

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Leonardo Santiago

**Aplicação de técnicas de processamento de
imagens de termografia infravermelha na
inspeção de materiais compósitos reforçados
com fibra de carbono.**

Uberlândia, Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Leonardo Santiago

Aplicação de técnicas de processamento de imagens de termografia infravermelha na inspeção de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, como requisito exigido parcial à obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Marcelo Keese Albertini

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Ciência da Computação

Bacharelado em Sistemas de Informação

Uberlândia, Brasil

2019

Leonardo Santiago

Aplicação de técnicas de processamento de imagens de termografia infravermelha na inspeção de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, como requisito exigido parcial à obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Marcelo Keese Albertini
Orientador

Henrique Coelho Fernandes
Professor

André Ricardo Backes
Professor

Uberlândia, Brasil
2019

Resumo

Termografia infravermelha ativa (no inglês *Active Infrared Thermography - IRT*) é uma técnica de ensaio não-destrutivo (END) que tem ganhado popularidade na indústria aeroespacial, automotiva, assim como em diversos outros setores. No decorrer das últimas décadas, IRT tem mostrado ser uma valiosa alternativa para END tradicionais como inspeção por raios-x e ultrassonografia para a inspeção de materiais compósitos devido a sua fácil implementação. Utilizando esta alternativa, este trabalho propõe a análise de amostras acadêmicas de material compósito reforçado com fibra de carbono com defeitos artificiais. As imagens infravermelhas obtidas durante os experimentos foram processadas utilizando as técnicas *Principal Component Thermography* e *Pulsed Phase Thermography*. Através de uma análise da razão sinal-ruído (*Signal Noise Ratio - SNR*), calculou-se a qualidade da visualização dos defeitos nas imagens obtidas após os processamentos realizados. Com estes números foi montada uma comparação dos valores, determinando que o *Principal Component Thermography* obteve uma média melhor e foi escolhida a melhor técnica dentre as estudadas para esta configuração de experimento.

Palavras-passe: termografia, termografia pulsada, processamento de imagens infravermelhas, *pulsed phase thermography*, *principal component thermography*, relação ruído sinal

Lista de abreviaturas e siglas

END - Ensaio Não Destrutivo

IRT - *Infrared Radiation Thermography*

SNR - *Signal Noise Ration*

UV - Ultravioleta

NIR - *Near Infrared*

SWIR - *Short Wave Infrared*

MWIR - *Medium Wavelength Infrared*

LWIR - *Long Wavelength Infrared*

VLWIR - *Very Long Wavelength Infrared*

LT - *Lock-In Thermography*

PT - *Pulsed Termography*

SPT - *Square Pulse Thermograph*

SHT - *Step Heating Thermograph*

CVSL - *Computer Vision and Systems Laboratory*

ROI - *Region Of Interest*

FPN - *Fixed Pattern Noise*

FPA - *Focal Plane Array*

IR - *Infrared Radiation*

DAC - *Square Pulse Thermograph*

PCT - *Principal Component Thermography*

PPT - *Pulsed Phase Thermography*

TSR - *Thermographic Signal Reconstruction*

PhAC - *Phase Absolute Contrast*

CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Composites*

SNR - *Signal to Noise Ratio*

RGB - *Red Green Blue*

SVD - *Singular Value Decomposition*

EOF - *Empirical Orthogonal Function*

PEEK - *Poli(Éter-Éter-Ketone)*

VT - *Vibro Thermography*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Divisão da radiação infravermelha no espectro eletromagnético, extraído de (BHOWMIK et al., 2011)	11
Figura 2 – Classificações da termografia infravermelha - extraída de (CHAIR, 2007c)	13
Figura 3 – Exemplo de imagem IRT utilizada no campo da medicina para estudos na descoberta do câncer de mama - extraído de (GONCALVES, 2017)	14
Figura 4 – Sistema de visão computacional- extraído de (FILHO; NETO, 1999) . .	15
Figura 5 – Localização dos defeitos na amostra - extraído de (FERNANDES et al., 2016)	25
Figura 6 – Configuração do experimento Pulsed Thermography - extraído de (FERNANDES et al., 2016)	26
Figura 7 – Máscara de Filtragem média - extraído de (BACKES, 2014)	27
Figura 8 – Frame capturado antes da aplicação do filtro da média (a) e após (b) .	27
Figura 9 – Frame capturado antes da aplicação da remoção da imagem fria (a) e após (b)	28
Figura 10 – Plot tempo x Temperatura de um pixel	28
Figura 11 – Exemplo de seleção da região de interesse usando o IR-View: (a) imagem original e (b) imagem resultante após a seleção - Fonte própria . .	29
Figura 12 – Comparação das imagens: (a) original, (b) resultado do PCT (EOF2) (c) resultado do PPT (fase 16)	30
Figura 13 – Os números de 1 a 9 representam as localizações de cada pixel escolhido para cálculo da zona de sinal e o asterisco branco é a localização do pixel utilizado no cálculo da zona de ruído, para as imagens obtidas pela técnica PCT - Fonte Própria	31
Figura 14 – Os números de 1 a 9 representam as localizações de cada pixel escolhido para cálculo da zona de sinal e o asterisco branco é a localização do pixel utilizado no cálculo da zona de ruído, para as imagens obtidas pela técnica PPT - Fonte Própria	31
Figura 15 – Imagens escolhidas após o processamento utilizando a técnica PCT: (a) sequência de 9000 frames, (b) sequência de 12000 frames - Fonte própria	32
Figura 16 – Imagens escolhidas após o processamento utilizando a técnica PPT: (a) sequência de 9000 frames, (b) sequência de 12000 frames - Fonte própria	32
Figura 17 – Comando executado para iniciar o IR View	38
Figura 18 – Interface 1 do programa IR View	39
Figura 19 – Interface 2 do programa IR View	39

Lista de tabelas

- Tabela 1 – Referente aos SNRs encontrados utilizando a técnica PPT nas duas frequências de 9000 e 12000 frames, além do cálculo da média dos SNR 34
- Tabela 2 – Referente aos SNRs encontrados utilizando a técnica PPT nas duas frequências de 9000 e 12000 frames, além do cálculo da média dos SNR 35

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Motivação	10
1.2	Objetivos	10
1.3	Organização do trabalho	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITOS ADOTADOS	11
2.1	Termografia	11
2.2	Processamento de Imagens	14
2.2.1	Sistema de visão computacional	14
2.2.2	Filtragem Espacial	16
2.2.3	Histograma	16
2.2.4	Limiarização	17
2.3	Ferramenta IR-View	17
2.4	Técnicas de processamento de imagens para IRT	17
3	TRABALHOS CORRELATOS	19
3.1	<i>Signal Noise Ratio - SNR</i>	19
3.2	<i>Thermographic Signal Reconstruction - TSR</i>	19
3.3	<i>Pulsed Phase Thermography - PPT</i>	21
3.4	<i>Principal Component Thermography - PCT</i>	22
4	METODOLOGIA E EXPERIMENTOS	24
4.1	Metodologia	24
4.2	Base de dados	24
4.3	Pré-Processamento - Média pixels vizinhos	25
4.4	Pré-Processamento - Subtração da imagem fria	26
4.5	Plot Txt	27
4.6	Processamento	29
4.7	Aplicação do SNR	29
5	RESULTADOS	32
6	CONCLUSÃO	36
6.1	Trabalhos Futuros	36

APÊNDICES	37
APÊNDICE A – IR-VIEW	38
REFERÊNCIAS	40

1 Introdução

1.1 Motivação

Por suas propriedades únicas e vantajosas, os materiais compósitos de alto desempenho vêm sendo cada vez mais empregados (ou cogitados para emprego) na indústria astronáutica (espacial) e aeronáutica, colaborando assim para o franco desenvolvimento destas áreas fundamentais para a prosperidade econômica e social de um país. Técnicas, metodologias e protocolos eficientes para assegurar a qualidade de peças, componentes e estruturas confeccionadas com tal classe de materiais avançados, tanto no estágio de fabricação quanto ao longo de toda a sua vida útil, se fazem imprescindíveis, e, nessa estratégia e abordagem, os Ensaios Não-Destrutivos (END) têm hoje um papel fundamental. Dentre os métodos de END mais valiosos para a inspeção dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas, a termografia infravermelha (*Infra-Red Thermography-IRT*) ocupa atualmente um lugar de prestigioso destaque.

1.2 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso visa o estudo e aplicação de técnicas de processamento de imagens aplicadas a termografia infravermelha para o uso na inspeção de materiais compósitos usados em diversas indústrias como, por exemplo, a aeronáutica. Os perfis de temperatura obtidos com os ensaios de termografia são muito sutis, portanto, técnicas para melhoria do sinal se fazem necessárias para a análise tanto qualitativa quanto quantitativa das imagens. Para esse fim as técnicas *Pulsed Phase Thermography* e *Principal Component Thermography* serão estudadas, executadas e uma comparação dos resultados obtidos com cada uma será feita.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho é organizado da seguinte forma: uma Introdução, onde é colocado os principais objetivos do trabalho, seguido de Fundamentação Teórica e Conceitos Adotados que aborda os conhecimentos necessários para o entendimento do trabalho, além de temas que foram utilizados em paralelo. Trabalhos Correlatos apresenta propostas de outros autores que são necessárias para a conclusão do objetivo do trabalho. Experimentos, Resultados e Conclusão remetem a análise principal, que é a utilização das técnicas de processamento, cálculo do *signal noise-ratio* - *SNR* dos resultados obtidos e entrega de uma análise sobre a comparação dos valores encontrados.

2 Fundamentação Teórica e Conceitos Adotados

2.1 Termografia

A visão infravermelha é a capacidade de um sistema biológico ou artificial de conseguir detectar a radiação infravermelha. Diversas formas de radiação são descritas muitas vezes como ondas, que são distúrbios periódicos que mantêm sua forma enquanto avança pelo espaço em função do tempo (CHAIR, 2007e). A radiação infravermelha é uma radiação invisível no espectro eletromagnético, não ionizante e que possui comprimento de ondas entre 700 nm e 1 mm. Este espectro contém diversos níveis de energia e frequência de ondas como, por exemplo, as ondas de radiação ultra-violeta (UV) e ondas de rádio(CHAIR, 2007b).

Segundo (CHAIR, 2007b), a radiação infravermelha (IR) pode ser subdividida em 5 principais regiões: *Near Infrared - NIR*, *Short Wave Infrared - SWIR*, *Medium Wavelength Infrared - MWIR*, *Long Wavelength Infrared - LWIR*, *Very Long Wavelength Infrared - VLWIR*. Cada região é definida de acordo com sua transmissão atmosférica, do material usado para sua detecção e seu uso. Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação IR e mesmo não sendo vista, ela é sentida na forma de calor. A região NIR é usada em sistemas de telecomunicações por fibra ótica, SWIR é utilizada em longas distâncias relacionadas à área de comunicações, MWIR são aplicadas em análises END e meios militares como vigilância, enquanto as VLWIR são usadas no campo da astronomia. Os usos e aplicações de cada região das ondas de radiação é dependente da forma como as mesmas reagem diante do sol, da temperatura do objeto, a distância do mesmo, entre outros fatores. A figura 1 mostra cada uma dessas regiões no espectro eletromagnético.

A Termografia Infravermelha (IRT) é a técnica com capacidade de fazer a leitura da intensidade da radiação infravermelha sobre um corpo ou algum local. Quanto maior a

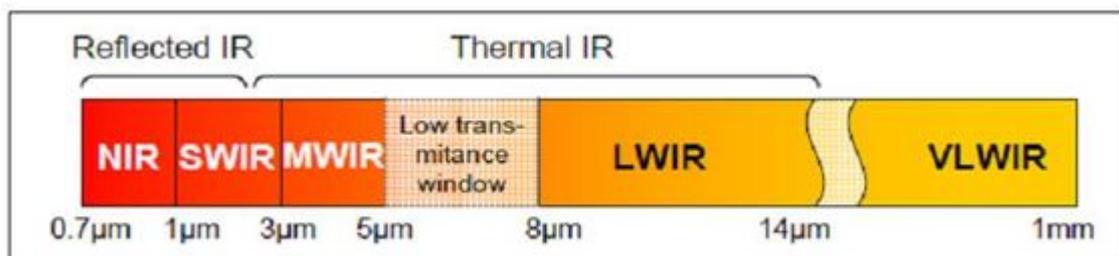


Figura 1 – Divisão da radiação infravermelha no espectro eletromagnético, extraído de (BHOWMIK et al., 2011)

temperatura localizada naquele ponto, mais radiação infravermelha é emitida pelo mesmo. Não é possível enxergá-la a olho nu, portanto precisa-se de auxílio de tecnologias para enxergá-la e medi-la (CHAIR, 2007e).

A IRT é uma técnica não destrutiva, não intrusiva e sem contato e considerada relativamente rápida em comparação com outras formas de testes de radiação onde o objeto em inspeção não tem seu uso futuro prejudicado (CHAIR, 2007a). De acordo com (CHAIR, 2007d) na IRT passiva o objeto sendo inspecionado normalmente tem a temperatura diferente do ambiente. Essa diferença é capturada através de um radiômetro infravermelho. Ela é muito utilizada em vigilância e aplicações médicas. Já na IRT ativa, o objeto sendo inspecionado está em equilíbrio com o ambiente em que ele se encontra e uma fonte de estímulo externa é usada para aquecer (ou resfriar) o mesmo. As diferenças de temperaturas geradas são então monitoradas por uma câmera IR o que gera, em últimas instâncias, imagens que são usadas para a avaliação do objeto.

A IRT ativa pode ter diferentes configurações na coleta de informações. Ela pode ter uma configuração estática, onde o objeto, a câmera e a fonte de calor estão fixos e não se movem durante o experimento, ou dinâmica onde um dos elementos está em movimento. Também é possível se utilizar uma configuração dinâmica para se obter os dados e depois transformar os dados para a aplicação de processamentos que geralmente são aplicados em configurações estáticas (M; K-P, 2010).

O estímulo na IRT ativa pode ser de várias formas e originárias de várias fontes. Por exemplo, a energia óptica, que pode ser obtida através de lâmpadas especiais ou flashes fotográficos que atuam sobre a superfície do objeto em estudo e propaga por condução térmica no interior do mesmo. Um defeito no interior do objeto age como uma barreira a propagação do calor, o que gera diferenças detectáveis nos perfis de temperatura. Existem duas formas deste estímulo ocorrer, o modo reflexão cuja fonte de energia vai estar a frente do objeto estudado, junto a câmera que captura, e o modo de transmissão em que o emissor vai estar de um lado da amostra e a câmera do lado oposto. Outra forma de estímulo é a excitação mecânica onde ondas ultrasônicas são usadas. As oscilações mecânicas excitam as falhas internas e propagam energia até a superfície. Neste caso o modo de transmissão é chamado de interno (M; K-P, 2010).

Existe também a classificação quanto a forma que este estímulo é aplicado na amostra. Pode ser por pontos, onde é feita uma varredura ponto a ponto do objeto em estudo, por linhas horizontais ou verticais, ou por superfície onde a operação é realizada em toda a face do objeto ao mesmo tempo. As duas primeiras são utilizadas quando a configuração do experimento é dinâmica. Já a configuração estática na maioria das vezes é aplicada em uma configuração estática.

Pensando nas diversas formas e classificações relacionadas ao processo do uso da IRT, existem vários nomes dado a aplicações diferentes da técnica. Estas são: *Lock-In*

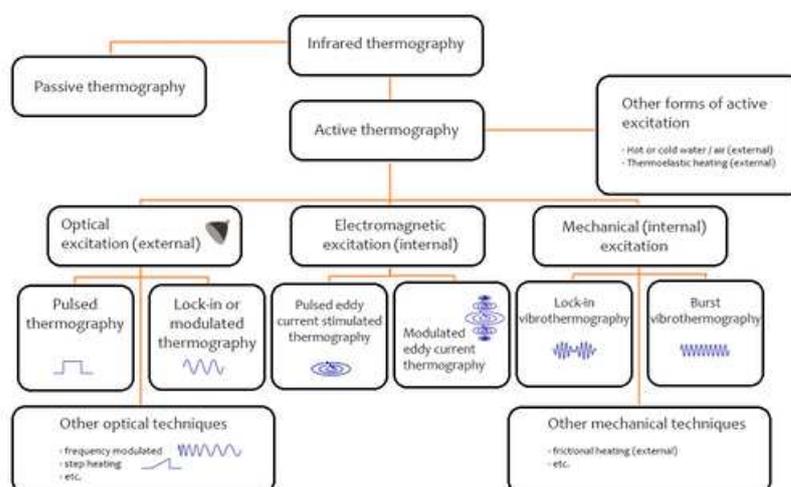


Figura 2 – Classificações da termografia infravermelha - extraída de (CHAIR, 2007c)

Thermography - LT, onde o aquecimento ocorre de forma periódica e a uma determinada frequência que se mantém durante certo tempo, neste processo observa-se como as respostas de perfis de temperatura na superfície da amostra se apresentam.. *Pulse Thermography - PT* onde um pulso de energia rápido é utilizado em toda a superfície da amostra enquanto a câmera captura durante o resfriamento ou aquecimento da amostra, para encontrar diferença nos possíveis defeitos existentes. *Square Pulse Thermography - SPT* é uma técnica que diferente de PT possui um pulso mais longo, portanto os processos de esfriamento e aquecimento são mais longos. *Step Heating Thermography - SHT* é semelhante à técnica SPT, no entanto, o foco das capturas é ao aquecimento da amostra e a *Point ou Line Scan Thermography* que consiste na varredura de pontos ou linhas da amostra por lasers, lembrando que esta necessita de uma configuração dinâmica, onde a fonte de calor se move por toda a superfície da amostra. Algumas destas configurações podem ser vistas na figura 2.

(M; K-P, 2010) nos mostram que o campo da termografia, teve uma rápida evolução devido aos progressos nos campos dos seus detectores de calor, eletrônica e nos computadores que são usados para fazer o processamento das imagens. A IRT é aplicada atualmente em diversas aplicações de END, monitoramento e manutenção preditiva, detecção de espécies gasosas entre outros. Além de ser uma tecnologia que vem se adaptando e surgindo no dia a dia das pessoas. A termografia é também considerada um excelente exemplo de visualização que consegue de uma forma menos complexa mostrar o que acontece quando reflexos de uma mudança de temperatura ocorrem em um objeto que está sendo observado. A imagem 3, por exemplo, remete ao uso de técnicas de processamentos da termografia infravermelha no campo da medicina.

Existem diversos métodos que são utilizados para interpretar a informação que se

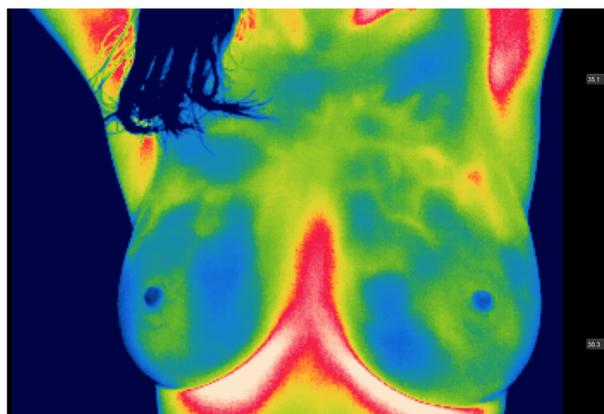


Figura 3 – Exemplo de imagem IRT utilizada no campo da medicina para estudos na descoberta do câncer de mama - extraído de (GONCALVES, 2017)

recebe através das imagens conseguidas na IRT. No entanto, ao capturar essas imagens, deve ser realizado um pré-processamento, pois as diferenças nos perfis de temperatura são bem sutis. Esse pré-processamento elimina problemas causados pela câmera que faz os registros e por causa da natureza do processo, para que em seguida as imagens possam através de métodos e cálculos serem estudadas.

2.2 Processamento de Imagens

Hoje, a área de processamento de imagens é importante em diversos campos como da Engenharia, Informática, Medicina, Agronomia, entre outros. É cada vez mais presente no dia a dia das empresas, indústrias, no campo acadêmico e até mesmo em aplicações pessoais (BEMDJÄHNE, 1995).

A importância da interpretação de imagens e a automatização destas interpretações realizadas pelos computadores cada vez mais potentes, são motivadores da evolução desta área.

Desde do início da década de 20, o processamento de imagens já vinha sendo aplicado para aprimorar qualidade, tendo como propulsor o programa espacial, que teve importância para corrigir imagens que eram capturas pelas sondas. Diversas técnicas tiveram suas bases criadas nesta época.

2.2.1 Sistema de visão computacional

Um sistema de visão computacional consiste em algumas etapas/operações: aquisição; pré-processamento; segmentação; extração de características; reconhecimento e interpretação, todas essas de alguma forma podem estar interligadas com a base de conhecimento. Esta informação é representada pela imagem 4, onde visualiza-se cada etapa

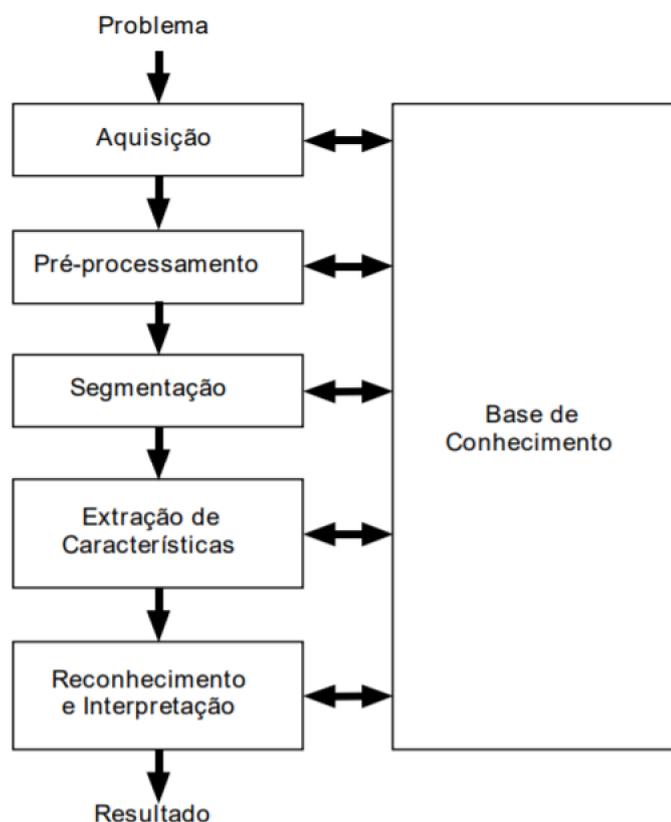


Figura 4 – Sistema de visão computacional- extraído de (FILHO; NETO, 1999)

representada por um retângulo e a ordem dos processos indicada por setas (FILHO; NETO, 1999).

Na aquisição existem dois elementos principais, o primeiro responsável por compreender o sinal de uma faixa diferente de energia e reproduzir uma saída que represente essa faixa em sinal elétrico e a segunda que transforma esse sinal em informação digital representada por bits de 0 ou 1. Esses bits são representados em matrizes enormes que seus elementos representam a escala de cinza naquele ponto da imagem. Essas matrizes podem ser armazenadas na memória RAM e usadas para processar ou editar as imagens, e depois são gravadas em discos maiores quando não estão sendo usadas.

As imagens capturadas passam por um pré-processamento onde existem imperfeições das capturas, como pixels ruidosos, baixo contraste da imagem, entre outros problemas que são corrigidos implementando técnicas para melhorar a qualidade da mesma e seguir com a segmentação.

A Segmentação é o processo onde se obtêm outras unidades menores e significativas, que nos permitem analisar a imagem ou até mesmo identificar padrões já previamente classificados. Após a segmentação, vem a etapa de extração de características, onde usando as informações encontradas e utilizando estruturas conhecidas como descritores, consegue-se um conjunto de elementos que são informativos à aquela característica. Portanto, ao

obter-se estas características é possível relacionar as informações com descritores e interpretar a imagem, finalizando assim o processp. Na etapa de segmentação, existe então uma subdivisão da imagem em informações menores (FILHO; NETO, 1999).

2.2.2 Filtragem Espacial

Uma imagem, se tratando de uma em tons de cinza, pode ser representada por uma função $f(x,y)$, cuja o valor de cada ponto seja proporcional a escala de cinza na mesma. Portanto, conseguimos assim realizar operações aritméticas e lógicas em imagens quando elas estão representadas como matrizes, e como resultado dessas operações obtêm-se uma nova matriz que represente uma imagem filtrada.

Uma máscara é uma matriz que possui a funcionalidade de modificar as informações de uma imagem através das operações de matrizes. As aplicações destas operações podem ter diversas motivações e na maioria das vezes estão envolvidas com a melhoria da qualidade, como a remoção de ruídos, uma suavização, ou até a identificação de formas em uma imagem.

Existem duas operações de filtragem espacial: correlação e convolução. A correlação é feita movendo a máscara pela imagem e calculando a soma dos produtos em cada região, e a convolução é executada da mesma forma, porém espelhando a máscara antes de sua aplicação. A convolução é classificada em periódica, que considera as extremidades de uma matriz como adjacentes, e apériodica, onde a aplicação de uma máscara na borda é ignorada (BACKES, 2014). Esta última foi utilizada neste trabalho para a aplicação de um filtro de média, onde os elementos da máscara que é uma matriz 3×3 possuem o valor 1 e no final ao passar a máscara pela imagem, o pixel central recebe o valor de uma média aritmética feita com o seu valor e com o valor dos vizinhos ao seu redor.

2.2.3 Histograma

Histograma é um vetor que guarda a frequência em que cada nível de cinza ocorre na imagem. Com isso é possível retirar das imagens informações como a predominância de pixels claros ou escuros, ou a possibilidade de existir ruídos, entre outros dados quantitativos ou qualitativos (M; K-P, 2010).

Sendo assim, pode-se também aplicar funções que podem alterar o histograma, por exemplo: a equalização do histograma, que redistribui a escala de cinza de forma uniforme por ele; hiperbolização do histograma, que é uma técnica baseada na resposta visual do olho humano que se acomoda à intensidade média, e aplica na imagem uma distribuição espaçada da escala de cinza e uma menor concentração de pixels mais escuras; expansão e compressão de histograma, que servem para expandir os níveis de pixels por todas as escalas ou comprimir os níveis espalhados em uma faixa da escala.

2.2.4 Limiarização

A limiarização consiste em uma técnica que consegue distinguir duas partes em uma imagem, o objeto estudado e o plano de fundo. Para isso acontecer, é definido um valor limiar para fazer a divisão. Todos os pixels que possuem um valor abaixo do limiar são convertidos em 0 e os pixels que tem o valor acima do limiar são convertidos em 1, com isso, a diferença entre os dois objetos fica clara na imagem (M; K-P, 2010).

Se o limiar é utilizado para segmentar toda a imagem ele é considerado um limiar global, já se ele é referente a alguma particularidade do ponto como, por exemplo, a média da vizinhança ele é chamado de limiar local.

2.3 Ferramenta IR-View

Segundo (KLEIN et al., 2008), o IR-View é um software gratuito, desenvolvido utilizando-se recursos do MATLAB, proposto inicialmente em 1998 pelo Laboratório de Visão e Sistemas de Computação (CVSL) da Universidade Laval no Canadá. É *open source* e busca responder às necessidades comuns e recorrentes contidas nas pesquisas e soluções referentes ao campo da IRT. Ele se encontra disponível para download na rede sobre uma licença GNU.

Funções importantes e redundantes usadas na IRT como, exibir uma sequência de imagens, manipular mapas de cores e localizar regiões de interesse (ROI), possuem um certo custo quanto ao tempo e eficiência na sua aplicação. Além do mais, a demanda e oferta de *softwares* que disponibilizem estas funções são pequenas. O IR-View fornece estas funcionalidades em uma interface gráfica simples e estável até certo ponto, possui uma documentação, e é compactado em apenas um *script* do MATLAB o que facilita a sua transferência e uso.

Para exibir a sua interface o programa é invocado como uma função no MATLAB onde seu argumento é a matriz, seja ela $M \times N$ ou $M \times N \times I$, ou seja, uma imagem ou uma sequência de imagens. Assim que aberta, a aplicação oferece diversas funcionalidades: adaptar a escala de cores, escolher uma região de interesse, calcular a fase 2D e amplitude da transformada de Fourier, aplicação de filtros, plotar um gráfico da evolução da temperatura versus o tempo em qualquer ponto $[x,y]$ da sequência, entre outras funções utilizadas em termografia infravermelha O apêndice A traz detalhes sobre essa ferramenta.

2.4 Técnicas de processamento de imagens para IRT

O *Pulsed Thermography - PT* é provavelmente a abordagem mais amplamente investigada em IRT devido à sua rapidez (de alguns segundos aos materiais de alta condutividade a vários segundos aos de baixa condutividade) e fácil implementação. Os dados

brutos de END, no entanto, são difíceis de analisar. Há uma grande variedade de técnicas de processamento que foram desenvolvidas para aprimorar as assinaturas sutis de IRT.

A imagem IR é degradada principalmente pelos seguintes efeitos: vinhetas devido à abertura limitada, *Fixed Pattern Noise - FPN* em *Focal Plane Array - FPA*) comumente usadas devido ao procedimento de leitura de pixels, presença de pixels mortos na matriz FPA, distorção radial devido à pontos de imagem não colineares em relação ao centro óptico e aquecimento não uniforme.

O *Fixed Pattern Noise - FPN* é o resultado de diferenças na capacidade de resposta dos detectores à irradiância recebida. Esse é um problema comum ao trabalhar com o *Focal Plane Array - FPA*. O FPN, para uma configuração específica, pode ser recuperado de uma imagem de corpo negro para subtração posterior da sequência IR.

Um pixel ruim pode ser definido como um anômalo que se comporta de maneira diferente do restante da matriz. Por exemplo, um pixel morto permanece apagado (preto) enquanto um quente fica permanentemente aceso (branco). De qualquer forma, os pixels ruins não fornecem nenhuma informação útil e apenas contribuem para deteriorar o contraste da imagem. Um mapa de badpixels geralmente é conhecido pelo fabricante do FPA, e eles podem ser detectados de forma manual ou automática; o valor nos locais com *badpixel* é substituído pelo valor médio dos pixels vizinhos.

Outro procedimento de pré-processamento é a suavização de ruído. A filtragem média é geralmente aplicada a outros pixels indesejados removidos presentes na imagem, como pixels ruins não mapeados. Um *kernel* é passado pela imagem e o pixel central é substituído pelo valor mediano dos valores classificados do *kernel*. Técnicas simples de subtração de imagem também são usadas para remover efeitos indesejados, como aquecimento não uniforme e reflexo da câmera, por exemplo. Uma imagem média pode ser calculada a partir de um certo número de imagens pré-pulso. Essa imagem média é comumente chamada de imagem fria. Essa imagem fria é subtraída de todas as imagens após o pulso..

Ao aplicar essas técnicas de pré-processamento pode-se melhorar bastante a qualidade de uma imagem obtida através de um experimento de PT e obter melhores resultados nas próximas etapas. Técnicas de processamento de imagem IR mais elaboradas são apresentadas na seção Trabalhos Correlatos.

3 Trabalhos Correlatos

3.1 *Signal Noise Ratio - SNR*

Em (HIDALGO-GATO et al., 2013) existe a proposta de uma comparação utilizando-se o *Signal Noise Ratio - SNR*. O desenvolvimento do experimento é realizado em várias etapas: pré-processamento, processamento e logo depois uma análise do resultado. A necessidade era buscar dentre as técnicas apresentadas qual era a melhor para a realização de automação do processamento das sequências obtidas durante o NTD feito nas amostras utilizando IRT ativa.

O processo de escolha é baseado na quantificação da qualidade obtida pelo SNR de cada uma das técnicas, *Differential Absolute Contrast - DAC*, *Pulsed Phase Thermography - PPT*, *Principal Component Thermography - PCT*, *Thermographic Signal Reconstruction - TSR*, *Phase Absolute Contrast - PhAC*, *Shewness e Kurtosis*, utilizadas no processamento das amostras e na análise final do experimento. O SNR consegue descrever as diferenças entre uma área defeituosa e uma não defeituosa, estabelecendo uma faixa dinâmica. Ou seja, para cada defeito se é selecionado uma área localizada no defeito, que é chamada de área de sinal, e uma ao redor do defeito que é chamada de área de ruído. Através destas duas áreas definidas se obtêm o valor do SNR, através do seguinte cálculo:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{abs}(S_{area_{mean}} - N_{area_{mean}})}{\sigma} \right) [db] \quad (3.1)$$

onde $S_{area_{mean}}$ é a média dos valores dos pixels sobre o defeito selecionado, $N_{area_{mean}}$ é a média dos valores dos pixels na região sem defeito selecionada e σ é o desvio padrão dos valores dos pixels na região sem defeito selecionada.

(HIDALGO-GATO et al., 2013) aplicou PT usando dois flashes de 6,4kJ por 5ms, três materiais de CFRP e um de PLEXI014 foram analisados, onde as suas imagens de calor foram capturadas por uma câmera IR. Após a coleta das imagens e aplicação das técnicas, foram analisados os termogramas que possuíam mais defeitos identificados e descrevessem melhor as características do material em análise. O mesmo foi feito para a área de ruído.

3.2 *Thermographic Signal Reconstruction - TSR*

Um dos algoritmos mais usados em IRT é o *Thermographic Signal Reconstruction - TSR*. (SHEPARD, 2001) propõe a Reconstrução de Sinal Termográfico como uma técnica de processamento que reduz a resolução espacial e temporal de uma sequência, reduzindo

assim a quantidade de dados a serem analisados. Existem complicações no processamento das imagens capturadas por PT, e estas podem ser resolvidas transformando o domínio do problema para um domínio logarítmico. Sendo assim, utilizando da lei de Fourier e aplicando logaritmo natural na sua equação, têm-se:

$$\ln(T) = \frac{Q}{e(\pi t)^{0.5}} \quad (3.2)$$

Usando a forma logarítmica da solução 1D da equação de Fourier, e ajustando para aplicá-la a uma série usando o polinômio de grau m , é obtida uma curva de decaimento para os perfis de temperatura dos pixels não defeituosos. Já os pixels defeituosos terão esta curva divergente das outras. Ao final, toda a sequência é transformada em imagens de coeficiente $m+1$, a partir das quais é possível reconstruir termogramas sintéticos.

$$\log_{10}(\Delta T) = a_0 + a_1 \log_{10}(t) + a_2 [\log_{10}(t)]^2 + \dots + a_n [\log_{10}(t)]^n \quad (3.3)$$

sendo que ΔT é igual ao aumento de temperatura em função do tempo t para cada pixel (i,j) .

A equação 3.3 é responsável por transformar os dados obtidos, utilizando um polinômio logarítmico de grau n , os transformando em uma sequência de imagens de aumento de temperatura (i,j,t) pela série de $(n + 1)$ de coeficientes polinomiais $a_0(i,j)$ até $a_n(i,j)$. Sendo então realizado o cálculo das derivadas logarítmicas do polinômio com o aumento limitado do tempo de ruído.

O processamento sintético traz algumas vantagens, como redução no ruído, possibilidade de cálculos analíticos e compressão de dados, além de ser facilmente automatizado, o que facilita o uso do mesmo em processos industriais, por exemplo. Também é permitido se estimar a temperatura por um tempo entre aquisições dos coeficientes polinomiais. O cálculo da primeira derivada de tempo indica a taxa de resfriamento, enquanto a segunda derivada do tempo refere-se a mudanças nesta taxa. O TSR tem exemplos de aplicações recentes na biomedicina, mecânica experimental, entre outras.

A proposta de (BALAGEAS et al., 2015) é projetar as três melhores imagens de coeficientes polinomiais em uma base RGB de modo a construir uma única imagem composta dos defeitos. Esta nova imagem pode ser estudada para além de identificar os defeitos, também correlacionar a profundidade dos mesmos com a cor da imagem composta. Embora nenhuma teoria tenha sido publicada ainda, é possível usar o TSR aplicando-o em outras formas de transmissão graduais de calor, como, por exemplo, transmissão de calor por aquecimento com ondas de pulsos longos. A presença de uma fonte interna de calor também causa uma distorção e pode ser identificada e ilustrada pela abordagem feita pelo TSR.

3.3 Pulsed Phase Thermography - PPT

Segundo (MALDAGUE; MARINETTI., 1996), a técnica PPT propõe combinar as vantagens de duas técnicas de termografia infravermelha, a termografia modular e a pulsada. Utilizando um END, o experimento ocorre com a aplicação da PT. Considera que o PPT também atua sem trazer as desvantagens da PT e LT e possui as vantagens de ambos, apresentando menor sensibilidade às características da superfície das amostras ópticas e infravermelhas; melhor resolução da forma defeituosa; a não necessidade de saber como priorizar a posição de uma área não defeituosa, no campo de visão, para calcular a imagem de contraste; capacidade de inspecionar amostras de alta condutividade térmica.

A *Pulsed Thermography - PT* é uma técnica que consiste em estimular a amostra utilizando um pulso de energia que é disparado por uma fonte térmica contra a superfície da mesma, e é difundido por todo o objeto de estudo. Este pulso pode possuir a duração de milissegundos ou até segundos dependendo do material que está sendo estudado. O comportamento desta difusão é capturado e depois analisado, seja na fase em que a temperatura sobe ou mesmo quando decai. A análise quantitativa é possível e geralmente baseada nas diferenças de temperaturas capturadas durante o experimento. Existe uma relação do tempo da propagação térmica com a profundidade do defeito, e esta é calculada através da seguinte fórmula:

$$t \approx \frac{z^2}{\alpha} \quad (3.4)$$

onde t é o tempo de propagação, z é a profundidade do defeito e α é a difusividade térmica do material. Uma dificuldade existente na PT é o cálculo de contraste térmico que consiste em calcular a diferença de temperatura nas imagens em relação às áreas não defeituosas.

Em *Lock-in Thermography - LT* amostra é estimulada por uma onda de calor modulada (na maioria das vezes senoidal). As respostas térmicas a este estímulo são visualizadas da mesma forma, e a magnitude e a fase desta onda permanecem inalteradas a medida que o estímulo ocorre. A amostra vai recebendo a energia, até que se atinja o regime estacionário. Após atingir este regime, a magnitude e a fase do sinal são calculadas. Esta magnitude é proporcional as características ópticas do ponto e da superfície IR. Já a fase é independente dos recursos ópticos e da superfície. A profundidade é limitada as características próximas à superfície, mesmo assim, considerando a PT, a LT possui as mesmas vantagens, com diferença que tem uma melhor resolução em questão de profundidade. Uma desvantagem é o alto tempo para a aquisição de imagens.

Usando os conceitos do pulso ideal de Dirac e a transformada de Fourier é possível pegar os valores obtidos durante um experimento de PT e através da evolução temporal da temperatura da amostra se chegar ao domínio de frequência, onde a amplitude e a fase são aplicáveis. Isto é relevante, pois combinaria as vantagens das duas técnicas. Portanto,

a utilização do PPT se baseia em utilizando um experimento PT comum, e extraindo para cada pixel desta imagem, a evolução temporal da temperatura e depois aplicando a transformada discreta de Fourier

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(x) \exp\left(\frac{-j2\pi ux}{N}\right) = R(u) + jI(u) \quad (3.5)$$

Quanto maior a frequência menor a diferença entre as análises e pior será o resultado do PPT. A técnica tem a vantagem de analisar com uma velocidade rápida como a da PT, e a vantagem de identificar defeitos com profundidade maiores como LT, com a análise da amplitude e da fase conseguidas com a utilização da transformada de fourier.

3.4 *Principal Component Thermography - PCT*

De acordo com, (RAJIC, 2002), PCT descreve uma forma alternativa ao PPT utilizando o conceito de decomposição de valor singular (SVD). Na técnica, uma expressão relaciona um tempo característico informado pela decomposição à profundidade do defeito, conseguindo assim uma estimativa com um bom nível de precisão desta profundidade.

Os sinais da resposta à temperatura em PT tendem a ser monotônicos e olhando para os métodos das funções ortogonais empíricas (EOF), estas aparentam ser uma alternativa de projeção mais forte para dados, através da construção de um conjunto de modos estatísticos ortogonais, fazendo que sinais termográficos se beneficiem com a decomposição empírica proposta no modelo. Sendo assim, os defeitos apresentam contrastes térmicos descritos de forma mais compacta pelo modelo fornecido por SVD. Dada uma matriz de dados apresentados pelo experimento, esta matriz é decomposta usando a seguinte fórmula:

$$A = UTV^t \quad (3.6)$$

onde U é a matriz MxN, T é matriz NxN com elementos positivos ou zero e representando valores singulares da matriz A e VT é a transposição de uma matriz NxN. Sendo que a matriz A pode estar organizada de forma que as variações espaciais sejam representadas em linhas e as de tempo em colunas, sendo assim, a matriz U representa um conjunto de EOF que representam as variações espaciais. Cada função ortogonal possui um comportamento temporal característico que são descritos na matriz VT, que possui vetores do componente principal organizados por linhas.

Para a aplicação da decomposição é necessária uma preparação anterior que é a transformação dos dados colhidos em determinado período de matrizes tridimensionais

para matrizes bidimensionais. Após esta operação também é utilizado um procedimento de padronização e normalização do desvio padrão de cada pixel garantindo que a decomposição funcione. Logo após a aplicação da decomposição, as duas primeiras funções ortogonais fornecem descrições de variações espaciais nos dados.

4 Metodologia e Experimentos

4.1 Metodologia

A metodologia do trabalho consiste no uso das sequências de imagens obtidas através da técnica *Pulse Thermography - PT* no experimento proposto por (FERNANDES et al., 2016), que aplicou técnicas de termografia infravermelha para detectar os defeitos inseridos de forma artificial em amostras de compósitos reforçados com fibra de carbono. A partir das informações coletadas, aplica-se um filtro de média e a remoção da imagem fria, obtendo sequências com qualidades melhores para o processamento. Após o processo de aplicação dos pré-processamentos, encontra-se então o momento do pulso de energia térmica nas sequências e seleciona-se uma região de interesse para a aplicação das técnicas *Principal Component Thermography - PCT* e *Pulsed Phase Thermography - PPT*. Para comparar os resultados obtidos no último processo, usou-se o *Signal Noise Ratio - SNR* que propõe calcular a qualidade da imagem obtida através da relação de uma área de sinal com uma área de ruído. Os resultados colhidos, foram apresentados em tabelas e uma comparação final utilizando os valores calculados foi feita.

4.2 Base de dados

Como base de dados para os experimentos, foi se utilizado a IRT para detectar defeitos inseridos de forma artificial em um laminado plano de polímero reforçado com fibra de carbono - CFRP, fabricado com carbono / PEEK(polieter-etercetona), com uma fração de volume de fibra de 61%.

A disposição do laminado é composta de 24 camadas, onde às duas primeiras camadas tem fibras orientadas a 0° e a terceira e quarta camadas tem fibras orientadas a 90°. Há um pré-impregnado antes do molde onde cada camada tem 0,16mm de espessura enquanto após a moldagem tem cerca de 0,13mm de espessura. Inserções artificiais foram feitas no material utilizando fita Kapton de 0,06 mm de espessura. Elas foram colocadas em diferentes regiões antes da moldagem e possuem três tamanhos 4x4, 3x3, 2x2 mm. Suas devidas posições na amostra podem ser observadas na figura 5.

A configuração usada na inspeção do experimento é mostrada na figura 6. A câmera utilizada nas inspeções foi uma FLIR Phoenix, Insb, 3-5um, 640x512 pixels com um janelamento de 320x256. A taxa de frame foi de 55Hz e o pulso fotográfico foi de 5ms e produziu 6,4kJ por flash aquecendo a amostra, para o registro que foi feito em modo de reflexão.

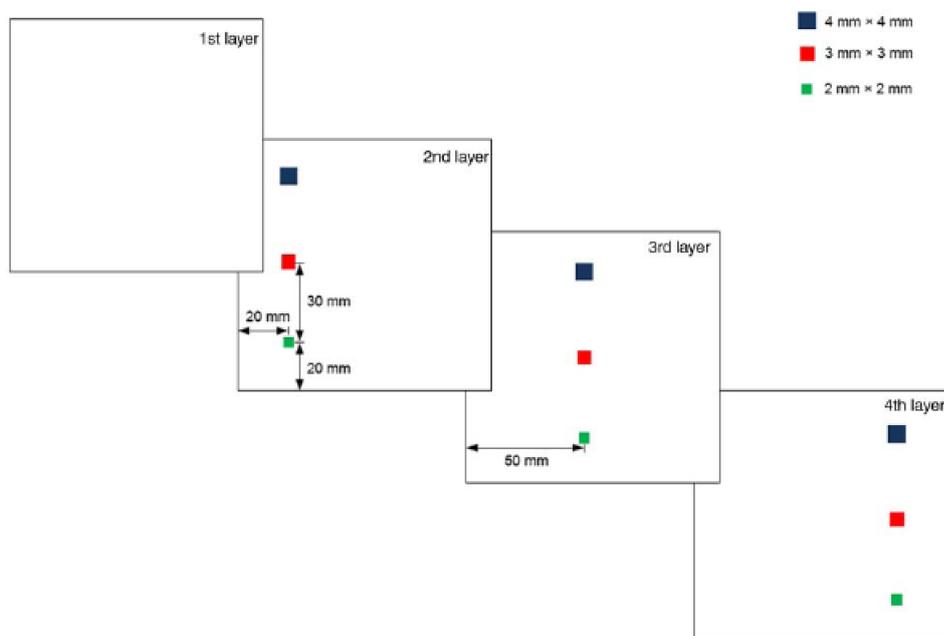


Figura 5 – Localização dos defeitos na amostra - extraído de (FERNANDES et al., 2016)

Os dados capturados durante as experiências construídas acima foram utilizados para a aplicação do experimento proposto, e as sequências obtidas pela câmera IR foram transferidas para um computador. Estes arquivos são da extensão .sfmov e possuem outros arquivos que são considerados cabeçalhos dos dados obtidos. Utilizando-se de um script no MATLAB, é possível carregar o arquivo .sfmov, por meio dos arquivos de cabeçalho, obtêm-se uma sequência de frames que correspondem ao que foi obtido pela câmera IR. Utilizando o MATLAB, o próximo passo foi a aplicação de pré-processamentos para preparar a base de dados para a aplicação das técnicas de processamento.

4.3 Pré-Processamento - Média pixels vizinhos

O primeiro pré-processamento aplicado é a utilização do conceito de filtragem no domínio espacial, utilizando a máscara da figura 7. Aplica-se uma convolução em todos os elementos da nossa matriz de frames. No entanto, por ser uma aplicação de convolução aperiódica, os elementos da borda de cada frame são desconsiderados. Com este processo, o problema de pixels anômalos é resolvido.

Como se é observado na Figura 8, uma suavização também ocorre na imagem, a barra na lateral condiz com a escala de valores contidos no visualizador, é possível notar que após o pré-processamento, o maior e o menor valores nesta escala ambos tiveram seu valor decrescido portanto é possível ver que a imagem passa a ter um tom mais claro em



Figura 6 – Configuração do experimento Pulsed Thermography - extraído de (FERNANDES et al., 2016)

seus pixels.

4.4 Pré-Processamento - Subtração da imagem fria

Após a aplicação da suavização, têm-se uma matriz com diversos frames como resultado. Esta matriz não contém mais *bad pixels*, que influenciariam na operação de subtração da imagem fria. Esta operação consiste em achar o elemento da matriz que possui o maior valor de temperatura. Este valor tende a ser o valor onde o pulso de temperatura atinge seu ápice na amostra e a partir daquele valor a temperatura começa a diminuir. Calculando uma média de todas as imagens anteriores ao frame deste valor máximo, obtendo-se então uma imagem média para todas aquelas imagens, que denominamos de imagem fria.

Com a imagem fria em mãos, o próximo passo é realizar a subtração desta em todas as imagens após o frame que contém o valor máximo. Isso faz com que os valores

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Figura 7 – Máscara de Filtragem média - extraído de (BACKES, 2014)

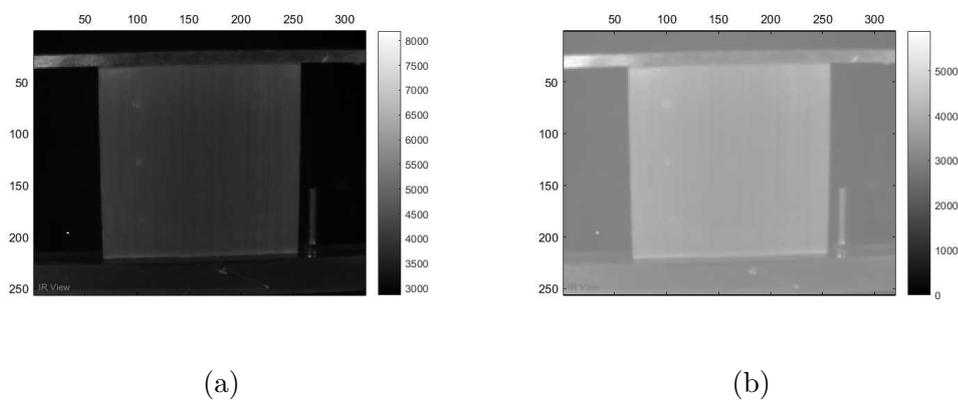


Figura 8 – Frame capturado antes da aplicação do filtro da média (a) e após (b)

que são padrões à amostra antes do pulso sejam desconsiderados após o mesmo. Com isso os elementos passam a ter em seus valores a resposta a aplicação da energia térmica e percebe-se que as diferenças destas respostas nas áreas de defeitos. Isso elimina alguns problemas presentes nas sequências de imagens, como o reflexo da câmera ao fazer as capturas, ou a correção do ruído padrão (FPN).

Com a remoção da imagem fria, as características que são comuns a todas as imagens desaparecem e somente as diferenças realmente ficam expostas na imagem, isso pode ser observado na figura 9. Novamente pode-se observar que os valores da escala lateral novamente caíram, além disto é possível notar melhor os contrastes dos defeitos presentes na amostra.

4.5 Plot Txt

Após passar pelos dois pré-processamentos, utiliza-se então o IR-View para fazer o plot Txt (tempo versus temperatura) de um pixel qualquer da sequência, onde um gráfico é construído utilizando os valores de temperatura no eixo y e o valor do tempo no eixo x. Portanto, é possível visualizar o comportamento da temperatura daquele pixel durante o

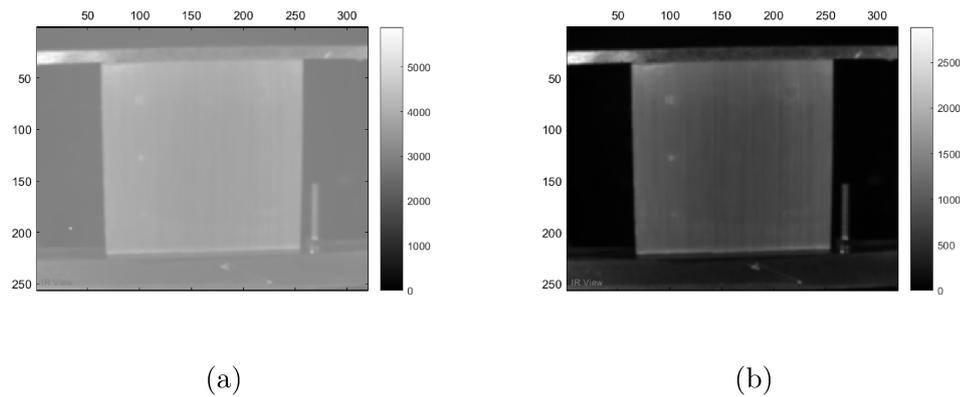


Figura 9 – Frame capturado antes da aplicação da remoção da imagem fria (a) e após (b)

tempo do experimento, como, por exemplo, a figura 10 demonstra.

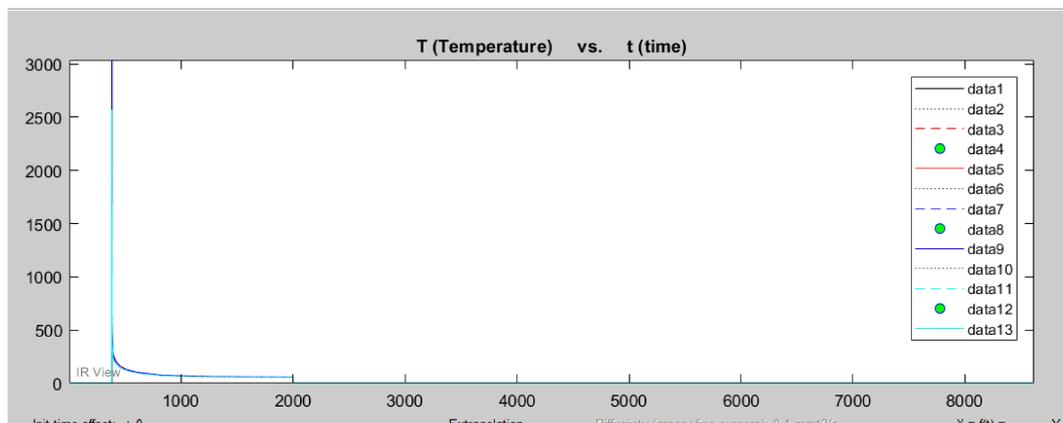


Figura 10 – Plot tempo x Temperatura de um pixel

É possível analisar que existe um grande pico de temperatura realizado de forma instantânea, este é o momento em que o flash ocorre durante o experimento, e com isso a temperatura sobe muito rápido e também decai à medida que a energia dispersa. Usando então este plot, consegue-se navegar pelo eixo x, e assim chegar até a imagem na sequência onde o flash ocorreu.

O melhor momento para se aplicar os processamentos de imagem são quando o valor de temperatura vai sofrendo mudanças, seja durante a fase de aquecimento ou em alguns processamentos durante a fase de esfriamento. Por isso, utilizando uma funcionalidade do próprio IR-View, exportou-se uma parte da sequência onde no gráfico os valores tiveram uma mudança significativa, no caso, cerca de 1000 imagens sequenciais compreendidas entre o pulso de energia e o seu decaimento do perfil de temperatura, pois, a medida que o tempo passa, as mudanças nos sinais termográficos são menores e portanto a informação é menos relevante.

Utilizando a nova sequência, modificou-se o arquivo através do IR-View para criar

uma região de interesse (ROI) em que apenas a amostra estivesse presente. Este é um importante passo para a aplicação dos processamentos, pois uma área com características diferentes pode influenciar no cálculo dos mesmos. Assim que a ROI é selecionada, o próximo passo é a aplicação dos dois algoritmos (PCT e PPT). A figura 11 mostra como esta seleção é feita pela interface do IR-View, assim como o resultado a aplicação desta funcionalidade.

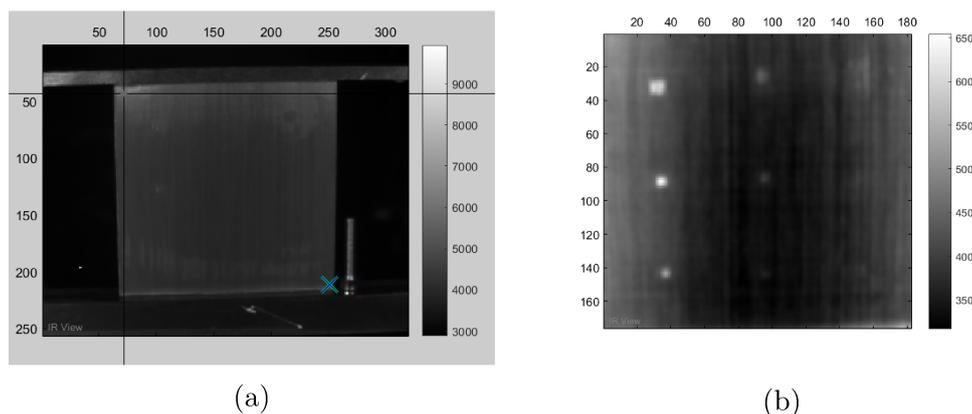


Figura 11 – Exemplo de seleção da região de interesse usando o IR-View: (a) imagem original e (b) imagem resultante após a seleção - Fonte própria

4.6 Processamento

O IR-View fornece a aplicação do PCT e do PPT. Utilizando a sequência reduzida criada no último passo, aplica-se os algoritmos nesta, e em resposta as imagens são modificadas e apresentadas. Nas imagens 12 é possível se observar as diferenças após a utilização dos processamentos.

4.7 Aplicação do SNR

Após aplicar o PCT e PPT, pensando na equação 3.1, é necessário delimitar tanto a área de ruído como a de sinal. Então, utilizando o IR-View foi identificado nas sequências processadas, as melhores imagens, onde os defeitos ficam mais visíveis.

O Ir-View possui uma ferramenta de zoom que nos permite aproximar a visão de uma área da imagem. A área de sinal é definida a partir de uma área onde é possível se ver o defeito na imagem, escolhendo um pixel desta área e colocando-o como centro de uma matriz 3x3, calcula-se a média dos elementos daquela matriz. Já em relação a zona de ruído, procuramos uma área que não exista defeitos e após a escolha de um pixel desta área, aplicamos novamente a média aritmética e o desvio padrão de uma matriz 3x3 tendo o pixel escolhido como centro da matriz. Na figura 10 é possível visualizar os asteriscos

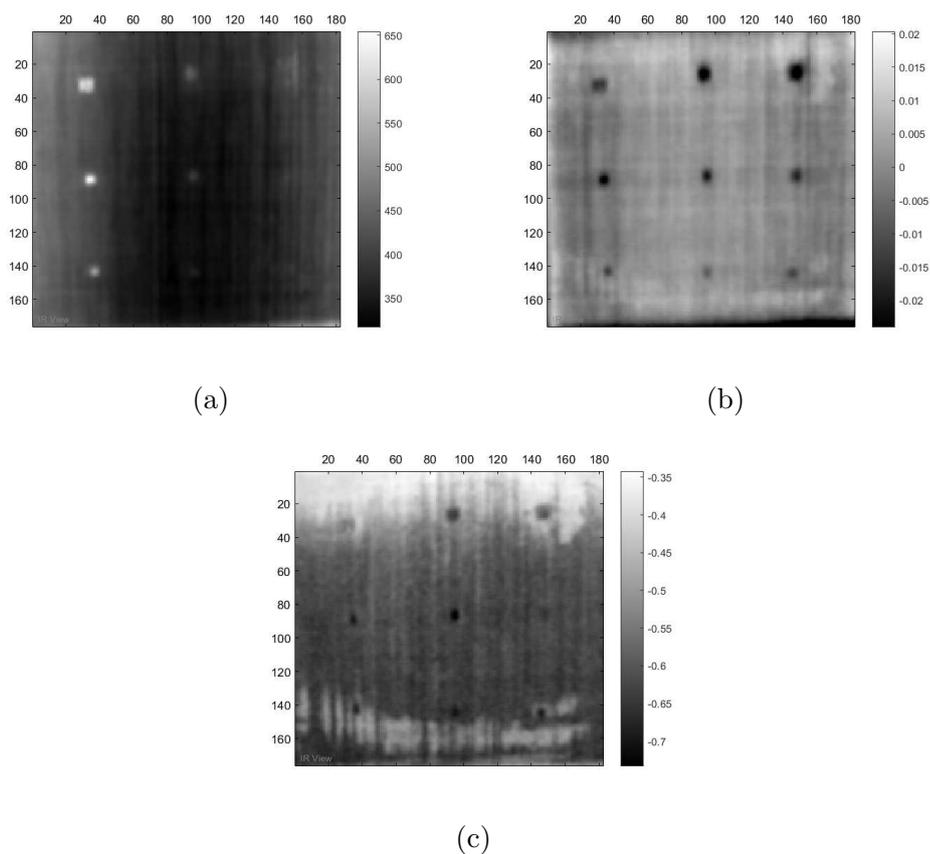


Figura 12 – Comparação das imagens: (a) original, (b) resultado do PCT (EOF2) (c) resultado do PPT (fase 16)

pretos que representam a localização de cada pixel escolhido para calcular a área de sinal, e o asterisco branco para calcular a área de ruído.

Após obter as duas médias aritmética e o desvio padrão das zonas descritas no passo anterior, aplica-se então a equação 3.1 e obtém-se o valor do SNR para cada defeito.

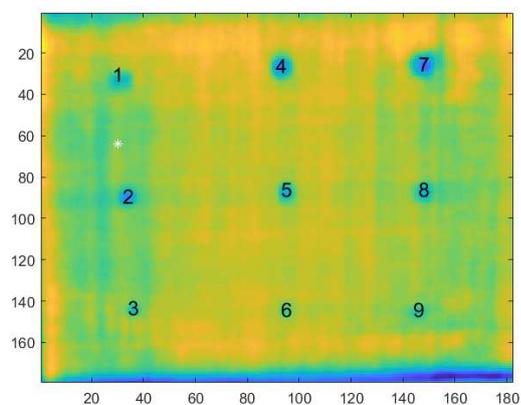


Figura 13 – Os números de 1 a 9 representam as localizações de cada pixel escolhido para cálculo da zona de sinal e o asterisco branco é a localização do pixel utilizado no cálculo da zona de ruído, para as imagens obtidas pela técnica PCT - Fonte Própria

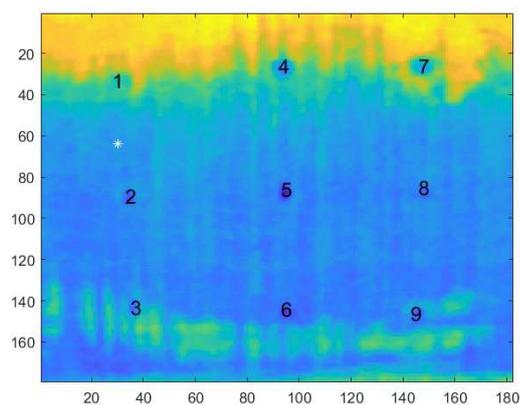


Figura 14 – Os números de 1 a 9 representam as localizações de cada pixel escolhido para cálculo da zona de sinal e o asterisco branco é a localização do pixel utilizado no cálculo da zona de ruído, para as imagens obtidas pela técnica PPT - Fonte Própria

5 Resultados

Utilizando duas seqüências PT obtidas através do experimento configurado, e após todo o processo de aplicação dos pré-processamentos, foram aplicadas as técnicas de processamento PPT e PCT, criando-se novas seqüências processadas. Das seqüências, foram escolhidas uma imagem para cada técnica, para o cálculo do SNR, estas imagens podem ser observadas na figura 16 para a técnica PPT e na figura 15 para a técnica PCT.

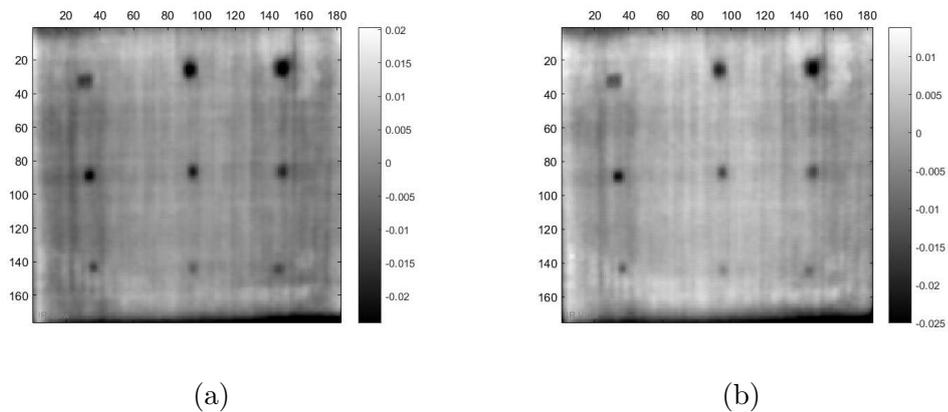


Figura 15 – Imagens escolhidas após o processamento utilizando a técnica PCT: (a) seqüência de 9000 frames, (b) seqüência de 12000 frames - Fonte própria

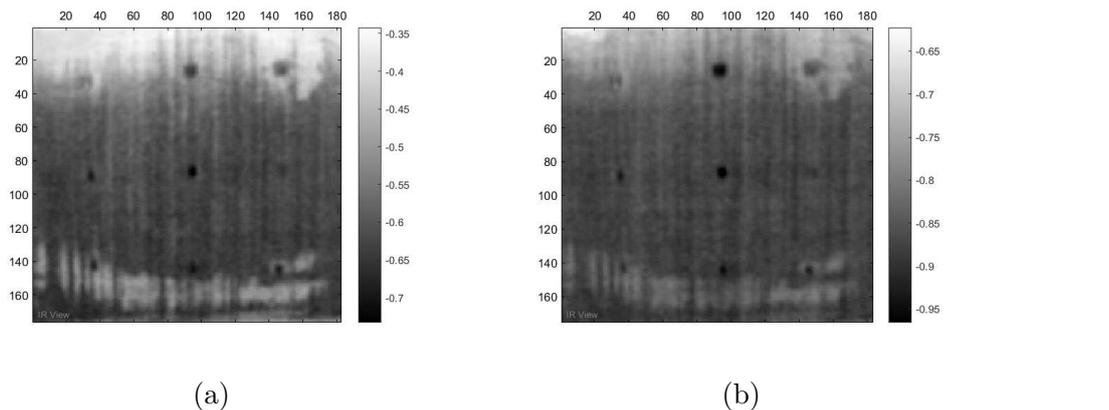


Figura 16 – Imagens escolhidas após o processamento utilizando a técnica PPT: (a) seqüência de 9000 frames, (b) seqüência de 12000 frames - Fonte própria

É notável que existem certas diferenças nas imagens principalmente em relação a escala de cores que tem os valores diferentes, por exemplo, nas imagens da técnica PCT é possível que na primeira imagem da seqüência de 9000 frames o valor máximo e mínimo é de 0,02 a -0,02. Já na seqüência de 12000 frames vai de 0.01 a -0.025, isso dá uma sensação de que uma imagem está mais clara que a outra. Além disso, a qualidade dos defeitos e da

imagem toda é diferente também para cada uma das sequências. Esta diferença é notável principalmente nas imagens referentes a técnica PPT que possui uma imagem mais escura na sequência de 12000 frames, mas é possível indentificar também que os defeitos inferiores da imagem da sequência de 9000 frames do PCT são mais visíveis do que a imagem da sequência de 12000.

A partir das imagens escolhidas, foram calculados os SNRs dos 9 defeitos presentes na amostra para cada técnica, a média aritmética da área de sinal foram colhidos a partir do mesmo pixel defeituoso, para cada um dos defeitos, sendo as mesmas áreas em ambas sequências. Da mesma forma, a mesma área de ruído foi utilizada para o cálculo do SNR de todos os defeitos, em ambas as sequências. Tendo como resultado, os SNRs dos 9 defeitos usando PPT e PCT para duas sequências. Estes resultados são apresentados nas tabelas 1 e 2, onde os números para cada defeito são apresentados na figura 13 para o PCT e na figura 14 para o PPT.

Um ótimo resultado para a técnica PCT foi colhido na sequência de 9000 frames, onde em todos os defeitos o resultado do SNR foi maior do 30. Já na imagem colhida de 12000 frames, a técnica teve resultados bons, exceto pelo defeito 6 que foi muito abaixo do resto com um SNR de 9,1595. Esse resultado influenciou na média final do defeito 6 que foi bem abaixo do que todos os outros com um SNR médio de 19,7598. Já o defeito 7 foi melhor visto nas duas imagens com um SNR médio de 42,5679.

A técnica PPT teve os SNRs calculados quase sempre na casa dos 20, exceto pelos defeitos 4 e 7, sendo o defeito 7 quase não identificado com um SNR de 1,3773. Já na sequência de 12000 frames, os resultados foram melhores, tendo os SNR de dois defeitos atingido a casa dos 30, no entanto o defeito 7 continuou a não ser tão bem identificado tendo o valor de 7,955. É possível notar que a média dos SNRs calculados foram na maioria das vezes boas, mas não tão boas se comparadas ao resultado obtido no PCT. Indicando que PPT foi bem inferior ao PCT nesta configuração de experimento.

É válido lembrar que a forma de aplicar a radiação infravermelha, o material da amostra estudada, podem influenciar no resultado de uma técnica de processamento para termografia vermelha, então é válido afirmar que apenas neste experimento, uma técnica apresentou um processamento melhor do que a outra.

SNR PCT			
Defeito	Pulsed 9000	Pulsed 12000	Media
1	39,2050	28,9511	34,0781
2	45,3344	35,7810	40,5577
3	37,3942	25,9971	31,6957
4	46,0910	34,3002	40,1956
5	42,2778	29,9659	36,1219
6	30,3600	9,1595	19,7598
7	47,4252	37,7705	42,5979
8	41,2941	30,3413	35,8177
9	36,9220	24,7443	30,8332

Tabela 1 – Referente aos SNRs encontrados utilizando a técnica PPT nas duas frequências de 9000 e 12000 frames, além do cálculo da média dos SNR

SNR PPT			
Defeito	Pulsed 9000	Pulsed 12000	Media
1	21,6618	18,3213	19,9915
2	25,2346	26,6018	25,9182
3	22,3806	20,2765	21,3285
4	17,4339	30,2081	23,8210
5	29,1543	32,5922	30,8732
6	26,5151	28,8886	27,7018
7	1,3773	7,9555	4,6664
8	21,4511	19,7443	20,5977
9	24,8542	25,1729	25,0135

Tabela 2 – Referente aos SNRs encontrados utilizando a técnica PPT nas duas frequências de 9000 e 12000 frames, além do cálculo da média dos SNR

6 Conclusão

Após a execução do pré-processamento dos dados obtidos através de *Pulsed Thermography - PT*, e utilizando dois processamentos voltados para imagens termográficas, o *Pulsed Phase Thermography* e o *Principal Component Thermography*, foi analisada a qualidade dessas duas técnicas usando o conceito do *Signal Noise Ratio - SNR*. Após algumas observações feitas no último capítulo e utilizando as médias encontradas na análise do SNR das duas sequências obtêm-se um SNR médio de 34,6285 para o PCT e 22,2124 para o PPT. Isso quer dizer que para as configurações usadas no experimento, o material da amostra e as técnicas envolvidas nesta comparação, o PCT teve uma melhor qualidade ao executar o processamento e facilitar a segregação dos defeitos presentes nas amostras.

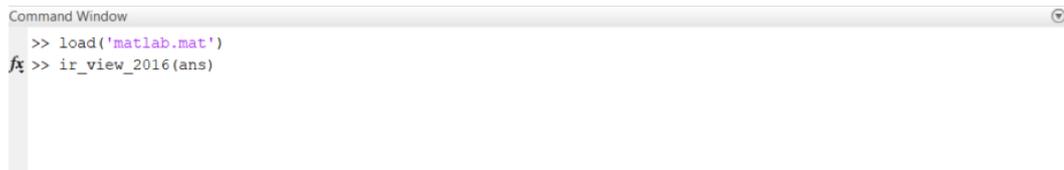
6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros existem diversas frentes, afinal pode-se ter configurações diferentes, outras amostras e técnicas de processamento que não foram utilizadas neste experimento que podem ser envolvidas em uma mesma comparação. É possível a automação do trabalho que foi realizado, utilizando-se scripts ou até mesmo softwares. Quanto as técnicas de processamento, pode-se considerar que o avanço da termografia tem abrangido várias áreas que hoje se beneficiam com estes estudos, portanto, utilizar destes nos campos de medicina, engenharia entre outras áreas, pode enriquecer cada vez mais as novas tecnologias que vão surgindo nestes meios.

Apêndices

APÊNDICE A – IR-View

Neste apêndice é descrito o uso da aplicação IR-View que foi utilizada ao longo deste trabalho de conclusão de curso.



```
Command Window
>> load('matlab.mat')
fx >> ir_view_2016(ans)
```

Figura 17 – Comando executado para iniciar o IR View

Para ser inicializado o IR View precisa ser invocado como uma função na linha de comando do MATLAB e precisa de uma matriz $M \times N$ ou uma sequência $M \times N \times I$ como argumento. A figura 17 representa este processo, utilizando uma variável chamada *ans* do workspace do MATLAB. Após a inicialização, o aplicativo possui duas interfaces. A primeira está demonstrada na figura 18 e a segunda na figura 19.

Na primeira interface é possível ver a imagem ou a primeira imagem de uma sequência, nas laterais existe um informativo das coordenadas desta imagem, mais a direita existe uma escala de tons que vai do maior até o menor identificado na imagem. Há um toolbar com funções para salvar, abrir ou criar um novo arquivo, com funcionalidades de edição de imagens básicas, como por exemplo, dar zoom ou alterar a cor. Existe a possibilidade também de acionar um plot toolbar para plotar figuras geométricas e setas que expliquem algo nas imagens, com opção para adicionar até mesmo textos. Outra toolbar existente é voltada para controle de uma camera e até mesmo gravações, o que não foi explorado no trabalho.

Na segunda interface existem diversas funcionalidade, a interface é dividida em algumas partes, a primeira é chamada de *Display Control*, nesta podemos inverter os eixos da imagem, aplicar um grid, habilitar ou desabilitar a visão das coordenadas e até mesmo acionar uma visão 3D se possível, além dessas funcionalidades também é possível passar os frames se o arquivo for uma sequência. A segunda parte é chamada de *Color Management* nesta podemos alterar as cores de visualização com combinações padrões do programa, e utilizando está combinação alterar o número de cores presentes na mesma. Também é possível se alterar os valores máximo e mínimo de tonalidades presentes na imagem. Fixando estes valores de acordo com a imagem ou com a sequência. Uma última sessão localizada abaixo do display control é a sessão *Spatial Filtering*, onde existem três botões para aplicação de filtros, RMF, Gaussian e Median, que são pré-processamentos disponibilizados pela aplicação.

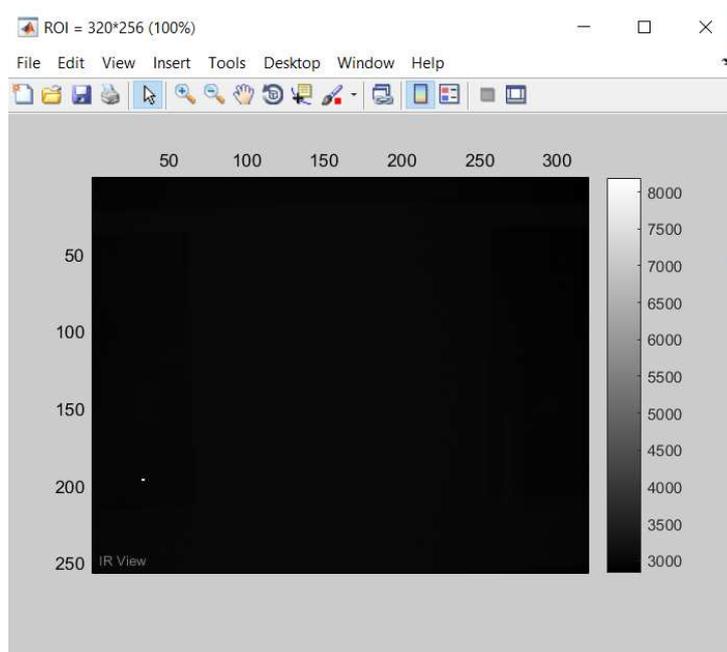


Figura 18 – Interface 1 do programa IR View

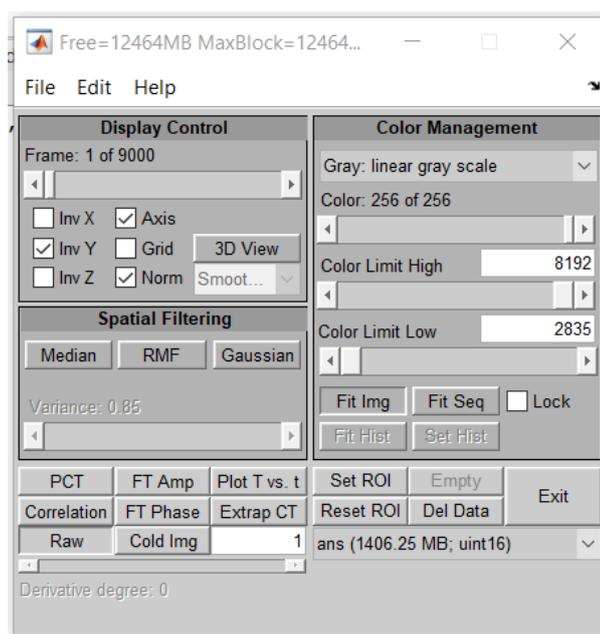


Figura 19 – Interface 2 do programa IR View

Na parte inferior direita da segunda interface é possível notar botões correspondentes a funcionalidade de selecionar uma região de interesse, como o de criar uma região de interesse ou resetar essa região já selecionada, também existem botões para deletar os dados em aberto e um para sair do aplicativo. Já na parte inferior esquerda existem botões com funcionalidades relacionados com a termografia infravermelha, como as técnicas utilizadas neste trabalho e o plot Txt.

Referências

- BACKES, A. *Aula06-FiltragemEspacial*. 2014. Available at <<http://www.facom.ufu.br/~backes/gsi058/Aula06-FiltragemEspacial.pdf>> (2019/11/12). Citado 3 vezes nas páginas 6, 16 e 27.
- BALAGEAS, D. L. et al. The thermographic signal reconstruction method: A powerful tool for the enhancement of transient thermographic images. *Elsiever*, v. 35, n. 1, p. 1 a 7, 2015. Citado na página 20.
- BEMDJÄHNE. *Digital Image Processing Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995. Citado na página 14.
- BHOWMIK, M. K. et al. *Thermal Infrared Face Recognition – A Biometric Identification Technique for Robust Security system, Reviews, Refinements and New Ideas in Face Recognition*,. 2011. Available at <<https://www.intechopen.com/books/reviews-refinements-and-new-ideas-in-face-recognition/thermal-infrared-face-recognition-a-biometric-identification-technique-for-robust-security-system>> (2019/11/12). Citado 2 vezes nas páginas 6 e 11.
- CHAIR, C. R. *Infrared Termography - Definition*. 2007. Available at <<http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=63&Lang=1>> (2019/11/12). Citado na página 12.
- CHAIR, C. R. *Infrared Termography - Electromagnetic Spectrum*. 2007. Available at <<http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=58&Lang=1>> (2019/11/12). Citado na página 11.
- CHAIR, C. R. *Infrared Thermography - Passive vs Active Thermography*. 2007. Available at <<http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=67&Lang=1>> (2019/11/12). Citado 2 vezes nas páginas 6 e 13.
- CHAIR, C. R. *Infrared Thermography - Passive vs Active Thermography*. 2007. Available at <<http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=66&Lang=1>> (2019/11/12). Citado na página 12.
- CHAIR, C. R. *Infrared Vision - Definition*. 2007. Available at <<http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=57&Lang=1>> (2019/11/12). Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- FERNANDES, H. et al. Carbon fiber composite inspection and defect. *Applied Optics*, v. 55, n. 34, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 6, 24, 25 e 26.
- FILHO, O. M.; NETO, H. V. *Processamento Digital de Imagens*. [S.l.]: Brasport, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 6, 15 e 16.
- GONCALVES, C. B. Detecção de câncer de mama utilizando imagens termográficas. Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 14.

HIDALGO-GATO, R. et al. Quantification by signal to noise ratio of active infrared thermography data processing techniques. *Optics and Photonics Journal*, v. 3, p. 20 26, 2013. Citado na página 19.

KLEIN, M. et al. Ir-view: a straightforward graphical user interface for basic and advanced signal processing of thermographic infrared sequences. In: VAVILOV, V. P.; BURLEIGH, D. D. (Ed.). *Thermosense XXX, SPIE Defense and Security Symposium*. Orlando, Florida, USA, Vol. 6939: [s.n.], 2008. v. 6939, p. 693914. Citado na página 17.

M, V.; K-P, M. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals Research and Applications*. [S.l.]: Wiley-VCH, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 16 e 17.

MALDAGUE, X.; MARINETTI., S. Pulse phase thermography. *Journal of Applied Physics*, v. 79, n. 5, p. 2694 2698, 1996. Citado na página 21.

RAJIC, N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*, v. 58, n. 4, p. 521 528, 2002. Citado na página 22.

SHEPARD, S. M. *Advances in pulsed thermography*. [S.l.]: In Proc. SPIE, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXVIII, 2001. volume 4360, pages 511 515. Citado na página 19.