

# **ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS À IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS E INCLUSÕES NÃO APARENTESENT MATERIAIS**

**Sinthya Gonçalves Tavares**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [gtavar@terra.com.br](mailto:gtavar@terra.com.br)

**Ângela Mara Cunha**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [amscunha@yahoo.com.br](mailto:amscunha@yahoo.com.br)

**Roberto Márcio de Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

**Resumo:** *O Ensaio Térmico não Destrutivo é uma ferramenta valiosa na identificação e caracterização de defeitos internos e inclusões não aparentes em materiais excitados termicamente. A variação nas propriedades termofísicas dos pontos onde estão presentes as falhas e inclusões alteram a difusão de calor no interior do material, gerando zonas de maior ou menor temperatura superficial. Consequentemente, os padrões de radiação no infravermelho emitidos pelo objeto sofrem também alterações. Estes padrões, convertidos em imagens termográficas devidamente tratadas, constituem-se veículos de informação sobre a presença e posição dos defeitos e inclusões. Neste trabalho é descrita a metodologia de ensaios em amostras com defeitos internos e inclusões conhecidas. Os resultados dos testes realizados são apresentados e discutidos.*

**Palavras Chave:** *ensaio térmico não destrutivo, defeitos internos, inclusões não aparentes*

## **1. INTRODUÇÃO**

As primeiras pesquisas na área de radiação infravermelha foram desenvolvidas por Sir Willian Herschel, por volta de 1800, para observar o aumento da temperatura do espectro criado pela luz do sol ao atravessar um prisma, na faixa do violeta ao vermelho. Ele descobriu que as maiores temperaturas ocorriam, de fato, além da luz vermelha. Herschel denominou essa radiação infravermelha, entre 0,75 a 10  $\mu\text{m}$ , como “raios caloríficos” (Herschel, 1800; Wolfe et al., 1978).

A técnica capaz de converter um padrão de radiação térmica no infravermelho em uma imagem é chamada de termografia. A câmera sensível ao infravermelho, ou termocâmera, é usada para leitura da radiação emitida e sua posterior conversão em valores de temperatura.

Em 1840 John Herschel, filho de Willian Herschel, desenvolveu um processo de detecção e registro da radiação infravermelha incidente, baseado na evaporação diferencial de um filme de óleo, em um processo semelhante à fotografia. Durante a Segunda Guerra Mundial, a termografia encontrou vasto campo de desenvolvimento para aplicação em sistemas de comunicação, visão noturna e reconhecimento. Os dispositivos no infravermelho foram utilizados pela primeira vez pelas forças alemãs em combates noturnos na frente russa. Para reconhecimento aéreo, os norte-americanos desenvolveram o FLIR (Forward Looking Infrared), sistema destinado a executar a

varredura do terreno à frente da aeronave e fornecer um mapa térmico que permitisse a localização de tropas e veículos. Ao final da Segunda Guerra, foram desenvolvidos projetos que deram origem aos mísseis equipados com sensores infravermelhos capazes de detectar o calor emitido pelas turbinas dos aviões inimigos. O sucesso desses projetos é tal que nos últimos 15 anos cerca de 90% dos aviões abatidos em combate foram atingidos por mísseis infravermelhos, (Veratti, 2003).

No campo da construção civil, a termografia tem encontrado um número cada vez maior de aplicações sobretudo na diagnose de estruturas de alvenaria. Estas estruturas apresentam variações nos padrões de integridade quando submetidas a condições adversas para as quais foram projetados. Recente pesquisa da American Society of Civil Engineers estima que os gastos com reparos em construções civis americanas gire em torno de 1,3 trilhões de dólares ao ano (Clark et al., 2002). Em alguns países, como na Inglaterra, a análise do conforto térmico nas construções é regulamentada por norma e realizada por meio da termografia. No Japão, devido ao aumento no número de acidentes causados pela presença de defeitos em estruturas de concreto, como pontes e túneis construídos na década de 60, a termografia foi implementada como ferramenta para realização de ensaios térmicos não destrutivos. (Sakagami et al., 2002).

No que diz respeito à implementação da técnica na avaliação da integridade estrutural de construções civis, a termografia representa ferramenta poderosa na detecção de defeitos internos e inclusões não aparentes. Ensaios em campo e em laboratório têm demonstrado a capacidade da termografia em identificar e localizar falhas, fornecendo uma resposta qualitativa aos serviços de inspeção. Neste trabalho é apresentada uma metodologia de Ensaios Térmicos não Destrutivo em amostras com defeitos internos e inclusões conhecidas. São apresentados e discutidos resultados dos testes realizados.

## 2. EXPERIMENTO

A identificação de defeitos e inclusões não aparentes em estruturas de alvenaria é possível a partir da análise do campo de temperatura superficial, quando a estrutura é submetida a uma excitação térmica. O processo de difusão térmica é afetado pela presença de falhas ou inclusões, gerando uma alteração do campo de temperatura superficial da estrutura defeituosa em comparação com o mesmo campo de temperatura de uma estrutura íntegra, conforme pode ser visto na Fig. (1).

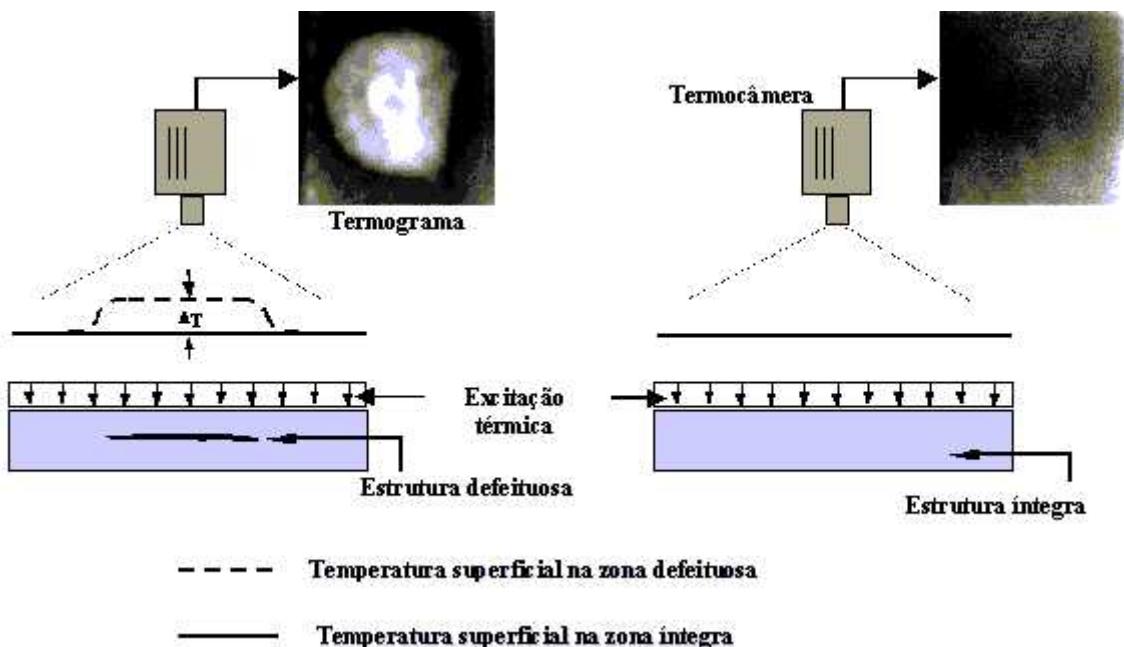


Figura 1. Esquema do princípio do Ensaio Térmico não Destrutivo

Para a identificação de defeito e inclusões foi construída uma parede em alvenaria com quatro espécies de tijolos: tijolo comum (de dimensões 20cm x 10cm x 5cm), tijolo furado (de dimensões 30cm x 20cm x 10cm), blocos de concreto (de dimensões 30cm x 15cm x 10cm) e tijolos de silicato de cálcio (de dimensões 40cm x 20cm x 15cm). Para junção dos tijolos e cobertura da parede, foi utilizado argamassa já prontamente misturada, visando reproduzir, ao máximo, os parâmetros usados em alvenaria residencial. A Figura (2) apresenta, esquematicamente, esta parede.

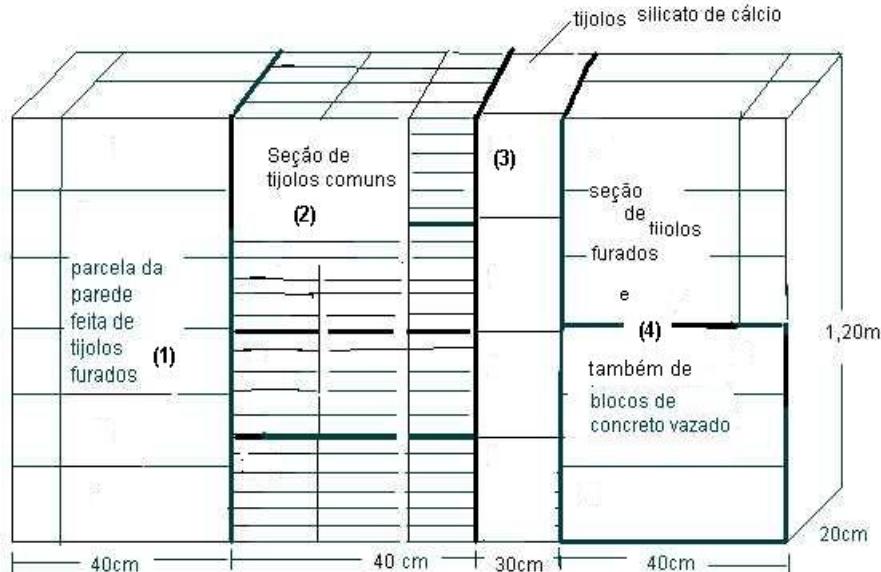


Figura 2. Distribuição dos tijolos e dimensões da amostra

Na seção 1, utilizou-se apenas tijolos furados. Na seção 2 foram utilizados tijolos comuns e na seção 3 tijolos de silicato de cálcio. Já a seção 4 foi dividida transversalmente em duas subseções sendo a seção 4A composta de tijolos furados e a seção 4B de blocos de concreto. Tal procedimento visava avaliar o comportamento de tais materiais quando expostos a iguais condições.

Na seção 1 inseriu-se longitudinalmente, a cerca de 10cm da superfície, uma tubulação de cobre de 12,7cm de diâmetro acoplada à outra de PVC de mesmo valor de diâmetro. Cada qual ocupava metade da dimensão da seção e ambas tiveram metade de seu comprimento isolado por uma cobertura de poliuretano.

A seção 4 foi percorrida interiormente por tubulação destinada a passagem de fiação elétrica. Com isto esperava-se avaliar a capacidade da termografia em identificar possíveis pontos de aquecimento, à partir da alteração local da temperatura resultado da passagem de corrente elétrica gerada à partir de uma fonte de 110V. A seleção deste parâmetro de tensão visava reproduzir condições de instalações elétricas residenciais comuns em Minas Gerais.

A Figura (3) apresenta, esquematicamente, a distribuição das tubulações no interior da parede, nas seções 1 e 4.

Na seção 2, totalmente construída em tijolos comuns, foram introduzidas descontinuidades internas, simuladas através da inclusão de material com propriedades termofísicas diferentes das do material de base. Para isto, pequenas placas de isopor, com valor de aresta de espessura  $t$  conforme croqui apresentado na Fig. (4), foram colados à primeira camada de emboço que recobria os tijolos comuns, e posteriormente cobertas com nova camada de emboço (também conforme croqui). Tal constituição da amostra possibilitou analisar a capacidade da termografia em identificar não só falhas de diversas dimensões mas também localizadas em profundidades diferentes. A superfície da parede foi recoberta por uma fina camada de tinta preta de emissividade com  $0,85 \pm 0,10$  (conforme indicação do fabricante).

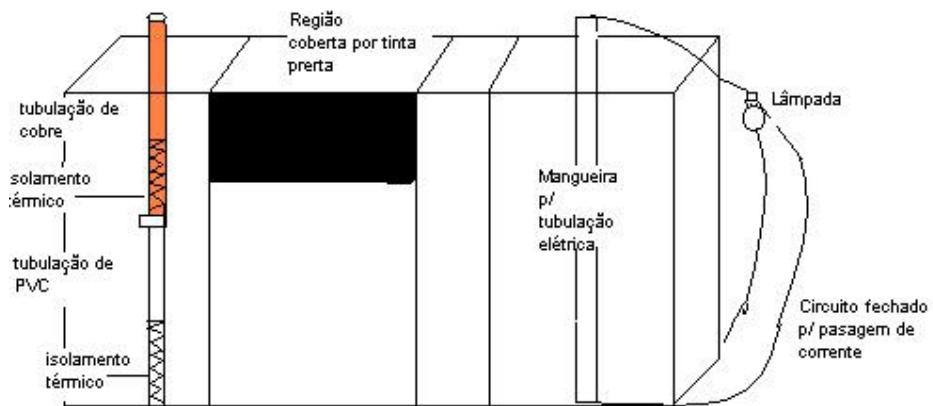


Figura 3. Distribuição das tubulações internas nas seções 2 e 4

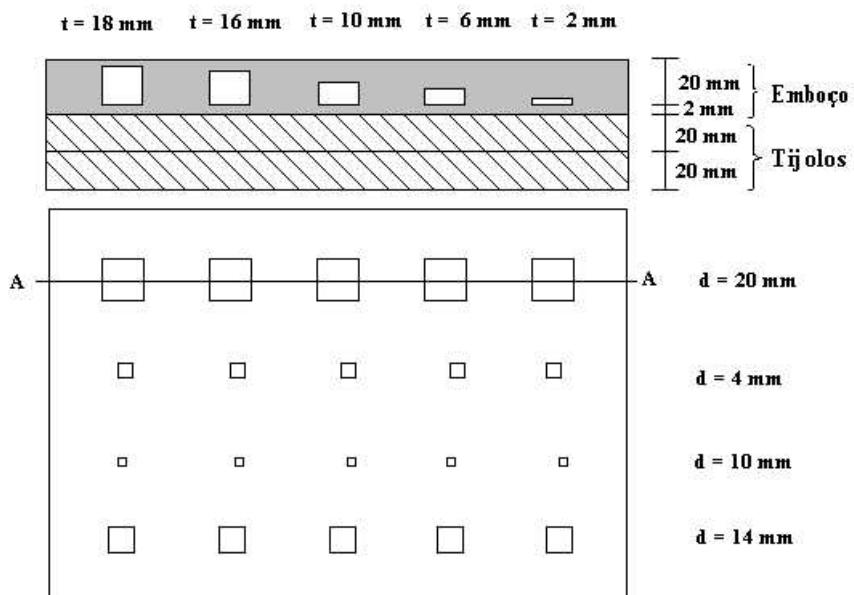


Figura 4. Detalhamento falhas internas inseridas na seção 2

A termocâmera usada nesse estudo é um instrumento do tipo Cyclops TI35+ Thermal Imager, cujas especificações são apresentadas na Tab. (1).

**Tabela 1 - Características da termocâmera utilizada no experimento**

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Freqüência de operação	25Hz
Distância focal	0,5m até infinito
Faixa de temperatura observável (baseado na temperatura de corpo negro)	-20°C a 1500°C,
Ruído equivalente a diferença de temperatura (para 30°C no corpo negro)	0,5°C
Campo de visão	16° (horizontal) x 16° (vertical)
Sistema de resfriamento do detector	Termoelétrico
Resposta espectral	‘L’ Range- 3,5 to 5 µm; ‘M’ Range - 3,9µm; ‘H’ Range - 3,9µm.

Para efeito de controle e ajuste das variações nos valores de temperatura, utilizou-se termopares do tipo K, com incerteza de medição, para a faixa de temperatura indicada durante os ensaios, de 1,1°C. Cabe salientar que o valor da incerteza da termocâmera listado na Tab.1 aplica-se somente quando as variáveis envolvidas nos processo de medição são perfeitamente controladas e conhecidas. Trabalhos, como de Tavares e Andrade (2003), têm já apresentado metodologias de avaliação de incerteza levando-se em conta as fontes externas e intrínsecas de incerteza envolvidas no processo de medição.

Os ensaios foram realizados durante o mês de Janeiro de 2004 no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. A escolha por este período favoreceu os testes na medida que às condições climáticas típicas de verão favoreciam ao aumento do diferencial de temperatura entre o objeto analisado e o ambiente. Para aumentar ainda mais este diferencial optou-se pelo período vespertino, após o poente, para a realização dos testes (tomada de imagens). Desta forma, evitou-se reflexos solares nas imagens, assim como garantiu-se uma absorção de maior carga térmica por parte da amostra. Porém, condições climáticas desfavoráveis, caracterizada pela ausência de incidência solar direta, não permitiram a utilização de somente condições de contorno naturais quando pretendia-se identificar as falhas internas simuladas na seção 2 da parede. Para resolver o problema optou-se pelo aquecimento artificial da superfície da parede naquela seção, obtido com a utilização de aquecedor elétrico com potência de 2,8kW. Na análise das seções 1, 3 e 4 as condições de contorno naturais foram suficientes.

No caso da seção 2, o aquecedor foi instalado em regiões bem próximas à área que desejava-se testar, e mantido naquela posição por 1 minuto. Tal procedimento visava o aquecimento uniforme da seção sob observação. O tempo de aquecimento foi definido experimentalmente em termos da saturação da imagem, uma vez que as imagens foram tomadas, em intervalos de tempos iguais, em período subseqüente ao aquecimento, (ou seja, durante o período de resfriamento da seção).

A termocâmera foi posicionada a uma distância de 2,10m da amostra; distância definida a partir do levantamento do melhor foco obtido pelo aparelho.

A temperatura média ambiente durante a realização dos ensaios foi de 26°C.

### 3. RESULTADOS

As Figuras (5) e (6) apresentam os termogramas obtidos para a seção 1.

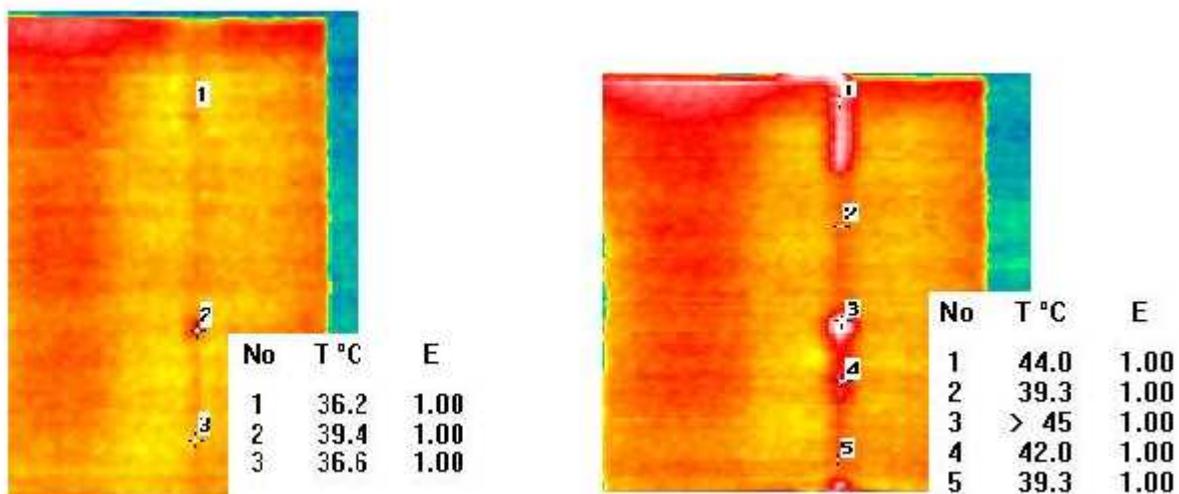


Figura 5. Tubulação hidráulica contendo água à temperatura ambiente (5a) e à temperatura de 92°C (5b)

A termografia só foi capaz de identificar a presença de água, na temperatura ambiente, à partir de 25 segundos decorridos do início da inspeção, como uma área de temperatura mais baixa que a região vizinha.

Com água a 92°C, o termograma fornece a identificação imediata da região da tubulação. Neste caso a tubulação apresenta-se como uma superfície de temperatura superior à toda vizinhança; exceto nas regiões isoladas.

Nas regiões não isoladas, a tubulação de cobre indicou uma temperatura média de 47°C quando percorrido por água quente. Já para a tubulação de PVC, a termografia identificou uma temperatura média de 42°C em razão da condutividade do cobre ser superior a do PVC.

No conjunto Cobre-PVC, as regiões isoladas pelo poliuretano representavam áreas mais frias e, consequentemente, mais escurecidas no termograma. A técnica indicou uma temperatura média para estas regiões de 40°C. Durante o ensaio, pôde-se observar um ponto de superaquecimento (47°C). Confirmou-se, posteriormente, que essa medição indicava a existência de vazamento na junção das tubulações de PVC e cobre.

A técnica permitiu ainda a visualização do limite entre a seção construída em tijolo de silicato de cálcio e a seção em tijolo furado, conforme pode ser visto também na Fig. (5). Tal situação deve-se à diferença significativa entre a condutividade térmica dos dois materiais ( $k_{\text{tijolo furado}} \gg k_{\text{tijolo silicato}}$ ), o que levou ao registro de temperaturas superficiais maiores no caso do tijolo de silicato.

Já para a tubulação elétrica, não foi possível indicar qualquer região de aquecimento, além daquele próprio da estrutura. Talvez tal situação esteja associada ao baixo valor de corrente (0,5 A) utilizada.

No caso das falhas, conforme pode ser visto na Fig. (6), a técnica foi capaz de identificar apenas as falhas de maiores dimensões e instaladas mais superficialmente. Vê-se claramente as falhas de aresta igual a 20 e 14 mm e profundidade até 10 mm. Para a identificação das demais falhas, faz-se necessário o uso de melhores programas de tratamento de imagem do que aquele disponibilizado.

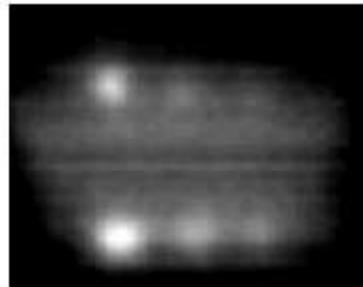


Figura 6. Detecção das falhas

#### 4. CONCLUSÕES

Ao se fazer uso da aplicação da termografia passiva, em análises da integridade de estruturas, deve-se levar em conta as limitações da técnica e, principalmente, se conhecer previamente o objeto em estudo.

A técnica foi capaz de identificar a presença de materiais de condutividade térmica diferente. Neste trabalho, foi possível identificar a presença de tijolos furados e dos tijolos de silicato de cálcio (com condutividade menor), através da avaliação da temperatura superficial da parede nas seções que continham um e outro material. Temperaturas superficiais superiores foram identificadas na seção que continha tijolo de silicato em relação à obtidas na seção que continha tijolos furados. Tal situação deve-se à condutividade térmica inferior do primeiro.

A técnica permitiu a identificação de tubulação contendo água à temperatura ambiente e à 92°C. No caso da água à temperatura ambiente, foi necessário aguardar 25 segundos para uma boa visualização da presença do fluido na tubulação. No caso da água quente, este transiente tendeu a valores nulos.

A técnica não foi capaz de identificar aquecimento devido a presença de corrente elétrica. Tal situação talvez esteja associada ao baixo valor de corrente (0,5 A) utilizada.

A técnica também pode apresentar dificuldades de implementação devidas principalmente as variações nas condições ambientes que surgem no decorrer da inspeção, e que sobre as quais não se tem controle, tais como: aumento da nebulosidade, variações na velocidade do vento, entre outras.

No caso deste trabalho, as condições atmosféricas desfavoráveis não permitiram a utilização de somente condições de contorno naturais na identificação da presença de falhas, simuladas no interior da parede. Neste caso foi necessário o estudo artificial da parede, através da utilização de aquecedor térmico. Com isto, a técnica foi capaz de identificar apenas as falhas de maiores dimensões e instaladas mais superficialmente. Pôde-se identificar, claramente, as falhas de aresta igual a 20mm e 14mm e profundidade até 10mm. Para a identificação das demais, faz-se necessário aplicação de melhores programas de tratamento de imagem do que o disponibilizado.

## 5. AGRADECIMENTOS

As autores agradecem ao Laboratório Kelvin, da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, pelo apoio na realização do presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Clark, M., McCann, D. M., and Forde, M. C., 2002, "Infrared Thermographic Investigation of Railway Track Ballast", NDT&E International, vol. 35, pp. 83-94.
- FLIR SYSTEMS, [http://www.flirthermography.com/brazil/about/how\\_infrared\\_cameras.asp](http://www.flirthermography.com/brazil/about/how_infrared_cameras.asp)
- Herschel, W., 1800, "Experiments of the invisible rays of the sun", Philos. Trans. of Royal Society, London 90 (1800) 284.
- Sakagami, T., and Kubo, S., 2002, "Development of New Non-Destructive Testing Technique for Quantitative Evaluations of Delamination Defects in Concrete Structures Based on Phase Delay Measurement Using Lock-in Thermography", Infrared Physics & Technology, Volume 43, pp. 311-316.
- Tavares, S. G., and Andrade, R. M., 2003 "Metodologia de Ensaio e Análise de Incerteza na Aplicação da Termografia", Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, PB.
- Veratti, A. B. 1992, "Termografia- Princípios, Aplicações e Qualidade", ICON tecnologia e Serviços. São Paulo.
- Wolfe N. L., and Zissis, G., 1978, "The Infrared Handbook", Office of Naval Research, Department of Navy.

## NON-DESTRUCTIVE THERMAL EVALUATIONS TO THE IDENTIFICATION OF INTERNAL DEFECTS AND NON APPARENT INCLUSIONS IN MATERIALS

**Sinthya Gonçalves Tavares**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [gtavar@terra.com.br](mailto:gtavar@terra.com.br)

**Ângela Mara Cunha**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [amscunha@yahoo.com.br](mailto:amscunha@yahoo.com.br)

**Roberto Márcio de Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901 – [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

**Abstract.** The non-destructive thermal evaluations are a valuable identification and characterization for internal defects and non-apparent inclusions in thermally excited materials. The variation of the thermophysical properties at the points where failures and inclusions are located change the diffusion of heat inside the material generating zones of higher or lower superficial temperature. Consequently, the infrared radiation patterns emitted by the object also go through alterations. These patterns, thermally converted into properly treated thermographic images, constitute the information carrier which indicates the presence and position of inclusions and defects. This work describes the evaluation methodology in samples containing known defects and inclusions. The results of the evaluations shall be presented and discussed herein.

**Keywords.** non-destructive thermal evaluations, internal defects, non-apparent inclusions.