.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração de um laminado com núcleo inercial. ....	17
Figura 2 – Pulso-ultrassônico. ....	22
Figura 3 - Esquemas de tipos de varreduras de ultrassom.....	23
Figura 4 – Princípio de um sistema de varredura de TC helicoidal. ....	25
Figura 5 – Disposição esquemática para realizar termografia infravermelha pulsada. ....	27
Figura 6 - (a) TIV ativo; (b) Curva temperatura x Tempo. ....	28
Figura 7 - Sistema completo de TIV e o operador. ....	28
Figura 8 - Sistema de shearografia digital. ....	30
Figura 9 – Modos de excitação (a) vibracional, (b) a vácuo, (c) mecânica e (d) térmico. ....	30
Figura 10 - Etapa da laminação: (A) pesagem da resina, (B) dose de resina sobre o molde, (C) posicionamento da manta, (D) impregnação da resina, (E) posicionamento do tecido, (F) aplicação de resina sobre o tecido, (G) compactação do laminado e (H) laminado pronto. ....	34
Figura 11 - Fluxograma da técnica.....	35
Figura 12 - Configuração da digitalização. ....	36
Figura 13 – Imagem da amostra com impurezas e poros. ....	37
Figura 14 - Amostra original, cinza e pb. ....	38
Figura 15 - Configuração de limites de cor preta e branca.....	38
Figura 16 – Imagens de amostras: (a) 65/90, (b)70/90, (c)70/100 e (d) 75/85.....	39
Figura 17 - Corpo de prova digitalizado marcado com as regiões das amostras.....	41
Figura 18 - Imagens das amostras retiradas de diferentes regiões. ....	41
Figura 19 - Amostras em preto e branco. ....	42
Figura 20 - Resultado do processamento da imagem do corpo de prova da região 1. ....	42
Figura 21 - Imagem dos corpos de prova geradas. ....	44
Figura 22 - Resultado da amostra 2 do CP fabricado.....	55
Figura 23 - Resultado da amostra 3 do CP fabricado.....	55
Figura 24 - Imagens do artigo tratadas via software. ....	56
Figura 25 - Resultado da amostra com 100% de vácuo. ....	57
Figura 26 - Resultado da amostra com 80% de vácuo. ....	57
Figura 27 - Resultado da amostra com 40% de vácuo. ....	58
Figura 28 - Resultado da amostra com 0% de vácuo. ....	58

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Resultados e comparações das análises. ....	44
---	----

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Quadro de END e tipos de falhas identificáveis. ....	32
---	----

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resultados obtidos pelo método END desenvolvido. ....	43
Tabela 2 - Resultados obtidos via END desenvolvido e comparados com os do artigo. ....	43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
1.1.1. Objetivo Geral .....	15
1.1.2. Objetivos Específicos .....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS .....</b>	<b>16</b>
2.1.1. Matriz.....	16
2.1.2. Reforços.....	17
2.1.3. Núcleos Inerciais .....	17
<b>2.2. MÉTODO DE LAMINAÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVEIS.....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Inspeção visual .....	19
2.3.2. Martelo especial.....	20
2.3.3. Ultrassom.....	20
2.3.4. Tomografia Computadorizada de raio-X.....	24
2.3.5. Termografia infravermelha.....	26
2.3.6. Shearografia.....	29
<b>2.4. TIPO DE FALHA.....</b>	<b>31</b>
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1. CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA .....</b>	<b>33</b>
3.1.1 Laminação manual.....	33
<b>3.2. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA LUZ BRANCA DE ALTA INTENSIDADE .....</b>	<b>35</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1. ETAPA 1 .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2. ETAPA 2 .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3. ETAPA 3 .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4. ETAPA 4 .....</b>	<b>39</b>
<b>4.5 VERIFICAÇÃO DA FERRAMENTA.....</b>	<b>40</b>
<b>4.6 VANTAGENS, DESVANTAGENS E APRIMORAMENTOS.....</b>	<b>45</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DA PROGRAMAÇÃO EM PYTHON.....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADO DE OUTRAS ÁREAS DO CORPO DE PROVA FABRICADO .....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADO DO TRATAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS DO ARTIGO .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO ARTIGO .....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria naval no Brasil tem crescido muito nos últimos anos com a produção de embarcações de recreio. O uso de materiais compósitos tem sido explorado pelo fato de se obter, além de uma estética agradável, boas propriedades mecânicas com este tipo de material. As estruturas e componentes principais podem ser mais leves e resistentes à corrosão, com o uso de compósitos, do que as tradicionais de metais, o que a indústria de embarcação de recreio tem reconhecido, e também estão percebendo a economia de combustível através da redução de peso. (GREENE, 2014).

O material compósito não tem uma definição universal, porém, alguns autores o classificam de maneira parecida. De acordo com Callister (1999), é qualquer material multifásico, que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem, de tal modo que é obtida melhor combinação de propriedades. Esses materiais podem ser combinados de matriz (resina) com reforços (fibra de vidro, fibra de poliaramida, outros) ou com núcleos (espuma de polyvinyl chloride - PVC, poliuretano, outros), com finalidade de obter as melhores propriedades para tal aplicação. Os materiais compósitos utilizados na indústria náutica em sua maioria são materiais fibrados com resinas termofixas, devido à facilidade de processamento, custo e combinação com propriedades mecânicas (SHENOI; WLLICOME, 1993). As resinas, como epóxi, poliéster, estervinílicas, entre outras, ocupam os espaços entre as fibras mantendo-as em posições determinadas e promovem uma barreira contra a água. (NASSEH, 2011).

As propriedades mecânicas do compósito são características adquiridas através dos tipos de reforçadores presentes, e alguns exemplos são: fibra de vidro, carbono, aramida e outros. Fibra de vidro do tipo E e resina de poliéster são vasta maioria nos compósitos navais de hoje. (SHENOI; WELLCOME, 1993).

Para o sucesso de um projeto, o engenheiro deve ter conhecimento de cada componente do compósito, combinando-os de forma a suportar os esforços que serão exigidos pelas estruturas, evitando falhas que venham prejudicar a embarcação.

Construções em material compósito não falham de uma hora para outra, a não ser sob fortes impactos. O modo mais comum de falha é um decréscimo de propriedades mecânicas ao longo do tempo, devido à baixa qualidade de fabricação e dos materiais utilizados. Assim, os

efeitos desta baixa qualidade só serão identificados algum tempo após o início do uso da embarcação (NASSEH, 2007).

A partir desse pressuposto, pode-se identificar outros modos de falhas que ocorrem na laminação de compósitos navais, como bolhas de ar, bolhas no casco após a imersão, falhas nas juntas, esmagamento do núcleo, cisalhamento do núcleo, delaminação, falha na fibra, impacto local, resina rachada, entrada de umidade, ondulações nas camadas, excesso ou falta de resina, separação do lamidado com o núcleo, danos por altas temperaturas e vazios. (GREENE, 2014).

Graças à tecnologia atual, é possível a utilização de ensaios que não causam dano à estrutura analisada. Esses ensaios não-destrutivos, conhecidos como END, são um conjunto de técnicas que possibilitam a análise, inspeção e caracterização de materiais, componentes e estruturas, sem qualquer prejuízo a sua utilidade e funcionabilidade futuras. (MALDAGUE X, 2001). Com esses ensaios é possível fazer o reconhecimento de possíveis fragilidades na estrutura antes de acontecer a falha, e sem destruição do material.

Existem diversas técnicas que podem ser empregadas nesse tipo de inspeção. A análise mais tradicional e básica, é feita através de uma detalhada **inspeção visual**, na procura de deformações explícitas na superfície. Outro método utiliza um **martelo especial** para bater contra a superfície do laminado, fazendo assim barulho, e quando ocorre determinado som, é possível caracterizar uma fragilidade interna. Com a ajuda de aparelhos eletrônicos, cita-se a **inspeção ultrasônica**, que utiliza as propriedades físicas da condução do som em diferentes meios para detectar os defeitos, e com auxílio de uma tela, mostrar tais diferenças. Também pode-se citar a inspeção por **tomografia computadorizada de raio-X**, no qual emprega-se radiação eletromagnética para analisar possíveis defeitos através da absorção de energia radiográfica e com a tomografia computadorizada gera-se imagem 3D interna do elemento examinado.

Outra técnica de análise examina as propriedades termodinâmicas conhecidas como **termografia infravermelha**, ou seja, o material é aquecido a certa temperatura e é realizada a análise com base na difusão do calor pelo compósito, o que caracteriza as imperfeições quando ocorre uma discontinuidade. Por último, o método desenvolvido recentemente é realizado com a utilização de laser, chamado **shearografia**, que realiza uma comparação da reflexão do laser na superfície da peça obtendo assim, se há ou não deformações. Pelas características de cada método, existem muitas variáveis para a escolha correta de qual método a ser implementado em um estaleiro.

Mesmo diante das diferentes técnicas disponíveis no mercado, ainda existe escassez de técnicas específicas para o setor náutico. Assim sendo, este trabalho apresenta o levantamento de alguns tipos de técnicas disponíveis no mercado e a proposta do desenvolvimento preliminar de

um novo método de ensaio não destrutivo com o uso de um scanner comum. Ao final, é apresentado um quadro comparativo entre os ensaios não destrutivos e suas respectivas características.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Apresentar ensaios não destrutivos em materiais compósitos e propor uma técnica de análise preliminar do índice de vazios em compósitos.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

1. Realizar um levantamento e descrição de técnicas de ensaios não destrutivos aplicadas em compósitos fibrados;
2. Propor o desenvolvimento de uma técnica simples e de baixo custo de END para indústria náutica e definir suas etapas;
3. Verificação da técnica END proposta;
4. Estabelecer vantagens, limitações e possíveis aprimoramentos da técnica proposta.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os diversos materiais compósitos são formados por combinações de matriz com reforçador e às vezes, núcleos inerciais, sendo que cada composição determina as propriedades mecânicas dos mesmos. Além disso, os diferentes métodos de laminação também influenciam na qualidade da peça fabricada. Para o setor náutico, essas características são fundamentais, pois materiais com falhas, ou que apresentem propriedades inferiores às desejadas, podem levar uma embarcação a pique.

O interesse na identificação de defeitos/danos nas peças laminadas está em assegurar a qualidade de um produto. Portanto, os ensaios não destrutíveis são importantes para identificar o teor de defeitos do material de análise, para então tê-lo como aceitável para uso.

Partindo deste pressuposto, a seguir serão apresentados os materiais compósitos, os métodos de laminação, os ensaios não destrutíveis e o tipo de falha investigado.

### 2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

O material compósito é formado pela união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de performance superior àquela de seus componentes, tomados separadamente (PEREIRA, 2005). Geralmente a combinação desse compósito conta com 3 fases, a matriz, os reforçadores ou fibras e os núcleos inerciais, e para o acabamento o gelcoat, explicados a seguir.

#### 2.1.1. Matriz

As matrizes, também conhecidas como resinas, são responsáveis por transferir as solicitações aos reforçadores e protegê-los do ambiente externo. Segundo Cheremisinoff (1993), as propriedades das resinas variam muito e determinam as condições sob as quais a fabricação ou moldagem de uma mistura pode ser feita. Antes de ser aplicada ao molde, é acrescentado na matriz uma concentração de iniciador que varia entre 1% a 6% do volume da matriz (SHENOI;

WELLICOME, 1993). Um tempo depois de acrescentado o iniciador, a resina inicia a cura, ou seja, não é mais possível modelá-la. Esse tempo é chamado de tempo de gel.

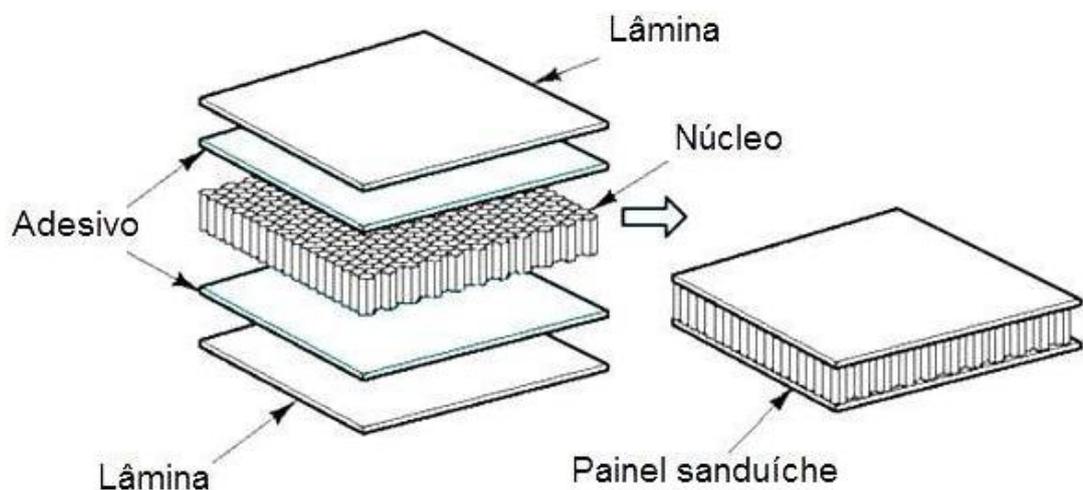
### 2.1.2. Reforços

Os reforços são os principais responsáveis pela propriedade mecânica do compósito. Podem ser encontrados em forma de partículas, filamentos ou escamas (ALMACO, [s. d.]). Os tipos mais comuns comercialmente são as fibras de vidro, de carbono e de aramida. (MARINUCCI, 2011). A partir de uma gama de opções, que abrange desde mechas de fios cortados aleatórios mais simples a tecidos especiais com melhores propriedades. Os tecidos são cada vez mais utilizados para desenvolver maior resistência e produtividade (SHENOI; WELLICOME, 1993).

### 2.1.3. Núcleos Inerciais

A rigidez a flexão de um componente do material pode ser melhorada com a aplicação de núcleos inerciais. Segundo Tillman (2015), o laminado sanduíche consiste de duas faces de um laminado de alta resistência e um núcleo de baixa densidade, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Configuração de um laminado com núcleo inercial.



Fonte: Almeida (2009, p.7).

Para Sheno e Wellicome (1993), um núcleo inercial ligado entre duas camadas de fibra de vidro reforçada com plástico permite suportar maiores cargas de flexão devido ao aumento da inércia. Esse aumento é causado pelo aumento da espessura do material com núcleo.

## 2.2. MÉTODO DE LAMINAÇÃO

Existem diversas técnicas de laminação e cada uma possui características que atuam diretamente nas propriedades mecânicas do laminado. A seguir são apresentadas as três técnicas mais utilizadas na fabricação de embarcações de recreio.

A primeira técnica é a laminação manual na qual o operador posiciona camada por camada de reforço intercalando com aplicação de resina. Com o esforço manual, impregna a resina de modo uniforme sobre as fibras e então, espera até a cura final da mesma (NASSEH, 2008). Não é possível laminar mais de duas ou três camadas de uma vez devido à reação de cura da resina. Fenômeno em que ocorre a liberação de calor pela catalisação e polimerização da resina. (NASSEH, 2008). A cura do compósito pode ser feita na temperatura ambiente ou em ambiente com temperaturas controladas, e o tempo de cura também depende da quantidade de catalisador e iniciador. Outro processo similar a esse é a laminação a vácuo.

Segundo Nasseh (2011), o processo de laminação à vácuo é similar ao anterior, mas tem uma pequena variação de como compactar o laminado. De acordo com Miranda (2011), após ser realizado o processo de aplicação de resina sobre os reforços, aplica-se pressão negativa, isto é, quando o vácuo é gerado no espaço entre o laminado e uma bolsa plástica que o envolve. O construtor usará um sistema de vácuo, que nada mais é que uma bolsa plástica selada nas extremidades, onde uma bomba tem a finalidade de remover o ar e fazer uma pressão negativa de 8 a 10 psi agir sobre o conjunto (NASSEH, 2011).

Nasseh (2011, p. 471) explica que “[...] a compactação irá simplesmente melhorar o teor de fibra que antecipadamente já havia sido ajustado pelo impregnador, de modo a proporcionar um ajuste mais fino da qualidade do laminado, que certamente resultará em um painel mais leve e mais resistente”. O último método comentado é parecido com este, porém mais limpo, chamado de infusão à vácuo.

De acordo com a ABMACO (2009), na laminação convencional a resina é depositada manualmente sobre os tecidos, porém na infusão, o operário nunca entra em contato com a resina, pois a mesma circula dentro de tubos, graças a uma bomba de vácuo. Depositando os tecidos secos, os núcleos sanduiches e toda a estrutura do laminado é possível fechar a bolsa de vácuo, aplicar pressão negativa em uma das extremidades e na outra introduzir a resina (NASSEH, 2011). Sendo que, após todo o material estiver totalmente impregnado de resina, mantém-se a pressão até a cura total do material (NASSEH, 2011).

Após o processo de laminação e desmoldagem, a placa final acabada pode passar por diferentes técnicas de END para identificar a presença de falhas ou danos internos.

### 2.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVEIS

Os diferentes END buscam evitar que possíveis acidentes ocorram através de inspeções que além de quantificar, qualificam os danos que o componente possui e assim um profissional possa decidir sobre sua substituição ou não, visando a integridade total do sistema (GARCIA, et al., 2014).

Os END envolvem a identificação de danos e falhas nas superfícies ou no interior do material compósito sem precisar cortar ou condenar o corpo de prova (Lockard, 2015 apud Gholizadeh, 2016). Por várias décadas as pesquisas sobre materiais compósitos tem sido contínuas, período no qual se expandiu o uso nos setores aeroespacial, naval, petroquímica, energia, construção e transporte (IBRAHIM, 2014)

Este trabalho apresenta 6 métodos que poderiam ser aplicados na indústria naval, sendo: inspeção visual, martelo especial, ultrassom, tomografia computadorizada de raio-X, termografia infravermelha e shearografia.

#### 2.3.1. Inspeção visual

Inspeção visual é a forma mais comum de inspeção para compósitos e outros sistemas estruturais (GREENE, 2014). Segundo Greene (2014), às vezes este tipo de inspeção é chamado de análise visual melhorada quando são utilizados equipamentos como: lupas, iluminação especial e câmeras de vídeos. Este método possui algumas vantagens e desvantagens citadas adiante.

##### A. Vantagens

Ghoelizadeh (2016), afirma que “A vantagem mais importante da inspeção visual é a rapidez e sua acessibilidade”. (p.53).

##### B. Desvantagem

De acordo com Greene (2014):

- Não utilização deste método em estruturas sanduíches;
- Não utilizados em laminados de fibra de carbono.

### 2.3.2. Martelo especial

De acordo com Greene (2014), existem diferentes dispositivos para cada tipo de análise, desde um simples toque com uma moeda, no qual é utilizada a sensibilidade do ouvido humano para verificação de falhas estruturais, até métodos automatizados que gravam as mudanças da frequência e amplitude do som.

A inspeção do compósito é realizada através de toques ou batidas feitas pelo operador em vários pontos resultando em sons diferentes em casos de danos ou falhas na estrutura (CAWLEY; ADAMS, 1987).

Pode-se citar algumas vantagens e desvantagens deste método além do equipamento utilizados.

#### A. Vantagens

Segundo Greene (2014), o inspetor treinado será capaz de identificar regiões de descolamento, de delaminação e de pouca cura, que não são identificáveis por inspeção visual.

#### B. Desvantagens

- Não consegue, de forma confiável, detectar defeitos ou anomalias nas camadas mais profundas do laminado. (GREENE, 2014).

#### C. Equipamentos

- Arruela de aço;
- Martelo pequeno;
- Dispositivo eletrônico.

Esse método é especialmente utilizado em estruturas sanduíches com camadas finas de fibra e núcleo de colmeia (GREENE, 2014).

### 2.3.3. Ultrassom

Segundo Garcia et al. (2012), a evolução da tecnologia trouxe a técnica de utilização de ondas ou impulsos ultrassônicos como mais um método de END para a detecção de defeitos superficiais ou internos nos materiais. “[...] os sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que contempla o mesmo, podendo ser transmitidos a outros ambientes”. (ANDREUCCI, 2016 p. 4).

De acordo com Miranda (2011), nos ensaios ultrassônicos, ondas de tensão são aplicadas no material através de uma perturbação, e então, os feixes que são, ou transmitidos, ou refletidos pelas descontinuidades geométricas, pelos defeitos, danos, pelas não-homogeneidades micro e macroestruturais, pelas interfaces, dentre outros fatores, devem ser monitorados e interpretados. Segundo Greene (2014), é necessária a utilização de um acoplador em forma de água ou gel para que ocorra a transmissão efetiva do som através da interface com o compósito. END ultrassônicos utilizam em geral pulsos ultrassônicos na faixa dos 2,25 MHz aos 10 MHz (MIRANDA, 2011).

Os ensaios com ultrassom podem ser feitos por dois métodos que se completam: o método de transmissão ou transparência, que utiliza vibrações constantes ultrassônicas; e o método de reflexão, que utiliza pulsos ultrassônicos. (GARCIA et al., 2012).

Através do método da transmissão ultrassônica, no qual se usa dois transdutores (um para enviar a onda ultrassônica e um para recebê-la após atravessar o elemento), é tipicamente limitada, pois é necessário o acesso aos dois lados da peça (GREENE, 2014). Miranda (2011), afirma que:

Defeitos e dano detectáveis bloquearão, ou reduzirão a transmissão do som, e isso causará uma redução proporcional na amplitude do sinal capturado pelo receptor, dando uma medida da gravidade dos mesmos. Este método é diferente do segundo quanto ao número de transdutores. (p. 48).

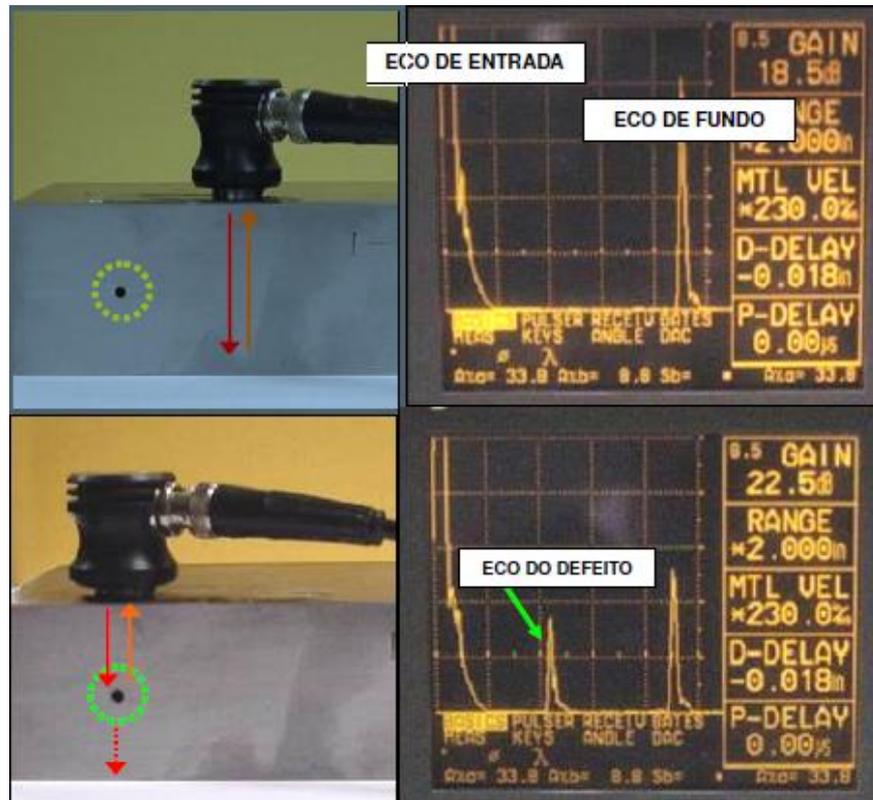
Na modalidade pulso-eco, os pulsos são gerados e detectados por um único transdutor mantido em íntimo contato com a superfície da peça inspecionada (MIRANDA, 2011), como apresentado na Figura 2. Quando os picos de início e final apresentam tamanhos próximos significa que não há descontinuidades geométricas, porém quando a diferença desses picos se torna evidente, indica que há falhas internas.

Miranda (2011) diz ainda que

Os pulsos refletidos, ou os ecos são detectados pelo mesmo transdutor, que age simultaneamente como emissor e receptor, e os sinais resultantes são monitorados em

um tubo de raios catódicos (TRC), possibilitando a indicação, a identificação e mesmo a quantificação dos defeitos que causaram estes ecos. (p. 46).

Figura 2 – Pulso-ultrassônico.



Fonte: Miranda (2011, p. 48).

A técnica de ultrassom aplicados a END, possui três formas mais conhecidas e são apresentadas, respectivamente, como varreduras (scans) dos tipos: A, B e C (MIRANDA, 2011).

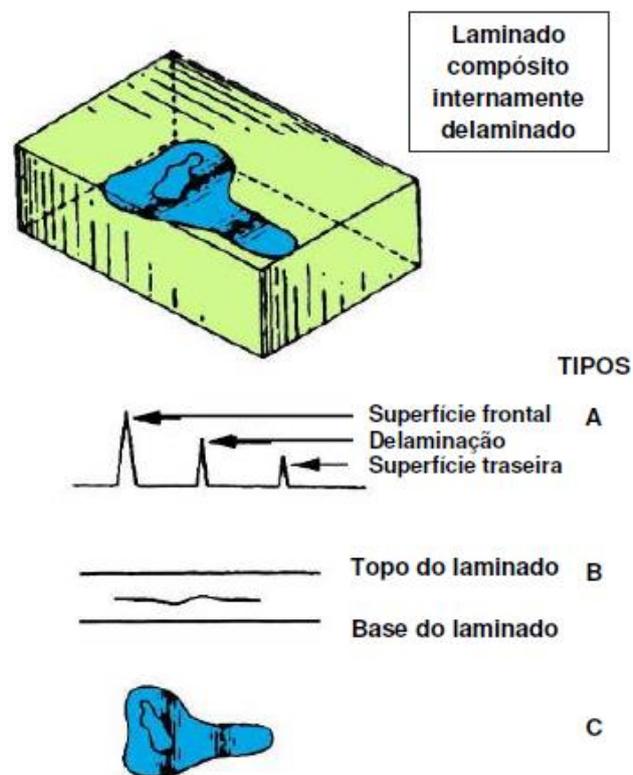
- i. Tipo A – Exibe a quantidade de energia ultrassônica recebida pelo transdutor como uma função do tempo. O tamanho relativo de uma descontinuidade pode ser estimado através da comparação da sua amplitude de sinal, capturado e mensurada no eixo vertical de energia, com a amplitude gerada por um refletor (dano/defeito) previamente conhecido. (MIRANDA, 2011). A profundidade do dano ou defeito pode ser mensurada a partir do tempo percorrido no eixo horizontal, desde que se conheça a velocidade de deslocamento do som naquele meio;
- ii. Tipo B – Consiste em vistas em perfil, ou seja, seções transversais da amostra inspecionada. A profundidade do dano/defeito, assim como suas dimensões lineares aproximadas na direção da varredura pode ser determinada. (MIRANDA, 2011). A varredura do tipo B é produzida através de uma janela de disparo na varredura do tipo A, com o transdutor se deslocando na superfície inspecionada, sendo assim,

sempre que o sinal de reflexão ultrapassar um limite pré-definido, um ponto representando uma parte do dado/defeito é produzido, e pode ser que um conjunto desses pontos forme a geometria planar da descontinuidade detectada;

- iii. Tipo C – Ainda de acordo com Miranda (2011), esse tipo de varredura é gerada com um sistema de obtenção automatizada de dados, controlado por computadores proporcionando uma vista plana da localização e do tamanho do dano/defeito presente no interior da amostra. Tipicamente, uma janela de coleta de dados é estabelecida na varredura tipo-A e a amplitude, ou o tempo de voo do sinal é gravado em intervalos regulares de tempo, enquanto o transdutor é deslocado ao longo da superfície da amostra segundo trajetórias não-lineares. Miranda (2011) conclui: “[...] a apresentação da varredura do tipo-C proporciona uma imagem bem delineada das peculiaridades geométricas do dano/defeito interno, cujas superfícies refletem e espalham as ondas sonoras”. (p. 55).

A Figura 3 mostra os tipos de varreduras que é possível serem feitas através da inspeção por ultrassom.

Figura 3 - Esquemas de tipos de varreduras de ultrassom.



Fonte: Miranda (2011, p. 56).

As vantagens, desvantagens e equipamentos deste método são apresentadas a seguir.

#### A. Vantagens

- Velocidade de escaneamento;
- Boa resolução;
- Capacidade de detecção de falhas;
- Uso em campo.

#### B. Desvantagens

- Dificuldades de configuração;
- Necessária habilidade para escanear com precisão;
- Necessária amostra teste para assegurar a precisão.

#### C. Equipamentos

- Pulsador ou receptor;
- Transdutor;
- Monitor.

Os principais danos e defeitos avaliados por ultrassom em laminados compósitos sólidos são os vazios, as delaminações geradas na manufatura ou aquelas criadas por cargas de impacto, as porosidades e a presença de filmes colantes de lâminas pré-impregnadas. (MIRANDA, 2011).

Outro tipo de END que também utiliza luz para determinação de possíveis falhas chama-se tomografia computadorizada de raio-X.

#### 2.3.4. Tomografia Computadorizada de raio-X

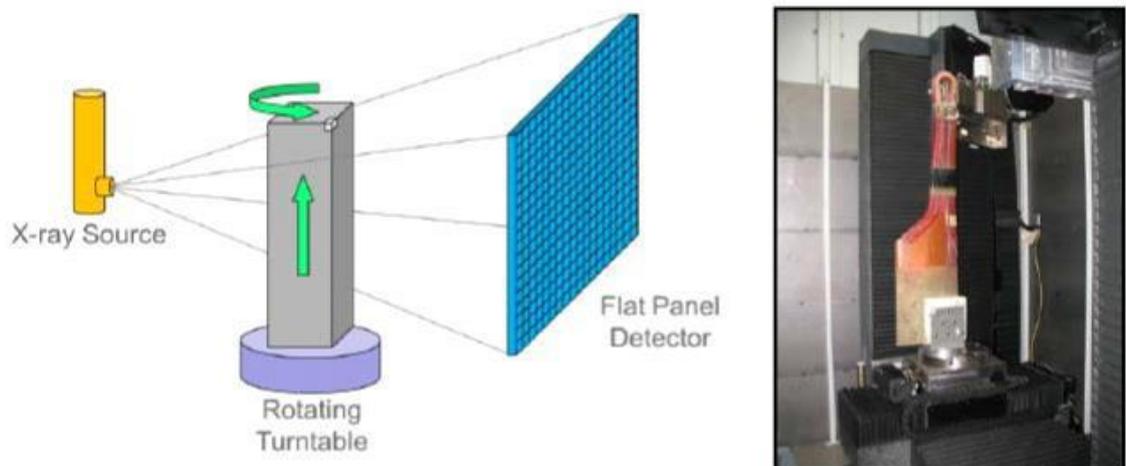
A tomografia computadorizada (TC) de raio-X permite a geração de imagem 3D do objeto a ser examinado. A geração da imagem é feita por feixe de raios-X colimado que atravessam a peça e são medidos através de detetores. As peças que possuem maiores números de densidade e atômico resultam em maior atenuação sofrida pelo feixe, ou seja, maior é a energia necessária para atravessar o material (JOLLY et al., 2015; GARCIA et al., 2014). Segundo Garcia et al. (2014), os parâmetros de operação são em função da composição do material e do tamanho da peça, podendo-se citar:

- A potência: alterando-a, variando a tensão e/ou a corrente. O aumento da potência implica no aumento da intensidade dos raios e assim o poder de penetração;
- A espessura: materiais mais finos geram imagens mais nítidas e com maiores detalhes.

O processo de obtenção de imagem é feito rotacionando, ou até mesmo transladando e rotacionando o objeto, até que se tenha um número suficiente de perspectivas para gerar a imagem, enquanto é lançado um feixe de raio-X sobre o objeto. De acordo com Garcia et al. (2014), em alguns modelos o apoio onde a peça repousa também se movimenta, fazendo com que a obtenção da imagem seja feita em uma única varredura, como ilustra a Figura 4.

Com a TC de raio-X, é possível obter imagens internas do material, revelando com clareza o conteúdo da parte em estudo, e fornecendo dados quantitativos dimensionais e qualitativos do material. Com base na quantidade de raios-X que conseguem atravessar a peça, gera-se um contraste na imagem formada em escalas cinzas, sendo que partes mais escuras possuem espessuras mais finas podendo ser uma região de falhas (GARCIA et al., 2014). Com o auxílio de software, efetua-se análise quantitativa de vazios, canais, trincas. (MIRANDA, 2011).

Figura 4 – Princípio de um sistema de varredura de TC helicoidal.



Fonte: Jolly et al. (2015, p.130)

As vantagens, desvantagens e equipamentos deste método são apresentadas a seguir.

### A. Vantagens

Segundo Garcia et al. (2014), este método proporciona com exatidão uma reprodução de um modelo digital, incluindo as dimensões externas e internas da peça, possibilitando a construção de imagens 3D.

### B. Desvantagens

- Método custoso;
- Efeito ionizante causam restrições econômicas e operacionais.

### C. Equipamentos

- Fontes de radiação;
- Detetores de radiação;
- Base giratória para o posicionamento do objeto;
- Sistema de processamento computadorizado de dados

De acordo com Jolly et al. (2015), as falhas observadas por este método são: delaminações, ondulações, porosidades, fibras quebradas e danos por impactos.

Através das propriedades térmicas dos materiais, é apresentado a seguir o tipo de END chamado termografia infravermelha.

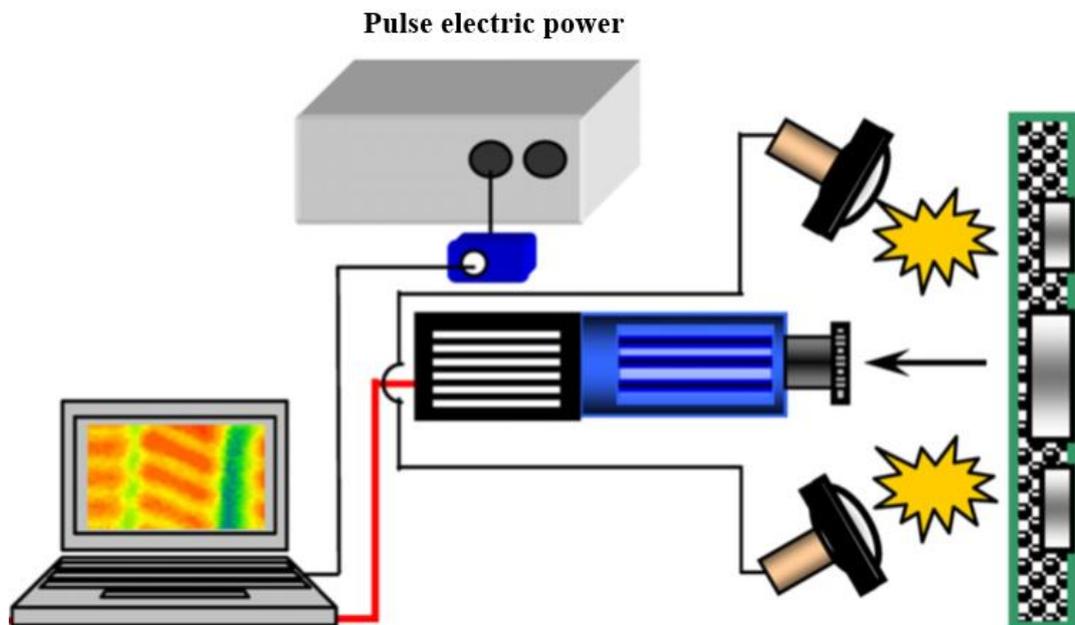
#### 2.3.5. Termografia infravermelha

A termografia infravermelha (TIV) é baseada no mapeamento térmico do corpo de prova com intuito de localizar as possíveis falhas. Miranda (2011) diz que: “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 molecular, portanto, maior a energia infravermelha emitida” (p. 74).

Existem dois métodos de inspeção por termografia infravermelha (TIV) que podem ser utilizadas para detecção de defeitos nos compósitos: passiva e ativa. A técnica passiva é utilizada em pesquisas de compósitos que estão em temperaturas diferentes do ambiente, enquanto que na abordagem da técnica ativa, uma fonte de excitação externa, como lâmpadas de flash, lâmpadas de halogêneo, vibração ultrassônica mecânica ou soprador de ar quente, são empregados com a intenção de causar um contraste térmico na peça. (JUNYAN et al., 2012; LIZARANZU et al., 2015).

De acordo com Junyan et al. (2012), Greene (2014) e Lizaranzu et al. (2015), um dos tipos de inspeção ativa mais utilizada é a termografia transitória pulsada, como ilustra a Figura 5, que utiliza diferentes fontes de calor, para gerar um transiente térmico resultante na superfície da amostra monitorado por câmera de infravermelho. Posteriormente, com a utilização de software gera-se como resultado final conjuntos de imagens térmicas da superfície com presença de contrastes influenciado por defeitos internos e que podem ser identificados. Greene (2014) completa: “[...] o acúmulo de calor transfere para a superfície do laminado, mostrando a localização e o tamanho aproximado da descontinuidade” (p. 5).

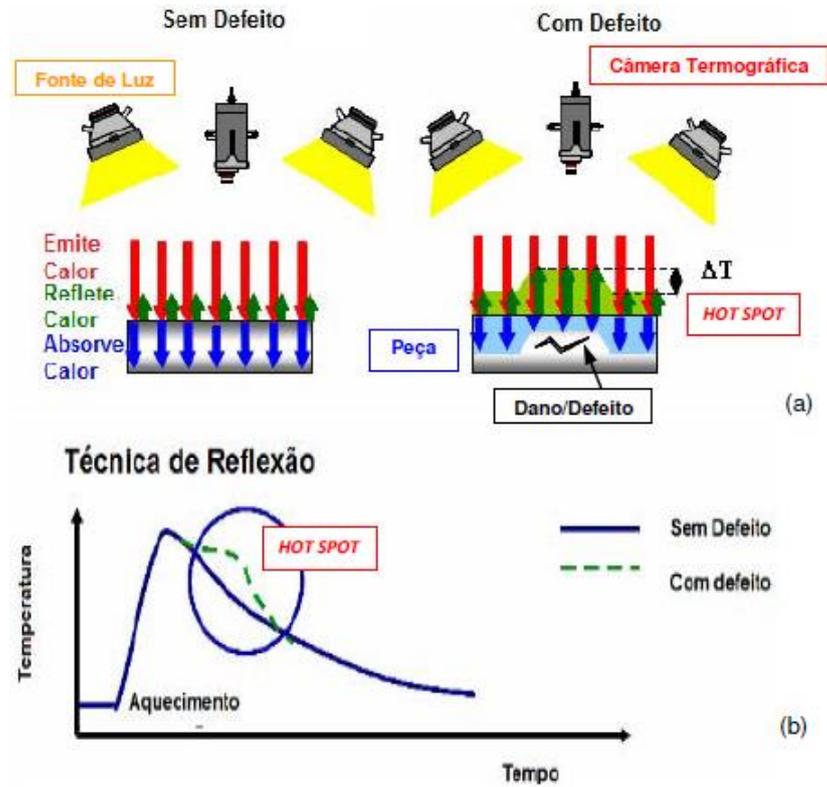
Figura 5 – Disposição esquemática para realizar termografia infravermelha pulsada.



Fonte: Adaptado de Junyan t al. (2012, p. 141).

O pulso gerado para a técnica TIV é muito rápido, na ordem de milissegundos, gerado a partir de lâmpadas, laser ou flashes de alta potência na ordem de 2000 W. Através da difusão do material e também perdas por radiação e convecção, varia-se a temperatura rapidamente após a aplicação do pulso. Os danos/defeitos no material diminuem essa taxa de difusão gerando regiões com gradientes de temperaturas e assim pode-se estimar com boa precisão a profundidade do dano/defeito (MIRANDA, 011). As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, de forma simplificada a inspeção TIV, com e sem falha, e um gráfico de temperatura por tempo, e um sistema completo TIV e operador.

Figura 6 - (a) TIV ativo; (b) Curva temperatura x Tempo.



Fonte: Miranda (2011, p. 79).

Figura 7 - Sistema completo de TIV e o operador.



Fonte: Miranda (2011, p. 81).

A seguir são apresentados as vantagens, desvantagens e equipamentos de acordo com Miranda (2011) e Gholizadeh (2016).

#### A. Vantagens

- Inspeção de grandes superfícies;
- Rapidez na inspeção;
- Interpretação simples das imagens;
- Análise em tempo real;
- Radiação não letal;
- Não requer contato com o objeto;
- Não sensível à geometria da peça;
- Acesso apenas um lado da peça.

#### B. Desvantagens

- Equipamentos sensíveis e caros;
- Inspectores altamente qualificados para executar os instrumentos;
- Laminados possuem espessuras limitadas (até 10 mm).

#### C. Equipamentos

- Câmera térmica;
- Fonte de calor;
- Sistema de processamento computadorizado;

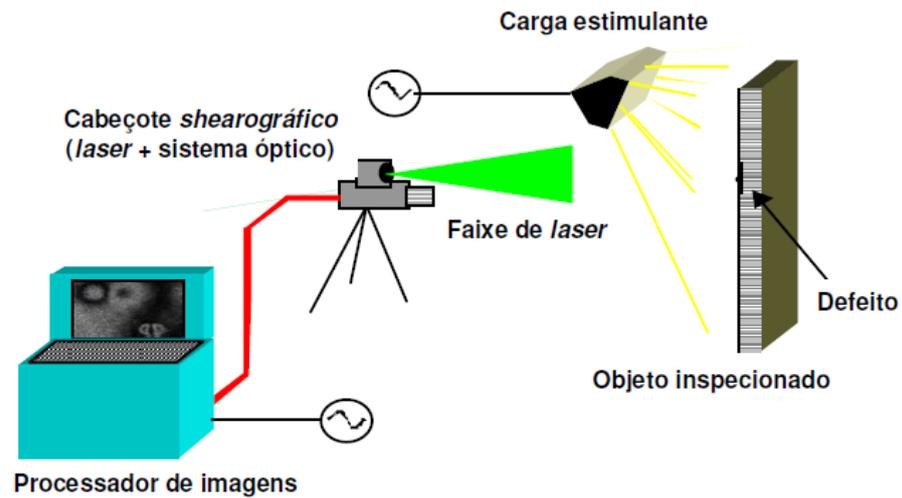
Através da condutividade térmica dos materiais e sua densidade é possível analisar os gradientes térmicos formados a partir de falhas, como vazios, poros e delaminações, que diminuem a capacidade de difusão térmica e assim evidenciam os danos internos (LIZARANZU et al., 2015).

#### 2.3.6. Shearografia

A shearografia é uma técnica de END que utiliza laser para mensurar pequenas deformações ocorridas na superfície devido à uma excitação externa no objeto de análise, vide esquema da Figura 8. Com aplicação de luz de laser irradiada na peça, aplica-se um determinado carregamento, podendo ser: vibracional, a vácuo, mecânico, térmico, entre outros, como é

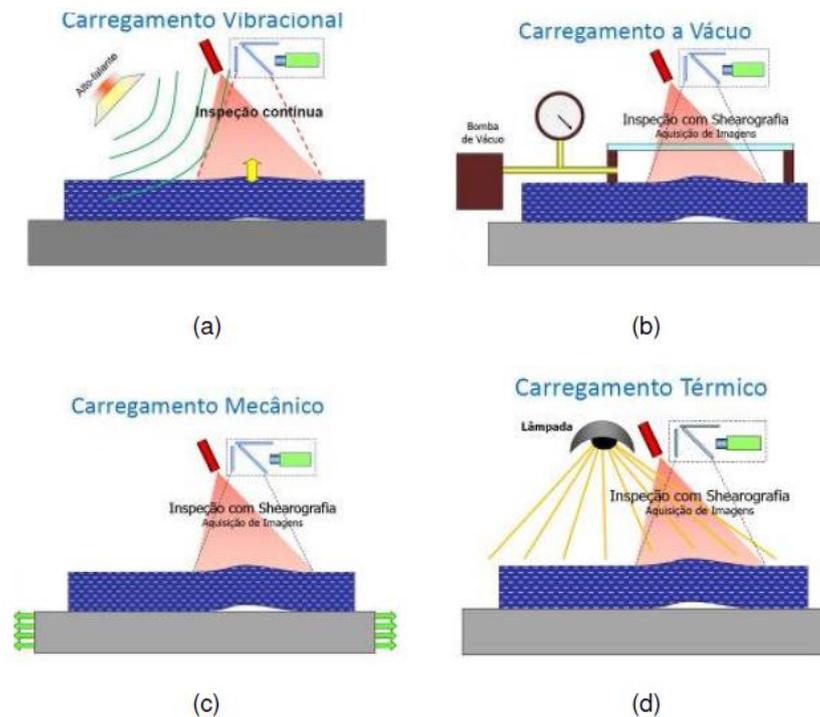
mostrado na Figura 9. Com um sistema formado por câmera, computador, sensor de imagens CCD, uma lente e um dispositivo de cisalhamento de imagem, pode-se capturar imagens sequenciais e compará-las imediatamente gerando como resultados diferenças de deslocamentos (GREENE, 2014; MIRANDA, 2011).

Figura 8 - Sistema de shearografia digital.



Fonte: Miranda (2011, p. 85).

Figura 9 – Modos de excitação (a) vibracional, (b) a vácuo, (c) mecânica e (d) térmico.



Fonte: Miranda (2011, p. 85).

A seguir são apresentadas as vantagens, desvantagens e equipamentos deste método de acordo com Miranda (2011), Greene (2014) e Gholizadeh (2016).

#### A. Vantagens

- Menos suscetível a ruídos;
- Inspeção global;
- Sem contato do sensor;
- Grande sensibilidade;
- Rapidez;
- Acesso apenas a um lado;
- Adequado para grandes superfícies;
- Elevado grau de automação;
- Capacidade de operação fora do ambiente laboratorial
- Possibilidade de avaliação e severidade de danos/defeitos;
- Customização do sistema de acordo com a necessidade.

#### B. Desvantagens

- Caracterização de tipos de falhas diferentes de delaminação é extremamente difícil;
- Não é uma metodologia de volume, mas sim de superfície.

#### C. Equipamentos

- Processador de imagens;
- Carregamento externo;
- Laser;
- Sistema óptico formado por: sensor de imagem CCD, câmera, lente e um dispositivo de cisalhamento da imagem.

A shearografia é uma técnica de END para determinação de delaminações, descolamentos, má adesão e microtrincas em materiais de compósitos.

## 2.4. TIPO DE FALHA

De acordo com os tipos de END apresentados, criou-se um quadro mostrando as técnicas aplicadas e as possíveis identificação de falhas, conforme é exibido no Quadro 1.

Quadro 1 - Quadro de END e tipos de falhas identificáveis.

TIPOS DE FALHA	ENSAIO NÃO DESTRUTIVO					
	Inspeção a olho nú	Martelo especial	Ultrassom	Tomografia computadoriza	Termografia Infravermelha	Shearografia
Porosidade			X	X	X	
Descolamento		X	X			X
Delaminação		X	X	X	X	X
Rachadura da matriz	X					
Dano por impacto	X			X		
Fibras quebradas				X		
Região de pouca cura		X				
Microtrincas						X
Ondulações				X		
Vazios			X		X	

Fonte: Autor (2017).

Os fatores que influenciam diretamente as propriedades mecânicas do laminado além dos métodos de laminação são a razão entre a matriz e o reforço, e a porosidade, (BITTENCOURT et al., 2016). A porosidade é gerada por bolhas de ar que ficam presas entre as camadas de reforços e influencia a absorção de água. Para tentar diminuir a incidência desse tipo de falha que geralmente possui forma esférica, usa-se um rolinho com nervuras (GREENE, 2014).

Com base no que foi dito e no quadro exposto, optou-se por desenvolver uma técnica capaz de identificar e quantificar a porosidade de maneira satisfatória e baixo valor de investimento comparado aos outros END.

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho apresenta o desenvolvimento preliminar de uma técnica de END através de um scanner comum de alta resolução, edição de imagem e programação em linguagem Python. O scanner tem a função de fazer uma varredura da superfície analisada, gerando uma imagem de alta resolução, que é tratada posteriormente via software. O tratamento resulta em uma imagem binária que é analisada por um programa Python, que percorre a imagem pixel a pixel e extrai informações referentes à cor do mesmo. Estas informações são utilizadas para identificar a porosidade na placa laminada e calcular a porcentagem volumétrica de possível porosidade (PVPP).

Para a verificação da técnica desenvolveu-se um corpo de prova feito por laminação manual.

#### 3.1. CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA

O corpo de prova foi fabricado no Laboratório de Modelagem e Construção Naval da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.

A placa de fibra de vidro foi produzida com resina poliéster ortoftálica da marca Sama comprada em Joinville-SC, com tecido multiaxial de 800 g/m<sup>2</sup> e manta de 450 g/m<sup>2</sup>. O corpo de prova possui dimensões 300 x 300 mm e o processo empregado foi o de laminação manual que é descrito a seguir.

##### 3.1.1 Laminação manual

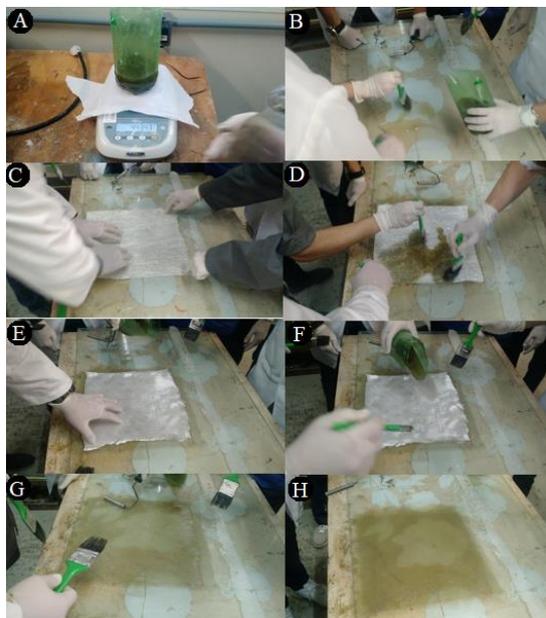
Inicialmente foram feitos cálculos de quantidade de resina e iniciador considerando o percentual aproximado de massa de 70% de resina e 30% de reforço. Antes de decidir a quantidade de iniciador realizou-se dois testes de tomada de tempo para a cura, chamado geltime, com concentrações de iniciador diferentes, com 1% e 2% em massa. Utilizou-se aproximadamente 70 g de resina para os testes, e o tempo de cura foi de 17min 30s e 11min 15s, respectivamente. Então, optou-se por utilizar 1,5% pois proporcionaria um tempo adequado para a laminação.

Primeiro foi realizado uma limpeza da superfície da lâmina de vidro que serviu como base para a laminação, em seguida, foi aplicado na superfície do vidro um agente desmoldante, e assim iniciou o processo de laminação. Começando pela mistura da resina com o iniciador e espalhando sobre a superfície. Logo após, foi colocado uma camada de manta seguida de resina sobre a mesma. A segunda camada foi de tecido, e outra de resina, por último, outra camada de manta seguida de resina. Feito isso, foi deixado a placa curar por 48 horas, e posteriormente, feita a desmoldagem. Ao longo de todo o processo foram utilizados os seguintes acessórios:

- Pinceis: utilizados para impregnar a resina nas fibras;
- Rolete: utilizado para espalhar a resina, compactar o laminado e por fim tirar possíveis bolhas;
- Balança: para pesagem da resina e iniciador;
- Trena: dimensionar o corpo de prova;
- Palitos: para mexer a mistura resina/iniciador;
- Luva;
- Tesoura;
- Espátula.

A Figura 10 ilustra as etapas do processo de confecção do corpo de prova.

Figura 10 - Etapa da laminação: (A) pesagem da resina, (B) dose de resina sobre o molde, (C) posicionamento da manta, (D) impregnação da resina, (E) posicionamento do tecido, (F) aplicação de resina sobre o tecido, (G) compactação do laminado e (H) laminado pronto.

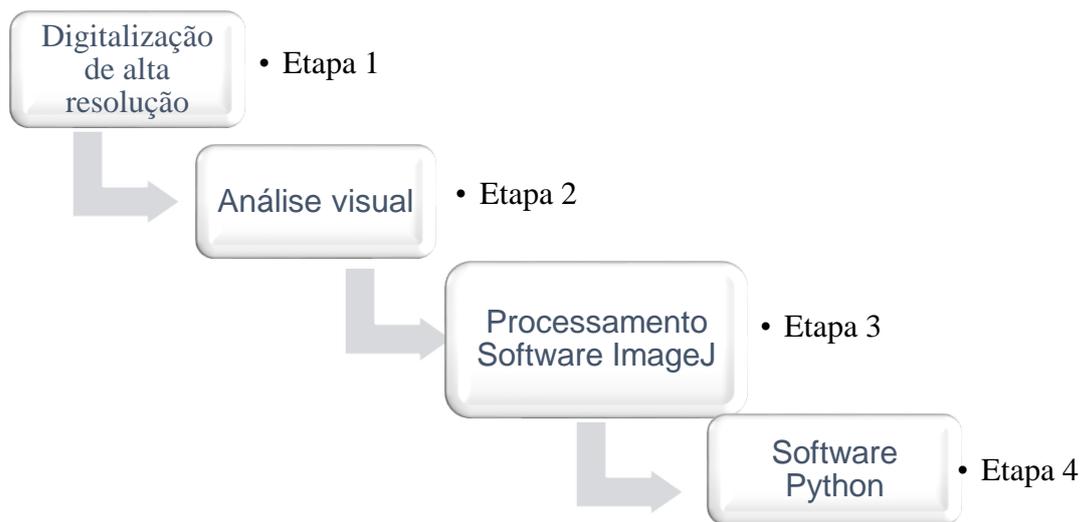


Fonte: Autor (2017).

### 3.2. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA LUZ BRANCA DE ALTA INTENSIDADE

O desenvolvimento deste trabalho consiste em apresentar como resultado os procedimentos necessários para análise de um corpo de prova, aplicando a técnica de luz branca de alta intensidade transmitida através do corpo de prova, criada a partir dessas análises. Um roteiro do procedimento da aplicação da técnica adotado é mostrado em fluxograma na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da técnica



Fonte: Autor (2017).

Para realização de tais análises foram utilizados uma impressora multifuncional da marca EPSON modelo L395 para obtenção da imagem de alta resolução, e os programas Python versão 3.6 32-bit, ImageJ versão 1.51n 64-bit e Epson Scan 2, versão 1.40. Além disso, o corpo de prova foi limpo com a utilização de um pano e álcool comum. O intuito desse procedimento é evitar que qualquer sujeira superficial mascare resultados.

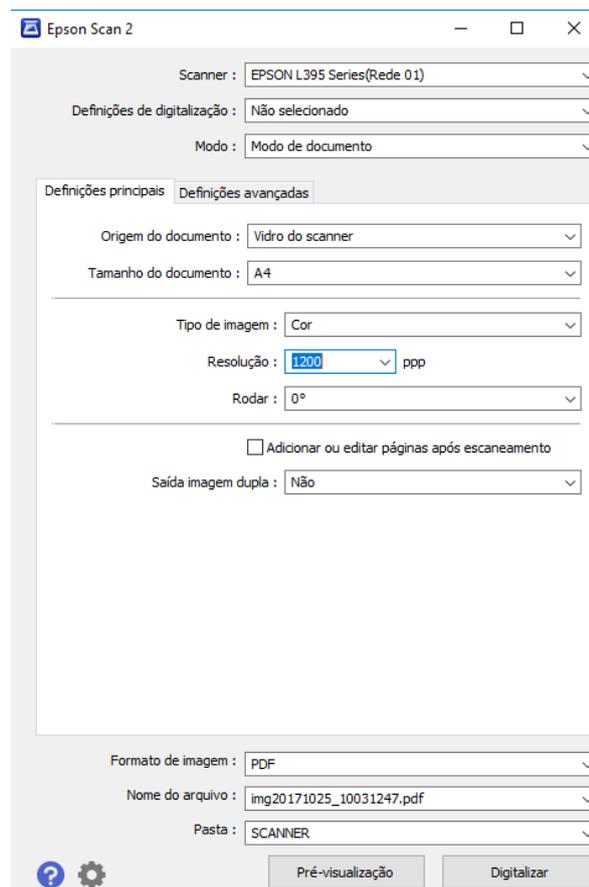
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo como objetivo desta pesquisa demonstrar o funcionamento da técnica de luz branca de alta intensidade, a seguir são descritos os procedimentos para cada etapa.

### 4.1. ETAPA 1

Após a limpeza, coloca-se a amostra no scanner e na configuração de software opta-se pela qualidade máxima de digitalização (1200 ppp), como mostra a Figura 12, obtendo imagem de alta qualidade e resolução. Com essa configuração é possível dar zoom máximo na imagem e assim observar perfeitamente as bolhas presentes internamente.

Figura 12 - Configuração da digitalização.

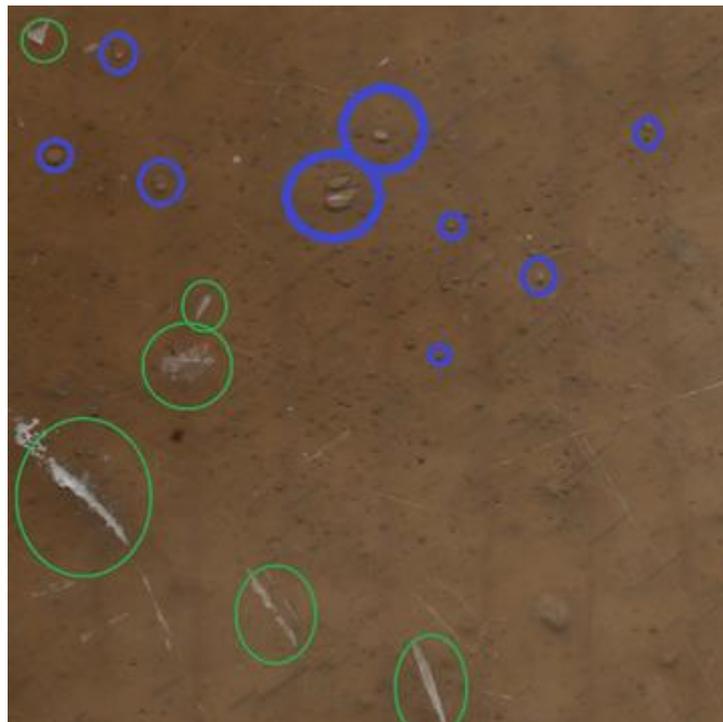


Fonte: Autor (2017).

#### 4.2. ETAPA 2

Com aplicação de zoom na amostra, procura-se separar os poros das impurezas por análise da morfologia do defeito. Geralmente os poros tem aspecto arredondados e as impurezas marcas mais acentuadas do pincel ou desmoldante. Exemplo de imagem da amostra com impurezas (círculos verdes) e poros (círculos azuis) é mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Imagem da amostra com impurezas e poros.

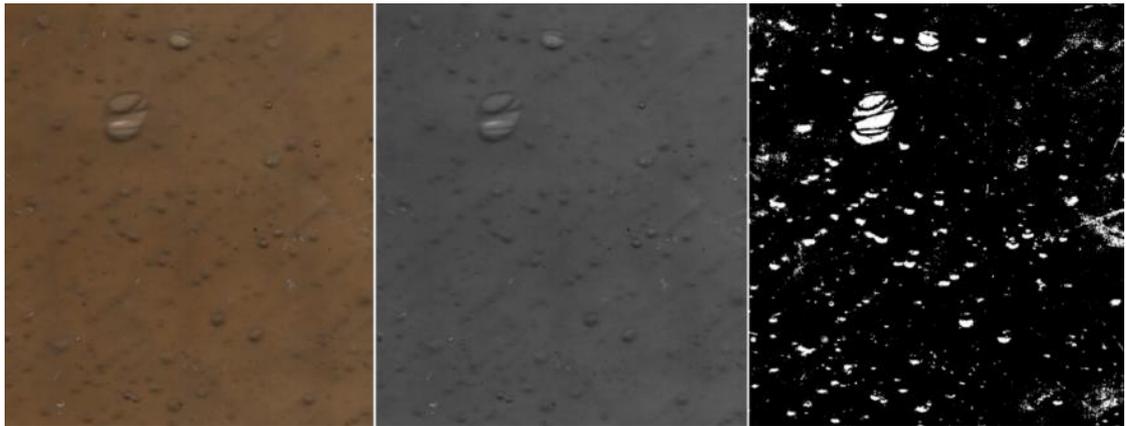


Fonte: Autor (2017).

#### 4.3. ETAPA 3

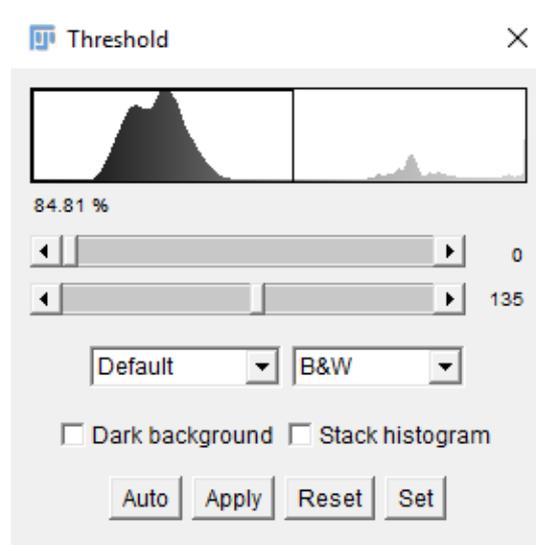
Após determinar regiões a serem inspecionadas, essas passam por um pré-processamento através do software ImageJ, responsável por transformar a imagem original em escala de cor cinza e posteriormente em uma imagem preta e branca, como mostra a Figura 14. Esse processo auxilia a identificar os limites de níveis de branco e preto dispostos na amostra, conforme Figura 15.

Figura 14 - Amostra original, cinza e pb.



Fonte: Autor (2017).

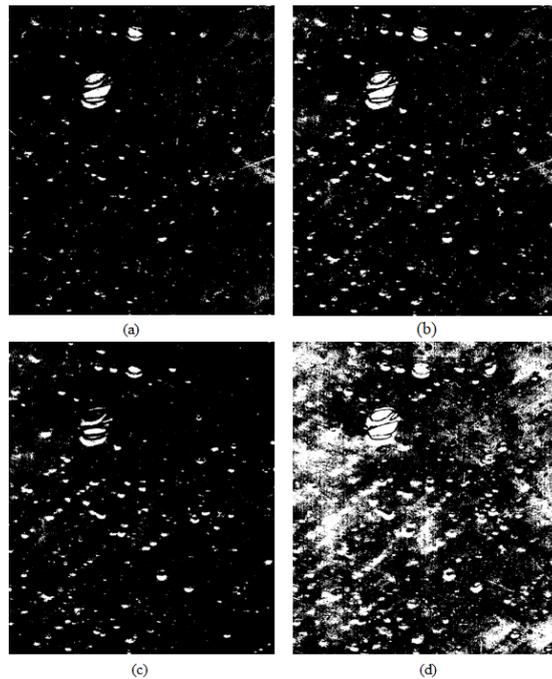
Figura 15 - Configuração de limites de cor preta e branca.



Fonte: Autor (2017).

O pixel branco representa o possível poro na peça. O parâmetro para determinar essa configuração se dá através de uma análise visual na qual é possível ver os poros aparecerem ou sumirem, conforme são alterados os limites das cores preta e branca. A Figura 16, mostra imagens de uma mesma amostra, porém com configurações diferentes de limites de preto e branco.

Figura 16 – Imagens de amostras: (a) 65/90, (b)70/90, (c)70/100 e (d) 75/85.



Fonte: Autor (2017).

#### 4.4. ETAPA 4

Após determinar uma configuração de limites de preto e branco ideal, um código desenvolvido em Python, que se encontra no Apêndice A, é acionado. Esse código faz a varredura na imagem da amostra tratada e analisa pixel a pixel a cor de cada um. Cada pixel possui um vetor com 3 valores, caracterizado por três cores, sendo b para blue (azul), g para green (verde) e r para red (vermelho) (b, g, r), variando de 0 a 255. As combinações desses 3 valores geram todas as cores. Para a cor preta o vetor é (0, 0, 0) e para a cor branca (255, 255, 255).

O passo a passo do código é disposto a seguir em forma de fases.

- Fase 1: Acontece o carregamento da imagem da amostra;
- Fase 2: É feita a leitura da dimensão da imagem;
- Fase 3: A primeira varredura que o programa faz guarda de cada pixel o valor do vetor em outros 3 vetores;
- Fase 4: O código faz a correção dos pixels que estão fora do valor determinado pelo usuário na fase de pré-tratamento de imagem;

- Fase 5: É feita uma verificação se todos os pixels estão no intervalo de valor desejado percorrendo os valores dos 3 vetores, azul, verde e vermelho. Caso contrário, é feita a correção automaticamente;
- Fase 6: É mostrado ao usuário a quantidade de pixels alterados para preto e branco. Caso haja algum pixel fora do limite, o usuário é informado através de mensagem dizendo que há erro no processo;
- Fase 7: Uma varredura, na imagem corrigida, é realizada contabilizando os pixels pretos e brancos;
- Fase 8: Verifica-se se há erros no processo;
- Fase 9: Cálculo do percentual volumétrico de possível porosidade;
- Fase 10: É mostrado ao usuário os resultados dos cálculos e também as dimensões da amostra;
- Fase 11: É carregada e mostrado ao usuário a nova amostra corrigida.

Para o cálculo de PVPP, o número de pixels brancos é dividido pelo número total de pixels da amostra e o resultado obtido é exposto em forma de porcentagem.

#### 4.5 VERIFICAÇÃO DA FERRAMENTA

Para a verificação do END desenvolvido, foram realizados dois testes. Para o primeiro, foi utilizado o corpo de prova fabricado em laboratório e o resultado da análise do percentual volumétrico de possível porosidade foi comparado com o obtido no trabalho de Inácio (2016). No segundo, teve como base um artigo científico sobre comparação de métodos para a caracterização de vazios em compósitos de fibra de vidro (tradução livre do Inglês) (ABDELAL; DONALDSON, 2017), no qual, se retirou imagens de corpos de prova geradas a partir do método de END chamado Section Serial. O Gráfico 1 apresenta os resultados do END desenvolvido e comparações com os outros trabalhos.

Deu-se início ao primeiro teste, fazendo a digitalização do corpo de prova, de acordo com a primeira etapa do processo, e em seguida, foram escolhidas três regiões distintas da placa, que não apresentassem problemas aparentes de sublaminação, o que resultaria possivelmente em erros de leitura do software conforme mostra as Figuras 17 e 18, respectivamente.

Figura 17 - Corpo de prova digitalizado marcado com as regiões das amostras.



Fonte: Autor (2017).

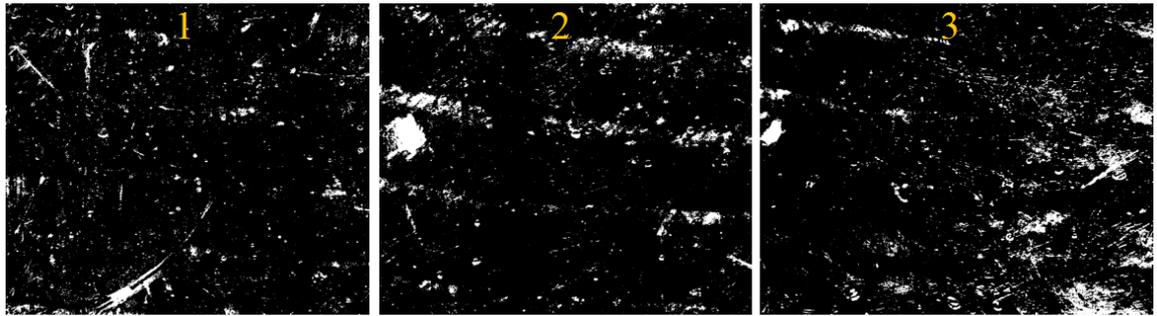
Figura 18 - Imagens das amostras retiradas de diferentes regiões.



Fonte: Autor (2017).

As amostras foram pré-tratadas através do software ImageJ, transformando-as primeiro em escala cinza e em seguida em binária ajustando os limites de preto e branco para cada uma, conforme Figura 19. Os diferentes ajustes de limites de preto e branco são devidos às posições em que se encontram as amostras na imagem.

Figura 19 - Amostras em preto e branco.



Fonte: Autor (2017).

Após o pré-tratamento, processou-se as três amostras no programa desenvolvido em Python, obtendo assim a PVPP de cada uma. A Figura 20 mostra a interface do resultado do processamento da imagem através do código em Python.

Figura 20 - Resultado do processamento da imagem do corpo de prova da região 1.

```
Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul 8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta: 27
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 230

Pixels corrigido para preto: 156129
Pixels corrido para branco: 34518

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 1198 pixels
Largura: 1362 pixels
Area da amostra: 1631676 pixels

4.977 % de volume de possível porosidade
```

Fonte: Autor (2017).

Os resultados obtidos de todas as regiões analisadas do corpo de prova são dispostos na Tabela 1 e as imagens das outras áreas estão no Apêndice B.

Tabela 1 - Resultados obtidos pelo método END desenvolvido.

Corpo de prova	Ajuste - Preto/Branco	PVPP <sup>1</sup>	Área (pixels)	Tempo (s)
Região 1	85	5,63%	1.044.340	48,34
	114			
Região 2	86	7,71%	1.541.106	20,45
	112			
Região 3	81	4,98%	1.631.676	45,73
	110			

Fonte: Autor (2017).

Realizou-se a soma das três regiões e calculou-se a média simples chegando ao valor final de 6,11% de PVPP da peça.

Para o segundo teste, teve base no artigo de Abdelal; Donaldson (2017), no qual, produziram placas de fibra de vidro pelo método de laminação a vácuo. As placas foram produzidas pelo método de laminação a vácuo utilizando quatro pressões diferentes sendo: 100%, 80%, 40% e 0% da potência da bomba, e que representam: -0,902 atm, -0,717 atm, -0,367 atm e -0 atm, respectivamente. As imagens dos corpos de prova estavam digitalizadas via microscópio digital KEYENCE VHX 600 com zoom de 30x, conforme Figura 21. Após essa etapa, as amostras foram submetidas ao pré-tratamento e em seguida, ao programa para calcular a PVPP<sup>1</sup>. Os resultados das comparações entre o END desenvolvido e análise feita pelo artigo são dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados obtidos via END desenvolvido e comparados com os do artigo.

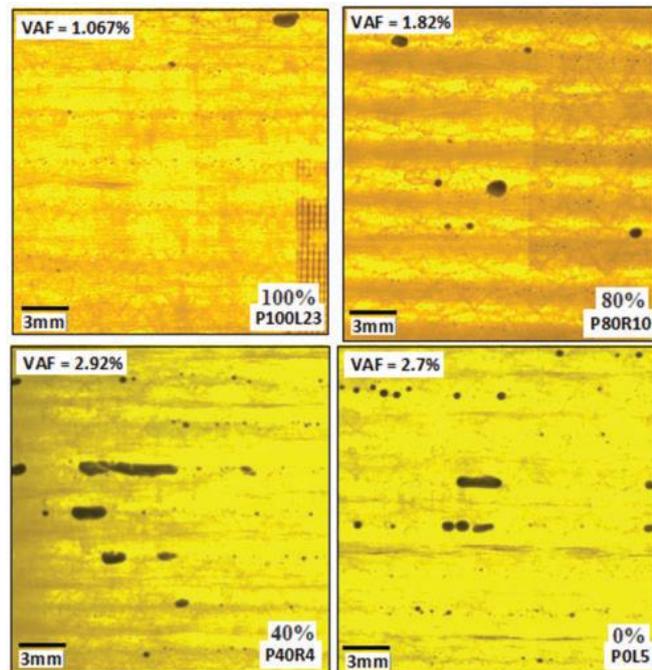
Corpo de prova	Ajuste - Preto/Branco	PVPP <sup>1</sup>	Referência	Diferença	Área (pixels)	Tempo (s)
CP 1	145	0,85%	1,07%	0,22%	38979	3,12
	255					
CP 2	131	2,06%	1,92%	0,14%	44121	3,17
	233					
CP 3	120	3,14%	2,92%	0,22%	44368	4,93
	255					
CP 4	139	2,66%	2,70%	0,04%	37740	4,47
	255					

Fonte: Autor (2017).

<sup>1</sup> Valores obtidos através do END proposto pelo autor.

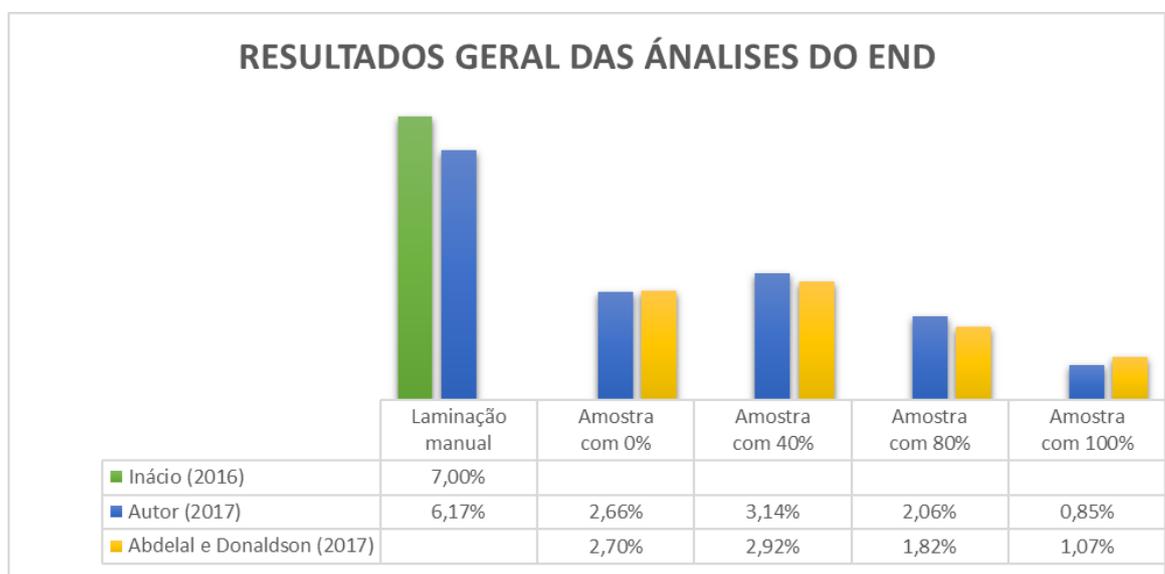
O Gráfico 1 mostra o resultado geral das comparações entre o END desenvolvido e os resultados na literatura. As imagens tratadas assim como os resultados de cada amostra estão no Apêndice C e D, respectivamente.

Figura 21 - Imagem dos corpos de prova geradas.



Fonte: Abdelal e Donaldson (2017, p.11).

Gráfico 1 - Resultados e comparações das análises.



Fonte: Autor (2017).

Os resultados do estudo de Inácio (2016), foram obtidos através da densidade aparente e conhecimento em micromecânica, na qual com os valores de massas de fibra e resina, e também suas densidades, calculou-se a porosidade.

Abdelal e Donaldson (2017), obtiveram os resultados através da técnica chamada *Serial Section* – Seção em série (tradução do Inglês livre). Sendo que, camadas planas com espessura fixa são separadas de cada amostra, seguida de polimento e imagem microscópica.

Analisando os resultados, pode-se afirmar que, a técnica possui potencial para fazer a identificação e a contabilidade da PVPP, chegando a um valor pertinente comparado com a literatura. Contudo, a ferramenta apresenta algumas dificuldades como distinguir os tipos de possíveis falhas que a placa possa possuir e a inconsistência no pré tratamento da imagem que pode afetar o valor real.

#### 4.6 VANTAGENS, DESVANTAGENS E APRIMORAMENTOS

Assim como nos END tradicionais, o método de luz branca de alta intensidade possui características que determinam sua usabilidade.

##### A. Vantagens

- Custo operacional;
- Quantificação de falhas;
- Capacidade de operação local;
- Baixa habilidade necessária;

##### B. Desvantagens

- Dificuldade em distinguir a falha;
- Limitação de espessura;
- Limitação de tamanho;
- Inconsistência no pré-tratamento da imagem;
- Limitações de utilização em peças com núcleo inercial.

##### C. Aprimoramentos

- Fazer o tratamento da imagem no próprio código, de forma a automatizar o processo;
- Tratamento superficial do molde para que não transmita risco/arranhões;

- Estabelecer padrões de pixels e falhas, assim como padrões de tipos de resina e fibras utilizadas;
- Estabelecer limite de espessura máxima que pode ser analisada.

Sabendo que a técnica consegue ler cada pixel e passar informações ao usuário, o aprimoramento dessa ferramenta poderia trazer resultado com maior velocidade e confiabilidade.

## 5. CONCLUSÃO

A conclusão foi dividida em tópicos de acordo com os objetivos específicos.

1. Realizar um levantamento e descrição de técnicas de ensaios não destrutíveis aplicadas em compósitos fibrados.

Foram descritos na fundamentação teórica métodos de END utilizados atualmente na indústria sendo inspeção visual, martelo especial, ultrassom, tomografia computadorizada de raio-X, termografia infravermelha e shearografia. Os mesmos foram listados em termos de vantagens e desvantagens.

2. Propor o desenvolvimento de uma técnica simples e de baixo custo de END para indústria náutica e definir suas etapas.

Nos capítulos da metodologia e do resultados e discussões, foi proposto um método de END de baixo custo, o qual utiliza um scanner de alta resolução para obtenção de imagem, e um programa para fazer o pré-tratamento desta, além de um código em Python que foi escrito para identificar e quantificar a porcentagem volumétrica de possível porosidade da mesma.

Como etapas do processo cita-se digitalização da imagem da amostra em alta resolução, análise visual para a escolha de áreas sem impurezas, definição dos limites das cores preta e branca e utilização do programa Python para realizar a identificação e a quantificação da porcentagem volumétrica de possível porosidade.

3. Verificação da técnica END proposta.

A verificação da técnica se deu de duas maneiras, sendo que na primeira foi realizada o END proposto em uma placa plana fabricada em laboratório e comparado o resultado com o obtido na literatura através de outro tipo de análise, chegou-se a um resultado pertinente. Na segunda, aplicou-se o END proposto em imagens retiradas de um artigo sobre porosidade. Os resultados de ambas verificações foram comparados e se mostraram pertinentes.

#### 4. Estabelecer vantagens, limitações e possíveis aprimoramentos da técnica proposta.

A técnica preliminar de END desenvolvida apresenta como vantagens: o seu custo operacional, a possibilidade de quantificar a porosidade do material, a possibilidade de aplicação da técnica no local e a fácil aplicabilidade, além da utilização de software livre

Por ser uma técnica preliminar, apresenta desvantagens como: dificuldade em distinguir os tipos de falhas, as limitações de espessura e tamanho, a inconsistência no pré-tratamento da imagem e a não utilização em laminados com núcleo inercial.

Para finalizar, são citados alguns aprimoramentos do END proposto de maneira a acelerar o processo através do tratamento da imagem no próprio código de programação, eliminação de impurezas superficiais via preparação adequada do molde de laminação e contagem mais próxima da realidade por meio implementação no código de padrões de pixels e falhas que fazem o isolamento dos poros.

Enfim, a técnica apresenta resultados consideráveis pertinentes comparando-os com os outros obtidos via demais técnicas de análise. A medida que este END for aperfeiçoado, sua confiabilidade será aumentada assim como a velocidade do processamento.

A partir do que foi apresentado para a realização deste trabalho, sugere-se o seguinte para a continuidade do desenvolvimento da técnica:

- Criar uma função no código para fazer o pré e o tratamento de forma automatizada;
- Criar um código que isole os padrões de falhas do tipo poros, para que assim consigo fazer uma contagem mais próxima da realidade;
- Testar com um scanner portátil;
- Verificar o limite máximo de vazios por  $\text{cm}^2$  de forma a não prejudicar as propriedades mecânicas do laminado;
- Associar as falhas a mecânica da fratura.

## 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>.

ABMACO. **Compósitos 2:** Tecnologia de Processos. [s.l.], 2009.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom:** Aplicações industriais. São Paulo: Us, 2016.

ALMEIDA, Maria Inês Avó de. **Fabricação de compósito.** Disponível em: <<http://fabricacaodecompositos.blogspot.com.br/2012/06/paineis-sanduiche.html>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

BITTENCOURT, Ana Paula Peixoto. **Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/poliéster.** 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

\_\_\_\_\_; DUTRA, G. B.; TANCREDI, T. P. **Revista Matéria**, v. 21, n. 4, p. 1021–1031, 2016.

CALLISTER JR., William D. Introdução. In: \_\_\_\_\_. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. Salt Lake City: Wiley, 1999. p. 1-5.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 361 p.

CAWLEY, Paul; ADAMS, Richard. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing. Londres, p. 299-316, 23, junho 1987.

GREENE, Eric. Marine composites non-destructive evaluation. **SSC Ship Structure Symposium.** Linthicum, p. 1-12. Mai. 2014.

IBRAHIM, Matthew. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review. **Composites: Part A.** Fishermans Bend, v. 64, p. 37-45, 14 abril 2014.

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.

JOLLY, Michelle et al. Review of non-destructive testing (NDT) techniques and their applicability to thick walled composites. Bedfordshire, p. 129-136, 6 jan. 2015.

JUNYAN, Liu; LIQIANG, Liu; YANG, Wang. Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites. **Composites Part B: Engineering,** Harbin, v. 45, n. 4, p.138-147, 2 jan. 2012.

LIZARANZU, Miguel et al. Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools. **Infrared Physics & Technology**. Zaragoza, p. 113-120. jul. 2015.

LAMBRINEAS, Peter. et al. X-ray computed tomography examination of inshore mine hunter hull composite material. **Ndt & e International**, v. 24, n. 4, p.207-213, ago. 1991.

MALDAGUE, Xavier P. **Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing**. Québec: Wiley-interscience, 2001.

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.

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos avançados de construção em composites**. Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2007.

\_\_\_\_\_. **Técnica e prática de laminação em compositos**. Rio de Janeiro: Divisão de Engenharia e Marketing da empresa Barracuda Advanced Composites, 2008

\_\_\_\_\_. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

PEREIRA, José Carlos. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. 2005. 180 p. Apostila. Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, ago. 2005.

RCONNDT. **Phoenix Nanotom S**. Disponível em: <<http://rcon-ndt.com/phoenix-nanotom-s/>>. Acesso em: 19 nov. 2016.

SHENOI, R. Ajit.; WLLICONE, J. F. **Composite materials in maritime structures**. 4. ed. New York: Cambridge University Press, 1993.

TILLMANN, Vinícius Bosco. **Análise estrutural de elementos compósitos com a utilização do método de elementos finitos**. 2015. 67 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DA PROGRAMAÇÃO EM PYTHON

```

import numpy as np
import cv2

print('ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE')
print()

# 1)CARREGAMENTO DA IMAGEM E SUAS DIMENSÕES
im = cv2.imread('tratada4.jpg') #escala cinza (8bit)
# 2)DETERMIANDO AS DIMENSÕES
linha = im.shape[1] #altura da imagem
coluna = im.shape[0] #largura da imagem
area = linha*coluna

# 3)PERCORRENDO OS PIXELS DA IMAGEM E GUARDANDO OS VALORES EM 3
VARIÁVEIS
i=0
blue={ }
green={ }
red={ }
verif=0
cont=0
vetor=[]

for x in range(0, coluna):
    for y in range(0,linha):
        (b,g,r)=im[x,y]
        blue[i]=b
        green[i]=g
        red[i]=r
        vetor.append(blue[i])
        i=i+1

# 4)CORREÇÃO DOS PIXELS FORA DO BINÁRIO
ajuste_pixel=sorted(set(vetor))
for x in range(0,len(ajuste_pixel)):
    limites=ajuste_pixel[x+1]-ajuste_pixel[x]
    if limites>100:
        Linf=ajuste_pixel[x]
        Lsup=ajuste_pixel[x+1]
        break
print('Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta: ',Linf)
print('Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: ',Lsup)
print()

```

```
# 5)LIMITES DAS CORES PRETO E BRANCO
#CONTABILIZANDO OS PIXELS ALTERADOS
```

```
#AZUL
```

```
i=0
```

```
c=0
```

```
ppb=0
```

```
pbb=0
```

```
for x in range(0,coluna):
```

```
    for y in range(0,linha):
```

```
        if blue[i]>0 and blue[i]<=Linf:
```

```
            im[x,y]=(0,0,0)
```

```
            ppb=ppb+1
```

```
        if blue[i]>=Lsup and blue[i]<255:
```

```
            im[x,y]=(255,255,255)
```

```
            pbb=pbb+1
```

```
        i=i+1
```

```
#VERDE
```

```
i=0
```

```
c=0
```

```
ppv=0
```

```
pbv=0
```

```
for x in range(0,coluna):
```

```
    for y in range(0,linha):
```

```
        if green[i]>0 and green[i]<=Linf:
```

```
            im[x,y]=(0,0,0)
```

```
            ppv=ppv+1
```

```
        if green[i]>=Lsup and green[i]<255:
```

```
            im[x,y]=(255,255,255)
```

```
            pbv=pbv+1
```

```
        i=i+1
```

```
#VERMELHO
```

```
i=0
```

```
c=0
```

```
ppve=0
```

```
pbve=0
```

```
for x in range(0,coluna):
```

```
    for y in range(0,linha):
```

```
        if red[i]>0 and red[i]<=Linf:
```

```
            im[x,y]=(0,0,0)
```

```
            ppve=ppve+1
```

```
        if red[i]>=Lsup and red[i]<255:
```

```
            im[x,y]=(255,255,255)
```

```
            pbve=pbve+1
```

```
        i=i+1
```

```
# 6)VERIFICAÇÃO DE POSSIVEL ERRO NOS VALORES DOS PIXELS E
QUANTIFICAÇÃO DE PIXELS CORRIGIDOS
```

```
if ppb==ppv==ppve:
```

```
    print('Pixels corrigido para preto:',ppve)
```

```
else:
```

```

    print('HÁ ERRO NO PROCESSO, VETORES COM VALORES DIFERENTES')
if pbb==pbv==pbve:
    print('Pixels corrido para branco:',pbve)
else:
    print('HÁ ERRO NO PROCESSO, VETORES COM VALORES DIFERENTES')
print()
print()

```

#### # 7)CONTABILIZAÇÃO DE PIXELS

```

blue={ }
green={ }
red={ }
branco=0
preto=0
i=0
for x in range(0, coluna):
    for y in range(0, linha):
        (b,g,r)=im[x,y]
        blue[i]=b
        green[i]=g
        red[i]=r
        if blue[i]==0:
            preto=preto+1
        elif blue[i]==255:
            branco=branco+1
        i=i+1

```

#### # 8)VERIFICAÇÃO DE ERRO NA IMAGEM CORRIGIDA

```

total=preto + branco
erro=area-total
if total != area:
    print('ALERTA-ALERTA')
    print('HÁ ERRO NO PROCESSO: contém',erro,'pixel(s) sem contabilizar')
    print()
    print()
    break
else:
    print('Processo sem erros')
    print()
    print()

```

#### # 9)CALCULO DE PERCENTUAL VOLUMÉTRICO DE POSSÍVEL POROSIDADE

```

pixels_falha=branco
falhas=round((branco/area*100),3)

```

#### # 10) RESULTADOS

```

print ("CORPO DE PROVA")
print()
print('DIMENSÕES')
print ("Altura:", im.shape[0], "pixels")
print ("Largura:", im.shape[1], "pixels")

```

```
print ("Area da amostra:", area, "pixels")
print()
print (falhas,'% de volume de possível porosidade')
print()
# 11)MOSTRAR IMAGEM CORRIGIDA
cv2.namedWindow('Imagem Corrigida', cv2.WINDOW_NORMAL)
cv2.imshow('Imagem Corrigida',im)

print()
print('_____')
```

## APÊNDICE B – RESULTADO DE OUTRAS ÁREAS DO CORPO DE PROVA FABRICADO

Figura 22 - Resultado da amostra 2 do CP fabricado.

```
Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul 8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta: 26
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 230

Pixels corrigido para preto: 92413
Pixels corrido para branco: 23244

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 940 pixels
Largura: 1111 pixels
Area da amostra: 1044340 pixels

5.627 % de volume de possível porosidade
```

Fonte: Autor (2017).

Figura 23 - Resultado da amostra 3 do CP fabricado.

```
Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul 8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANALISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta: 27
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 230

Pixels corrigido para preto: 158585
Pixels corrido para branco: 50402

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

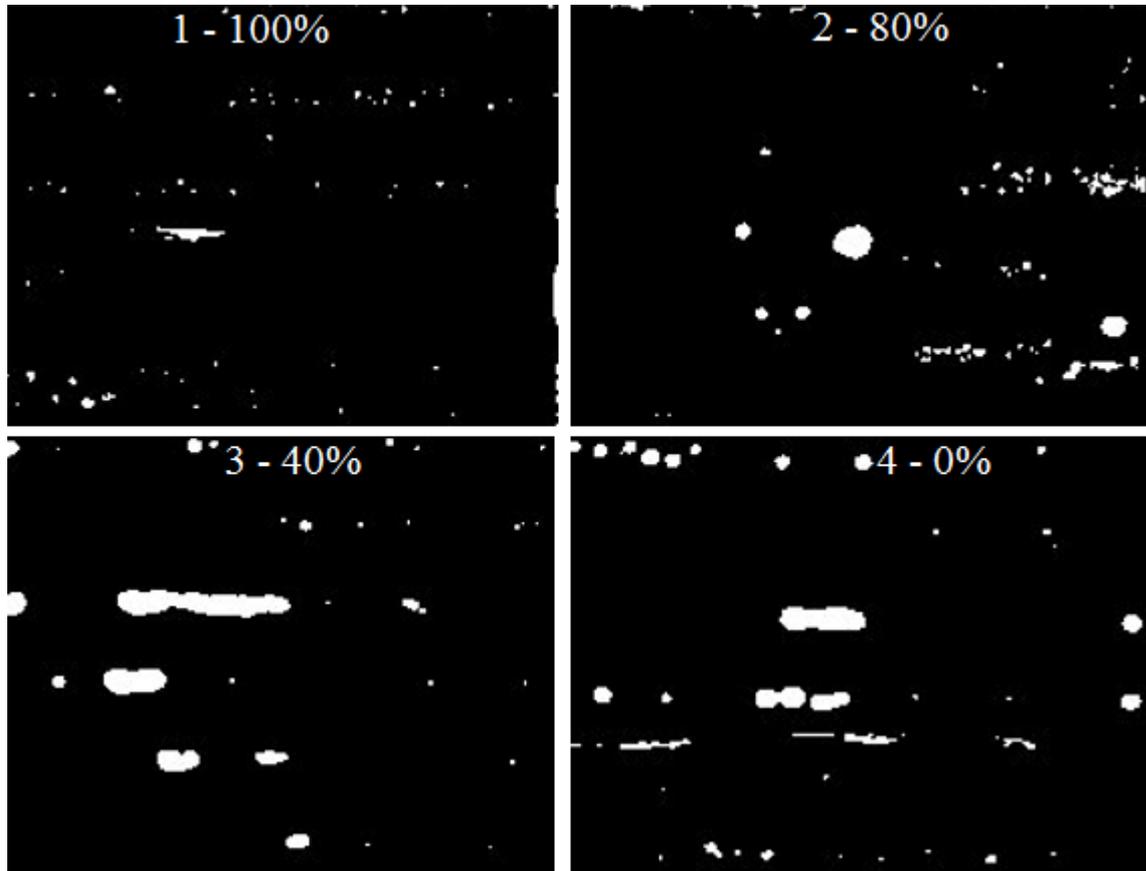
CARACTERÍSTICAS
Altura: 1134 pixels
Largura: 1359 pixels
Area da imagem: 1541106 pixels

7.712 % de volume de possível porosidade
```

Fonte: Autor (2017).

**APÊNCIDE C – RESULTADO DO TRATAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS DO  
ARTIGO**

Figura 24 - Imagens do artigo tratadas via software.



Fonte: Autor (2017).

## APÊNDICE D – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO ARTIGO

Figura 25 - Resultado da amostra com 100% de vácuo.

```
Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul  8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta:  21
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 240

Pixels corrigido para preto: 2569
Pixels corrido para branco: 131

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 183 pixels
Largura: 213 pixels
Area da amostra: 38979 pixels

0.849 % de volume de possível porosidade
```

Fonte: Autor (2017).

Figura 26 - Resultado da amostra com 80% de vácuo.

```
Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul  8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta:  20
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 235

Pixels corrigido para preto: 2547
Pixels corrido para branco: 405

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 191 pixels
Largura: 231 pixels
Area da amostra: 44121 pixels

2.063 % de volume de possível porosidade
```

Fonte: Autor (2017).

Figura 27 - Resultado da amostra com 40% de vácuo.

```

Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul  8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta:  23
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 234

Pixels corrigido para preto: 1640
Pixels corrido para branco: 635

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 188 pixels
Largura: 236 pixels
Area da amostra: 44368 pixels

3.14 % de volume de possível porosidade

```

Fonte: Autor (2017).

Figura 28 - Resultado da amostra com 0% de vácuo.

```

Python 3.6.2 (v3.6.2:5fd33b5, Jul  8 2017, 04:14:34) [MSC v.1900 32 bit (Intel)]
on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
RESTART: C:\Users\DELL\Google Drive\curso\TCC\IMAGEM\PROGRAMA_IMAGEM_FUNCOES.py

ANÁLISE DE PORCENTAGEM VOLUMÉTRICA DE POSSÍVEL POROSIDADE

Valor do limite do pixel corrigido para a cor preta:  21
Valor do limite do pixel corrigido para a cor branca: 235

Pixels corrigido para preto: 2092
Pixels corrido para branco: 464

Processo sem erros

CORPO DE PROVA

DIMENSÕES
Altura: 170 pixels
Largura: 222 pixels
Area da amostra: 37740 pixels

2.666 % de volume de possível porosidade

```

Fonte: Autor (2017).