

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

LUIZ AUGUSTO WESCHENFELDER FOLLETTO

TERMOGRAFIA APLICADA A DETECÇÃO DE VAZIOS EM LAMINADOS

Joinville

2019

LUIZ AUGUSTO WESCHENFELDER FOLLETO

TERMOGRAFIA APLICADA A DETECÇÃO DE VAZIOS EM LAMINADOS

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(a): Dr. Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2019

LUIZ AUGUSTO WESCHENFELDER FOLLETTO

TERMOGRAFIA APLICADA A DETECÇÃO DE VAZIOS EM LAMINADOS

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.

Banca Examinadora:

Dr. Gabriel Benedet Dutra
Orientador
Presidente

Dr. Renato Oba
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Rafael Gallina Delatorre
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Durante o período acadêmico, muitas pessoas contribuíram e colaboraram para minha formação.

Agradeço aos meus pais que mesmo morando em outro continente me apoiaram e deram estruturas ao longo da graduação.

Aos meus familiares que apesar da distância se fizeram presentes nos momentos difíceis.

A minha namorada e amigos que conquistei em Joinville, os quais são minha família nessa cidade.

Ao professor Gabriel Benedet Dutra que sempre abriu as portas do laboratório, me ajudou nas pesquisas e pela orientação deste trabalho.

À banca examinadora que aceitou o convite, em especial ao Professor Renato Oba que se prontificou em ajudar nas análises.

Aos colegas que fiz amizade durante o curso, em especial ao Felipe Santos, Luiz Felipe Kamienski e ao Vitor Henrique Pachedo Schmitt que contribuíram e acreditaram nas minhas idéias.

À Equipe Babitonga, a qual fui membro durante os dois últimos anos de graduação.

À Equipe Roboat de nautidesign, a qual fui membro desde 2016.

À empresa CarBuss que acreditou em mim e abriu as portas para estágio.

E por fim à família Triplo X pelos momentos que me proporcionaram durante todos esses anos.

RESUMO

Defeitos como bolhas e vazios em laminados estão presentes na indústria náutica, principalmente em estaleiros e empresas que realizam o processo de laminação manual. Assim, técnicas de detecção destes defeitos volumétricos sem a deterioração da peça são de grande importância para este setor. Esse trabalho apresenta o ensaio não destrutivo (END) de laminados navais para detecção de defeitos utilizando termografia infravermelha (TIV). A TIV possibilita um mapeamento térmico na superfície do laminado e apresenta os defeitos por diferença de temperatura. Para fazer a análise térmica foi confeccionado um laminado com vazios de tamanhos conhecidos para obter um bloco padrão com espessura de 1,6 mm. Como parte dos resultados encontrados, está a dificuldade da análise térmica para superfícies de baixa emissividade, a identificação dos vazios de até 20mm de diâmetro e os problemas no processo de identificação dos vazios de 10 e 5mm. Apesar de algumas limitações a técnica se mostrou eficiente para identificação de vazios em placas de compósitos até um determinado diâmetro.

Palavras-chave: Termografia infravermelha. Ensaio não destrutivo. Laminados. Vazios. Emissividade.

ABSTRACT

Blistering and voids in laminates are common situations in the nautical industry, once many processes are still manual. Thus, techniques for detecting these volumetric defects with no deterioration have great importance to this sector. This work shows the non-destructive testing on naval laminates using Infrared Thermography (IRT). The IRT enables a thermal mapping on a component to find defective regions with defects or damage by temperature difference. For thermal analysis has been manufactured single skin laminate with standard blister diameters in order to have a template with a thickness of 1,6 mm. As results, was found the difficulty to perform the thermal analysis for low emissivity surfaces as well the identification of voids up to 20mm diameter and also problems in the process of identifying voids of 10 and 5mm. Despite some limitations this technique has proved to be efficient for voids identification on composite boards up to a certain diameter.

Keywords: Infrared thermography. Non-destructive testing. Laminates. Voids. Emissivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Probabilidade de detecção de danos em laminados para vários métodos de END .	13
Figura 2 – Processo de laminação manual.....	15
Figura 3 – TIV na forma ativa em modos de inspeção por reflexão e transmissão.....	17
Figura 4 – TIV em modo de inspeção por reflexão.....	18
Figura 5 – TIV em modo de inspeção por transmissão.....	18
Figura 6 – Espectro de radiação eletromagnética.....	19
Figura 7 – Espectro de radiação de um corpo negro.....	21
Figura 8 – Corpo de prova para teste preliminar: a) Lado sem gel coat, b) Lado com gel coat.....	24
Figura 9 – Gabarito modelado no software NX em 3D.....	25
Figura 10 – Gabarito modelado no software NX em 2D [mm].....	25
Figura 11 – Gabarito com os insertos para aplicação no laminado.....	26
Figura 12 – Processo de laminação manual: a) Moldes encerados, b) Presença do gel coat em um dos moldes.....	26
Figura 13 – Gabaritos com os insertos sendo inseridos na laminação.....	27
Figura 14 – Vazios criados no laminado.....	28
Figura 15 – Laminado finalizado.....	28
Figura 16 – Termopar na região central do laminado.....	29
Figura 17 – Bancada de testes.....	30
Figura 18 – Laminado com tinta de alta emissividade.....	31
Figura 19 – Primeiro teste preliminar: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 31 segundos de aquecimento.....	32
Figura 20 – Segundo teste preliminar: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento.....	33
Figura 21 – Laminado com vazios de 30, 20, 10 e 5mm, respectivamente.....	34
Figura 22 – Teste para o vazio de 30mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento.....	35
Figura 23 – Teste para o vazio de 20mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento.....	35
Figura 24 – Teste para o vazio de 10mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento.....	36

Figura 25 – Teste para o vazio de 30mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b)
Amostra com 1 minuto de aquecimento 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das temperaturas indicadas durante análises preliminar	33
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- END – Ensaio Não-Destrutível
TIV – Termografia Infravermelha
IR – Infravermelha
MEKP – Peróxido de Metil Etil Cetona

LISTA DE SÍMBOLOS

c_o – Velocidade da luz no vácuo = $2,99792458 \times 10^8 \text{ m. s}^{-1}$

E_b – Emitância total [W/m^2]

$E_{\lambda,b}$ – Emitância espectral [$\text{W. m}^{-2}. \mu\text{m}^{-1}. \text{sr}^{-1}$]

h – Constante de Planck = $6,626076 \times 10^{-34} \text{ J. s}$

$I_{\lambda,b}$ – Intensidade de radiação [$\text{W. m}^{-2}. \mu\text{m}^{-1}. \text{sr}^{-1}$]

k – Constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$

T – Temperatura ao qual emite radiação o corpo negro [K]

ε – Emissividade

λ – Comprimento de onda [μm]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. LAMINAÇÃO MANUAL	15
2.2. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	16
2.2.1 Radiação	19
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 CONFECÇÃO AMOSTRAS TESTES PRELIMINARES.....	23
3.2 CONFECÇÃO DOS INSERTOS.....	24
3.3 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS: LAMINAÇÃO MANUAL	26
3.4 BANCADA PARA TIV	29
4 RESULTADOS	32
5 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O mercado náutico brasileiro, impulsionado por um movimento de expansão, atingiu patamares inéditos nos anos de 2008, 2009 e 2010. O mercado de embarcações de luxo e grande porte abriram portas para grandes marcas internacionais, que colocaram o Brasil como mercado de alto potencial, mesmo diante da crise econômica. Essa expansão alavancou a demanda por embarcações e acessórios, fazendo com que os serviços, empresas, pesquisas e estudos crescessem e se modernizassem também (INDÚSTRIA NÁUTICA BRASILEIRA, 2012).

Além disso, o Brasil possui 7.840km de costa ao longo de 17 estados, que somados a rios e lagos são mais de 32.500km navegáveis, representando um dos maiores potenciais náuticos do mundo. Apesar da crise econômica de 2008, a economia brasileira se desenvolveu e o setor náutico acompanhou o crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) na contramão da crise mundial até 2014 (SCHMIDT, 2017).

A construção de pequenos estaleiros deu início ao segmento náutico no Brasil e entre 1970 e 1980 o setor ganhou força e consolidou o mercado no cenário econômico nacional. A partir de 1990 o setor náutico brasileiro estabeleceu padronização nos processos de construção e recebeu reconhecimento internacional por suas tecnologias e design diferenciado em relação aos mesmos produtos europeus e norte americanos. Assim ganhou força no mercado internacional, com exportação e competitividade para produtos importados (SEBRAE, 2014).

O mercado náutico brasileiro é responsável por milhares de empregos em empresas de pequeno e médio porte do Brasil e é uma grande geradora de emprego, renda e fonte de inovação tecnológica. Essas empresas contam com atividades diversas, produção de embarcações, manutenção, venda de peças e serviços de apoio náutico (SEBRAE, 2014).

Apesar do potencial e constante desenvolvimento do setor náutico brasileiro, muitas técnicas de produção ainda são dependentes de mão de obra qualificada e metodologias manuais de confecção. Para se alcançar peças com qualidade estrutural, o processo deve garantir peças em compósitos sem vazios ou defeitos volumétricos.

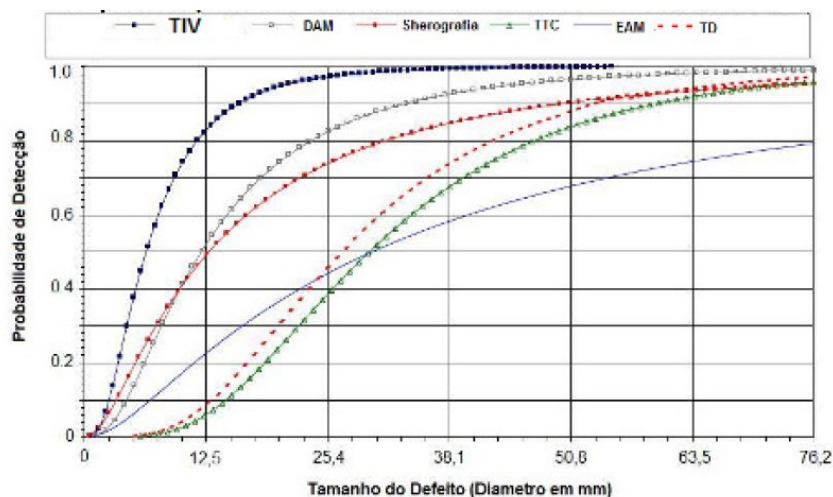
O presente trabalho baseia-se no ensaio não-destrutível (END) de laminados navais para detecção de defeitos utilizando termografia infravermelha (TIV), visto que bolhas e vazios em laminados são situações comuns na indústria náutica, pelo fato de muitos processos ainda serem realizados de forma manual. Assim, técnicas de detecção destes defeitos volumétricos sem a deterioração da peça são de grande importância para este setor.

O END não afeta a integridade e funcionalidade dos materiais, portanto pode ser definido como um conjunto de técnicas que possibilitam a análise e a caracterização de materiais, componentes e estruturas. (ALMEIDA, 2010).

Dentre as técnicas de END a que mais vem se destacando é a TIV, técnica que se baseia no mapeamento térmico de um componente para encontrar suas regiões com defeitos ou danos. Destaca-se pela facilidade de analisar grandes superfícies em pouco tempo, a interpretação das imagens se dá em tempo real, a radiação não é de natureza letal e durante a inspeção não requer contato com o material. As poucas, mas importantes desvantagens do método são: material inspecionado deve ser fino, o custo relativamente alto do equipamento e superfície do material inspecionado deve possuir emissividade consideravelmente alta (TARPANI, 2009).

A figura 1 ilustra a relação entre várias probabilidades de detecção de danos utilizando END e a dimensão dos defeitos ou danos encontrados. No gráfico estão as seguintes técnicas: TIV, detecção automática manual (DAM), sherografia, teste de impacto computadorizado (TIC), escaneamento acústico móvel (EAM) e TD. Pode-se observar que a TIV se destaca como a mais eficiente com aproximadamente 100% de detecção para defeitos maiores de 30mm.

Figura 1 – Probabilidade de detecção de danos em laminados para vários métodos de END



Fonte: ALMEIDA (2010)

1.1 OBJETIVOS

Para estudar a problemática e evoluir nos estudos sobre ensaio não destrutivo utilizando a técnica de TIV em compósitos, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo estudar a viabilização da termografia infravermelha como END para detecção de defeitos em compósitos navais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Montar uma bancada para realizar TIV em uma placa plana em compósito de fibra de vidro e resina poliéster comumente utilizado no setor naval;
- Verificar o limiar de detecção de vazios da técnica TIV em placas do compósito naval, com variação do diâmetro dos vazios de 1 a 100 milímetros;
- Verificar viabilidade de implementação do método TIV no setor naval, assim como destacar limitações do método neste trabalho;

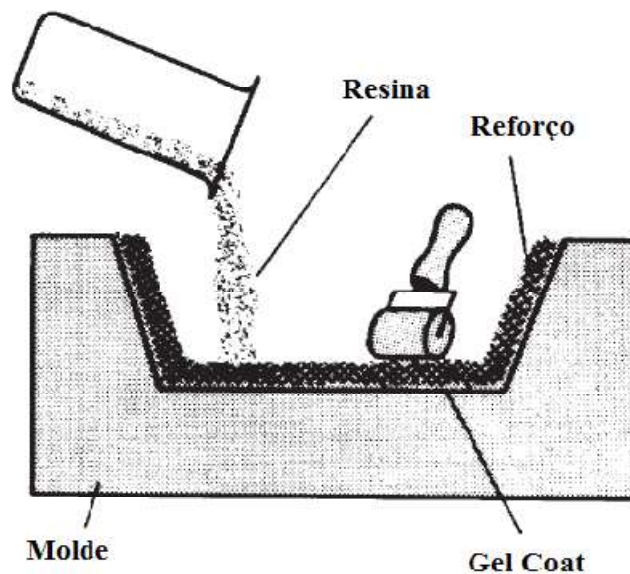
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do estudo, neste capítulo serão discutidos os conceitos utilizados nesse trabalho. Para poder aplicar a TIV em laminados navais deve-se conhecer os processos de laminação manual e a fundamentação teórica da TIV.

2.1. LAMINAÇÃO MANUAL

Embora já existam métodos mais modernos de laminação, como a laminação a vácuo, infusão e RTM (Resin Transfer Molding), a laminação manual é uma das primeiras etapas no aprendizado de qualquer laminador ou construtor, sendo ela a base para o conhecimento dos processos mais complexos (NASSEH, 2008).

Figura 2 – Processo de laminação manual



Fonte: GREENE (1999)

O processo de laminação manual se baseia em colocar vários reforços de fibra, seja de vidro, aramida ou carbono, sobre um molde com geometria a ser copiada, aplicar resina sobre eles, e com esforço manual dissipar a resina de modo uniforme sobre as fibras com auxílio de uma trincha ou rolo de lã de carneiro para impregnação (NASSEH, 2008).

Além das fibras, que fornece resistência mecânica ao laminado, do molde, da trincha e do rolo de lã de camelo já citados, alguns outros materiais são necessários para a laminação

manual. Antes de realizar a laminação, é necessário aplicar um desmoldante no molde com o objetivo de facilitar a retirada do laminado após o processo concluído. O gel coat é a camada superficial do laminado, tem a finalidade de proteger a peça das intempéries e dos raios UV e dar acabamento. Junto com a resina, que tem a função de unir os reforços formando um sólido, é aplicado o iniciador, esse aumenta a velocidade de cura da resina. É importante eliminar qualquer inclusão de ar e para isso é utilizado o rolo tira bolhas, ele comprime o laminado e diminui a quantidade de bolhas e vazios.

O processo de laminação manual é mais utilizado para laminados sólidos, sem núcleo, porém ele pode ser aplicado para laminações com núcleo inercial. Vários fabricantes desenvolveram técnicas de laminação com núcleo que podem ser aplicados com sucesso em peças de pequeno e médio porte (NASSEH, 2008).

A laminação manual possui um baixo custo do ferramental, junto com uma baixa tecnologia empregada e uma facilidade operacional. O processo, no entanto, tem dificuldade em garantir ausência de bolha, dificuldade de homogeneizar a matriz plástica e elevado consumo de resina. Porém com um laminador eficiente e experiente, é possível obter laminados com qualidade e sem excessivo consumo de resina.

2.2. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

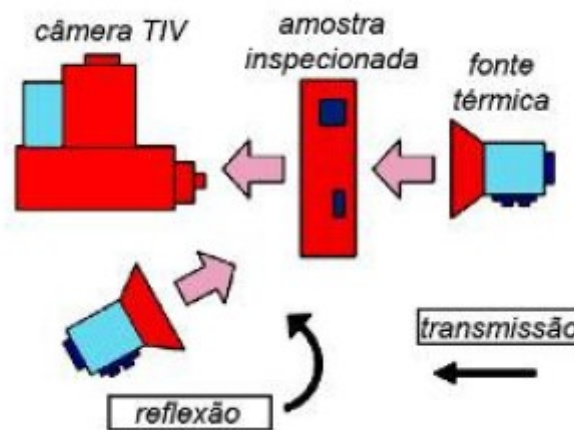
A termografia infravermelha (TIV) é a técnica de ensaio não-destrutivo (END) que se baseia no mapeamento térmico para então originar os termogramas de uma peça, componente ou estrutura para identificar as regiões com defeitos. Isso acontece porque a condutividade térmica do material em análise depende do seu grau de integridade. Assim, na presença de bolhas, vazios ou defeitos, o fluxo de calor é alterado e isso causa uma diferença de temperatura nessa região do material. Desta forma, a revelação da presença de danos ou defeitos ocorre devido ao aquecimento ou resfriamento forçado da peça (o que se chama termografia ativa), ou então ocorrendo sem fonte de aquecimento ou resfriamento (termografia passiva) (ALMEIDA, 2010).

Para a termografia ativa é necessário fonte externa de calor, onde o objeto de estudo é energeticamente estimulado por fontes térmicas simples, como lâmpadas halogêneas, flashes, jato de ar quente ou então por fontes mais elaboradas, como pulso ultra-sônico, correntes parasitas, radiação infravermelha, microondas e laser. Esse procedimento é realizado com o intuito de gerar um fluxo interno de calor no objeto inspecionado para que a eventual presença de defeitos cause uma perturbação desse fluxo, o que gera um contraste térmico na superfície

do componente, que é detectado pela câmera termográfica onde a mesma acusa a existência de descontinuidade (ALMEIDA, 2010).

A fonte de calor na termografia ativa pode estar do mesmo lado da câmera termográfica, onde a inspeção será por reflexão, ou então a fonte térmica pode estar do lado oposto a câmera, ficando o objeto de estudo entre a câmera e a fonte de calor e estabelecendo a inspeção por transmissão. A figura 3 ilustra ambos os modos de inspeção.

Figura 3 – TIV na forma ativa em modos de inspeção por reflexão e transmissão

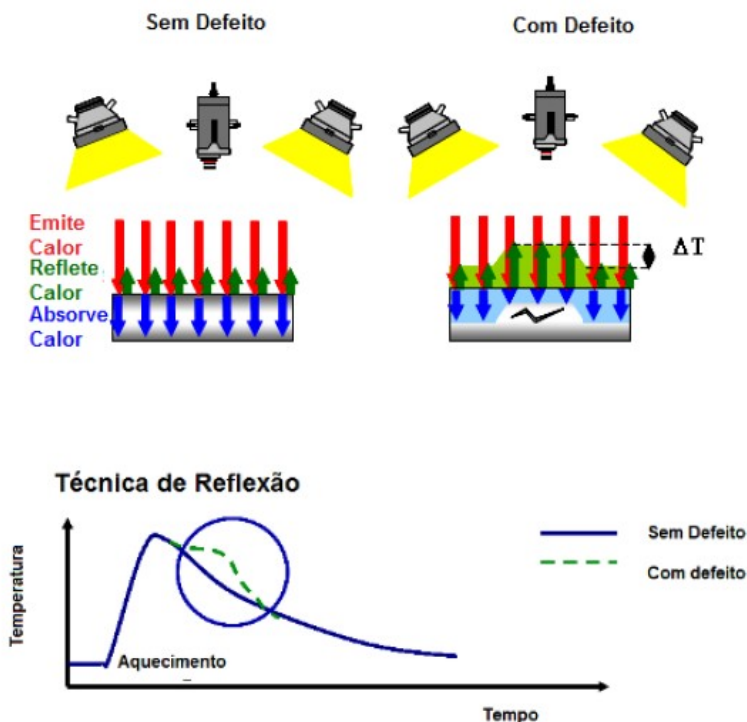


Fonte: ALMEIDA (2010)

A figura 4 representa dois corpos em análise por TIV, um corpo sem defeito e outro corpo com defeito. O calor então se acumula na região de análise da câmera, pois o defeito reduz a capacidade do material transportar calor, e assim ela identifica um ponto quente. O ponto quente é identificado pela câmera térmica porque a análise é feita por reflexão, se a inspeção é realizada por transmissão, a câmera identificará um ponto frio na região de dano ou defeito, representado na figura 5.

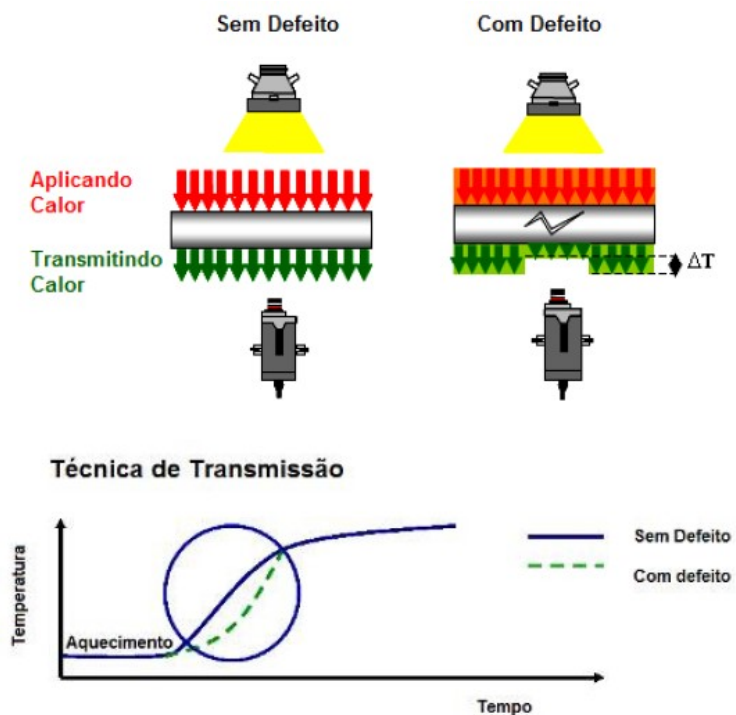
A figura 4 apresenta um aquecimento por pulso rápido, mas no caso de um ciclo de aquecimento longo, denomina-se termografia por aquecimento contínuo (figura 5). Esses dois diferentes métodos podem ser observados nas curvas de temperatura pelo tempo na superfície inspecionada para o material íntegro e para o material com dano ou defeito. Ainda, se o material for inspecionado por aquecimento contínuo, e o material for analisado novamente durante o resfriamento natural, é considerado inspeção termográfica por resfriamento contínuo.

Figura 4 – TIV em modo de inspeção por reflexão



Fonte: ALMEIDA (2010)

Figura 5 – TIV em modo de inspeção por transmissão



Fonte: ALMEIDA (2010)

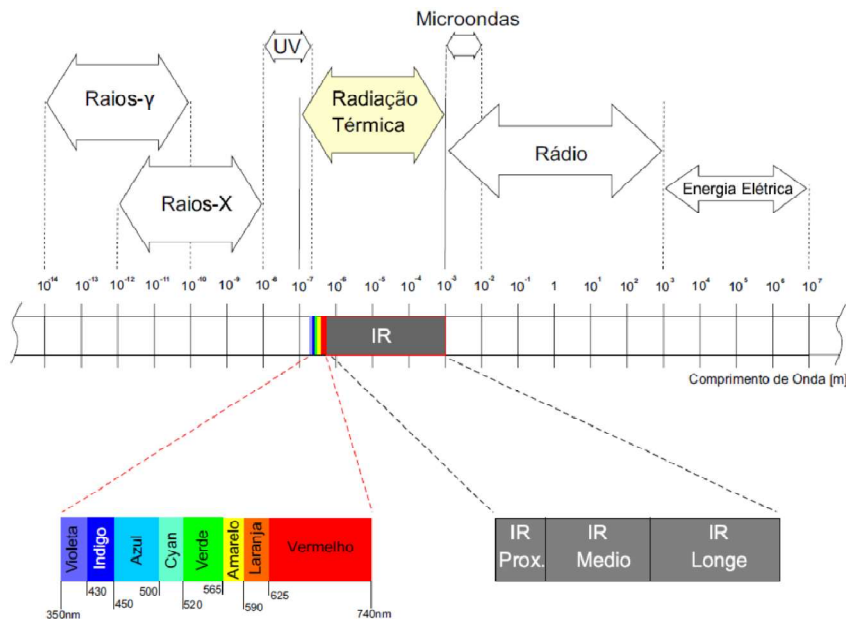
Um termograma exhibe a diferença de temperatura do componente analisado na forma de gradientes de coloração através de câmeras termográficas. A técnica pode ser aplicada a diversos tipos desse componente em análise, incluindo laminados, compósitos e alumínio.

A TIV pode apresentar um promissor potencial na redução de custos de inspeção e durante manutenções periódicas de componentes. Além de favorecer resultados confiáveis de maneira rápida e eficiente (ALMEIDA, 2010).

2.2.1 Radiação

Um objeto irradia energia eletromagnética quando aquecido, essa energia é irradiada em diferentes níveis do espectro de radiação, como pode ser observado na figura 6. Um dos modos que essa energia é irradiada é na forma de radiação infravermelha (IR), podendo ser refletida, absorvida, emitida e transmitida através de um corpo sólido.

Figura 6 – Espectro de radiação eletromagnética



Fonte: RODRÍGUEZ (2010)

Radiação IR é apenas uma parte do espectro de onda eletromagnética cuja energia transportada depende somente da temperatura do corpo que está emitindo. Como visto na figura 6, à medida que o comprimento de onda aumenta, o espectro é dividido em bandas, sendo: raio gama, raios-X, raios ultravioleta, espectro visível, infravermelho, ondas de raio e microondas. O olho humano só consegue ver a faixa do espectro que varia de 0,4 a 0,8 μm , já

o espectro infravermelho varia seu comprimento de onda de 0,78 até 1.000 μm . Ele pode ser dividido nas seguintes faixas: IR próximo (com comprimentos de onda de 0,78 até 1,5 μm), IR médio (1,5 até 20 μm) e IR distante (20 até 1.000 μm). Essa divisão de banda é feita em relação a capacidade do detector IR. Os equipamentos que trabalham com IR próximo são fotodetectores quânticos, fotoemissivos e fotovoltaicos, já os equipamentos que trabalham com IR médio e distante são detectores térmicos (RODRÍGUEZ, 2010).

As câmeras térmicas detectam uma energia emitida na forma de onda através de um sistema óptico que converte IR em tensão elétrica e assim formam a imagem térmica. Essa energia detectada pela câmera é gerada pela vibração e rotação dos átomos e moléculas, e quanto mais aquecido um objeto, maior é a agitação atômica e molecular e maior a energia infravermelha transmitida por ele.

A energia transmitida por uma superfície negra a uma determinada temperatura é definida pela Lei de Planck. Essa lei é uma das mais importantes que trata da emissão térmica, pois descreve a distribuição de energia emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda para uma determinada temperatura. O Corpo negro é definido como um corpo que possui emissividade máxima, ou seja, não transmite luz e irradia a maior quantidade de energia possível para dada temperatura e nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida (RODRÍGUEZ, 2010).

O corpo negro além de absorvedor ideal é também um emissor ideal e sua emissividade é igual a 1. Ele ainda pode ser aproximado a um orifício que conecta a cavidade com o exterior de um objeto onde a radiação incidente no orifício é refletida nas paredes internas da cavidade, assim, absorvendo toda radiação.

A Lei de Planck é dada pela Eq. (1):

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

$I_{\lambda,b}$ = Intensidade de radiação em $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$

λ = comprimento de onda em μm

T = temperatura ao qual emite radiação o corpo negro em K

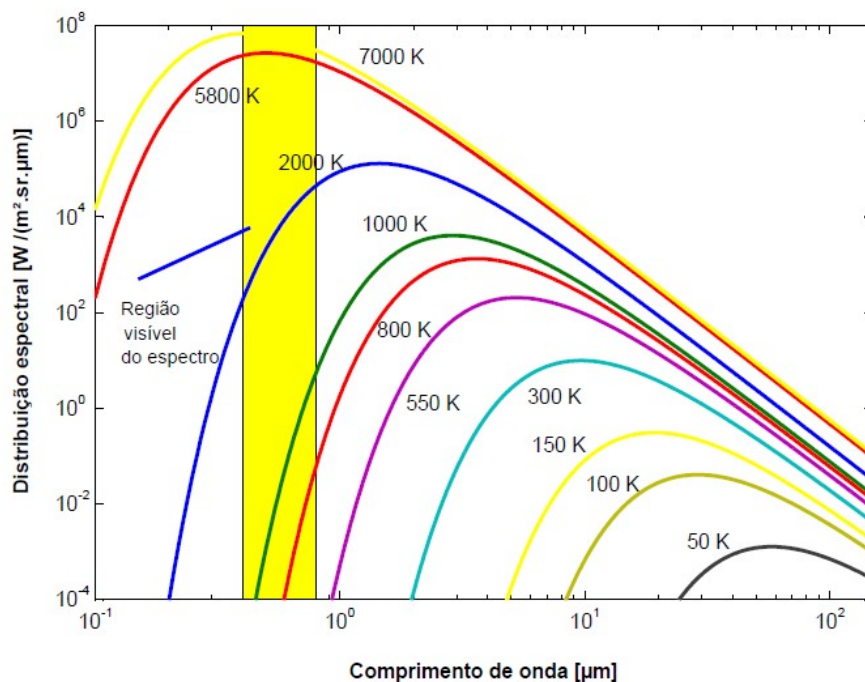
h = constante de Planck = $6,626076 \times 10^{-34} J \cdot s$

k = constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$

c_0 = velocidade da luz no vácuo = $2,99792458 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$

A figura 7 representa a distribuição de energia por comprimento de onda para diferentes temperaturas de um corpo negro. Pode-se também notar a localização do espectro visível. Na medida em que o corpo negro é aquecido, ele passa a emitir um espectro de radiação que depende da temperatura. Para uma determinada temperatura, a magnitude da radiação transmitida varia com o comprimento de onda. (RODRÍGUEZ, 2010)

Figura 7 – Espectro de radiação de um corpo negro



Fonte: MALDAGUE (2001)

Ainda temos a emitância espectral, é importante apresentá-la, pois a energia irradiada depende também da emissividade, dada por:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \iint I_{\lambda,b}(\lambda, T) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (2)$$

Sendo os limites de integração de zero a 2π e de zero a $\pi/2$.

A emitância total de um corpo negro é obtida através da integral da equação (2), essa integral resulta na lei de Stefan-Boltzmann, equação (3), que permite o cálculo da quantidade de radiação emitida para todos os comprimentos de onda a partir da temperatura do corpo negro:

$$E_b = \int E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

Sendo o limite de integração de zero a $+\infty$.

Para a utilização da TIV é necessário saber a emissividade do material analisado, pois o mesmo necessita uma emissividade maior que 0,20. A emissividade é a propriedade do material que faz relação com sua emissão de energia infravermelha, ela é definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro para uma mesma temperatura. A obtenção da emissividade do material pode ser obtida através da literatura do fabricante ou análise em laboratório.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos práticos utilizados para obter os resultados. Começando com a confecção de amostras para teste preliminares, confecção dos insertos e do laminado e elaboração de uma bancada para análise das placas utilizando uma câmara térmica.

3.1 CONFECÇÃO AMOSTRAS TESTES PRELIMINARES

Para realização de testes preliminares foi confeccionado um corpo de provas com dimensão de 100x100mm. Nele foi adicionado um inserto de 40mm de diâmetro no centro da peça durante o processo de laminação e removido antes da cura da resina.

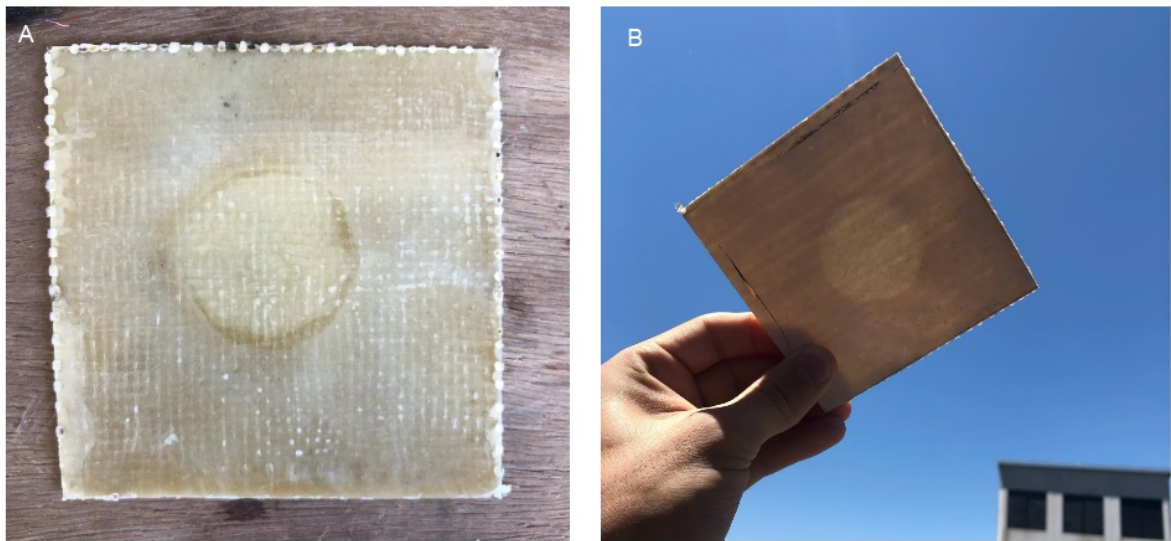
Primeiramente foram preparados os moldes para a laminação, os vidros foram demarcados com fita na região de trabalho. A preparação começou com a aplicação de cinco camadas de cera carnaúba. Depois da aplicação da cera, foi inserido desmoldante a base de álcool polivinílico para facilitar o processo de desmolde.

Após a preparação dos moldes, foram feitos os cortes das fibras, totalizando três tecidos biaxiais de 300 g/m² e três mantas de 300 g/m². Dois tecidos e duas mantas para a laminação com presença de gel coat e um tecido e uma manta de para a outra laminação. Na laminação com a presença de gel coat foi inserido o inserto e antes da cura completa da resina o mesmo foi removido, posteriormente as duas laminações foram unidas.

Antes do início da laminação, foi realizado um teste de gel time para ser determinado o tempo de cura da resina. Foi feito um teste com 50g de resina poliéster ortoftálica e 1,5% de iniciador a base MEKP (peróxido de metil etil cetona), o que nos resultou em um gel time de 14 minutos.

A figura 8 (a) representa o lado sem gel coat enquanto a figura 16 (b) representa o lado do gel coat exposto contra a luz, onde pode ser observado o vazio de 40mm, gerado pelo posicionamento do inserto.

Figura 8 – Corpo de prova para teste preliminar: a) Lado sem gel coat, b) Lado com gel coat



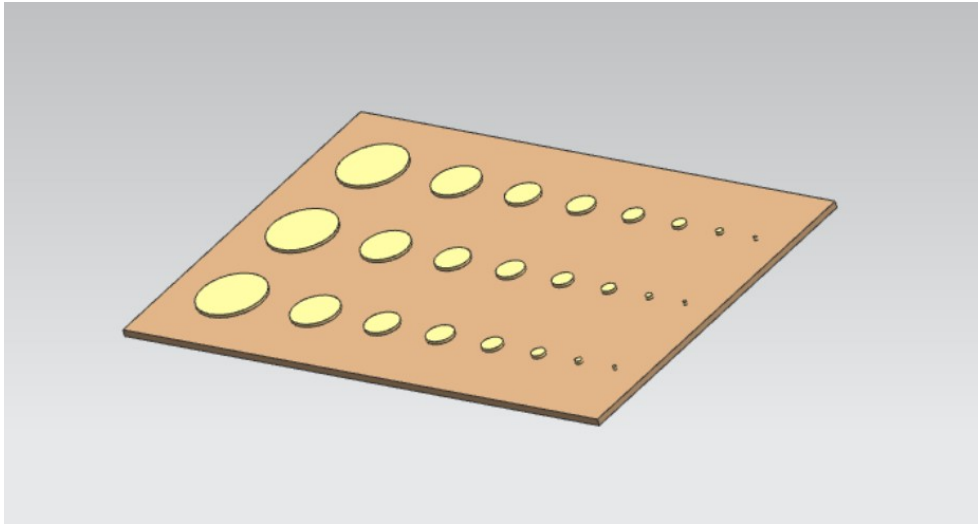
Fonte: AUTOR (2019)

3.2 CONFECÇÃO DOS INSERTOS

Para serem obtidos tamanhos controlados de vazios dentro da laminação foram confeccionados insertos cilíndricos de tamanhos definidos, com o intuito de serem inseridos durante o gel time e removidos antes da cura da resina. Para isso serão realizadas duas laminações simultâneas, uma com gel coat e uma camada a mais de tecido e manta, e outra sem gel coat, para que possam ser unidos após a remoção dos insertos e assim os vazios no laminado serem obtidos.

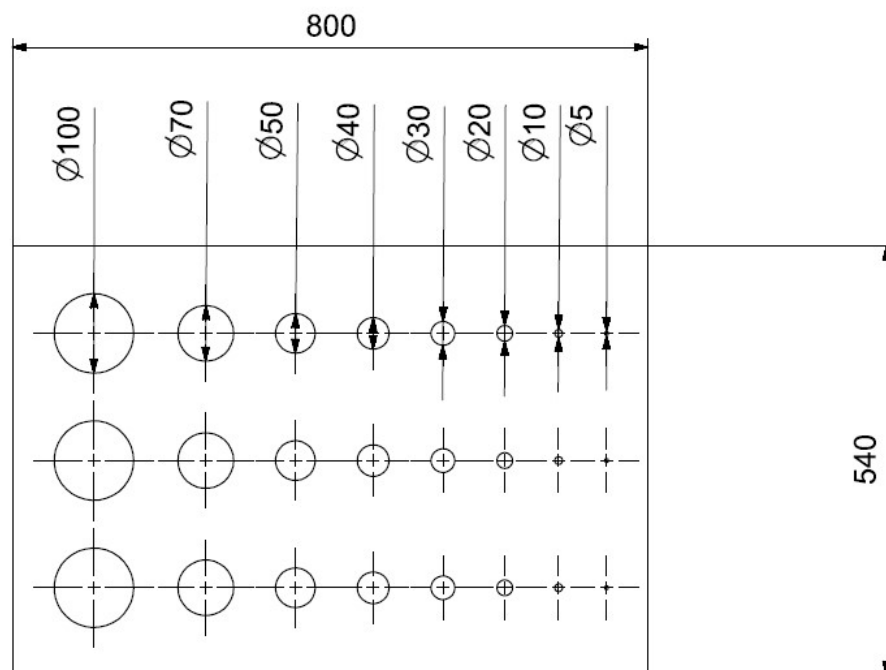
Os insertos foram confeccionados com uma varredura de cinco a cem milímetros de diâmetro e sua espessura sendo de 1,6 milímetros. O material utilizado para essa confecção foi o papelão Paraná, fabricado a partir da madeira de pinos e água. Foram confeccionados três insertos para cada diâmetro diferente, e para melhor inseri-los durante a laminação, foi criado um gabarito com as mesmas dimensões de comprimento e largura do próprio laminado. Para que não ocorresse contato entre o gabarito e o laminado, mas apenas dos insertos com o laminado, foram sobrepostos três insertos, fazendo com que sua espessura aumentasse de 1,6 para 4,8 mm. O gabarito foi modelado com o auxílio do software NX para melhor visualização do mesmo e pode ser vista na figura 9 e 10. Ainda, a figura 11 representa o gabarito de compensado naval com os insertos colocados.

Figura 9 – Gabarito modelado no software NX em 3D



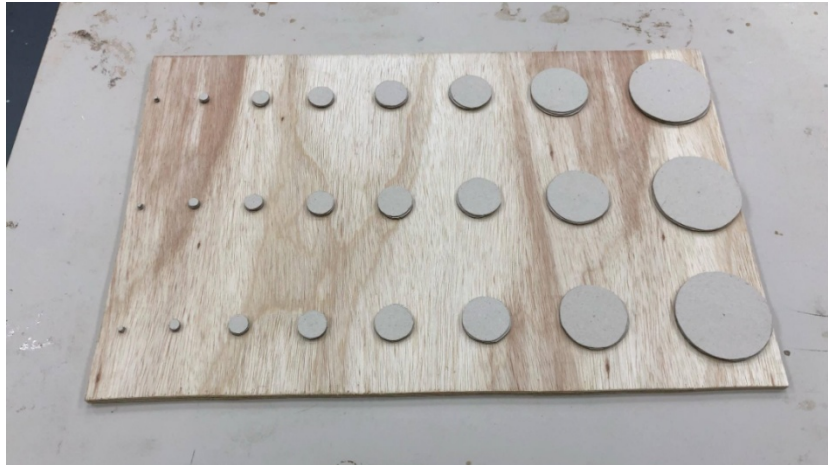
Fonte: AUTOR (2019)

Figura 10 – Gabarito modelado no software NX em 2D [mm]



Fonte: AUTOR (2019)

Figura 11 – Gabarito com os insertos para aplicação no laminado



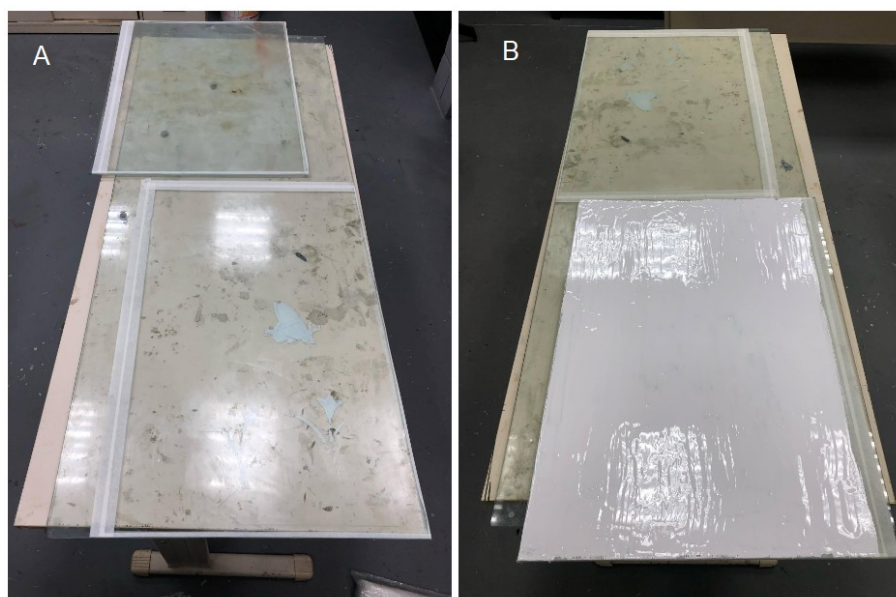
Fonte: AUTOR (2019)

3.3 CONFECCÃO DAS AMOSTRAS: LAMINAÇÃO MANUAL

Para esse laminado foi realizado o mesmo plano de laminação descrito no Capítulo 3.1.

A marcação realizada no molde foi de 540x800mm, resultando em uma área de 0,432 m², e para essa área foi utilizado 350 gramas de gel coat, com 2% de MEKP, para ser obtido uma espessura de gel coat de 0,6mm. A figura 12 apresenta as etapas descritas acima.

Figura 12 – Processo de laminação manual: a) Moldes após a aplicação do agente desmoldante, b) Presença do gel coat em um dos moldes

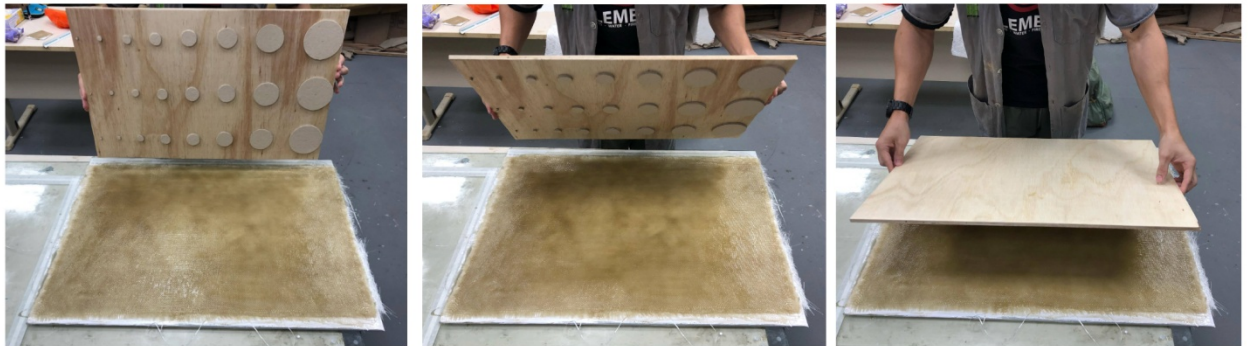


Fonte: AUTOR (2019)

Para definir a quantidade de resina foi mensurada as massas dos tecidos e mantas que foram utilizados para cada molde. Para o primeiro molde com dois tecidos e duas mantas a massa foi de 542,8g. Assumindo uma proporção em massa de resina e fibra de 65% e 35% respectivamente, proveniente de uma laminação manual, a quantidade de resina utilizada foi de 1000 g. Para o segundo molde com um tecido e uma manta a massa foi de 282,8g e com os mesmos cálculos utilizamos 500g de resina.

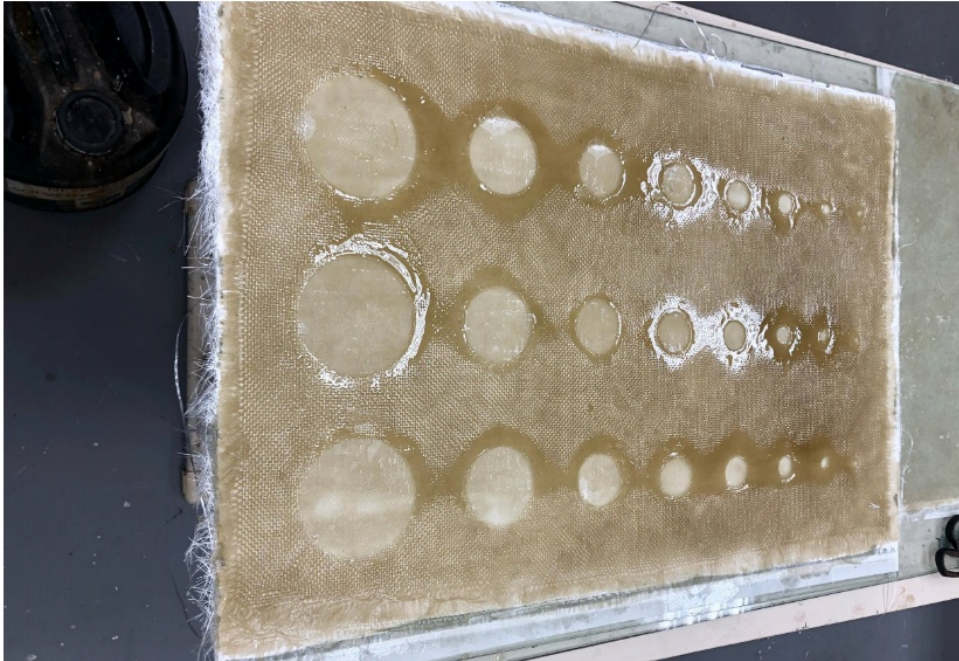
Após a aplicação do iniciador nas resinas e dos tecidos e mantas serem devidamente adicionamos nos moldes, foi então inserido o gabarito com os inserto no laminado durante o processo de gel time, como pode ser visto na figura 13. Depois de retirar o gabarito com os insertos, as duas laminações foram unidas para que os vazios criados fossem isolados. Os vazios criados na laminação também podem ser vistos na figura 14.

Figura 13 – Gabaritos com os insertos sendo inseridos na laminação



Fonte: AUTOR (2019)

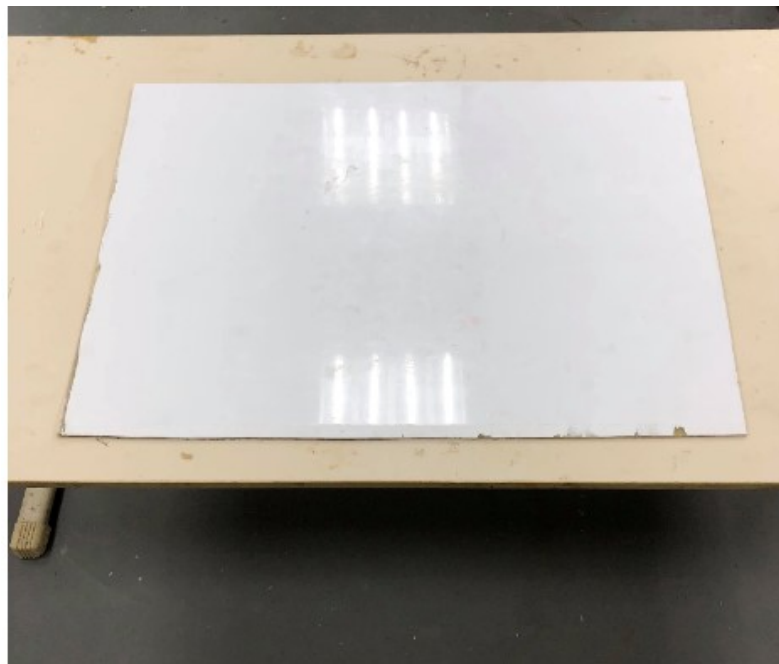
Figura 14 – Vazios criados no laminado



Fonte: AUTOR (2019)

O laminado foi desmoldado e foi realizado um trabalho de acabamento para posterior análise do mesmo em laboratório. A figura 15 representa o laminado finalizado.

Figura 15 – Laminado finalizado



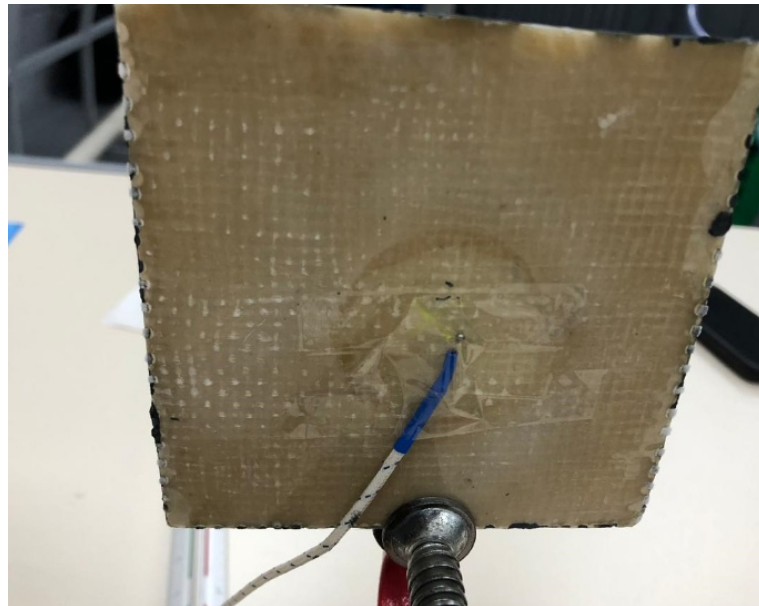
Fonte: AUTOR (2019)

3.4 BANCADA PARA TIV

A câmera térmica utilizada foi a FLIR® T450sc, e após alguns testes para encontrar a melhor distância entre a câmera e o laminado, foi definido uma distância de 400 mm, onde a câmera obteve um melhor foco. Ambos foram posicionados em cima de uma bancada e demarcados para que todos os testes fossem realizados na mesma posição. Foi também utilizada uma morsa de bancada para que o laminado ficasse na posição vertical e não houvesse pontos quentes oriundos da reflexão da radiação térmica da bancada.

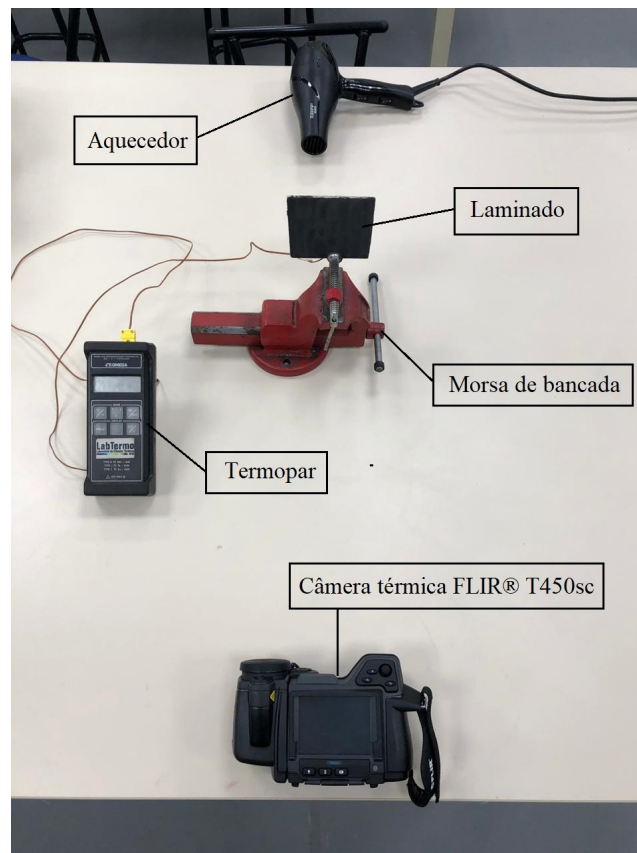
O estímulo térmico foi dado por um aquecedor posicionado na região contrária a câmera térmica, onde a técnica usada é a termografia por aquecimento contínuo e inspeção por transmissão. O aquecedor utilizado tem potência de 1550-1700W, tensão de 220/230V e frequência 50-60-Hz. Para possibilitar a análise térmica foi incluído um termopar do tipo K na região central e traseira do laminado, possibilitando a visualização instantânea da temperatura nessa região. A posição do termopar após o procedimento descrito pode ser observada na figura 16 e o esquema geral da bancada de testes na figura 17.

Figura 16 – Termopar na região central do laminado



Fonte: AUTOR (2019)

Figura 17 – Bancada de testes



Fonte: AUTOR (2019)

A variável que mais afeta a precisão dos resultados captados pela câmera térmica é a emissividade da superfície a ser medida. Caso a emissividade considerada não seja precisa, os resultados de temperaturas fornecidos pela câmera são afetados, pois esses resultados são obtidos através da medição da intensidade radiativa captada pelo sensor da câmera na superfície analisada.

A emissividade do gel coat ortoftálico é baixa para análises com a câmera térmica, essa baixa emissividade pode levar a resultados errôneos ou não confiáveis. Para obter resultados mais precisos e confiáveis, foi utilizada uma tinta de alta emissividade na superfície que será feita a medição pela câmera. Além de a medição ser realizada numa superfície de emissividade mais elevada, a tinta também tem a função de uniformizar a emissividade da superfície. A figura 18 apresenta o laminado que será utilizado no teste preliminar com a presença da tinta na superfície.

Figura 18 – Laminado com a tinta de alta emissividade



Fonte: AUTOR (2019)

Novloski et al. (2018) realizaram uma estimativa da emissividade da tinta, utilizando um material de emissividade conhecida ($\epsilon = 0,95$) na superfície a ser medida e comparando a temperatura estimada pela câmera para a região com material e sem o material, nesse caso uma fita. Se as regiões estiverem em equilíbrio térmico, a diferença apontada pela câmera é a diferença na emissividade entre as duas regiões. Para se ter maior confiabilidade dos resultados, um termopar foi anexado em ambas as regiões para verificação da temperatura estimada pela câmera. Foram realizadas três medições e os resultados da imagem infravermelha foram comparados com a superfície ao lado do termopar. O valor médio de 0,86 para a superfície com tinta foi encontrado.

4 RESULTADOS

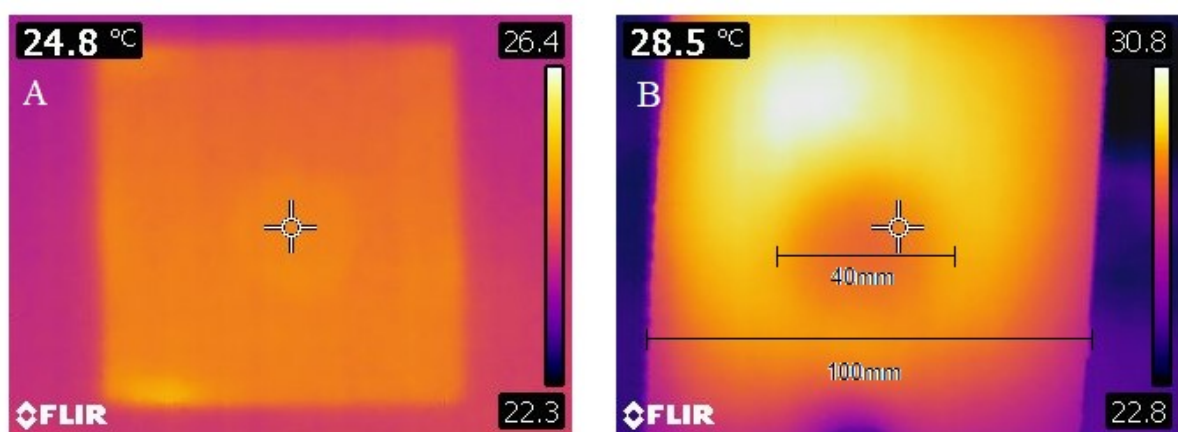
Inicialmente foram realizados dois testes com o corpo de provas com vazio de 40mm de diâmetro confeccionado para os testes preliminares, o primeiro com 30 segundos de aquecimento e segundo com 1 minuto de aquecimento. A figura 19 é referente as imagens termográficas pertencentes ao teste de 30 segundos, e a figuras 20 ao teste de 1 minuto.

Na figura 19 (a), a bancada de testes foi montada e nenhuma fonte externa de aquecimento foi adicionada ao teste, a foto foi tirada em temperatura ambiente ilustrada na imagem em graus Celsius.

A amostra foi aquecida durante 30 segundos e durante o período de resfriamento natural da mesma foram retiradas fotos para análise. A figura 19 (b) apresenta uma das fotos durante o resfriamento, onde a identificação do defeito do laminado aparece de forma centralizada na imagem termográfica.

Note que nas imagens térmicas com defeito é possível observar a escala da largura do laminado e do tamanho do defeito.

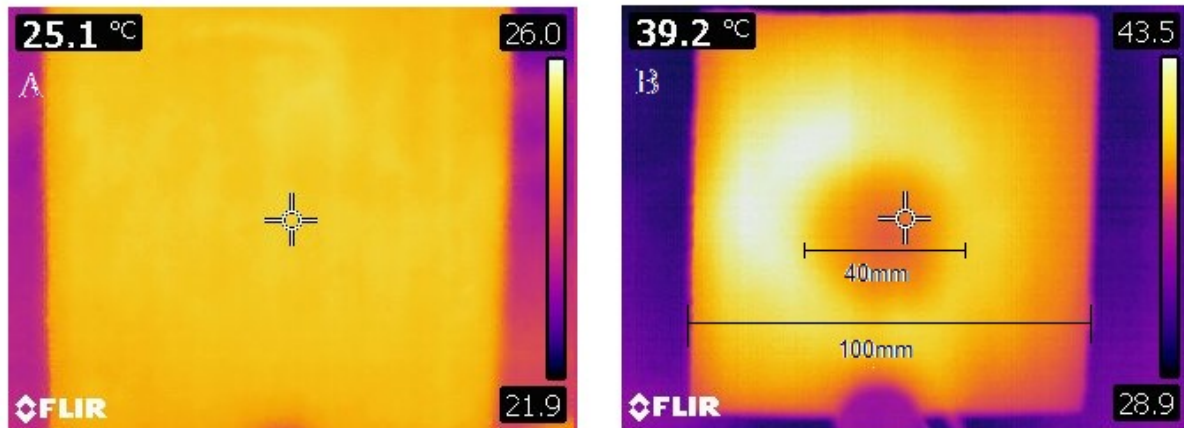
Figura 19 – Primeiro teste preliminar: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 30 segundos de aquecimento



Fonte: AUTOR (2019)

Para os testes com aquecimento de 1 minuto, seguiu-se a mesma metodologia. A figura 20 (a) apresenta o laminado em temperatura ambiente e na figura 20 (b) o laminado durante o período de resfriamento.

Figura 20 – Segundo teste preliminar: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento



Fonte: AUTOR (2019)

Após os primeiros testes, pode-se observar que a análise durante o resfriamento natural do laminado apresentou o vazio de 40mm inserido no mesmo pois a dissipação de calor da parte traseira para a parte frontal do laminado foi obstruída pelo vazio de ar presente na região central, o que acarretou em um acúmulo de calor nessa região.

Durante as etapas dos dois testes foi medida, através do termopar, a temperatura da superfície oposta ao gel coat no momento que o aquecimento foi interrompido. A medição da temperatura do laminado antes do aquecimento e da temperatura no momento da foto durante o resfriamento é dada pela medição da câmera térmica na superfície em frente ao gel coat. Esses valores são indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo das temperaturas indicadas durante análises preliminar

Tempo de aquecimento (s)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura após aquecimento (°C)	Temperatura da medição (°C)
30	24,8	46,1	28,5
60	25,1	47,5	39,2

Fonte: AUTOR (2019)

Para os próximos testes, o laminado de 540x800mm foi cortado em pedaços menores, mantendo os vazios na região central dos cortes, similar ao laminado usado anteriormente. Esses cortes foram feitos para que a análise dos vazios pudesse ser feita de forma individual,

obtendo uma dissipação de calor homogênea durante o aquecimento já que o laminado possui dimensões relativamente grandes para análise.

Como o vazio de 40mm já foi identificado no teste preliminar, a sequência de testes será para os laminados com vazios de 30, 20, 10 e 5mm. Após o corte do laminado, foi separado um laminado com um vazio para cada um dos quatro tamanhos diferentes. A última etapa antes da análise com a câmera foi a pintura de cada laminado com a tinta de alta emissividade. Os laminados prontos para a análise térmica podem ser observados na figura 21.

Figura 21 – Laminados com vazios de 30, 20, 10 e 5mm, respectivamente

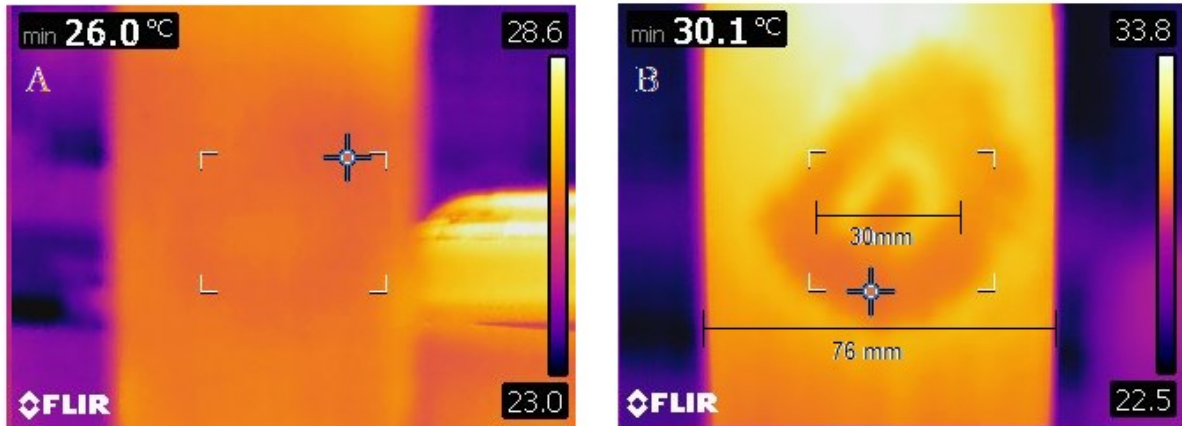


Fonte: AUTOR (2019)

Com base no teste preliminar foi realizado um teste para cada amostra com um aquecimento de 1 minuto. Primeiramente foi registrada uma imagem térmica antes do aquecimento e durante o processo de resfriamento foram registradas fotos para identificação dos vazios.

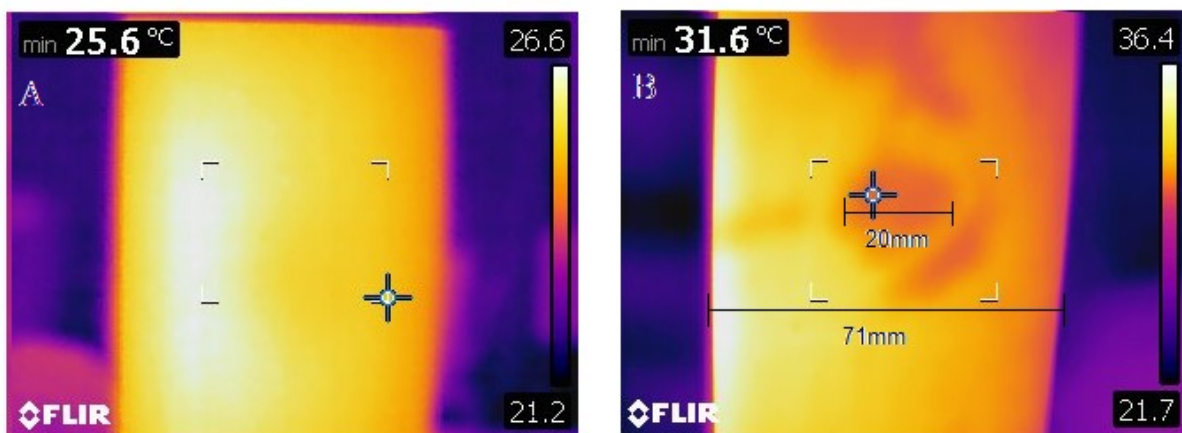
O primeiro laminado a ser analisado foi o laminado com defeito de 30mm, em seguida a análise seguiu para os laminados com vazio de 20, 10 e 5mm, respectivamente. A Figura 22 corresponde a análise de 30mm, a Figura 23 a análise de 20mm, a Figura 24 a análise de 10mm e por fim, a Figuras 25 a análise de 5mm. A primeira figura de cada teste é a foto térmica antes do aquecimento e a segunda figura é uma das fotos durante o resfriamento para identificação do vazio, onde também está presente a escala do laminado e do defeito.

Figura 22 – Teste para o vazio de 30mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento



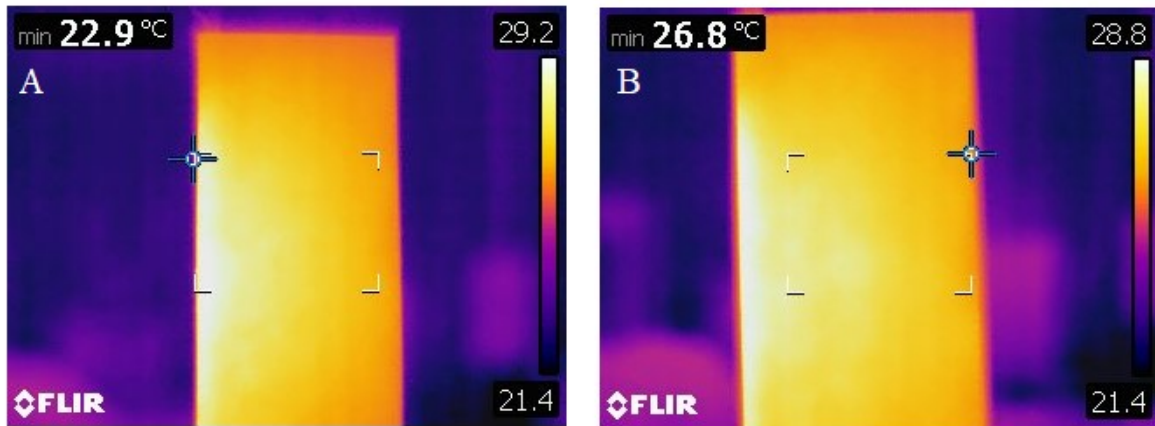
Fonte: AUTOR (2019)

Figura 23 – Teste para o vazio de 20mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento



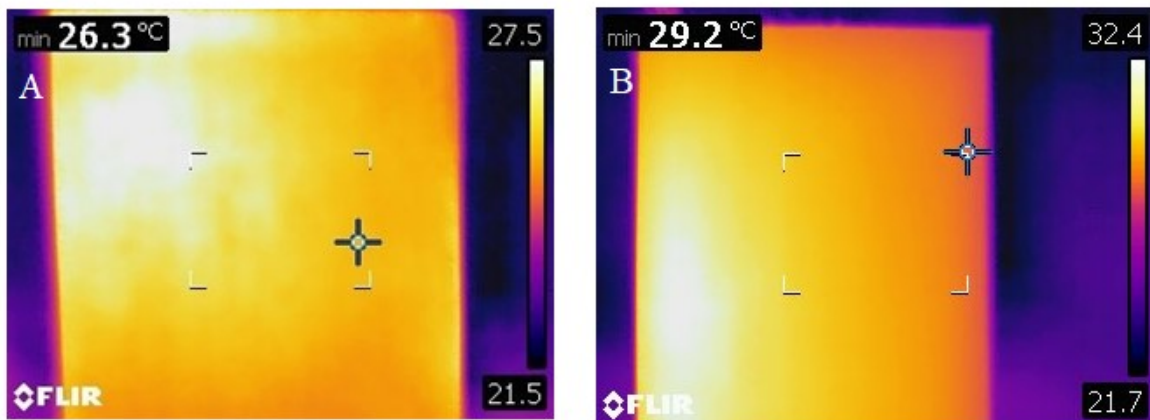
Fonte: AUTOR (2019)

Figura 24 – Teste para o vazio de 10mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento



Fonte: AUTOR (2019)

Figura 25 – Teste para o vazio de 5mm de diâmetro: a) Amostra sem pré aquecimento, b) Amostra com 1 minuto de aquecimento



Fonte: AUTOR (2019)

É possível notar que para o teste com o vazio de 30mm, a identificação do defeito é perceptível após o aquecimento, como ilustrado na Figura 22. Quando analisamos o próximo teste com vazio de 20mm, a Figura 23 também ilustra o defeito no centro do laminado. Para esses dois casos, o defeito foi capturado pela câmera térmica igualmente como foi notado no teste anterior para o vazio de 40mm.

Para os testes de identificação de defeitos tanto para 10mm quanto para 5mm, os defeitos não foram capturados pela câmera durante o resfriamento dos laminados, como pode ser observado na Figura 24 e 25. Durante o início do aquecimento do material, quando a

temperatura começa a subir, o vazio pode ser observado na câmara térmica por alguns segundos, mas devido a inércia térmica o sistema alcança o equilíbrio térmico e visualização do defeito não é mais identificado pela câmara.

Por fim, o teste possui algumas limitações para compósitos navais. Testes com diferentes espessuras do laminado não foram analisadas, testes com a presença de núcleo não foi analisado, a peça somente com gel coat não obteve resultado e a peça com TIV durante o processo de cura da laminação também não foi analisada, onde a exotermia de reação de cura poderia revelar a presença de vazios durante a confecção da peça.

Apesar das limitações, a técnica TIV mostrou potencial de atuação para detecção de vazios em laminados, nos quais a espessura é de até 1,6 mm e o diâmetro dos vazios é igual ou maior que 20 mm.

5 CONCLUSÃO

Para encontrar os resultados e alcançar os objetivos propostos no trabalho, desenvolveu-se um gabarito com uma varredura de bolhas de tamanhos conhecidos, foi fabricada uma amostra por laminação manual e a mesma foi utilizada para testes e estudos de termografia infravermelha. Os testes e estudos foram realizados e analisados e as conclusões estão presentes nesse capítulo.

Após algumas tentativas de introdução dos insertos dentro do laminado foi possível obter a varredura de vazios desejados, porém também foi observada a presença de bolhas oriundas do processo de laminação manual.

Uma bancada simples para análise TIV em laminados planos foi montada e alcançou o desempenho esperado. É importante salientar que o posicionamento ideal da câmera e o tempo de aquecimento deve ser ajustado de acordo com as características do laminado, em relação a dimensões. Para os valores aqui testados, uma distância de 400 mm entre a câmera e a placa e um tempo de aquecimento de 1 minuto foram os valores que demonstraram maior eficiência de medição.

Os resultados encontrados pela câmera térmica durante os estudos se mostraram próximos ao esperado na teoria. A tinta de alta emissividade auxiliou a visualização dos defeitos, para os testes sem tinta a emissividade foi baixa, pois a diferença de emissividade na superfície a ser medida influencia a identificação de defeitos. Além disso, foi observado que o estímulo térmico foi suficiente para a visualização de defeitos de até 20mm em laminados de fibra de vidro e quando a análise do defeito passa de 20mm para 10mm a visualização do mesmo começa a ser afetada, principalmente pela inércia térmica.

Por fim, foram listadas algumas limitações da aplicação do TIV que não foram investigadas neste trabalho, como espessura do laminado que foi utilizado apenas um valor padrão durante as análises, a análise diretamente no gel coat não obteve resultados precisos e por isso a utilização da tinta de alta emissividade, e a análise apenas para laminados single skin sem a presença de núcleo inercial na peça. Apesar de tais limitações a técnica demonstrou ter um potencial de aplicação para detecção de vazios em laminados em compósitos.

Após a realização dos estudos e para continuação do mesmo, é sugerido os seguintes trabalhos futuros:

- Fazer a análise térmica durante o processo de laminação manual para observar os defeitos durante a fabricação do laminado;

- Substituir o gel coat ortoftálico por gel primer ou por algum material de emissividade mais elevada para análise térmica sem o uso da tinta de alta emissividade;
- Avaliar a influência da espessura do laminado nas análises;
- Utilizar um software computacional para analisar o diâmetro das bolhas reveladas pela câmera térmica;
- Expansão das análises para outros materiais usados na indústria naval.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. G. R. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- GREENE, Eric. **Marine composites**. 2 Ed. Eric Greene Associates, INC. Anapolis. 1999.
- INDÚSTRIA NÁUTICA BRASILEIRA, Fatos e números 2012, Rio de Janeiro, 2012.
- MALDAGUE, Xavier. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley and Sons Inc., 2011.
- NASSEH, Jorge. **Técnica e prática de laminação em composites**. .1. Ed. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008.
- NOVLOSKI, Flávia. **Estudo de termografia infravermelha para detecção de defeitos em materiais da indústria aeroespacial**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Aeroespacial, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- RODRÍGUEZ, Fernando de Jesús López. **Deteção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- SCHMIDT, M. A. V.; SANTOS, A. S. Ecodesign Aplicado ao Mercado Náutico Brasileiro. **Design e Tecnologia**, v. 7, n. 13, p. 35-45, 30 jun. 2017.
- SEBRAE. **Estudo setorial da Indústria Catarinense – Náutico – SEBRAE 2014**.
- TARPANI, José R.; ALMEIDA, Euripeder G. R.; SIMÊNCIO, Éder C. A.; MOTA, Lucas P.; PAZ, Jaime H. A. A.; GUALBERTO, Alan R. M.; CARDOSO, Felipe L. A.; GATTI, Cristina A. **Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono**. São Paulo, v. 19, n. 4, p. 318-328, 2009.