

Taubaté, 12/09/15 a 28/11/15

## **TTEM 012/15**

### **TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA: AS DIFERENTES MODALIDADES DA TÉCNICA E O SEU USO NA AVIAÇÃO**

#### **INFRARED THERMOGRAPHY: THE DIFFERENT TECHNICAL PROCEDURES AND ITS USE FOR AVIATION**

Signatários:

- **Luiz Carlos Rezende Coelho<sup>1</sup>**
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP
- Prof. Dr. José Rui de Camargo – Universidade de Taubaté

Finalidade: Apresentar o ensaio de termografia infravermelha, explicando suas modalidades e uso na aviação.

Duração: 3 meses

1 – Aluno do curso de Especialização em Engenharia Aeronáutica da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) – coelho.rezende@gmail.com

Palavras chave: Termografia. Ensaios Não Destrutivos.

**Resumo.** Termografia infravermelha é uma técnica de ensaios não destrutivos, permitindo a rápida e segura inspeção de materiais aeroespaciais. As modalidades ativas utilizam uma fonte externa energia para produzir um contraste térmico revelando o defeito no material, já a modalidade passiva o aquecimento ou resfriamento ocorre naturalmente no componente sem necessidade de uma fonte externa. Vários tipos de energia podem ser empregados, dependendo da aplicação. Neste trabalho técnico as diferentes técnicas são descritas. O trabalho exemplifica também algumas aplicações da termografia infravermelha utilizada na aviação.

## 1. Introdução

A radiação infravermelha foi estudada no final do século 19. Em 1800 Willian Herschel havia notado que filtros de diferentes cores deixavam passar quantidade diferente de calor em suas observações da luz solar e desejava calcular essa quantidade de calor (figura 1). Em seu experimento ele direcionou luz solar, através de um pequeno orifício em um pedaço de papelão, deixou passar uma cor incidente da refração de um prisma de vidro e então mediu a temperatura de cada uma das cores. Herschel usou três termômetros com bulbos pretos (para melhor absorver o calor) e, para cada cor do espectro, posicionou um bulbo em uma cor visível enquanto os outros dois foram posicionados fora do espectro para controle. Conforme ele media a temperatura individual das cores do violeta ao vermelho, ele percebeu que todas as cores tinham temperaturas mais altas que a dos termômetros de controle, e que a temperatura aumentava na direção do sentido vermelho do espectro. Ele então decidiu medir a temperatura da região logo após a cor vermelha, onde aparentemente não havia luz solar, e descobriu que a temperatura nessa região do espectro era mais elevada que nos lugares onde havia luz incidente. Ele concluiu que naquela região devia haver alguma radiação que não era visível, e a nomeou de "raios caloríficos". Após mais experimentos ele descobriu que essa radiação sofria os efeitos de reflexão, refração, absorção e transmissão de forma semelhante à das radiações do espectro visível. Essa radiação foi depois renomeada de radiação infravermelha. Esse experimento foi importante para demonstrar que existem tipos de radiação que não são visíveis aos olhos humanos [6]



William Herschel  
Astrônomo e compositor  
Alemão  
Ano de 1.800  
filtros de diferentes cores  
deixavam passar quantidade  
diferentes de calor

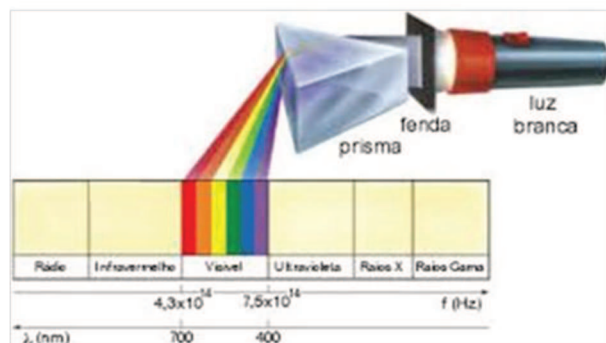


Figura 1 – Experiência de William Herschel.

A partir de então a instrumentação foi sendo desenvolvida para medir as mudanças na energia radiante nos materiais. John Herschel, filho de Willian Herschel, criou a primeira imagem térmica em 1840, mas o desenvolvimento das imagens térmicas só ocorreu nas principais áreas da indústria, após a década de 1950 e início dos anos 1960. Este exclusivo método de teste não destrutivo tem tido um crescimento fenomenal e expansão à medida que mais e mais aplicações têm sido desenvolvidas [1].

A termografia é um método de inspeção muito utilizado para inspecionar estruturas de materiais compósitos e honeycomb. O princípio básico de inspeção térmica consiste na medição ou mapeamento das temperaturas da superfície quando o calor flui através de um objeto a ser analisado. Todas as técnicas de termografia contam com diferenciais de condutividade térmica entre as áreas normais, sem defeitos e aquelas que têm um defeito. Normalmente, uma fonte de calor pode ser usada para elevar a temperatura da parte a ser examinada, enquanto observam-se os efeitos durante o aquecimento da superfície [2].

A termografia infravermelha tem sido utilizada para os ensaios não destrutivos (END) em componentes da indústria aeroespacial por vários anos [1]. A principal vantagem da termografia é a possibilidade de inspecionar grandes áreas de uma forma rápida e segura sem a necessidade de ter acesso a ambos os lados do componente. No entanto, a termografia infravermelha está limitada à detecção de defeitos relativamente pouco profunda (alguns milímetros sob a superfície), uma vez que é afectada por difusão de calor em 3D. Os mais comuns tipos de anomalias encontradas em aplicações aeroespaciais, tais como delaminações, descolamentos, água retida dentro de compósitos ou honeycombs, trincas, impactos, entre outras irregularidades, podem ser efetivamente detectados e por vezes, quantificados utilizando técnicas de termografia ativa.

Várias configurações podem ser adotadas de acordo com a aplicação particular em vista e o equipamento disponível. Uma abordagem passiva ou ativa pode ser utilizada, dependendo se a parte inspecionada está em equilíbrio térmico ou não. Por exemplo, a abordagem passiva, isto é, sem o uso de uma fonte externa de energia, pode ser empregue na detecção de água retida em estruturas logo após o pouso da aeronave, quando a diferença térmica entre o material e água é significativa, permitindo a detecção de irregularidades. Do contrário, um contraste térmico precisa ser criado através de uma fonte externa sempre que o componente está em equilíbrio térmico. O tipo mais comum de inspeção das peças aeroespaciais são normalmente empregados depois da fabricação destas ou depois de várias horas após o desembarque (figura 2). Nos parágrafos seguintes, as diferentes configurações técnicas ativa e passiva são descritas [1].

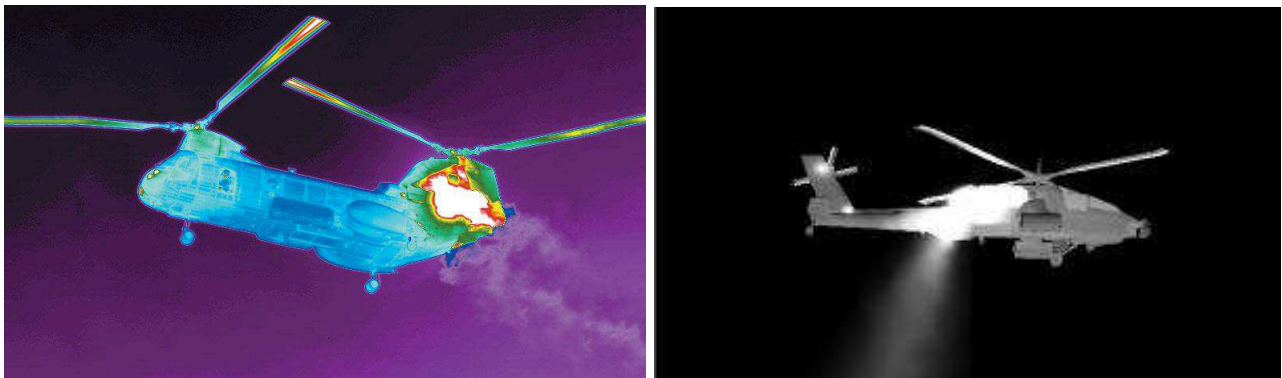


Figura 2 (A e B) – Região motora (quente) dos helicópteros.

## 2. Radiação Infravermelha

A energia térmica pode ser alterada de uma forma para outra. Por exemplo, um motor de carro converte energia química da gasolina em energia térmica. Isso, por sua vez, produz energia mecânica, bem como energia elétrica para luzes ou ignição e energia térmica para o desembaçador ou ar condicionado [1]. Esta é a Primeira Lei da Termodinâmica (princípio da conservação da energia). Um sistema não pode criar ou consumir energia, mas apenas armazená-la ou transferi-la ao meio onde se encontra, como trabalho, ou ambas as situações simultaneamente.

Quando existe uma diferença de temperatura entre dois objectos, ou quando um objeto alterar a temperatura, a energia calorífica é transferida a partir das zonas mais quentes para as áreas mais frias até que o equilíbrio térmico ser atingido. Esta é a Segunda Lei da Termodinâmica. Uma transferência de energia de calor resulta na transferência de elétrons ou aumento da vibração atômica ou molecular [1].

A energia térmica pode ser transferida por qualquer dos três modos: condução, convecção ou radiação. A transferência de calor por condução ocorre principalmente em sólidos e até certo ponto em fluidos, pelas moléculas mais quentes que transferem a sua energia diretamente para as mais as mais frias. A convecção ocorre em fluidos e envolve o movimento de massa das moléculas. A radiação é a transferência de energia entre os objetos por radiação eletromagnética, que não precisa do meio de transferência, podendo ocorrer até no vácuo [1].

A 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 [1].

Assim, todos os corpos emitem naturalmente 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 quando o material é aquecido, há um aumento na energia das partículas atômicas, levando um aumento na temperatura e da energia emitida por cada partícula. Contudo, a agitação térmica destas 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. Esse comprimento de onda da radiação eletromagnética compreende a região do espectro entre a luz visível e as micro-ondas. A figura 3 apresenta as regiões do espectro de radiação eletromagnética [4].

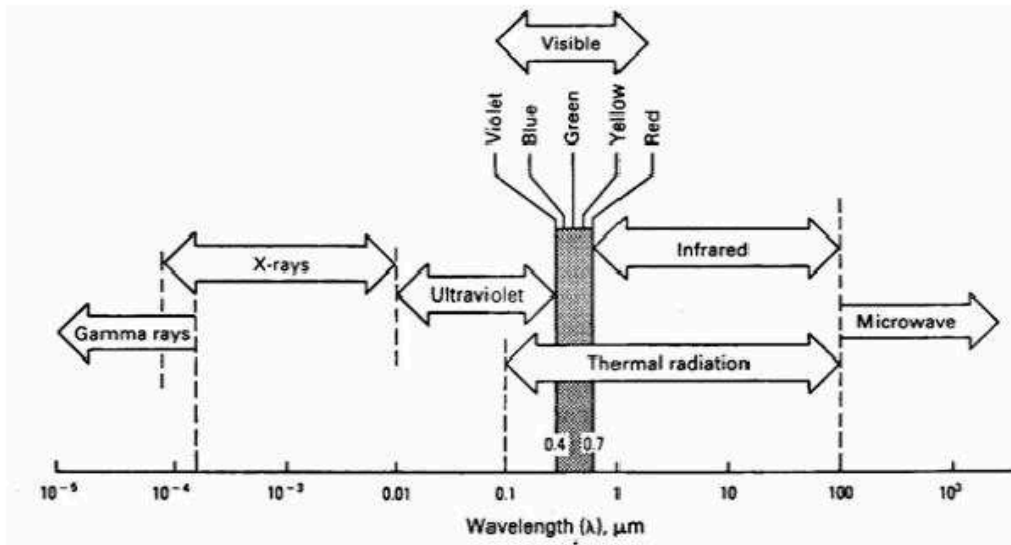


Figura 3 – Espectro eletromagnético de Radiação [4]

Tanto a intensidade da radiação emitida pelo corpo quanto seu espectro depende da temperatura do corpo e de sua emissividade (propriedade a ser discutida no item seguinte. A Lei de Stefan-Boltzmann é apresentada na equação abaixo [1]:

$$W = e BT^4$$

Onde:

W = intensidade da taxa de emissão de energia radiante por unidade de área ( $Wm^{-2}$ )

e = emissividade

B = constante de Stefan-Boltzmann =  $5,7 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

T = temperatura absoluta (K)

O comprimento de onda de intensidade de radiação máximo em certa temperatura T é expresso através da Lei de Wien, conforme equação abaixo [1]:

$$\lambda_{max} = b/T$$

onde:

$\lambda_{max}$  = comprimento de onda de intensidade de radiação máximo ( $\mu m$ );

b = constante de Wien =  $2,897 \mu m/K$

T = temperatura absoluta (K)

Analisando tanto a lei de Stefan-Boltzmann quanto à lei de Wien, pode se observar a dependência da intensidade da radiação com a temperatura, na qual para baixas temperaturas, a radiação emitida pelo material é caracterizada por ser de baixa intensidade e constituída de comprimentos de onda longos enquanto que a altas temperaturas, a intensidade de radiação é alta e de baixo comprimento de onda. Isso se explica pelo fato de que quando uma superfície é aquecida, ocorre um aumento na energia dos átomos e conseqüentemente induz a um 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 [4].

Outra variável importante que é apresentada na lei de Stefan-Boltzmann é a emissividade, que será explicado no próximo item [4].

Envelhecimento aeronave tornou-se um tema de estudo cada vez mais sério, com o aumento da frota de aviões no mundo inteiro. A idade útil de uma aeronave depende de muitos fatores e pode ser definida pela totalidade ou por uma combinação desses como idade cronológica, o número de ciclos de voo e o número de horas de funcionamento. Os dois últimos fatores são os que podem afetar mais diretamente a aeronavegabilidade de uma aeronave (HERRERA & VASIGH, 2009) [4].

A idade cronológica por si só pode não refletir na condição estrutural do avião. O número de voos, o tempo de voo acumulado, exposição ambiental e padrões de uso desempenham o papel igualmente. Juntos, porém, esses fatores tendem a se correlacionar bem com a idade cronológica e problemas estruturais como fissura por fadiga, corrosão e descolamento são mais prováveis de serem encontrados em aeronaves com alto tempo de uso. Um aumento na demanda por aeronaves comerciais forçou as companhias aéreas a operar as aeronaves existentes além da sua vida útil econômica de origem (FAA, 1992) [4].

### 3. Emissividade

Uma propriedade de extrema importância para avaliar a sua aplicabilidade em termografia é a emissividade. A emissividade é a propriedade que representa a razão entre a quantidade de energia total irradiada e/ou absorvida pelo corpo de prova e a temperatura 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 certa temperatura e tem seu valor de emissividade igual a 1 (um). Os demais são denominados de corpo cinza e apresentam valores de emissividade entre 0 (zero) e 1 (um). A tabela 1 mostra valores de emissividade para alguns materiais [4].

Tabela 1 - Valores de emissividade para alguns materiais [4].

<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

A termografia apresenta um grande sucesso na inspeção de materiais com alta emissividade (0,7 e 0,9). Este sucesso se deve a alta intensidade de radiação emitida por um material que possui alta emissividade conforme visto pela lei de Stefan-Boltzmann e também pelo fato de materiais de baixa emissividade apresentar uma alta taxa de reflexão, refletindo assim radiação oriunda de outras fontes, o que confere ruídos na imagem termográfica e reduz a intensidade de dados de interesse (do corpo inspecionado). Este efeito é apresentado na figura 4 [1].

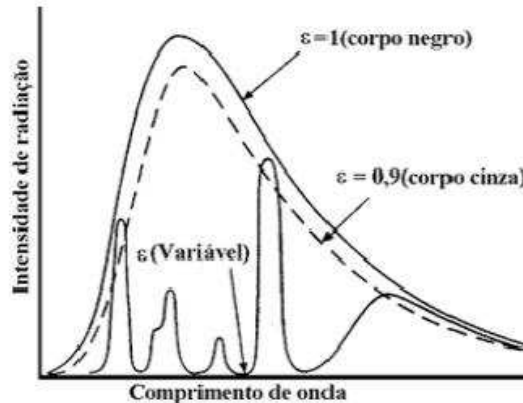


Figura 4 – Efeito da emissividade na intensidade de radiação emitida [4]

Contudo a emissividade é fortemente dependente da condição da superfície do material, conforme é observado na tabela acima. 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 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 [4].

Um problema comum de ocorrer é quando um material apresenta variações de emissividade na sua superfície, uma vez que quando a emissividade se reduz numa região levando a uma falsa indicação de redução de temperatura nesta região do material e vice versa. A solução para este 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 utilizada em superfícies metálicas e em menor escala para superfícies não metálicas. Após análise o revestimento pode ser retirado da superfície do material [4].

## 4. Termografia Infravermelha

### 4.1 – Termografia Passiva

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 [4].

## 4.2 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 a sua alta velocidade de inspeção e possibilidade de avaliação à 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 está posicionado no mesmo lado da câmera é denominado modo de reflexão e quando o excitador térmico é posicionado na face oposta à câmera termográfica é denominado de modo de transmissão. A figura 5 apresenta um esquema dos dois modos de posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova [4].

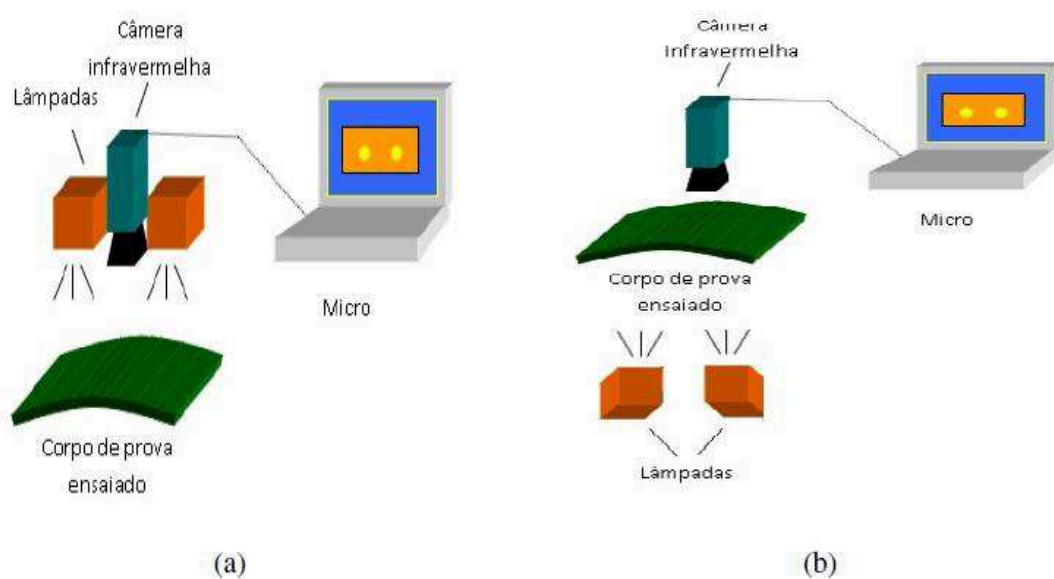


Figura 5 – Esquema representativo do posicionamento do excitador térmico em relação ao corpo de prova (a) modo de reflexão e (b) modo de transmissão [4]

### 4.3.2.1 Modalidades da técnica de termografia

Podemos apresentar cinco modalidades de termografia ativa. São elas a termografia ativa pulsada, step heating, termo ativa modulada, termografia ativa de fase pulsada e a vibrotermografia. Estas serão descritas nos próximos tópicos.

#### 4.3.2.1.1 Termografia Ativa Pulsada (Pulsed Termography)

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 [4].

Para o aquecimento da superfície do material e posteriormente é monitorado o decaimento de temperatura em sua superfície, devido à propagação da onda térmica, que através da difusão, penetra abaixo da superfície do material. Diante disso, 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 [4].

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 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 superfícies oposta nem sempre é acessível e também não é possível o conhecimento da profundidade do defeito, uma vez que a distância percorrida pelo pulso independe da profundidade do defeito [4].

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 torna uma limitação da técnica [4].

A termografia ativa pulsada é uma técnica consolidada de ensaio não destrutivo muito utilizada na área aeroespacial, devido à sua capacidade de detecção de defeitos em juntas adesivas e em materiais compósitos, além dos defeitos em revestimentos de superfície [4].

#### **4.3.2.1.2 Step Heating**

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 do 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 [4].

#### **4.3.2.1.3 Termo Ativa Modulada (Lock in Thermography)**

A termografia Lock-in está 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 mono frequências e assim só será analisado sinais de resposta com a mesma frequência desejada, aplica-se a Transformada de Fourier para avaliar o comportamento da amplitude e fase deste sinal de resposta. A escolha de 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 se confere uma limitação à modalidade [4].

A figura 6 apresenta um esquema representativo do processamento de termografia Lock-In.

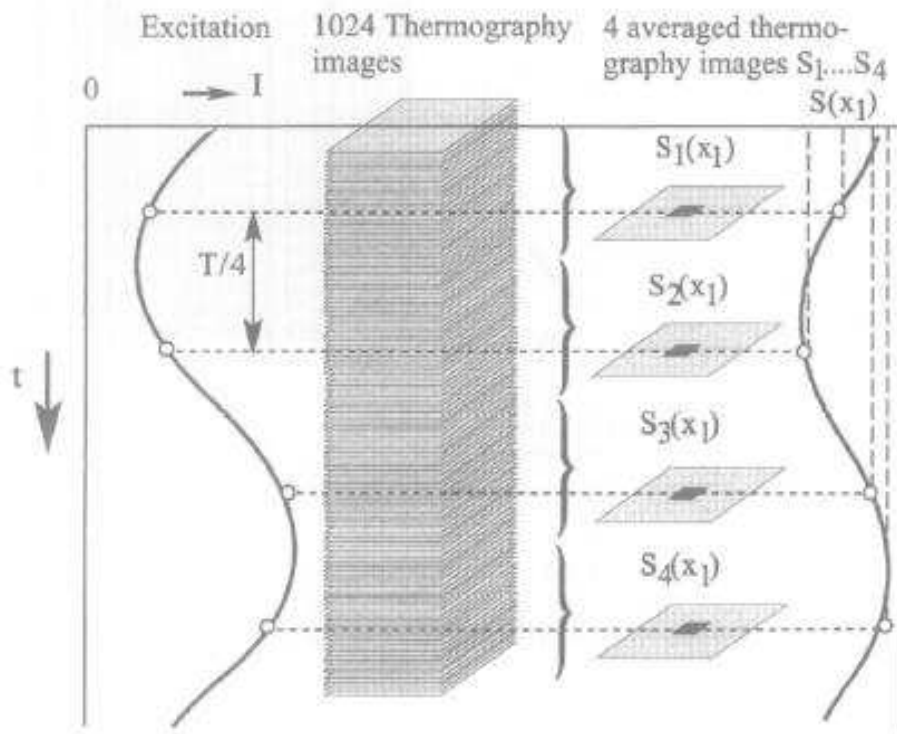


Figura 6 – Esquema representativo da modalidade de termografia Lock In [4]

Esta modalidade é indicada para detecção de áreas descolamento de revestimentos, delaminações, danos causados por impactos, inclusão de impurezas em materiais compósitos, defeitos de perda de espessura nos aços entre outros [4].

#### 4.3.2.1.4 Termografia Ativa de Fase Pulsada

Esta modalidade combina as vantagens 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 de espectro de frequência de uma excitação térmica temporal. A evolução da temperatura segundo o tempo de cada pixel de um termograma é levada para o domínio de 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. A figura 7 apresenta um esquema representativo do procedimento utilizado nesta modalidade [4].

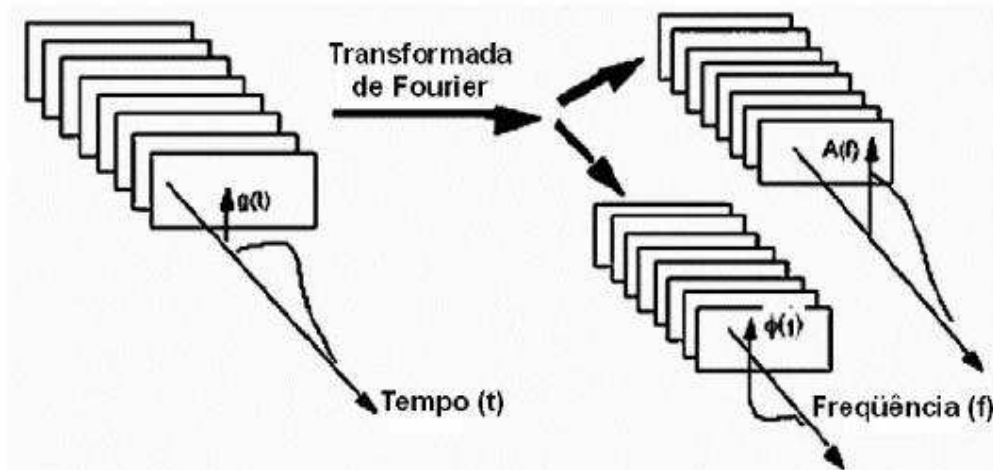


Figura 7 – Esquema representativo da modalidade de termografia ativa de fase pulsada [4]

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 predição de profundidade de defeitos, pois apesar da relação entre 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 [4].

#### 4.3.2.1.5 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 à fricção e como cada descontinuidade possuiu uma ressonância mecânica específica, diferentemente do resto do material, o aumento ou decréscimo da frequência da excitação mecânica causará um gradiente térmico local, possibilitando assim a detecção de descontinuidades presentes no material [4].

A tabela 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens de cada uma das modalidades acima citadas [4].

Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens [4]

Modalidade	Vantagem	Desvantagem
Termografia Passiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem contato Físico e Interação com o material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicável somente em materiais que possuam fontes uma fonte de excitação interna</li> </ul>
Termografia Ativa Pulsada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem contato Físico com o material</li> <li>Rápido Pulso para excitação térmica do material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessário fonte externa para excitação do material</li> <li>Limitação da área superficial para inspeção (Até 0,25m<sup>2</sup>)</li> </ul>
Termografia Ativa Step-Heating	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem contato físico com o material</li> <li>Materiais baixa condutividade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessário fonte externa para excitação do material</li> <li>Risco de superaquecimento do material</li> </ul>
Termografia Ativa Lock-in	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem contato físico com o material</li> <li>Capacidade de inspeção de grandes áreas superficiais</li> <li>Análise através de fase e de amplitude</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessário fonte externa para excitação do material</li> <li>Necessita de um ou mais ciclos de modulação para observação</li> <li>Limitação quanto à espessura da camada abaixo da superfície</li> <li>Conhecimento Prévio do defeito para Determinar as Frequências de modulação a ser utilizada</li> </ul>
Termografia Ativa de Fase Pulsada	<ul style="list-style-type: none"> <li>As Vantagens das técnicas Lock-in e ativa Pulsada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Predição da profundidade do defeito através de cálculos matemáticos complexos e necessidade de conhecimento de muitas propriedades do material</li> </ul>
Vibrotermografia Ativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deteção de defeitos fechados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dificuldade para geração das vibrações mecânicas</li> <li>Alguns contrastes térmicos só aparecem em frequências específicas</li> <li>Contato físico com o material para geração das vibrações mecânicas</li> </ul>

## 5. Deteção de descontinuidades

Essas técnicas de termografia ou vibrotermografia podem detectar vários tipos de descontinuidades, tais como: trincas, corrosão, poros, delaminações, etc (figuras 8 e 9).

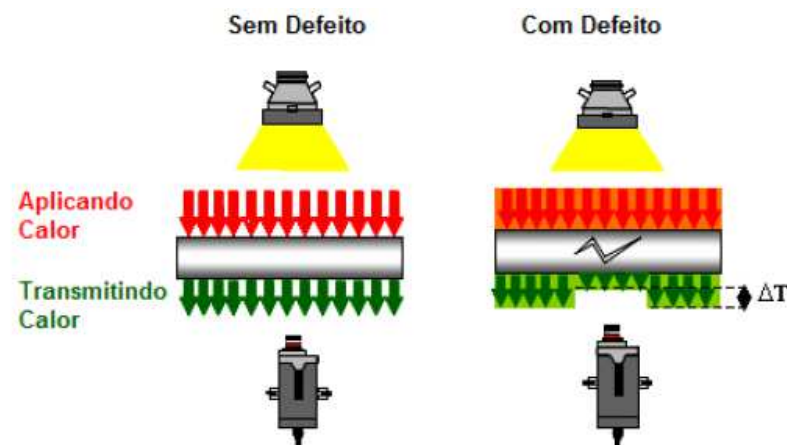


Figura 8 – Fluxo interno de calor, monitoramento da diminuição de temperatura no material.

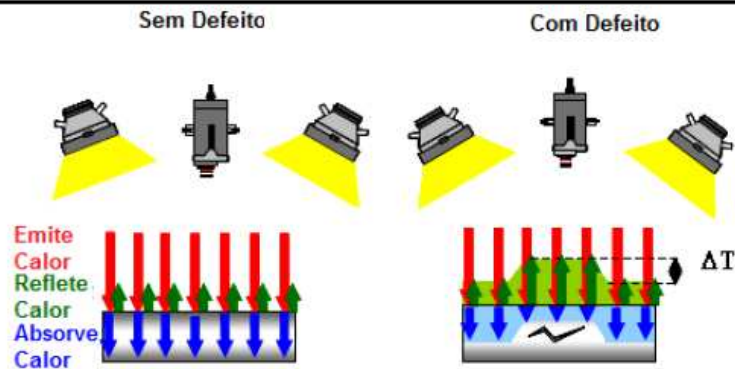


Figura 9 – Modo de excitação: Flashes, Lâmpadas de aquecimento, Pulsos Ultrassônicos, correntes parasitas, radiação infravermelha, micro-ondas, laser...

## 6. O Uso da Termografia na Aviação

Os mais comuns tipos de anomalias encontradas em aplicações aeroespaciais, tais como delaminações, descolamentos, água retida dentro de compósitos ou honeycombs, trincas, impactos, entre outras irregularidades, podem ser efetivamente detectados e por vezes, quantificados utilizando técnicas de termografia.

A instrução suplementar da ANAC IS nº 43.13-003 Revisão C, a qual trata de ensaios não destrutivos na manutenção de produto aeronáutico, referência a termografia infravermelha como um dos métodos de END.

A termografia infravermelha tem sido utilizada como ensaios não destrutivos (END) em componentes da indústria aeroespacial por vários anos. Como discutido no trabalho técnico, este é um método de inspeção muito utilizada para inspecionar estruturas de materiais compósitos e honeycomb e assim, utilizada na aviação, pois os materiais compósitos têm sido cada vez mais aplicados na aviação, como é o caso do Boeing 787, cujo percentual em massa de material compósito nas suas estruturas primárias e secundárias chega a 50%.

Este ensaio também se mostra muito eficaz para detecção de possíveis danos causados por impactos em laminados compósitos que eventualmente possam ocorrer durante o voo de aeronaves com pássaros ou quaisquer outros objetos, possuindo um método simples, rápido e eficaz, podendo ser efetuado logo após ou pouso, horas depois do pouso, ou até mesmo durante as inspeções, manutenções periódicas, corretivas e preditivas.

O método mostra-se também aplicável para a detecção de corrosão, que é uma das grandes preocupações na aviação.

Outro grande auxílio deste END é a detecção de água em compôs ou honeycombs que também podem ser efetuados logo em seguida do voo ou durante procedimentos de manutenção.

O procedimento torna-se útil também para aplicação no processo de fabricação de peças e componentes voltados à aviação para a detecção de irregularidades, pela sua simplicidade, velocidade, confiabilidade e custo.

## 7. Conclusão

Com base no trabalho técnico, pode-se afirmar que o tempo de inspeção é relativamente curto e simples, quando comparado aos outros métodos de ensaios não destrutivos, se apresentando uma técnica muito inovadora para, pelo menos mapeamentos rápidos de defeitos em inspeções preliminares.

As características deste ensaio mostram ainda que esta é uma técnica excelente para monitoramento de condições, podendo contribuir com a redução de custos na manutenção e na detecção de defeitos na indústria aeronáutica, não demandando muitos e grandes equipamentos, com baixo investimento relativo.

## 8. Referências

1. HELLIER, CHARLES J.; Handbook Of Non Destructive Evaluation, Mc Graw-hill Companies, Inc, 2003
2. REITHMAIER, LARRY; STERKENBURG RONALD; Standard Aircraft Handbook for Machanics and Technicians, Seventh Edition, Mc Graw-hill Education, Inc, 2014
3. MIRANDA, MORCOS; Comparação de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas; USP, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011
4. GROSSO, MARCELA; Análise de defeitos de corrosão em aços revestidos por materiais compósitos; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, 2011
5. OLIVEIRA, TIAGO MIGUEL DIAS; Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia; FEUP, 2012
6. [http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic\\_classroom/classroom\\_activities/herschel\\_bio.html](http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_bio.html)
7. INSTRUÇÃO SUPLEMENTAR - IS n° 43.13-003 Revisão C – ANAC, 2013

## 9. Comunicado de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

**Abstract.** Infrared thermography is a non-destructive testing technique, allows a quick and safe Aerospace Material Inspection. Active modes use an external source of energy to get a thermal contrast revealing the defect in the piece. The passive mode, in the other hand, it occurs naturally on the component without the need of an external source. Several kind energy can used, depending on the application. In this work, different techniques described. The work also exemplifies some applications of infrared thermography used in aviation.