

**Curso: Inspeção de Equipamentos e Instalações
Petrobrás / UN-Rio**

**NOÇÕES SOBRE
TERMOGRAFIA**
INTEGRIDADE DE EQUIPAMENTOS

ARGEMIRO PERTENCE NETO
Eng. Mecânico

Ano: 2004

ÍNDICE

Teoria da Radiação.....	2
Composição dos espectro	2
Leis da Radiação.....	3
Emissividade.....	3
Valores de emissividade.....	5
Transmissão atmosférica.....	6
Equipamentos para termografia.....	7
Aplicações da termografia.....	8



Termografia

1. Teoria da radiação

Em meados do século XIX, o físico britânico James Maxwell propôs ser a luz um tipo de radiação de natureza eletromagnética. Os estudos por ele apresentados indicavam a existência de outros tipos de radiação, além da luz visível, de natureza semelhante.

Segundo Maxwell, o espectro da luz visível observado anteriormente por Isaac Newton seria apenas uma pequena parcela visível de um contínuo espectro de radiações invisíveis de maior amplitude.

Maxwell observou, as ondas eletromagnéticas ou radiação eletromagnética são o resultado da oscilação de um campo elétrico numa direção perpendicular a um campo magnético.

Este fenômeno radiante (ou radiação) se propaga no espaço físico em forma de ondas.

A distância entre duas cristas consecutivas das ondas define seu comprimento de onda (λ). Se este comprimento estiver entre 0,0004 mm e 0,00075 mm, a radiação correspondente é aquela captada pela visão humana e é classificada como “luz visível”.

O número de oscilações por unidade de tempo é a frequência da radiação (f) e é medida em Hz (hertz ou ciclos por segundo).

A radiação eletromagnética se propaga com a velocidade da luz ou cerca de 300.000 km/s no vácuo. A importância deste valor reside no fato de ele estabelecer a relação de proporcionalidade entre o comprimento de onda e a frequência de um tipo de radiação ou:

$$c = f \cdot \lambda$$

onde:

c = velocidade da luz (m/s)

f = frequência da radiação (em Hz)

λ = comprimento de onda (em m)

Radiação	Faixa de frequência (HZ)	Faixa de comprimento de onda (m)	Cor
Raios gama	3×10^{19} a 3×10^{23}	$1,0 \times 10^{-15}$ a $1,0 \times 10^{-11}$	Invisível
Raios X	3×10^{16} a 3×10^{18}	$1,0 \times 10^{-11}$ a 1×10^{-8}	Invisível
Ultravioleta	$7,5 \times 10^{14}$ a 3×10^{15}	1×10^{-8} a $4,0 \times 10^{-7}$	Invisível
Visível	$7,0 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$	$4,0 \times 10^{-7}$ a $5,0 \times 10^{-7}$	Violeta
	$6,5 \times 10^{14}$ a $7,0 \times 10^{14}$	$5,0 \times 10^{-7}$ a $5,5 \times 10^{-7}$	Azul
	$6,0 \times 10^{14}$ a $6,5 \times 10^{14}$	$5,5 \times 10^{-7}$ a $5,8 \times 10^{-7}$	Anil
	$5,5 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{14}$	$5,8 \times 10^{-7}$ a $6,2 \times 10^{-7}$	verde
	$5,0 \times 10^{14}$ a $5,5 \times 10^{14}$	$6,2 \times 10^{-7}$ a $6,5 \times 10^{-7}$	Amarelo
	$4,5 \times 10^{14}$ a $5,0 \times 10^{14}$	$6,5 \times 10^{-7}$ a $6,7 \times 10^{-7}$	Laranja
	$4,0 \times 10^{14}$ a $4,5 \times 10^{14}$	$6,7 \times 10^{-7}$ a $7,0 \times 10^{-7}$	Vermelho
Infravermelho	$3,0 \times 10^{11}$ a $4,0 \times 10^{14}$	$7,0 \times 10^{-7}$ a $1,0 \times 10^{-4}$	Invisível
Microondas	$3,0 \times 10^8$ a $3,0 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{-4}$ a $1,0 \times 10^0$	Invisível
Ondas de rádio e TV	$3,0 \times 10^3$ a $3,0 \times 10^8$	$1,0 \times 10^0$ a $1,0 \times 10^5$	Invisível

Tabela 1 – Composição do espectro de radiações eletromagnéticas

A radiação infravermelha foi inicialmente percebida no início do século XIX por Sir William Herschel, astrônomo da corte do rei George III, da Inglaterra. Herschel tentava repetir a experiência de Isaac Newton com o objetivo de descobrir materiais que servissem como filtros para a observação do sol. Ao medir com um termômetro o aquecimento produzido pela incidência de cada uma das cores do espectro, Herschel percebeu surpreso que o maior nível de aquecimento se dava, não em uma das sete faixas do espectro visível, mas numa faixa escura, situada além do extremo do vermelho ou “abaixo do vermelho” se considerarmos sua posição no espectro de radiações eletromagnéticas. Desta observação resultou a denominação adotada hoje – o infravermelho.

O limite inferior do infravermelho coincide com o da nossa percepção visual da cor vermelha – próximo a $\lambda = 0,75 \mu\text{m}$ – enquanto que o superior coincide com o limiar das radiações de microondas – na faixa de $\lambda = 1 \text{ mm}$.

2. Leis da radiação

Em 1860, Gustav Kirchhoff demonstrou a lei que estabelecia a igualdade entre a capacidade de um corpo absorver e emitir energia radiante. Kirchhoff também propôs teoricamente o termo “corpo negro” para designar um objeto que absorvesse toda radiação incidente sobre ele; em consequência, o corpo negro seria o emissor ideal.

Poucos anos mais tarde, Josef Stefan concluiu, a partir de experiências em laboratório, que a energia total irradiada (ou emitida) por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Ludwig Boltzmann confirmou a tese de Stefan através da termodinâmica clássica, o que resultou na Lei de Stefan-Boltzmann que determina:

$$W = \sigma T^4$$

onde:

W – energia irradiada (ou emitida) (W/m^2)

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T – temperatura absoluta (K)

3. Emissividade

Os corpos reais não se comportam como corpos negros, reagindo à radiação incidente sobre eles de forma seletiva e particular. A radiação incidente sobre um corpo qualquer pode assumir três comportamentos, a saber:

- ✓ uma parcela (α) pode ser absorvida ou emitida, segundo a Lei de Kirchhoff;
- ✓ uma parcela (δ) pode ser refletida;
- ✓ uma parcela (τ) pode ser transmitida

Assim, a soma das três parcelas equivale à totalidade da energia incidente sobre ele:

$$\alpha + \delta + \tau = 1$$

Para corpos opacos à radiação (onde $\tau = 0$) temos:

$$\alpha + \delta = 1$$

A Lei de Kirchhoff estabelece a igualdade entre a capacidade de um corpo qualquer em absorver energia radiante e sua capacidade de reemitir-la. A esta última chamamos **EMISSIVIDADE**.

Definimos **EMISSIVIDADE** de um corpo a relação entre a energia emitida (ou irradiada) por um corpo qualquer e a energia emitida por um corpo negro para um mesmo comprimento de onda que pode ser expressa assim:

$$\varepsilon = W'/W$$

onde:

ε - emissividade

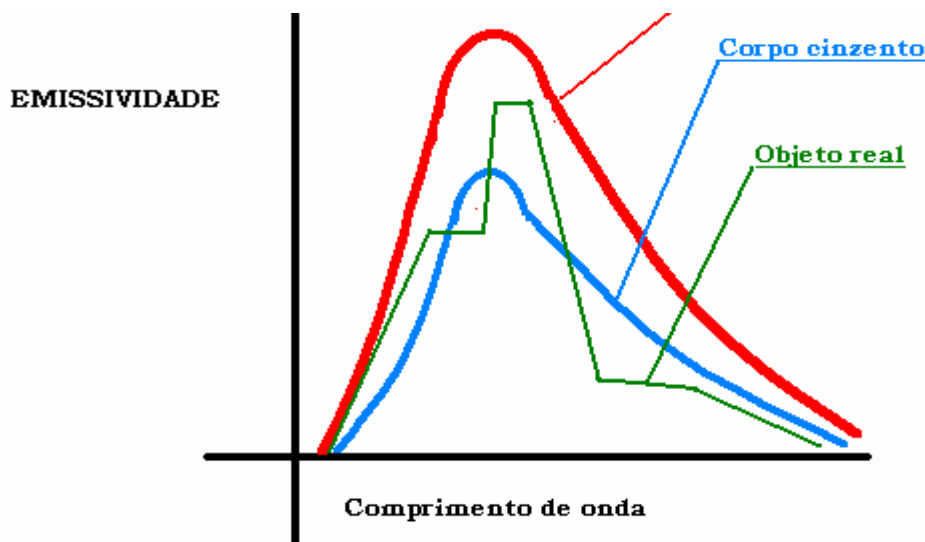
W' - quantidade de energia emitida por um corpo qualquer (λ constante)

W - quantidade de energia emitida por um corpo negro (λ constante)

A **EMISSIVIDADE** varia em função da composição química e da textura superficial do material, bem como de sua temperatura e do comprimento de onda da radiação emitida.

Figura 1 – Variação da emissividade em função do comprimento de onda

A tabela abaixo indica alguns valores típicos de emissividade para materiais encontrados em aplicações industriais



- **Corpo negro: emissividade constante e igual a 1**
- **Corpo cinzento: emissividade constante e menor do que 1**
- **Corpo real: a emissividade varia com o comprimento de onda**

:

Material	Temp (°C)	Emissividade
Alumínio (chapa comercial)	100	0,09
Alumínio (oxidado)	90 - 500	0,20 – 0,31
Latão (chapa laminada)	25	0,06
Latão (chapa oxidada a 600 ° C)	200 - 600	0,61 – 0,69
Cobre (comercial)	25	0,07
Cobre (oxidado)	25	0,78
Cobre (aquecido a 600 ° C)	200 - 600	0,57
Aço (inoxidável polido)	100	0,07
Ferro fundido (polido)	200	0,21
Aço inoxidável AISI 310 (altamente oxidado)	220 - 520	0,90 – 0,97
Aço carbono (tubo ou chapa novos)	25	0,66
Aço carbono ou baixa liga (oxidado a 600 ° C)	200 - 600	0,80
Chapa de aço carbono (superfície áspera)	40 -400	0,94 – 0,97
Tijolo refratário	1000	0,75
Tijolo refratário magnésítico	1000	0,38
Vidro (placa polida)	25	0,94
Vidro Pyrex	260 - 540	0,95 – 0,85
Madeira (plana)	25	0,90
Tinta alumínio em bom estado	100	0,52
Tinta laca preta fosca	80 -150	0,91
Tinta laca branca fosca (sobre ferro)	25	0,87
Tinta laca preta ou branca	40 - 100	0,96 – 0,98
Papel de parede	25	0,91
Borracha (dura e lisa)	25	0,94
Borracha (macia e áspera)	25	0,86
Areia	25	0,90
Pele humana	32	0,98
Solo seco	20	0,92
Solo saturado de água	20	0,95
Água destilada	20	0,96
Gelo	-10	0,96
Neve	-10	0,85

Tabela 2 – Valores típicos para a emissividade de alguns materiais

4. Transmissão atmosférica

Após ser emitida por um corpo a radiação infravermelha interage com a atmosfera circundante

tendo alguns de seus comprimentos de onda absorvidos, transmitidos ou refletidos Este fenômeno é conhecido como *atenuação atmosférica* e sua ocorrência se dá em função da presença de gases e partículas em suspensão.

A atmosfera terrestre não é inteiramente transparente à radiação infravermelha. A presença de vapor d'água e gás carbônico na atmosfera produz uma absorção seletiva em algumas faixas da radiação térmica, especialmente entre os comprimentos de onda entre 1 e 15 μm e em grande parte da radiação de comprimento de onda acima de 15 μm . Este fenômeno é o responsável pelo conhecido “

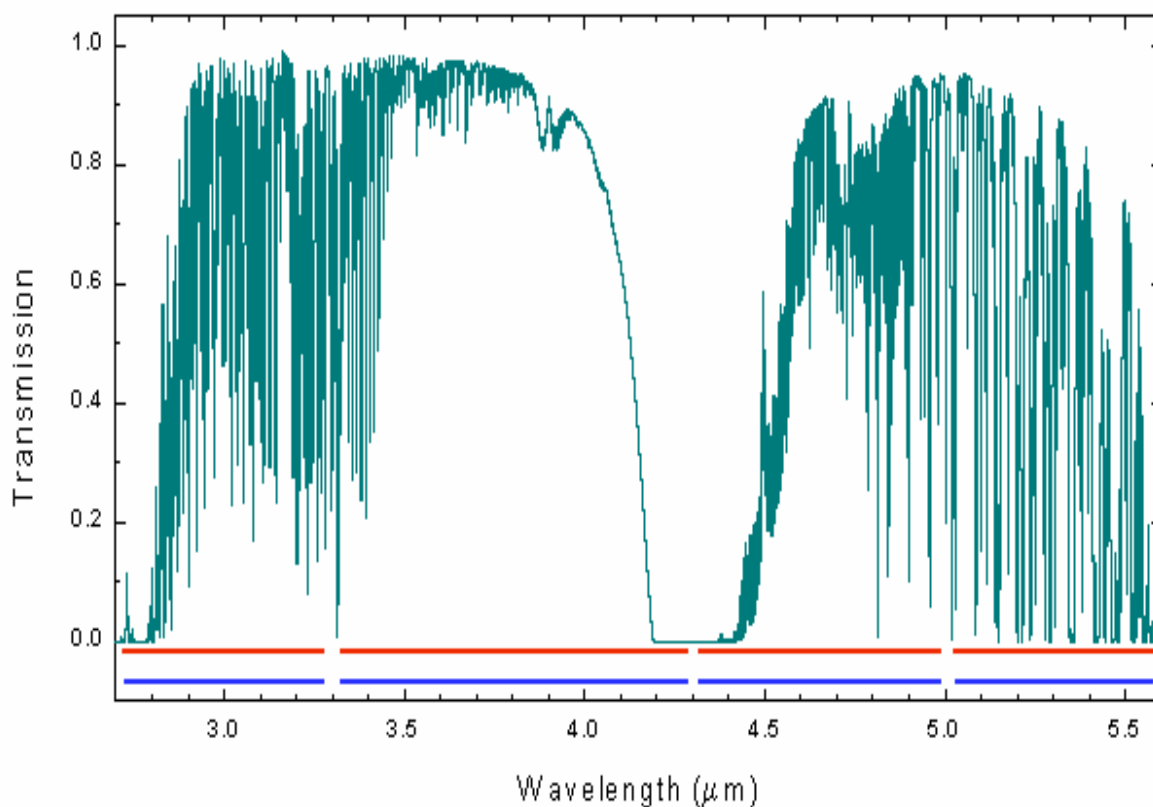


Figura 2 – Transmissão atmosférica para λ entre 3,0 e 5,5 μm

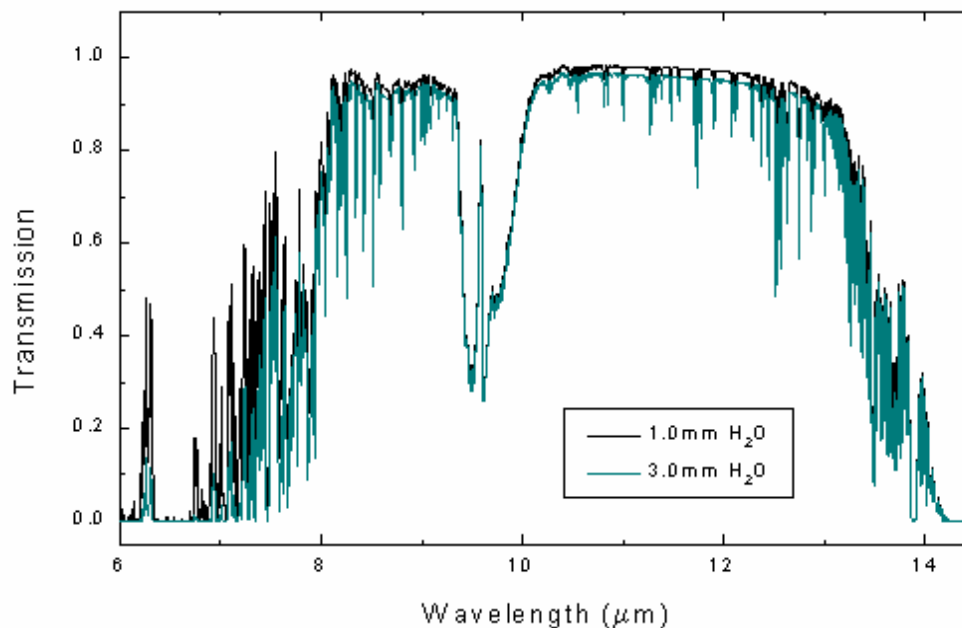


Figura 3 – Transmissão atmosférica para λ entre 6,0 e 14,0 μm

Em atmosferas urbanas ou industriais, com alta densidade de fontes poluidoras, os efeitos de atenuação e reflexão da radiação infravermelha se tornam mais importantes, gerando a necessidade do uso de filtros espectrais para seleção dos comprimentos de onda menos atenuados nestas condições.

5. Equipamentos para termografia

As pesquisas visando a detecção de radiação infravermelha datam do século XVI, com Galileo Galilei. As experiências passaram por diferentes estágios e princípios, desde a variação de um volume conhecido de gás até que se descobriam materiais capazes de produzirem uma corrente elétrica ao serem atingidos por radiação infravermelha, o conhecido efeito foto-elétrico, no início do século XX.

Grande impulso teve o desenvolvimento de equipamentos detectores de radiação térmica durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945). Sistemas de visão noturna e reconhecimento tático foram inicialmente empregados pela *Wermacht* alemã na frente russa em 1944.

Ao fim da Segunda Guerra Mundial, já estavam em andamento estudos para a produção dos mísseis *Sidewinder* e *Falcon*, capazes de detectar e perseguir o calor emitido pela exaustão das turbinas dos jatos de combate.

A partir da década 1960, tornou-se possível a aplicação com objetivos civis da nova tecnologia. Avanços foram obtidos no campo da micro-eletrônica, da ótica e de materiais sensíveis à radiação térmica – os detectores.

Os principais elementos de um equipamento de termografia são:

- Sistema ótico formado por lentes (grande angular e teleobjetiva)
- Filtros
- Mecanismo de varredura da imagem
- Detector
- Processador de sinal
- Monitor de vídeo.

Figura 4 – Equipamento portátil de termografia



6. Aplicações da termografia

As aplicações mais usuais da termografia são:

- Militar
- Medicina
- ✓ Indústria

- Geração e transmissão elétricas
- Petróleo & petroquímica
- Siderurgia
- Papel e celulose
- Caldeiras e fornos
- Máquinas
- Construção civil

- Uso Militar



Figura 5 – Míssil termo-guiado ar-ar “Piranha”, de fabricação brasileiro



Figura 6 – Carro de combate israelense com mira infravermelha

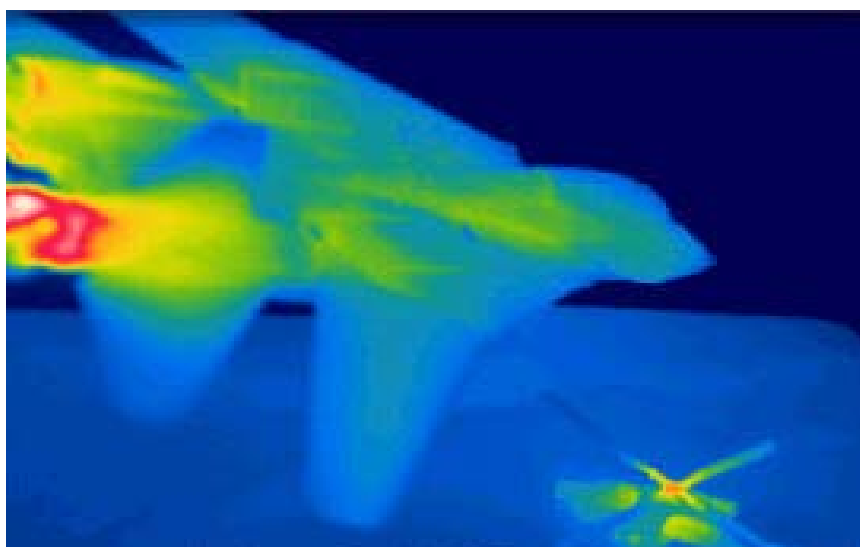
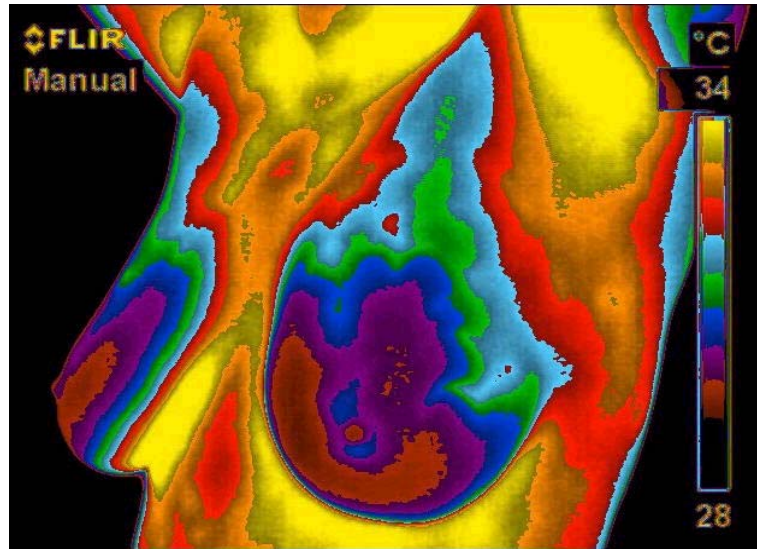


Figura 7 – Caça supersônico detectado por uma câmera termográfica

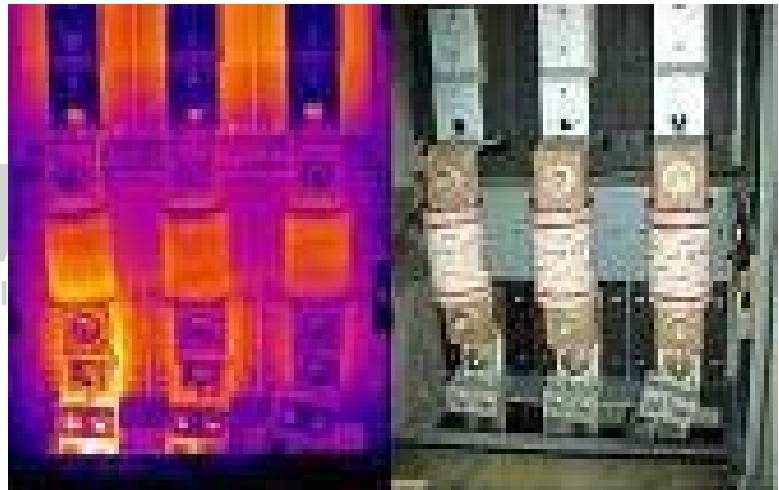
- Medicina

Figura 8 – Termo-mamografia



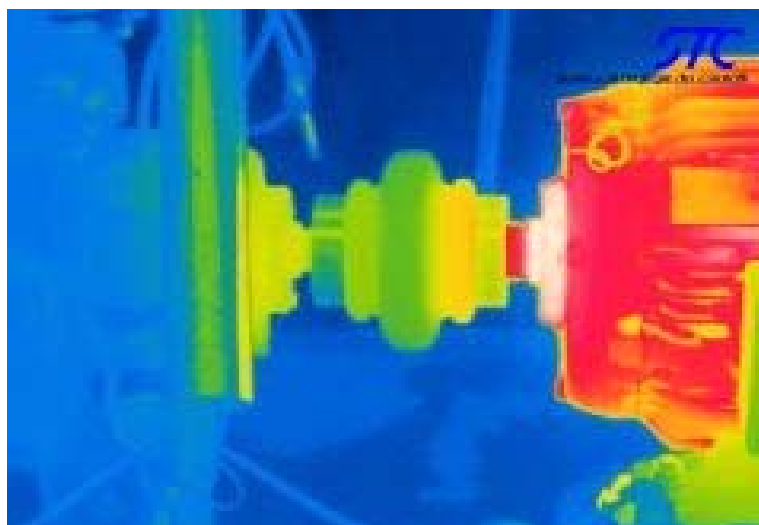
- Sistemas elétricos de potência

Figura 9 – Aquecimento anormal em uma das fases de um circuito trifásico



- Equipamentos rotativos

Figura 10 – Termograma de um motor indicando sobreaquecimento no eixo, próximo ao acoplamento



– Indústria do petróleo

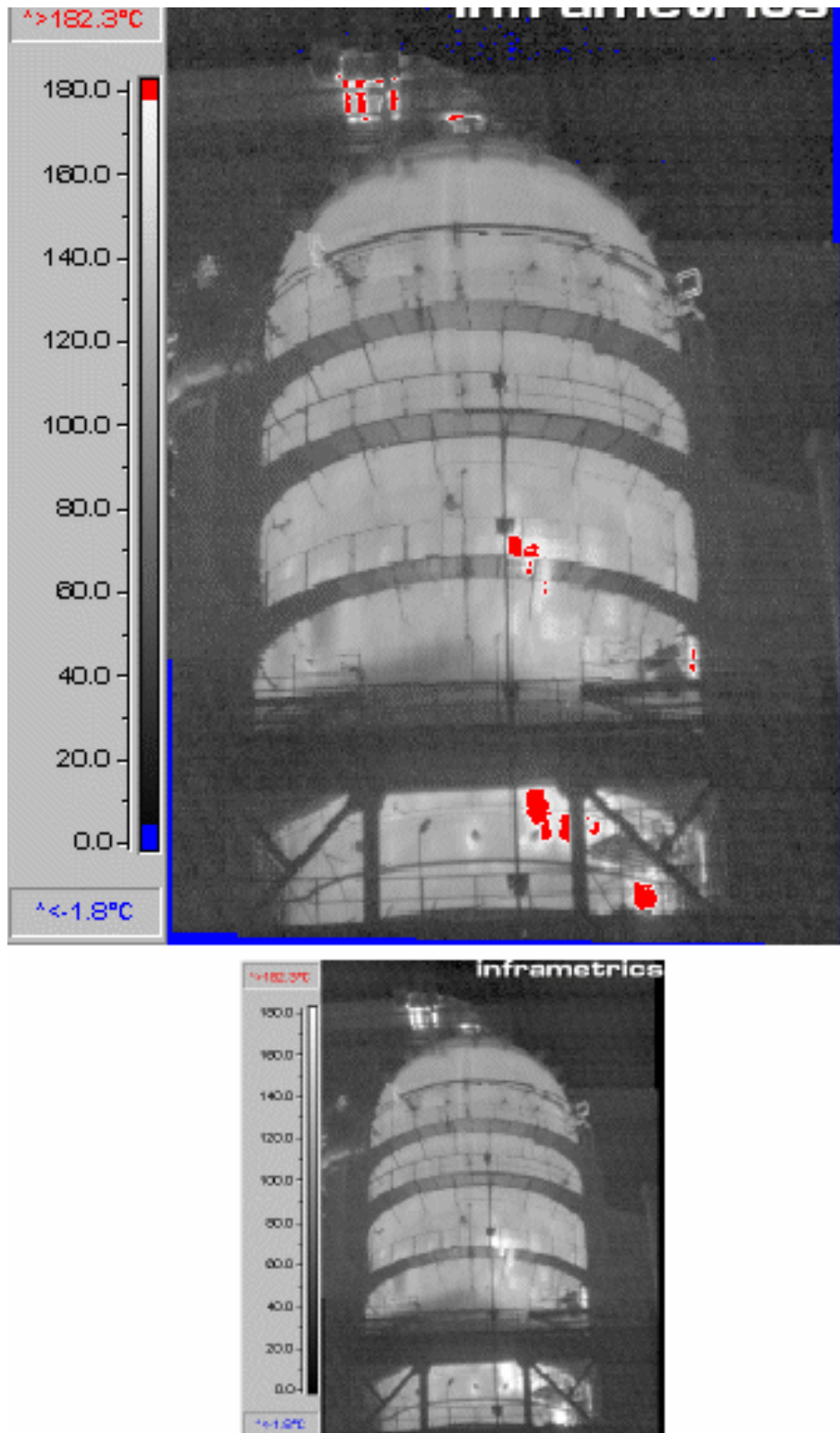


Figura 11 – Aquecimentos localizados indicando falhas no revestimento refratário interno de um regenerador de uma planta de craqueamento catalítico fluido

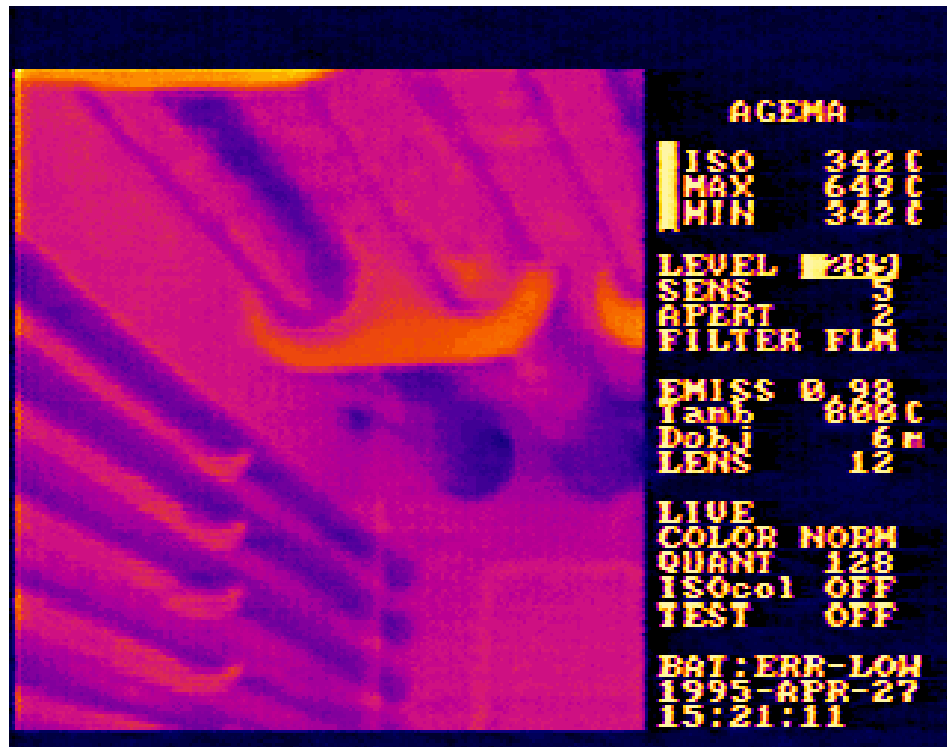


Figura 12 – Aspecto térmico da câmara de radiação de um forno de uma unidade de destilação de petróleo

- Refratários e isolamentos térmicos

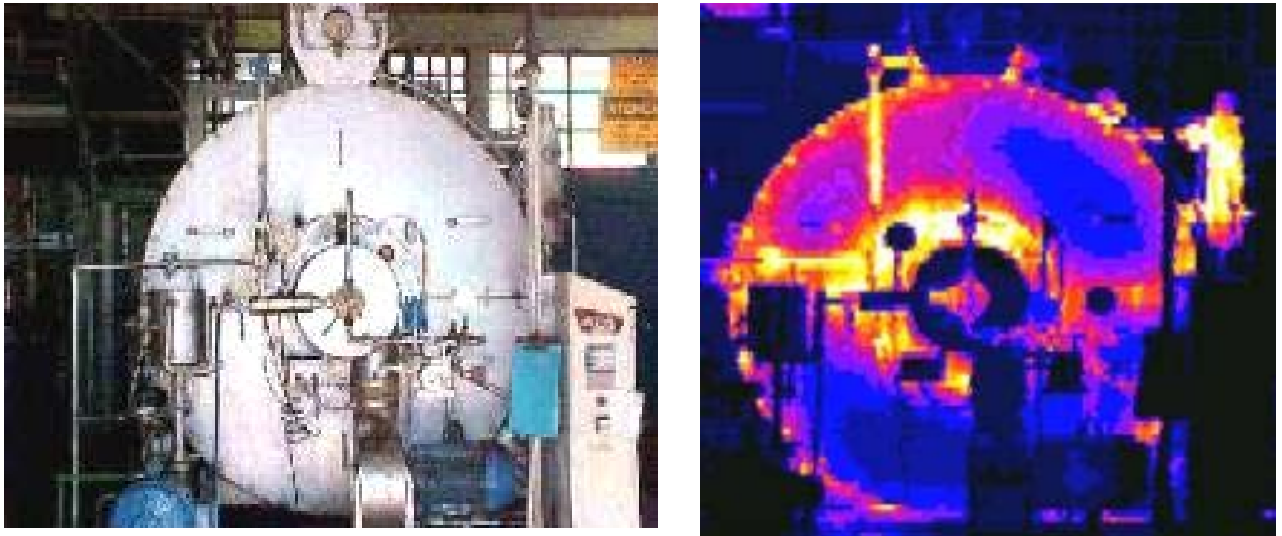


Figura 13 – Imagem visível e infravermelha da área do queimador de uma caldeira flamotubular indicando a presença de falhas no isolamento térmico

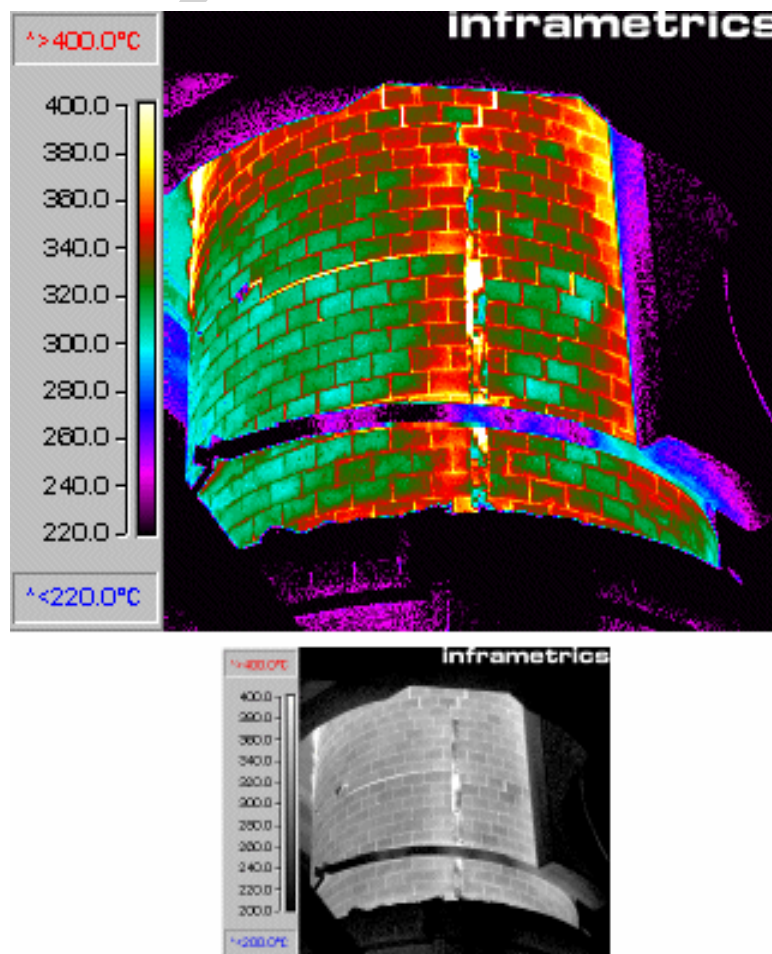


Figura 14 – Termograma de uma chaminé de coqueria indicando trincas nos tijolos refratários-isolantes