



MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE



**André Luís Rocha Paredes**



# Ensaio não destrutivo

RIO DE JANEIRO

2013

**André Luis Rocha Paredes**

**ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS: Termografia**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Pires

Rio de Janeiro

2013

**André Luís Rocha Paredes**

**ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS: Termografia**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do curso de Oficial de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador

(a): \_\_\_\_\_

Titulação (Mercante/Especialista/Mestre/Doutor, etc)

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos meus pais e  
principalmente a Marcella.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o apoio dos meus pais e amigos. Agradeço principalmente a Marcella, sem você nada disso seria possível.

## RESUMO

Mudanças de temperatura podem indicar problemas em várias áreas de trabalho dos técnicos, todos os dias. A análise termográfica é a técnica de inspeção não destrutiva realizada com a utilização de sistemas infravermelhos, para a medição de temperaturas ou observação de padrões diferenciais de distribuição de calor, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. Um sistema de análise termográfica é formado pelo conjunto de recursos que permitam a realização de tarefas de análise preditiva nos campos de redes elétricas, equipamentos mecânicos, redes de vapor, fornos, reatores e processos. A base para tal sistema é dada pelo equipamento empregado, o termovisor. A análise de temperatura, quando associada à manutenção de equipamentos elétricos, utiliza-se mais da técnica de termografia que usa um equipamento de medição de temperatura por infravermelho, conhecido como termovisor, capaz de produzir imagens térmicas dos equipamentos e prover um panorama dos defeitos que possam influir na temperatura da peça, assim como os valores térmicos absolutos. As medidas de temperatura, assim como os termogramas (imagens térmicas), devem ser examinadas e armazenadas para que a sua variação ao longo do tempo possa ser analisada de modo que eventuais defeitos possam ser diagnosticados em tempo hábil.

Palavras-chave: Temperatura. Infravermelho. Termovisor. Termogramas.

## **ABSTRACT**

Temperature changes can indicate problems in various areas of technical work, every day. The thermographic analysis is a nondestructive inspection technique performed with the use of infrared systems for measuring temperatures or watching differential patterns of heat distribution, with the objective of providing information on the operating condition of a component, equipment or process. A thermographic analysis system is formed by the set of features that allow performing tasks of predictive analysis in the fields of electrical networks, mechanical equipment, steam networks, furnaces, reactors and processes. The basis for this system is given by the equipment used, the thermal imager. The analysis of temperature, when associated with the maintenance of electrical equipment, it uses more of thermography technique that uses a device temperature measurement by infrared, known as thermal imager capable of producing thermal imaging equipment and provide an overview of the defects that may influence the temperature of the workpiece, as well as thermal absolute values. Temperature measurements, as well as the thermograms (thermal imaging), should be examined and stored so that its variation over time can be analyzed so that any defects can be diagnosed in a timely manner.

Key-words: thermographic analysis, thermograms, thermal imager.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1 TERMOGRAFIA</b> .....	11
1.1 Temperatura.....	12
1.2 Transferência de Calor.....	13
1.2.1 Convecção .....	13
1.2.2 Condução .....	13
1.2.3 Radiação Infravermelha.....	14
1.3 Condutividade Térmica .....	16
1.4 Difusividade Térmica .....	17
1.5 Emissividade.....	18
<b>2 MODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA</b> .....	20
2.1 Termografia Passiva .....	20
2.2 Termografia Ativa .....	20
2.2.1 Excitadores Térmicos Utilizados na Termografia Ativa .....	21
2.3 Modalidades da Técnica de Termografia .....	22
2.3.1 Termografia Ativa Pulsada .....	22
2.3.2 StepHeating.....	23
2.3.3 Termografia Ativa Modulada .....	23
2.3.4 Termografia Ativa de Fase Pulsada.....	24
2.3.5 Vibrothermography ou Thermal Mechanical Vibration.....	25
<b>3 TERMOVISORES</b> .....	27
3.1 Relação Custo-Benefício .....	29
3.2 Atividades Básicas.....	30
<b>4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS</b> .....	31
4.1 Sistemas de Processamento de Imagens Digitais .....	31

4.2 Análise de Imagens .....	32
4.3 Melhoria.....	33
4.4 Tratamento da Imagem.....	33
4.5 Modificação de Intensidade.....	34
4.6 Subtração de Imagens .....	34
4.7 Segmentação .....	35
4.8 Limiarização .....	36
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

## INTRODUÇÃO

“Ensaio não destrutivo” é um ramo da ciência dos materiais interessado no estudo de todos os aspectos de uniformidade, qualidade e de desempenho em uso dos materiais e estruturas. Pela definição, esses ensaios são considerados não destrutivos pela sua capacidade de inspecionar os materiais e estruturas sem danificá-las e até mesmo sem interferir na sua vida em serviço.

O principal objetivo da ciência dos ensaios não destrutivos é incorporar todas as tecnologias capazes de detectar e medir as importantes propriedades do objeto inspecionado, incluindo as descontinuidades presentes nele, uma vez que detectada a presença de descontinuidades no material se torna possível o conhecimento do grau de risco relacionado com o desempenho dele em serviço. Tal fato explica a importância dos ensaios não destrutivos como uma ferramenta de controle de qualidade e também como ferramenta para aumentar a confiabilidade e produtividade nos processos de fabricação e manutenção dos materiais e estruturas.

Os ensaios não destrutivos são constituídos de vários métodos, cada qual com as suas técnicas, procedimentos e equipamentos. Segundo a ASNT (American Society for Nondestructive Testing) os métodos de ensaios não destrutivos podem ser classificados em seis grandes categorias:

- Visual;
- Radiação (radiografia);
- Vibração (ultra-som, emissão acústica);
- Eletromagnética;
- Térmica (termografia);
- Eletroquímica (potenciais eletroquímicos);

Neste trabalho a técnica a ser pesquisada será a termografia.

# CAPÍTULO 1

## TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica não destrutiva que tem por objetivo analisar o perfil de temperaturas na superfície do corpo tornando possível detectar regiões na superfície do corpo que apresentem uma diferença de temperatura em relação ao restante do corpo, indicando assim a possibilidade de presença de defeitos nestas superfícies ou abaixo dela. Posteriormente, pode-se correlacionar esta diferença de temperaturas a um mau funcionamento do equipamento analisado e também a presença de defeitos.

Embora os métodos de inspeções não destrutivas atualmente estejam bem estabelecidos, há um grande interesse da indústria de materiais no desenvolvimento de técnicas avançadas que permitirão inspeções rápidas, sem contato físico e *in situ* grandes estruturas. Diante disso, a termografia vem ganhando importância nessa área científica ficando à frente de outros tipos de detecção, como o ultrassom, radiografia, corrente parasita, por proporcionar as seguintes vantagens: é uma técnica sem contato, de fácil inspeção e armazenamento de dados e possui uma velocidade de inspeção. Nos últimos anos, a técnica de termografia infravermelha tem se mostrado uma ferramenta ímpar para a detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais em vários tipos de materiais: metais, compósitos e polímeros. A inspeção nestes tipos de materiais apresentou-se difícil com outras técnicas que não a termografia.

As vantagens não se restringem as citadas anteriormente, esta técnica apresenta um grande campo de aplicações em diversos setores como: setor elétrico, para manutenção preditiva de sistemas geradores e transmissores de energia elétrica; setor eletrônico, no acoplamento do desempenho de placas e de circuitos eletrônicos; setor automobilístico, para desenvolvimento do perfil térmico dos fundidos e inspeções de revestimentos refratários de fornos; setor químico, para controle de reatores e torres de refrigeração, detecção de corrosão, e no setor civil, para avaliação do isolamento térmico de edifícios e vazamentos e aeroespacial.

O ensaio termográfico consiste na detecção da radiação térmica (infravermelha) emitida pelo corpo através do sensor de infravermelho contido na câmara termográfica e a conversão dessa radiação em sinal elétrico, formando uma imagem, na qual os dados resultantes do ensaio são expressos em termos de níveis de cinza ou em cores (RGB)

nas imagens termográficas digitais. É comumente denominado de termograma, as imagens termográficas que apresentam a distribuição de temperaturas na superfície do corpo e na presença de alguma descontinuidade, como o fluxo de calor será alterado, haverá diferenças na temperatura na superfície do corpo apresentado no termograma, sendo este o principal meio para a detecção de defeitos na termografia.

A emissão de radiação dos corpos ocorre em função da movimentação, a nível atômico, dos seus constituintes, a temperatura do corpo é proporcional a intensidade dessas emissões e também a uma propriedade denominada emissividade, que será esclarecida posteriormente.

## **1.1 TEMPERATURA**

A temperatura é uma grandeza física comumente associada às noções de frio e quente, no entanto, mesmo entre os estudantes que ingressam em cursos superiores é comum aqueles que têm dificuldade de definir tal grandeza. Em uma descrição do ponto de vista microscópico, ela é definida como a medida da energia cinética associada à vibração das partículas (em um sólido) ou ao movimento das partículas (em um gás).

Ainda não existe nenhuma tecnologia que permita olhar diretamente para os átomos e moléculas e contar quantas vezes eles vibram em um determinado intervalo de tempo. Por isto surgiram os sensores de temperatura: os termômetros.

O mais comum é associar efeitos como variação volumétrica (dilatação ou contração de líquidos ou gases) ou variação na resistividade (em geral de um metal ou liga) com a variação de temperatura medida. Para fazer isto também é necessário escolher referenciais de temperatura, que servirão de parâmetro para as diferentes escalas de graduação desta grandeza. A temperatura é definida como sendo uma medida de intensidade da movimentação atômica, molecular ou iônica de uma substância, ou seja, é uma medida de energia cinética medida dos seus constituintes.

O calor é uma energia em transito da temperatura, sempre da mais alta para a mais baixa dentro de um sistema quando há um gradiente de temperaturas em seu interior. Uma vez que essas duas grandezas são estatísticas, ou seja, são medidas através

de alterações físicas e químicas no corpo sob estudo, associada a alguma resposta dele, elas são fortemente influenciadas por fatores externos.

## **1.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

Existem três formas de transferência de calor. Para o estudo da termografia serão considerados a condução e a irradiação elementos importantes para nossa análise.

### **1.2.1 CONVECÇÃO**

A convecção somente ocorre em líquidos e gases. Consiste na transferência de calor dentro de um fluido através de movimentos do próprio fluido. O calor ganho na camada mais baixa da atmosfera através de radiação ou condução é mais frequentemente transferido por convecção. Esse tipo de transferência só ocorre entre dois sólidos se entre eles há presença de um fluido ou gás.

### **1.2.2 CONDUÇÃO**

A transferência por condução é dada quando a transferência de calor no qual a energia térmica se propaga entre dois corpos sólidos em contato quando há uma diferença de temperatura entre eles ou quando essa diferença ocorre entre partes de um sólido. Essa transferência de calor se dá entre camadas sucessivas de um material através da difusão de energia cinética entre os átomos, sendo essa energia maior nas regiões com maiores temperaturas e menor nas mais frias, assim o fluxo de calor na condução se direciona da região de mais alta temperatura para a região de mais baixa temperatura a fim de igualar a temperatura nas duas regiões. Duas propriedades do material que são importantes para esse tipo de transferência de calor são a condutividade térmica, que fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferidas pelo processo de difusão, e a sua difusividade térmica, propriedade que mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação a sua capacidade de armazená-la. Estas propriedades serão descritas posteriormente.

### 1.2.3 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Radiação infravermelha é a forma de transferência de calor através de ondas eletromagnéticas as quais possuem o comprimento de onda dentro da região do infravermelho no espectro eletromagnético. – Valores de condutividade térmica de alguns materiais.

Todos os corpos emitem naturalmente a radiação eletromagnética em função da temperatura absoluta de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, ou seja, eles sempre trocam calor com o ambiente. Este fenômeno ocorre devido a um aumento ou decréscimo na energia dos átomos e na carga elétrica, uma vez que quando um material é aquecido, há um aumento na energia das partículas atômicas, levando a um aumento na temperatura e da energia emitida por cada partícula. Contudo, a agitação térmica dessas partículas produz uma forma de radiação de energia eletromagnética conhecida como infravermelha, pois as ondas resultantes deste mecanismo apresentam características, como frequência e comprimento de onda, que compreendem a região do infravermelho no espectro eletromagnético. Este comprimento de onda da radiação eletromagnética compreende a região do espectro entre a luz visível e as micro-ondas. As regiões do espectro de radiação eletromagnético estão expostas na figura abaixo:

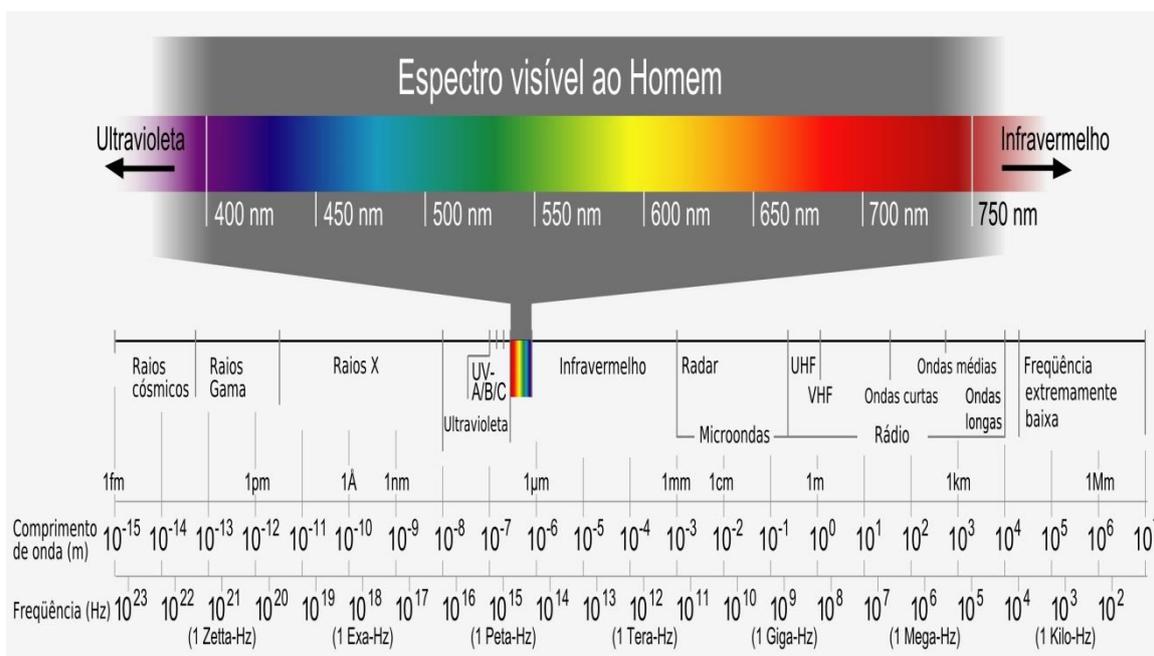


Figura 1 – Espectro eletromagnético de radiação.

Tanto a intensidade de radiação emitida pelo corpo quanto o seu espectro depende da temperatura do corpo e de sua emissividade (propriedade que será abordada posteriormente). A Lei de Stefan-Boltzmann é dada conforme a figura abaixo:

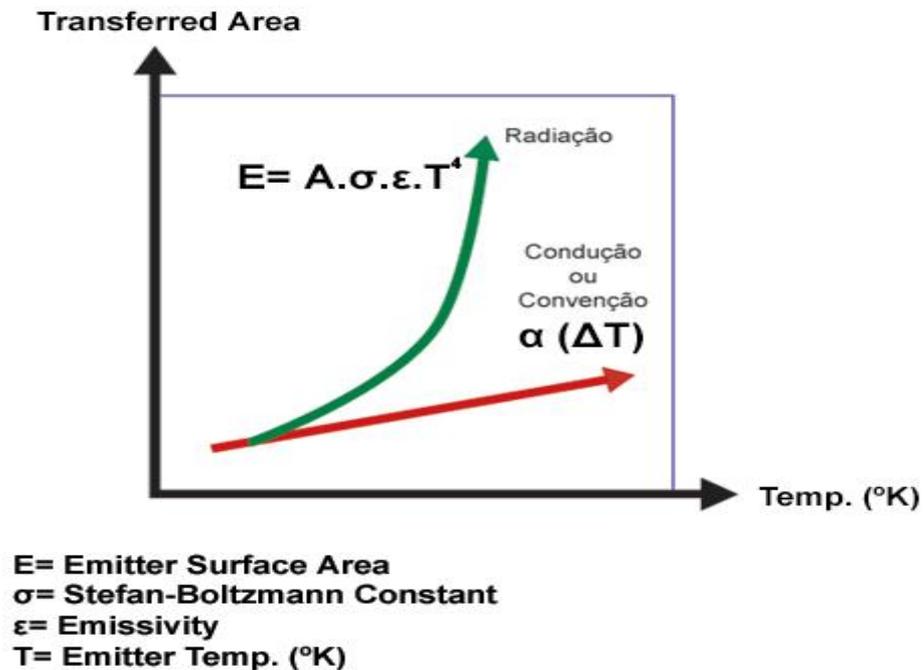


Figura 2

O comprimento de onda de intensidade e radiação máxima em certa temperatura é expresso através da Lei de Wien, conforme abaixo:

Analisando tanto a Lei de Stefan-Boltzmann quanto a Lei de Wien, pode-se observar a dependência da intensidade da radiação com a temperatura, na qual baixas temperaturas, a radiação emitida pelo material é caracterizada por ser de baixa intensidade e constituída de comprimentos de ondas longos enquanto que as altas temperaturas, a intensidade de radiação é alta e de baixos comprimentos de onda. Isso se explica pelo fato de que quando uma superfície é aquecida, ocorre um aumento na energia nos átomos e conseqüentemente induz a uma aumento na temperatura e da energia emitida por ele, o que confere um aumento na intensidade de radiação emitida pelo corpo quando ele é aquecido.

Outra variável importante que é apresentada na Lei de Stefan-Boltzmann é a emissividade, que será tratada mais adiante.

### 1.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condução térmica é o fenômeno segundo o qual o calor é transferido das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura em uma substância. Assim, a propriedade que caracteriza essa habilidade de um material em transferir calor é condutividade térmica. Podemos observar a condutividade térmica, como a relação entre o fluxo de calor transportado através de um corpo e o gradiente de temperatura que gera esse fluxo. Esta propriedade pode ser calculada por esta expressão:

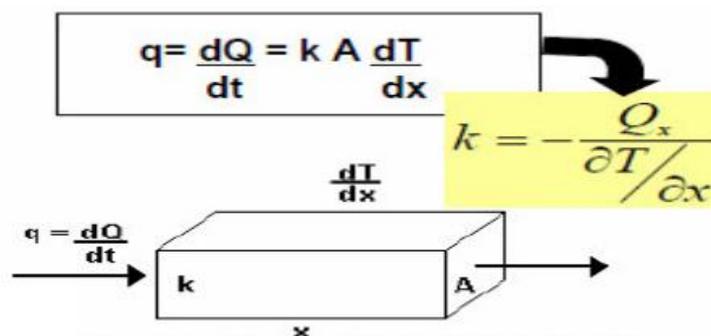


Figura 3

$q$ : fluxo de calor (W)

$t$ : tempo de transmissão de calor (s)

$k$ : condutividade térmica (W/mK)

$a$ : área perpendicular ao fluxo ( $m^2$ )

$q$ : calor transmitido (J)

$x$ : comprimento na direção do fluxo

$t$ : temperatura (K)

Material	K ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Material	K ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
Prata	406	Hidrogénio a 0°	0.14
Cobre	385	Hélio a 0°	0.14
Latão	109	Oxigénio	0.023
Alumínio	205	Gelo Seco	0.1
Ferro	65	Fibra de vidro	0.04
Aço	50.2	Tijolo de isolamento	0.15
Chumbo	34.7	Tijolo vermelho	0.6
Mercúrio	8.3	Cortiça	0.04
Gelo	1.6	Lã	0.04
Vidro	0.8	Fibra de rocha	0.04
Cimento	0.8	Esferovite	0.01
Água a 20°	0.6	Madeira	0.04 – 0.12
Asbesto	0.16	Ar a 0°	0.024

Figura 4 – Valores de condutividade térmica de alguns materiais.

A taxa de transferência de calor pode ser classificada em função do tempo como estacionária, no caso onde a taxa não varia com o tempo ou não estacionária, quando esta taxa varia de acordo com o tempo até o equilíbrio térmico do material seja atingido, ou seja, a taxa seja constante.

## 1.4 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica é uma propriedade térmica intrínseca do material. Propriedade esta de grande importância, principalmente quando o fluxo de calor ocorre no estado transiente, ou seja, não estacionário, pois é ela quem determina as temperaturas seguras de operação, controle de processos e garantia de qualidade. Ela é dada pela velocidade com que o calor atravessa a espessura do material e pode ser determinada através da equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times C_p}$$

Onde:  
 $k$  – condutividade térmica;  
 $\rho$  – densidade;  
 $C_p$  – calor específico.

Figura 5

A determinação dos valores de difusividade térmica são comumente calculados utilizando-se a técnica de termografia, usando o flash como excitador térmico, conforme a norma ASTM E1461-07. Este processo é baseado no aquecimento por pulso rápido de calor na superfície frontal do material e o monitoramento da temperatura ao longo do tempo na superfície oposta, determinando assim o tempo necessário para que a temperatura na superfície oposta só material seja metade do valor máximo de temperatura. Conhecendo a espessura do material, determina-se a difusividade térmica do material através da equação.

## 1.5 EMISSIVIDADE

Esta propriedade é de suma importância no que se refere ao estudo dos materiais no que tange a termografia. A emissividade é a propriedade que representa a razão entre a quantidade de energia total irradiada ou absorvida pelo corpo de prova a uma temperatura e a de um corpo negro na mesma temperatura. O corpo negro é uma fonte hipotética de radiação que emite a energia máxima de radiação teoricamente possível a uma certa temperatura e tem seu valor de emissividade igual a 1 (um). Os demais são denominados de corpos cinza e apresentam valores de emissividade entre 0 (zero) e 1 (um). Os valores de alguns materiais podem ser vistos na tabela abaixo:

<b>Material</b>	<b>Faixa de Emissividade</b>
<b>Alumínio, Ouro, Prata, Bronze e Estanho (Condição altamente polido)</b>	0,002 – 0,04
<b>Alumínio, Cobre, Estanho, Zinco (Condição levemente oxidado)</b>	0,2 – 0,4
<b>Aço, Ferro, Cobre e Alumínio (Condição altamente oxidado)</b>	0,6 – 0,85
<b>Pinturas Brancas, Porcelanas e Plásticos</b>	0,8 – 0,95
<b>Pinturas Vermelhas, Marrons, Verdes e outras cores, vidros e plásticos translúcidos, compósitos com fibra de vidro, óleo</b>	0,85 – 0,95
<b>Compositos com fibra de carbono,</b>	0,9 – 0,97
<b>Concreto</b>	0,92
<b>Pele Humana</b>	0,98

Figura 6

Contudo, a emissividade é fortemente dependente da condição e da composição da superfície do material, conforme é observado na tabela. A condição de polido impõe um aumento da emissividade do material em comparação ao material rugoso e a natureza do material, como é o caso dos metálicos, apresenta uma emissividade menor do que os não-metálicos. A presença de resíduos de corrosão na superfície do metal como também poeiras metálicas na superfície de compósitos conferem uma alta emissividade na superfície destes materiais.

Um problema comum de ocorrer é quando o material apresenta variações de emissividade na sua superfície, uma vez que quando a emissividade se reduz numa região isto leva a uma falsa indicação de redução de temperatura nesta região do material e vice versa. A solução para esse problema é tornar a superfície do material com uma emissividade mais uniforme possível e isto é conseguido pelo revestimento uniforme dessa superfície com materiais de alta emissividade. Esta solução é muito empregada para superfícies metálicas e em menor escala para superfícies não metálicas. Após a inspeção termográfica deste material, o revestimento aplicado pode ser retirado da superfície do material.

## **CAPÍTULO 2**

### **MODOS DE EXCITAÇÃO TÉRMICA**

Como já citado anteriormente através da Lei de Stefan-Boltzmann, o nível de radiação infravermelha emitida por um corpo se eleva com o seu aumento da temperatura e para induzir esse aumento no nível de radiação é necessária uma excitação térmica dele.

Baseado no modo de excitação térmica, que pode ser estacionária ou transiente, a termografia é dividida em duas modalidades: termografia passiva (convencional) e termografia ativa.

#### **2.1 TERMOGRAFIA PASSIVA (CONVENCIONAL)**

Esta modalidade é também conhecida como termografia convencional e consiste na modalidade mais simples de ensaio termográfico. uma vez que o próprio corpo inspecionado emite radiação infravermelha, ou seja, ele apresenta uma fonte interna de excitação térmica. O modo de excitação térmica nesta modalidade é constante. Este tipo de modalidade de inspeção é o tipo utilizado para avaliação de revestimentos internos de fornos, uma vez que a inspeção é realizada na superfície externa do forno e com isso consegue-se avaliar o estado e eficiência do material utilizado como revestimento dele.

#### **2.2 TERMOGRAFIA ATIVA**

Esta técnica se tornou nos últimos anos uma poderosa ferramenta de medição para detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais em diferentes tipos de materiais como metais, compósitos e polímeros devido a sua alta velocidade de inspeção e possibilidade de avaliação a distância. Em contraste com a modalidade de termografia passiva a termografia ativa requer uma fonte de excitação (excitador térmico) para induzir uma diferença de temperatura (contraste térmico) entre a região defeituosa e a região sem defeito. Há dois modos de posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova inspecionado e a câmera termográfica: quando o excitador térmico está posicionado no mesmo lado da câmera é denominado modo de reflexão e quando o

excitador térmico é posicionado na face oposta a câmera termográfica é denominado de modo de transmissão. A figura apresenta um esquema dos dois modos de posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova.

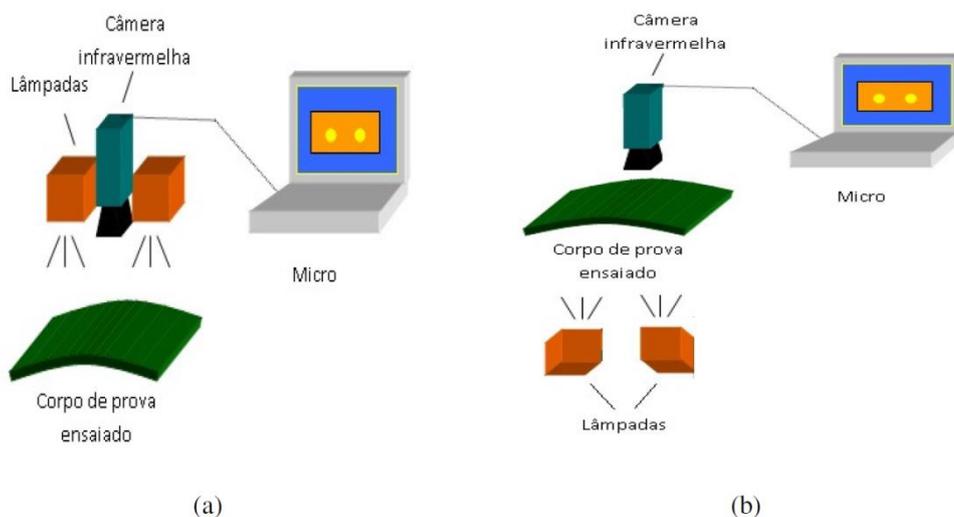


Figura 7

Para o presente estudo, foi utilizada a técnica de termografia ativa e o modo de reflexão nos ensaios termográficos.

### 2.2.1 EXCITADORES TÉRMICOS UTILIZADOS NA TERMOGRAFIA ATIVA

Os excitadores térmicos utilizados na termografia ativa são uma fonte de calor necessária para gerar aquecimento e conseqüentemente um perfil de temperaturas (onda térmica) ao longo da espessura do objeto sob exame em um tempo adequado para formação de uma imagem termográfica com um nível de contraste moderado, possibilitando assim a detecção de defeitos na análise da imagem. Os principais excitadores térmicos utilizados na termografia ativa são: lâmpadas de alta potência, flashes fotográficos, sopradores térmicos, entre outros, como feixes ultrassônicos.

## 2.3 MODALIDADES DA TÉCNICA DE TERMOGRAFIA

### 2.3.1 TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA (*Pulsed Thermography*)

Esta modalidade consiste na utilização de um curto pulso de energia, na ordem de alguns milissegundos para materiais com alta condutividade térmica, como é o caso dos metais, e na ordem de alguns segundos para materiais de baixa condutividade, como polímeros e compósitos, para o aquecimento da superfície do material e posteriormente é monitorado o decaimento de temperatura no material. Este pulso inicial térmico ao incidir no material, provoca um rápido aumento de temperatura em sua superfície, devido a propagação da onda térmica, que através da difusão, penetra abaixo da superfície do material. Diante disto, a presença de uma descontinuidade no material, acarreta numa modificação tanto na taxa de difusão quanto no caminho do fluxo de calor e com isso, ao analisar a distribuição de temperaturas no termograma, a região que contenha a descontinuidade aparecerá na imagem como áreas de diferentes temperaturas em relação ao restante do material sem a presença de descontinuidade. É a partir deste mecanismo que a termografia se torna uma ferramenta poderosa para detectar tanto defeitos superficiais quanto sub-superficiais, principalmente em metais, compósitos, polímeros e madeiras.

O pulso térmico pode ser gerado através de diversas fontes sendo as principais o laser, flash fotográfico de alta potência lâmpadas com acionamento mecânico e sopradores de ar quente. Essa modalidade pode ser aplicada tanto no modo de reflexão (quando o excitador térmico se encontra no mesmo lado da câmera termográfica) quanto no modo de transmissão (quando o excitador térmico se encontra no lado oposto ao da câmera termográfica). Contudo, quando se deseja detectar descontinuidades próximas da superfície a ser excitada termicamente é indicado o uso do modo de reflexão e para detecção de descontinuidades próximas do lado oposto ao de excitação térmica indica-se o modo de transmissão. O modo de transmissão apresenta duas desvantagens em comparação ao de reflexão: nem sempre pode ser utilizado, pois a superfície oposta nem sempre é acessível e também não é possível o conhecimento da profundidade do defeito, uma vez que a distancia percorrida pelo pulso independe da profundidade do defeito contudo, esta técnica é afetada pela variação do coeficiente de emissividade e por um

aquecimento não uniforme da superfície, o que confere uma dificuldade na visualização do defeito, ou seja se toma uma limitação da técnica.

A termografia ativa pulsada é uma técnica consolidada de ensaio não destrutivo, muito utilizada na área aeroespacial, devido a sua capacidade de detecção de defeitos em juntas adesivas e em materiais compósitos, além dos defeitos em revestimentos de superfície.

No presente estudo, adotou-se a modalidade de termografia ativa pulsada e o modo de excitação térmica de reflexão.

### **2.3.2 StepHeating**

Esta modalidade apresenta o mesmo princípio da modalidade de Termografia Ativa Pulsada porém na modalidade de *step heating* o material inspecionado é submetido a um longo tempo de excitação térmica sendo o tempo deste pulso de energia entre 1 a 30 minutos.

O *step heating* é indicado para aplicação em materiais de baixa condutividade térmica como telhas cerâmicas e materiais fibrosos: estruturas do tipo sanduíche: falhas profundas: inspeção de espessuras de revestimentos: entre outras aplicações.

### **2.3.3 TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA (*Lock-in Thermography*)**

A termografia *Lock-in* esta baseada no aquecimento periódico do corpo inspecionado através de lâmpadas de modulação com onda senoidal e a formação de termogramas durante este aquecimento. Nesta modalidade é necessário que o termógrafo esteja sincronizado com a amplitude de frequência de modulação, uma vez que a essência desta modalidade é o trabalho com ondas térmicas monofrequenciais e assim só será analisado sinais de resposta com a mesma frequência utilizada para modulação, ou seja as imagens formadas nos termogramas terão somente a mesma frequência utilizada para excitação, daí o nome de *Lock-in*. Uma vez obtido o sinal na frequência desejada aplica-se a Transformada de Fourier para avaliar o comportamento da amplitude e fase deste sinal de resposta A escolha da frequência de excitação, ou seja, a frequência de modulação é baseada no comprimento de difusão (penetração da

onda térmica) e este comprimento é dado em função de outras propriedades do material, como condutividade térmica, calor específico e densidade, entre outros. Porém, quando se desconhece estas propriedades do material ou então defeitos de diferentes profundidades devem ser detectados, é necessária a realização desta modalidade com sinais de diferentes frequências e para cada frequência avaliar a formação do termograma. o que confere uma limitação a modalidade. A figura 4 apresenta um esquema representativo do processamento de termografia *Lock-in*.

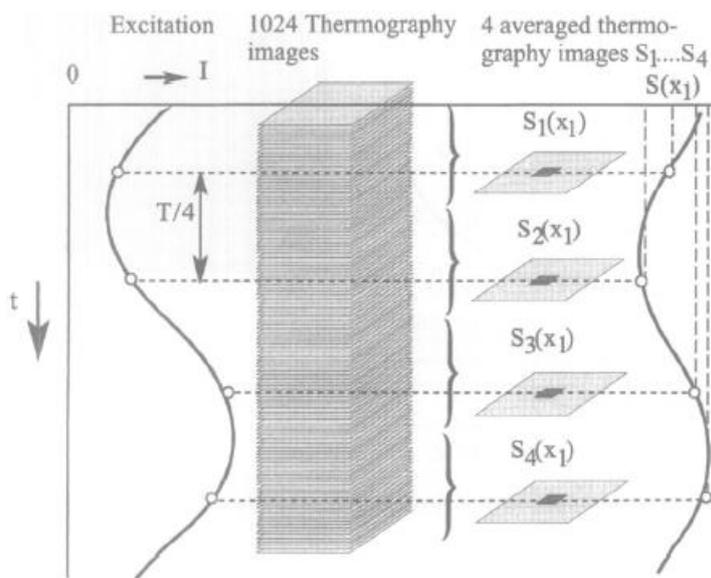


Figura 8

Esta modalidade é indicada para detecção de áreas descolamento de revestimentos, delaminações, danos causados por impactos, inclusões de impurezas em materiais compósitos, defeitos de perda de espessura nos aços entre outros.

### 2.3.4 TERMOGRAFIA ATIVA DE FASE PULSADA

Esta modalidade combina as vantagens das técnicas de Termografia Pulsada e de Termografia *Lock-in*. A termografia de fase pulsada permite a geração de imagens a partir dos ângulos de fase do espectro de frequências de uma excitação térmica temporal. A evolução da temperatura segundo o tempo de cada pixel de um termograma é levado para o domínio da frequência através da transformada de Fourier (da mesma maneira que é utilizada na Termografia *Lock-in*) onde mapas com os valores dos ângulos de fases de frequências escolhidas podem ser obtidos. Além das imagens de

fase, a termografia de fase pulsada permite a obtenção das imagens de amplitude (módulos da transformada de Fourier). que correspondem a mapas de cores formados a partir dos módulos da transformada de Fourier para cada pixel dos termogramas.

Uma das grandes vantagens desta modalidade de termografia ativa é a possibilidade de análise de todo o espectro de frequências a partir de uma única excitação térmica de forma rápida e com grande capacidade de automação para todo o processo. O aspecto negativo da metodologia é a previsão de profundidade de defeitos, pois apesar da relação entre o ângulo de fase e o caminho médio percorrido pela onda térmica que daria indicações sobre a profundidade, estes cálculos ainda são obtidos por processos matemáticos complexos e, em muitas vezes, requer que dados como difusividade térmica, condutividade térmica e outros sejam estimados inferindo incerteza e subjetividade aos dados.

### **2.3.5 Vibrothermography ou Thermal Mechanical Vibration**

Nesta modalidade, a excitação térmica do material é realizada através da aplicação de vibrações mecânicas, entre 20 e 50 Hz, que são convertidas diretamente em energia térmica. Quando há uma descontinuidade presente no material há uma liberação de calor nela devido a fricção e como cada descontinuidade possui uma ressonância mecânica específica diferentemente do resto do material, o aumento ou decréscimo da frequência de excitação mecânica causará um gradiente térmico local possibilitando assim a detecção de descontinuidades presentes no material.

A tabela apresenta as principais vantagens e desvantagens de cada uma das modalidades acima listadas

<b>Modalidade</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
<b>Termografia Passiva</b>	Sem contato físico e interação com o material	Aplicável somente em materiais que possuem uma fonte de excitação térmica interna
<b>Termografia Ativa Pulsada</b>	Sem contato físico com o material Rápido pulso para excitação térmica do material	Necessita de uma fonte externa para excitação do material Limitação da área superficial para inspeção (até 0,25 m <sup>2</sup> )
<b>Termografia Ativa Step-Heating</b>	Sem contato físico com o material	Necessita de uma fonte externa para excitação do material Risco do superaquecimento do material
<b>Termografia Ativa Lock-in</b>	Sem contato físico com o material Capacidade para inspeção de grandes áreas superficiais Análise através das imagens de fase e de amplitude	Necessita de uma fonte modulada para excitação térmica do material Necessita de 1 ou mais ciclos de modulação para observação Limitação quanto a espessura da camada abaixo da superfície Conhecimento prévio do defeito para determinação da frequência de modulação a ser utilizada
<b>Termografia Ativa de Fase Pulsada</b>	As vantagens da Termografia Ativa Pulsada com a <i>Lock-in</i>	Predição da profundidade do defeito através de cálculos matemáticos complexos e necessidade de conhecimento de muitas propriedades do material
<b>Vibrothermography Ativa</b>	Detecção de defeitos fechados	Dificuldade para geração das vibrações mecânicas Alguns contrastes térmicos só aparecem em frequências específicas Contato físico com o material para geração das vibrações mecânicas

Figura 9 – Vantagens e desvantagens de cada uma das modalidades da Termografia.

## CAPÍTULO 3

### TERMOVISORES

Este tipo de equipamento é aplicável à manutenção preventiva em diversos setores, como eletroeletrônica, engenharia, mecânica, construção civil, segurança do trabalho, náutica. Além de poder ser utilizado na área médica veterinária. O aparelho identifica sobreaquecimento, constatado tanto em painéis elétricos e quadros de distribuição, quanto no corpo humano ou animal, sinalizando pontos de infecção.

São sistemas imageadores dotados de recursos para a análise e medição de distribuições térmicas. São produzidos, normalmente, com sensibilidade nas faixas espectrais de 3 a 5 microm (sistemas industriais) e de 8 a 12 microm (sistemas militares e de pesquisa).

Tal como nos equipamentos fotográficos, os termovisores possuem objetivas intercambiáveis que possibilitam adequar o campo de visão do aparelho às necessidades específicas de cada observação. As imagens são geradas em branco e preto, podendo ser convertidas em imagens coloridas pela substituição da escala de cinza por uma escala de cores. Atualmente todo o registro das imagens térmicas geradas é digital, através de disquetes ou interfaces que permitem o acoplamento dos sistemas com microcomputadores para posterior processamento da informação. Além de mostrar graficamente as diferenças de temperatura, essas unidades medem e armazenam as temperaturas de cada ponto da imagem. Subsequentemente, todos esses pontos de dados podem ser nomeados e usados em análises detalhadas de problemas potenciais ou simplesmente na monitoração de tendências num mesmo local ao longo do tempo.

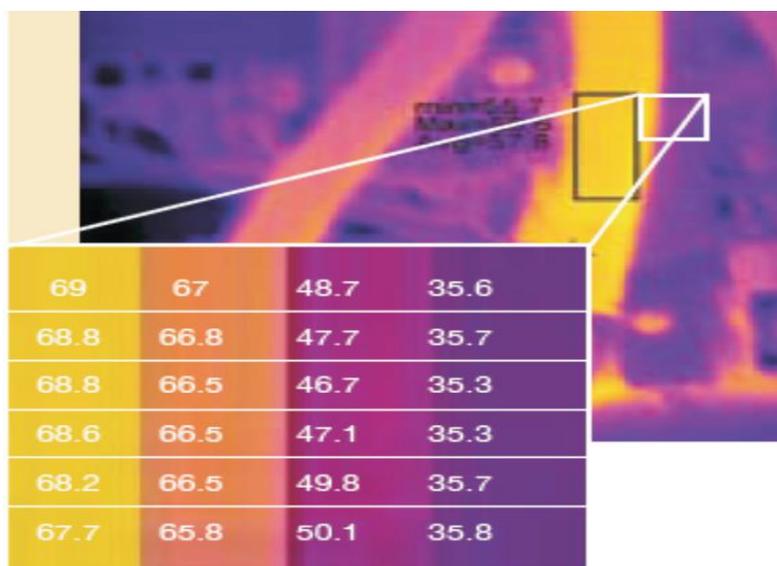


Figura 10 - Termovisores mostram as diferenças de temperatura de cada ponto da imagem.

A manutenção preventiva de qualquer equipamento elétrico pode ser considerada como um dos ramos da técnica que mais evolui na atualidade, pois constitui uma poderosa ferramenta para garantir o funcionamento contínuo das instalações responsáveis pelo suprimento e aproveitamento de energia elétrica. Termovisores mostram as diferenças de temperatura de cada ponto da imagem.

Uma das principais características dos equipamentos elétricos é a sua propensão a produzir calor, sendo isso considerado uma vantagem ou desvantagem, dependendo da aplicação. Se a finalidade do aparelho é aquecer um produto, como a água do banho, por exemplo, então essa característica se torna desejável – obviamente, ao contrário do que acontece em um motor elétrico, cujo objetivo é produzir movimento, e a geração de calor é indesejável. Termovisores mostram as diferenças de temperatura de cada ponto da imagem.

Esse fenômeno é conhecido como Lei de Joule (também definida como efeito Joule) é uma lei física, que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. O nome é devido a James Prescott Joule (1818-1889) que estudou o fenômeno em 1840, e é regido pela lei homônima, que diz:

$$Q = R \int i^2 dt$$

onde:

- $Q$  é o calor gerado por uma corrente constante percorrendo uma determinada resistência elétrica por determinado tempo.
- $I$  é a corrente elétrica que percorre o condutor com determinada resistência  $R$ .
- $R$  é a resistência elétrica do condutor.
- $t$  é a duração ou espaço de tempo em que a corrente elétrica percorreu ao condutor.

A corrente é função da potência do equipamento e, se ele estiver trabalhando em condições normais, é constante. Já a resistência elétrica pode mudar com o passar do tempo, pois as variações térmicas, normalmente sofridas pelas peças, produzem dilatações que acabam por gerar folgas entre os elementos, aumentando-a.

Em painéis elétricos, cuja principal função é distribuir a energia e comandar os equipamentos de uma planta, a geração de calor é indesejável, pois danifica a isolamento elétrica dos componentes e acelera a sua deterioração.

### 3.1 RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO

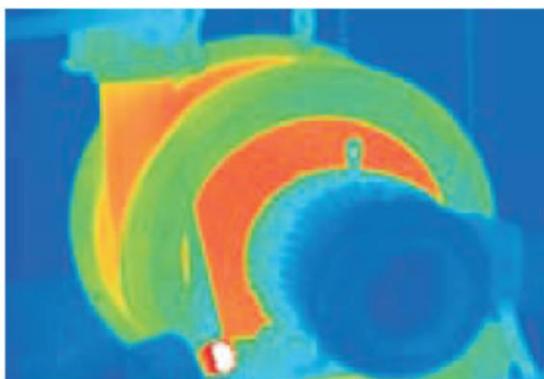
A manutenção, como função estratégica das organizações, é responsável direta pela disponibilidade dos ativos e tem importância capital nos resultados da empresa. Esses resultados serão tanto melhores quanto mais eficaz for a gestão da manutenção. A avaliação precisa dos custos envolvidos em qualquer tipo de interrupção de processo, principalmente, quando se trabalha com conceitos estatísticos, sem sombra de dúvida, resulta na necessidade de implantação de programas de manutenção preventiva.

Nesse caso, os objetivos principais são adequar a cada intervalo de tempo, as condições da instalação e seus equipamentos a um novo período ininterrupto de funcionamento. Isso permite reduzir os custos dos problemas intempestivos, que eventualmente ocorram durante os períodos de operação normal.

Observe-se que executar a manutenção preventiva de um equipamento não implica necessariamente a abertura, desmonte e remonte, nem ensaio do mesmo, mas na realização de uma série de procedimentos padrão. Esses, por sua vez, devem se basear nas características técnicas e operativas, normalmente, suportadas por estudos estatísticos.

Desse modo, inspeções de rotina, objetivando o levantamento de dados de corrente, tensão, temperatura e parâmetros capazes de indicar a existência ou evolução de problemas internos ao equipamento também se inserem dentro das práticas de manutenção preventiva.

O objetivo das inspeções visando à manutenção preventiva dos equipamentos elétricos é salvaguardá-los contra interrupções e danos pela detecção e eliminação de causas potenciais de defeitos. Nesse sentido, a manutenção periódica deve possibilitar muitos anos de operação livre de problemas.



**Totalmente infravermelho**



**Totalmente Visual ( luz visível )**

Figura 11 – Equipamento analisado com luz infravermelha e com luz visível.

## **3.2 ATIVIDADES BÁSICAS**

A rotina para a execução das inspeções relacionadas à manutenção preventiva de equipamentos elétricos envolve a observação visual de algumas de suas condições específicas, bem como, quando possível, os reparos necessários que podem ser realizados no campo. A frequência dessas inspeções depende, sobretudo, da importância crítica do equipamento em questão, das condições ambientais, e/ou das condições operacionais.

## CAPÍTULO 4

### PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As imagens são um suporte físico visual que contém uma determinada informação. O termo processar uma imagem consiste na aplicação de uma série de transformações com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela contida. Esta informação pode ser tanto de caráter físico, ou seja, associada a uma medida de um fenômeno físico quanto de caráter cognitivo, ou seja, uma medida associada ao conhecimento.

O termo imagem monocromática ou simplesmente imagem se refere a uma função bidimensional da luz  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são as coordenadas espaciais e o valor de  $f$  em cada ponto  $x$  e  $y$  é proporcional ao brilho (níveis de cinza ou tons de cores) da imagem naquele ponto. Uma imagem digital é considerada uma matriz cujos índices de linhas e de colunas representam um ponto (elemento) na imagem e o valor deste ponto (elemento) identifica a intensidade de cinza naquele ponto (elemento) ou os valores referentes aos três canais na imagem colorida. Os pontos (elementos) dessa matriz são chamados de *pixels*. A análise quantitativa e a interpretação de imagens representam atualmente uma ferramenta de extrema importância em diversas áreas científicas como na ciência dos materiais, na medicina biofísica, na física entre outras. Inicialmente o termo imagem era associado somente ao domínio da luz visível, porém atualmente o termo imagem se refere a uma grande quantidade de dados representados sob a forma bidimensional, como por exemplo, as imagens infravermelhas, imagens acústicas, magnéticas entre outras.

Outro aspecto atualmente relacionados a imagem é a classificação dos métodos de sua exploração em duas técnicas: análise e melhoria (*enhancement*) que serão abordados posteriormente.

#### 4.1 SISTEMAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Um sistema de processamento de imagens consiste nas seguintes operações que se podem efetuar sobre uma imagem aquisição, armazenamento, processamento, comunicação (transmissão) e exibição.

A operação de aquisição consiste na conversão de uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. Esta etapa necessita de dois elementos principais, sendo o primeiro um dispositivo físico sensível a uma faixa (banda) de energia eletromagnética (como raios X, ultravioleta visível ou raios infravermelhos) que produza um sinal elétrico de saída proporcional a um nível de energia percebida e o segundo dispositivo, denominado de digitalizador, é responsável pela conversão do sinal elétrico em informação digital. Para o presente trabalho o dispositivo físico utilizado foi uma câmera termográfica que através do sensor, a radiação infravermelha coletada é convertida em sinal elétrico e o digitalizador foi o software da própria câmera utilizada.

Uma vez realizada a aquisição de imagens, a próxima operação é o armazenamento, sendo este dividido em três categorias: armazenamento por curto tempo, armazenamento “on-line” para acesso rápido e armazenamento em arquivo. A operação de processamento de imagens digitais envolve procedimentos que são geralmente expressos em forma algorítmica e que podem ser implementada no software.

A comunicação (transmissão) das imagens não é simples devido a grande quantidade de dados contido em cada imagem que precisariam ser transferidos. Com isso, esta operação de transmissão das imagens é limitada e uma opção para amenizar esta dificuldade é a utilização de técnicas de compressão e posterior descompressão nas imagens.

Por fim, a última operação é a de exibição das imagens. Os principais dispositivos de exibição são os monitores de TV, monocromáticos e coloridos. Quando a exibição da imagem é em papel, existem diversas formas de reprodução, contudo a melhor opção é a reprodução fotográfica. A exibição das imagens deste trabalho foi num monitor LCD, de modo que todo o processamento realizado nas imagens foi baseado no contraste da imagem fornecida pelo monitor.

## **4.2 ANÁLISE DE IMAGENS**

Análise consiste na etapa de tratamento onde existe uma descrição da informação contida na imagem e é nesta etapa que várias medidas quantitativas (parâmetros) são utilizadas para descrever diferentes informações dentro de uma imagem. Algumas aplicações desta técnica são: determinação do número de células

contidas numa amostra de tecido biológico, determinação da distribuição de uma população específica de um conjunto de células entre outras.

### **4.3 MELHORIA (*Enhancement*)**

O *Enhancement* é um termo genérico que está associado a melhoria da qualidade da imagem com o objetivo de posteriormente ser julgado por um observador humano. Na maior parte dos trabalhos, utiliza-se os níveis de cinza da imagem transformando-os para aumentar o contraste ou para evidenciar uma região de interesse. Alguns exemplos desta técnica de melhoria da imagem é a subtração da imagem por uma imagem de referencia, utilização de filtros espaciais, a utilização de cores-falsas entre outros exemplos.

### **4.4 TRATAMENTO DA IMAGEM**

A cerca deste trabalho, foi utilizado o tratamento de imagens como uma ferramenta complementar para melhoria das imagens termográficas para uma posterior análise de detecção e dimensionamento mais confiáveis dos defeitos. Diante de tal fato, será descrito neste trabalho somente os principais recursos de tratamento de imagem sem um grande aprofundamento do principio e detalhes, para não fugir do escopo do trabalho.

A grande importância do tratamento de imagens via processamento computacional se deve a duas finalidades de sua aplicação, como o melhoramento da aparência visual e a preparação de imagens para medidas de características específicas. Na maioria das situações, o tratamento de imagens se faz necessário devido à presença de ruídos na imagem, ruídos estes que interferem nas informações contidas nas imagens. Diante de tal situação, o tratamento de imagens é utilizado com a finalidade de minimização do efeito dos ruídos nas imagens através da extração somente das informações de interesse na imagem.

Os modos de tratamento da imagem podem ser classificados em:

- Aplicação de filtros espaciais;

- Manipulação das frequências da imagem.
- Modificação da ordem ou distribuição de intensidade de brilho

## 4.5 MODIFICAÇÃO DE INTENSIDADE

Algumas formas de melhorar a intensidade de brilho de uma imagem são utilizadas com o objetivo de realçar as informações de interesse. A etapa inicial para a realização desta melhoria consiste na geração de um histograma da imagem analisada que relacione o número de pixels com os seus valores de nível de cinza. De posse desta distribuição, faz-se uma manipulação direta das variáveis brilho e contraste presentes nos programas de tratamento da imagem.

Para o presente trabalho, a imagem convertida de RGB para tons de cinza não sofreu nenhuma modificação nas suas variáveis brilho e contraste, mas sim de uma técnica de subtração de imagens para melhoria do contraste térmico, conforme será abordada no próximo item.

## 4.6 SUBTRAÇÃO DE IMAGENS (Contraste Térmico)

Conforme já citado anteriormente, sendo a imagem uma matriz, a diferença entre duas imagens  $f(x,y)$  e  $h(x,y)$  é expressa como:  $g(x,y) = f(x,y) - h(x,y)$

Assim, a imagem resultante dessa diferença,  $g(x,y)$ , é constituída de uma matriz na qual o valor de cada pixel ou seja o valor de  $x$  e  $y$  de cada ponto (elemento) da matriz possui o valor da diferença deste mesmo ponto entre  $f(x,y)$  e  $h(x,y)$ .

Esta subtração de imagens tem aplicações importantes para processamento de imagens de um modo geral, mas especialmente para o tratamento de segmentação de imagens, o qual será utilizado neste trabalho. Essa subtração é realizada com o objetivo de destacar somente os objetos de interesse da imagem, como a subtração de uma imagem original do seu fundo e também para diminuição dos ruídos presentes na imagem.

Com essa subtração das imagens procura-se obter o contraste térmico, através da variação no nível de cinza obtido no material devido a realização do ensaio de

Termografia Ativa. A imagem resultante deste procedimento foi utilizada para segmentação, procedimento este que será abordado a seguir.

## 4.7 SEGMENTAÇÃO

Geralmente a segmentação consiste na primeira etapa de processamento da imagem sob o ponto de vista da informação nela contida. Este procedimento foi criado durante os anos 80 e atualmente se apresenta como uma linha de pesquisa de extrema importância em processamento de imagens, uma vez que é a segmentação a etapa inicial para o processamento das informações contidas na imagem.

A segmentação subdivide uma imagem em suas partes ou objetos constituintes, sendo o nível desta subdivisão dependente da resolução do problema, ou seja, o limite da segmentação é quando os objetos de interesse na imagem tiverem sido isolados do restante da imagem. Com isso, a segmentação reduz as tonalidades presentes na imagem, simplificando o seu conteúdo e desta maneira aumenta a evidência de detalhes da imagem, o que torna mais fácil a análise de ocorrências particulares bem como a possibilidade de análise automática. Para imagens em tons de cinza como é o caso do presente trabalho, a segmentação transforma os níveis de cinza da imagem em apenas dois níveis, no qual os objetos de interesse aparecerão sob a forma de branco e os demais pontos da imagem aparecerão como preto (plano de fundo).

Ao trabalhar com imagens monocromáticas, os algoritmos de segmentação são baseados em uma das seguintes propriedades básicas de valores de cinza: descontinuidade e similaridade. Na primeira propriedade, a imagem é particionada de acordo com as mudanças bruscas nos níveis de cinza e seu campo de interesse se destina a detecção de pontos isolados e detecção de linhas e bordas na imagem. A segunda propriedade, similaridade, esta baseada em limiarização, crescimento de regiões, difusão e fusão de regiões. Para o presente trabalho, a segmentação foi realizada baseada na limiarização que será descrita no próximo item.

## 4.8 LIMIAZIZAÇÃO

O primeiro passo para a limiarização é o estudo do histograma de níveis de cinza da imagem. Sabendo que a imagem é uma matriz de informações que pode ser representada por uma função  $f(x,y)$ , como já citado anteriormente, e para o caso da imagem ser composta por objetos iluminados sobre um fundo escuro, os pixels do objeto e os pixels do fundo da imagem são agrupados em dois grupos dominantes, o histograma se apresentara da seguinte maneira, conforme figura 6. representando a quantidade de pixels para cada valor de intensidade de cinza.

Uma maneira de extrair os objetos do fundo da imagem é através da seleção de um limiar  $T$ , ou seja, uma intensidade de nível de cinza, de modo que a imagem seja separada em dois grupos. Então, cada ponto  $(x,y)$  da imagem tal que  $f(x,y) > T$  será considerado ponto do objeto, no presente trabalho será considerado defeito, caso contrário, o ponto será considerado ponto de fundo, sendo este ponto no presente trabalho considerado como área não defeituosa do corpo de prova. Contudo, se o histograma da imagem se apresentar com o formato do histograma da figura 7, haverá a predominância de três grupos no histograma, conferindo então as seguintes classes de objeto:  $f(x,y) < T_1$ , correspondendo ao fundo da imagem:  $T_1 < J(x,y) < T_2$ . classe de um objeto: e  $f(x,y) > T_2$ , classe do segundo objeto presente na imagem. Com isso, esse tipo de limiarização é denominado de limiarização multiníveis, sendo esta caracterizada pela menor confiabilidade do que a limiarização descrita anteriormente, no qual se baseia num limiar único, ao invés de dois limiares. Isso se deve a dificuldade da escolha de múltiplos limiares para o isolamento dos objetos de interesse da imagem, sendo esta dificuldade crescente com o aumento do número de grupos presentes no histograma.

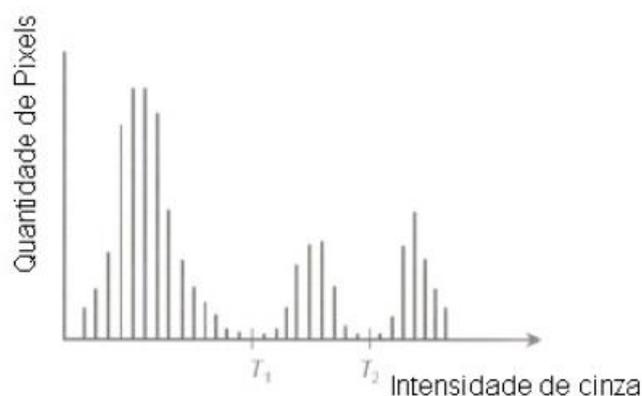


Figura 12 - Histograma dos níveis de cinza referente a limiares múltiplos.

Realizada a limiarização, a imagem limiarizada  $g(x,y)$  se apresentará como uma imagem binária definida como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x,y) > T \\ 0 & \text{se } f(x,y) \leq T \end{cases}$$

Figura 13

Assim, os pixels de valor igual a 1 corresponderão aos objetos da imagem enquanto que pixels com valores iguais a 0 corresponderão ao fundo da imagem.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme explicado anteriormente, a avaliação de uma técnica capaz de detectar defeitos que não são possíveis ser percebidos por uma inspeção visual. Para o presente trabalho, foi escolhida como técnica a ser estudada.

Conforme visto, a técnica de termografia ativada é capaz de detectar defeitos de perda de espessura. A técnica também apresenta detecção de defeitos abaixo de revestimentos, defeitos que podem ser ocasionados pela presença de uma fresta entre o filme de revestimento e o aço, permitindo assim a permanência de ar entre eles. A avaliação da influencia das dimensões e profundidades do defeito na variação da temperatura conferem uma variação maior na temperatura em comparação com região do corpo de prova sem defeito, mostrando que quanto maior a dimensão do defeito, maior será seu contraste térmico em comparação com a região sem defeito, ou seja, mais fácil será visualizado na imagem termográfica.

O procedimento de contraste térmico apresenta como resultado melhorias na qualidade das imagens pela atenuação dos ruídos presentes nas imagens e melhor delimitação dos contornos dos defeitos, facilitando a interpretação dos resultados e tornando-os mais confiáveis. Desse modo, o procedimento adotado se torna uma ferramenta útil a ser adotada nos ensaios termográficos.

Outra metodologia de pós-processamento utilizada foi a segmentação das imagens de contraste térmico. O procedimento para a determinação do limiar para a segmentação apresenta bons resultados e é possível o dimensionamento dos defeitos e a indicação da extensão do outro tipo de defeito presente. O erro obtido de dimensionamento de defeitos menores é menor enquanto que em defeitos maiores esse erro se mostra maior, pois a segmentação realizada tem seu limiar baseado nos defeitos maiores. Pelo fato dos valores serem de sobredimensionamento, isto confere ao procedimento um comportamento conservador e menos perigoso do que um subdimensionamento, uma vez que o sobredimensionamento não impõe o risco de um defeito de tamanho crítico ser aprovado, comprometendo a integridade da estrutura inspecionada. Contudo, para valores de sobredimensionamentos altos, poderá haver paradas e reparos nas estruturas, conferindo demanda de tempo e de custos desnecessários

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Maldague, X., Moore, P.** Nondestructive Testing Handbook – Infrared and Thermal. s.l: American Society for Nondestructive Testing Vol. 3.
- Montanini, R.** “Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography”. Infrared Physics & Echnology. 2010. Vol. 53.
- Shepard, S.M** Flash Thermography: The Final Frontier. Quality. April de 2007, Vol. 46
- Hung, Y.Y., Chen, Y. S., Ng S.P., Liu, L., Huang, Y.H., Luk, B.L., Ip, R.W.L., Wu, C.M.L., Chung, P.S.** Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. Materials science an engineering R.2009, Vol. 64.
- Genest, M., Martinez, M., Mrad, Renaud, G., Fhar, A.,** “Pulsed thermography for nondestructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs”. Composite Structures. 2009 Vol. 88.
- Freitas, G.A.C.** Avaliação de defeitos em juntas de dutos utilizando materiais compositórios, através da técnica termográfica. Tese de M.Sc. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: COPPE/UFRJ 2004.
- Santos, W., N., Mummery, P., Wallwork, A.** Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique. Polymer Testing. 2005, Vol. 24.
- Maldague, X.** Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Wiley-Interscience. 2001.
- Schroeder, J.A., Ahmed, T., Chaudhry, B., Shepard, S.** “Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composites joints: pulsed thermography”. Composites: Part A. 2002, Vol. 33
- Omar, M. A., Zhou, Y.** A Quantitative review of three flash Thermography processing routines. Infrared Physics & Technology. 2008, Vol. 51

**Rantala, J., Wu, D., Busse, G.** NDT of polymer materials using lock-in thermography with water-coupled ultrasonic excitation. NDT&E International.1998, Vol.31

**Piercing, S., Almond, D.**, “Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques”. NDT&E International. 2008, Vol. 41

**Chatterjee, K., Tuli, S., Pickering, S.G., Almond, D.P.** “A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques. NDT&E International. 2011.

**Lugin, S., Netzelmann, U.** An effective compression algorithm for pulsed thermography data. NDT&E International. 2005, Vol. 38

**Wu, D., Busse, G.** Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. 1998, Vol. 37.

**Albuquerque, M.P.** Processamento de Imagens: Métodos e Análises. Disponível em:<[HTTP://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF](http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF)>. Acesso em: 25 de julho de 2013.

**Marque, O.F., Vieira, H.N.** Processamento Digital de Imagens. Rio de Janeiro: Brasport 2005.

**Gonzalez, R. C., Woods, R. E.** Processamento de Imagens Digitais. São Paulo: Edgar Blucher, 2000.