

APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA AVALIAÇÃO DE DEFEITOS NÃO APARENTES EM MATERIAIS¹

Angela Mara da Silva Cunha²
Sinthya Gonçalves Tavares³
Roberto Márcio de Andrade⁴

Resumo

Nos últimos anos, tem-se destacado a vantajosa relação custo/benefício da utilização da termografia na indústria em programas de manutenção preventiva e preditiva. A capacidade de identificar problemas potenciais em sua fase inicial e de maneira não intrusiva, como defeitos e inclusões não aparentes em estruturas, presença de umidade e pontos de superaquecimento anormal em equipamentos ou em fases do processo tem incentivado a disseminação da técnica nos mais diversos setores. Neste trabalho serão apontadas as possibilidades do emprego da termografia em inspeções térmicas, assim como serão discutidos os seus modos de operação. As variáveis envolvidas no processo de medição serão discutidas e a influência sobre os resultados da medição avaliados, por fim, medidas que permitam otimizar sua aplicação serão sugeridas. Os procedimentos experimentais foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Palavras-chave: Termografia; Falhas internas; Ensaios experimentais.

APPLICATION OF THE THERMOGRAPHY IN THE OF NON APPARENT DEFECTS IDENTIFICATION IN MATERIALS

Abstract

The advantageous cost-benefit relationship of the utilization of thermography in of preventive and predictive maintenance programs has been emphasized over the last years. The capacity of identifying potential problems in the flaws' initial phase such as small structural internal failures, unusually overheated spots in equipment or phases of processes has fostered its dissemination among various sectors of the economy. In this study the real possibilities of the use of the thermography in thermal inspections as well as its ways of operation will be argued. The results of measurements in samples of known characteristics will be presented. The variables involved in the measurement process will be argued and the influence on the results of the measurement evaluated. The variables suggested in the measurement process will be discussed and the influence on the results of the measurement evaluated. The experimental procedures have been carried out in the laboratories of the Department of Mechanical Engineering of the Federal University of Minas Gerais (UFMG).

Key words: Thermography; Internal flaws; Experimental tests.

¹ Contribuição técnica apresentada na **61º Congresso Anual da ABM**, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheira Mecânica pela UFMG

³ Mestre em Engenharia Mecânica pela UFMG

⁴ Professor Doutor da UFMG

1 INTRODUÇÃO

Fatores como o amplo espectro aplicativo, a facilidade de operação, a alta velocidade da medição e obtenção de respostas, a relativa facilidade na interpretação de resultados e possibilidade da utilização sobre equipamentos em operação tem agregado, cada vez mais, valor aos ensaios térmicos não destrutivos, ou Non Destructive Thermal Evaluation – NDTE.⁽¹⁻³⁾ Trabalhos, como os de Adams et al.,⁴⁾ que procuravam medir a perda de calor em incubadoras, tem-se valido com sucesso da técnica. Destaca-se a utilização da termografia no controle de qualidade e projeto de semicondutores: Talwar, Jogai e Loehr,⁽⁵⁾ na indústria de tintas com o objetivo de determinar o tempo de secagem; Can,⁽⁶⁾ na avaliação de fadiga em materiais; Luong,⁽⁷⁾ na identificação de vazamento em canais; no controle de processo e qualidade do produto Andrade,⁽⁸⁾ dentre outras aplicações.

Estudos publicados na Maintenance Technology Magazine, Sanor,⁽⁹⁾ levantaram a real viabilidade de implementação do Ensaio Térmico Não Destrutivo na indústria. Segundo a revista, existe uma relação custo/ benefício da razão de 1:4 no uso de ensaios térmicos em programas de manutenção preditiva, mesmo considerando o investimento inicial relativamente alto para a aquisição do sistema. Segundo a Maintenance Technology Magazine esta relação pode chegar a 1:20 se forem consideradas as perdas de produção decorrentes de paradas no processo

A termografia pode ser, ainda, genericamente definida como a técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas, de um equipamento, componente ou processo, a partir da radiação infravermelha. Habilidade essa que é baseada no fato de que todos os objetos, com temperatura superior ao zero absoluto, emitem energia radiante (energia de infravermelho), sendo essa radiação função da temperatura da superfície do objeto, de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann.

A técnica poderá sempre ser usada na investigação de situações onde a temperatura da superfície de um equipamento, máquina ou estrutura qualquer puder ser usada na indicação de um problema ou de uma particular propriedade de um material.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a aplicação da termografia na avaliação de defeitos e inclusões não aparentes em materiais. Através de resultados obtidos em amostras de características conhecidas, serão levantadas as reais possibilidades do emprego da termografia em inspeções térmicas. As variáveis envolvidas no processo de medição serão discutidas e a influência sobre os resultados da medição avaliada, podendo-se sugerir, por fim, medidas que permitam otimizar sua aplicação.

2 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A implementação da termografia infravermelha pode ser realizada por meio de técnicas ativa e a passiva.

A técnica passiva é empregada em materiais e/ou estruturas que apresentam uma diferença natural de temperatura (geralmente superior) com o ambiente. Aplicações comuns da técnica passiva para ensaios não destrutivos estão em programas de manutenção preventiva e preditiva e em avaliação de processos e componentes industriais, onde o acompanhamento periódico das condições normais de operação favorece a identificação da presença de anomalias.

Segundo Maldague,⁽¹⁰⁾ a otimização dos resultados obtidos pelo método passivo é possível quando o diferencial de temperatura do objeto com relação ao ambiente circundante assumir valores superiores a 4°C. Tal procedimento, associado a um modelamento matemático, do tipo elementos finitos, fornece condições a uma análise mais sofisticada da situação física, levando a resultados de caráter quantitativo, em substituição aos meramente qualitativos obtidos na maioria dos casos.

Na termografia ativa faz-se necessária a produção de um estímulo térmico que será capaz de produzir uma considerável diferença entre as temperaturas ambiente e da amostra. Várias metodologias de estimulação térmica podem ser empregadas, cada qual com características e limitações próprias Maldague.⁽¹¹⁾ A escolha do tipo de estímulo térmico depende não só das características da superfície a ser testada mas, essencialmente, do tipo de informação requerida.

A técnica ativa encontra numerosas aplicações dentro do campo de ensaios não-destrutivos utilizando, basicamente, três métodos de excitação térmica: termografia modulada (modulated thermography - MT), também nomeada termografia lock-in, termografia pulsada (pulse thermography - PT) e termografia pulsado por fase (pulse phase thermography - PPT).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes, foi projetada e construída uma parede de alvenaria, onde foram empregados quatro tipos de tijolos: tijolo comum (de dimensões 200x100x50mm), tijolo furado (de 300x200x100mm), blocos de concreto (de dimensões 300x150x100mm) e tijolos de silicato de cálcio (de dimensões 400x200x150mm). Na junção dos tijolos e na cobertura da parede foi utilizada argamassa prontamente misturada. Uma seção da amostra foi recoberta por tinta de cores distintas. Padrões de cores diferentes dão uma boa indicação dos efeitos da radiação emitida em cada uma delas.

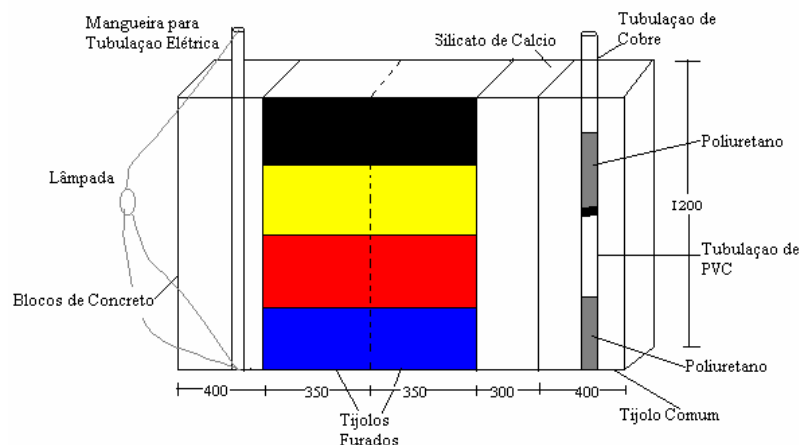


Figura 1. Parede utilizada nos ensaios

A faixa coberta com tinta preta solúvel em água serve com referência e parâmetro de controle para a emissividade. Pois simulará a presença do corpo negro. Em uma região da amostra inseriram – se tubulações de cobre e PVC, para a passagem de água, ambas com 127mm de diâmetro. As tubulações diferentes foram unidas e ambas tiveram metade de seu comprimento isolado por uma cobertura de

poliuretano. Durante os ensaios preencheu-se esta tubulação com água na temperatura ambiente (25°C) e com água a 92 °C.

Uma outra parcela da amostra foi, ainda, percorrida internamente por tubulação destinada à passagem de fiação elétrica. Com isto esperava-se avaliar a capacidade da termografia em identificar possíveis pontos de superaquecimento provocados por passagem de corrente elétrica gerada a partir de uma fonte de 110V.

Para a detecção das falhas, optou-se por realizar os ensaios, tomando-se apenas a parcela da amostra coberta por tinta preta, como será visto; de dimensões de 0,35m x 0,03m x 0,02m; e cujo material de base constituía-se apenas de tijolos comuns. Nessa área foram introduzidas peças de isopor, entre a primeira e a segunda camada de argamassa, de 0,002m. A disposição das placas de isopor na amostra possibilitou analisar a capacidade do termografia em identificar falhas de diversas dimensões e profundidades.

A opção de usar isopor para simulação da presença de falhas, ou vazios na parte interna da estrutura, decorreu do fato deste material possuir propriedades termofísicas diferentes do material de base.

O corte do isopor foi feito de maneira tal, a se ter diversas peças de tamanhos e espessuras diferentes. Essas peças, foram, então, distribuídas em “trilhas” horizontais, pela superfície, sendo que, constituíam-se de quadrados de 0,002m, 0,004m, 0,010m, 0,014 e 0,020m de lado. As peças, para a mesma dimensão de face, possuíam espessuras de: 0,002m, 0,006m, 0,010m, 0,0016m e 0,018m.

E foram distribuídas conforme a figura abaixo:

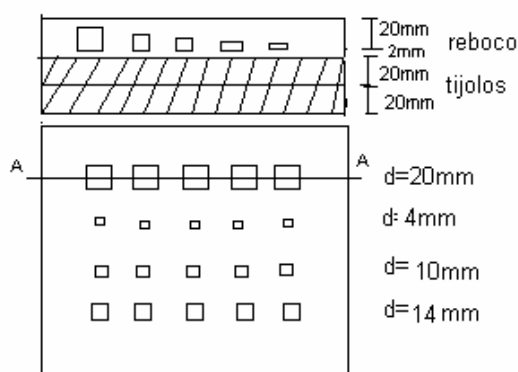


Figura 2. Distribuição das peças de isopor na seção coberta por tinta preta.

Logo, na amostra, as peças de isopor foram distribuídas de maneira que nas fileiras horizontais houvesse falhas de mesma área de face, porém com espessuras distintas.

Este trabalho apresentará os resultados obtidos na seção aonde foram inseridas as placas de isopor.

Como o objetivo do estudo era se fazer o levantamento experimental da aplicação das técnicas passiva e ativa, optou-se por realizar os testes durante o mês de junho, quando têm-se, normalmente, condições climáticas ideais (céu claro e grande período de cobertura solar) o que iriam proporcionar um melhor gradiente de temperatura entre o objeto analisado e o ambiente. Para que se fizesse uma análise bastante ampla, os testes iniciavam-se com a incidência dos primeiros raios de sol e findavam com o poente. Garantia – se assim uma absorção maior da carga térmica disponível e minimizava - se o efeito dos reflexos solares nas imagens.

Durante todo o período de ensaio, a temperatura superficial da amostra foi monitorada por meio de termopares tipo K; o que permitiu o ajuste do valor da emissividade da amostra no equipamento de medição.

Para a tomada dos valores das características do ambiente, além dos termopares e do instrumento de medição (termocâmara), foram usados: um psicrômetro (para levantamento dos valores de temperatura de bulbo úmido e seco e conseqüentemente da umidade), um anemômetro, (análise da velocidade do vento), um par de solarímetros (indicação da radiação solar incidente), e um cronômetro (para controle do tempo de cada teste).

Neste estudo, a emissividade da superfície da seção pintada de preto, obtida durante o ajuste da termocâmara, foi de 0,92. Este valor encontra-se dentro da faixa indicada pelo fabricante da tinta empregada para recobrir a esta seção, que é de $0,83 \pm 0,10$. Para as demais seções a emissividade obtida durante o ajuste da termocâmara foi de 0,90. Segundo Incropera and DeWitt,⁽¹²⁾ para superfície de concreto, a emissividade pode variar de 0,88 a 0,93.

A temperatura do meio, durante os ensaios, foi de $19,1^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, tomadas com termômetro com valor de incerteza expandida de $0,2^{\circ}\text{C}$, para esta faixa de temperatura. A transmitância do meio foi considerada igual a 1,0. Como foram testadas ambas as técnicas (passiva e ativa), utilizou-se, para fins de termografia ativa, um aquecedor elétrico com potência de 0,85 kW, instalado em regiões bem próximas à superfície em análise. O tempo de aquecimento adotado foi de 1 minuto, para permitir o aquecimento uniforme da seção sob observação. As imagens foram tomadas em intervalos de tempos iguais durante o período de resfriamento da seção.

Visando a reprodutibilidade do procedimento de medição, os ensaios foram repetidos, em condições idênticas de teste, por 12 vezes. Para cada série, foram feitas 5 imagens, representando 5 instantes do resfriamento da amostra.

A termocâmara usada nesse estudo foi a do tipo Cyclops TI35+ Thermal Imager.

A fim de avaliar o efeito da distância sobre os resultados obtidos, utilizaram-se duas distâncias: 1,30m e 2,10m, mantendo-se um ângulo de 90° entre a lente e a superfície. A menor distância necessária entre a termocâmara e o objeto sob análise, descrita pelo fabricante do equipamento é de 0,5m. O ângulo de 90° visa minimizar os ruídos da medição.

Pode-se então sugerir uma metodologia para realização da diagnóstica por termografia infravermelha que vise o monitoramento das diversas variáveis envolvidas no processo de medição. São estas variáveis que irão refletir, em forma de incerteza de medição, sobre os resultados obtidos. Esta metodologia pode ser resumida conforme segue:

1) Escolha da metodologia de excitação térmica, observada as características do objeto sob análise e restrições quanto ao aquecimento da superfície.

2) Escolha do período do ano, para o caso de termografia passiva com o uso do aquecimento natural. Condições de verão, representadas por alta incidência de raios solares, aumenta a possibilidade de um maior diferencial de temperatura entre a amostra e o ambiente e, conseqüentemente, possibilita a otimização da resposta do método. A escolha do período do ano torna-se, sobretudo, importante em superfícies que oferecem restrições quanto a um maior aquecimento.

3) Escolha da posição relativa entre a amostra e o caminho do sol. A amostra deve ser posicionada, sempre que possível, na direção leste-oeste, a fim de evitar reflexos solares nas imagens.

4) Conhecimento prévio das propriedades termofísicas do material e características óticas da superfície. Permite a previsão das respostas, abrindo ainda a possibilidade de validação dos resultados através de análise matemática. Atenção especial deve ser dedicada ao valor da emissividade da superfície, essencial para o ajuste da termocâmara e determinação da incerteza de medição. O desconhecimento desta variável mascara os resultados e é uma das responsáveis pelos falsos alarmes de irregularidades. O ajuste poderá ser feito pela temperatura ambiente ou através de um objeto ou superfície negra.

5) Ajuste da distância da termocâmara. O ajuste da distância entre o objeto em estudo e a termocâmara deve estar em acordo com as indicações do fabricante, ou seja, dentro do campo de visão instantâneo (IFOV) da termocâmara, permitindo a melhor resolução da imagem térmica. Outras características do equipamento fornecidas pelo fabricante devem ser observadas, como: mínima resolução da diferença de temperatura (MRTD), mínima diferença de temperatura identificável (MDTD), resolução ou sensibilidade térmica (NETD). Estas características não fornecem uma estimativa da incerteza intrínseca do equipamento, mas tão somente servem como referência podendo ser utilizados como parâmetro de comparação entre equipamentos.

6) Determinação da temperatura e transmitância do meio, essencial na determinação da incerteza de medição.

7) Repetição, quando possível, dos ensaios como importante procedimento na análise de incerteza.

8) Análise da imagem com identificação dos gradientes de temperatura a partir do valor da intensidade contraste presente na imagem digital.

4 RESULTADOS

O campo de temperatura apresentou-se uniforme na seção com presença de tubulação elétrica, não sendo possível identificar qualquer ponto de temperatura mais alta que pudesse indicar a presença da passagem de corrente elétrica. Esta situação pode ter sido causada por dois fatores: baixo valor de corrente (0,5A) e a presença do isolamento térmico sobre o fio. Em casos onde ocorrem curtos circuitos, este isolamento encontra-se deteriorado e temperaturas pontuais mais altas são alcançadas.

Já para a tubulação hidráulica o termograma apresentado na Figura 3(a) refere se a imagem obtida 25 segundos após o início da inspeção, quando da utilização de água à temperatura ambiente. Somente depois de decorrido este tempo, a condição de equilíbrio entre as seções da parede com e sem tubulação foi alterada, e com isto, foi possível identificar uma área de temperatura mais alta (cor mais avermelhada) que da região vizinha, indicando a presença da tubulação não aparente. Porém esta identificação somente foi possível nos setores onde não existia a presença do isolamento térmico.

Já o termograma apresentado na Figura 3(b) refere se a imagem obtida 10 segundos após o início da inspeção, quando da utilização de água à 92°C. A facilidade da identificação da tubulação neste segundo caso deve-se ao maior diferencial de temperatura obtido entre a parede na seção onde estavam introduzidos os tubos (e que, conseqüentemente, continha água quente), e a temperatura ambiente. Confirmando a informação fornecida por Maldague⁽¹³⁾ os resultados demonstraram que diferenças de temperatura da ordem de 1°C entre a seção íntegra e aquela sob análise já são capazes de indicar, a presença de anormalidade, porém, para a sua real caracterização, diferenciais de temperatura acima de 4°C fazem-se necessários, como visto na Figura 3(b).

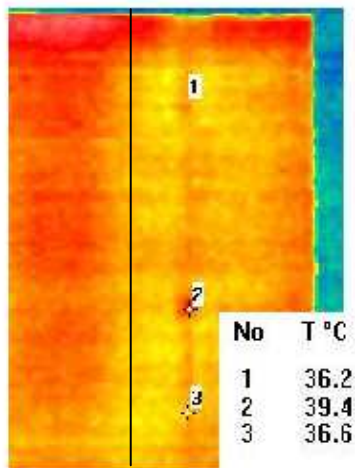


Figura 3(a). Tubulação Hidráulica contendo água a temp. ambiente

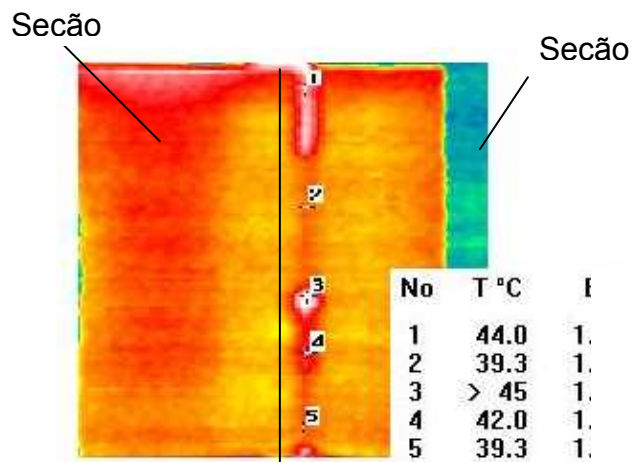


Figura 3 (b). Tubulação Hidráulica contendo água a 92°C

Para a tubulação de PVC, a termografia identificou uma temperatura média de 42°C. No conjunto Cobre-PVC, as regiões isoladas pelo poliuretano representavam áreas mais frias e, conseqüentemente, mais escurecidas no termograma. A técnica indicou uma temperatura média para estas regiões de 40°C. Situação interessante ocorreu quando se pôde observar um ponto de superaquecimento (47°C) na junção entre a as tubulações de PVC e cobre. Confirmou-se, posteriormente, que essa medição indicava a existência de vazamento na naquele ponto. No caso das falhas, Fig.4, com aplicação da metodologia passiva apenas as de dimensões maiores, três primeiras em disposição horizontal, na primeira e última linha, puderam ser identificadas claramente, perdendo-se a visibilidade das menores, porém o padrão de intensidade de brilho nos termogramas vislumbrava a possibilidade de existência de falha em determinadas regiões, merecendo portanto maior rigor investigativo.

Com a metodologia ativa as falhas em seus diversos tamanhos puderam ser facilmente visualizadas.

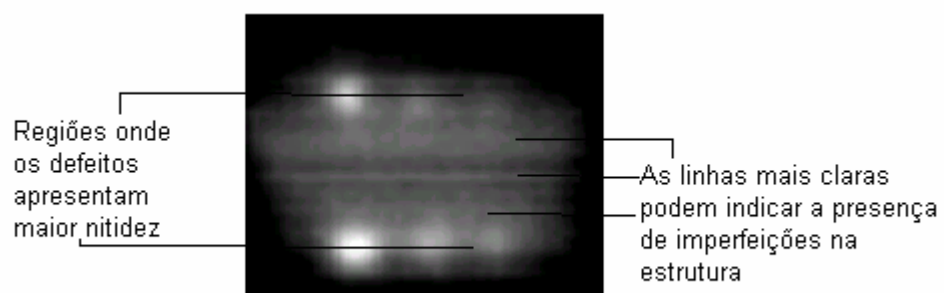


Figura 4. A presença dos vazios é detectada na figura, pela presença das linhas mais claras

5 CONCLUSÃO

Ao se fazer uso da aplicação da termografia passiva, como é mais usual na maioria das indústrias, deve-se levar em conta as limitações da técnica e, principalmente, se conhecer previamente as características físicas e térmicas do objeto em estudo. Essa metodologia permite, apenas, a identificação de elementos estruturais que apresentem consideráveis diferenças de temperaturas com elementos vizinhos, ou seja, é possível distinguir, apenas, superfícies que apresentam diferenças significativas nos valores de suas propriedades térmicas, especialmente diferenças no valor do coeficiente de condutividade térmica, k . Como o acontecido entre o material da tubulação e os tijolos.

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, reflexos de radiação, entre outras. Quando da implementação da técnica ativa, na sua versão pulsada, foi possível identificar as falhas internas. Quando essas se encontravam mais superficiais, e a distância entre o sistema de medição e o mesurando foi menor, falhas de até 10mm de aresta e 2mm de espessura foram corretamente identificáveis, ou seja, a diferença de temperatura entre a área íntegra e com presença de falha foi maior que a incerteza de medição. Para maiores distâncias entre o sistema de medição e o mesurando os resultados foram considerados suspeitos.

Ao se implantar um programa de inspeções termográficas, deve-se considerar o custo do equipamento infravermelho, dos programas aplicativos e da formação de operadores, ou seja, para que os resultados de um programa de termografia sejam compensadores, as inspeções devem fazer parte de um ciclo que permita o máximo de aproveitamento do tempo empregado e das informações coletadas, não só para a correção das anormalidades detectadas, mas também para o aperfeiçoamento da aplicação da técnica, como para melhoria dos processos e equipamentos. A distância entre o mesurando e o sistema de medição maximiza os efeitos da transmitância do meio sobre os resultados. Desta forma, a máxima distância a ser implementada também deve ser tal que os efeitos da transmitância do meio sejam mínimos.

6 REFERÊNCIAS

- 1 Dowling, M. J., Kinsella, T. E., Bartels, K. A., Light, G. M., 1998, "Radiographic image processing for industrial applications", Proceedings of SPIE, vol. 3396.
- 2 Titman, D. J., "Applications of thermography in non-destructive testing of structures", NDT&E Internacional, vol. 34, pp. 149-154, 2001.
- 3 Chrzanowski, K., "Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 Standards", 2001, Proceedings of SPIE, vol. 4360, pp. 387-401.
- 4 Chrzanowski, K., Fischer, J., Matyszekiel, R., "Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement", 2000, Journal of Optical Engineering vol. 39, no 9, pp. 2535-2544.
- 5 Adams, A. K., Gill, A. S., Ek, J. R., Nelson, R. A., 1998, "Contribution of conduction to total infant energy expenditure", Journal of Thermal Biology, vol. 23, pp. 267-272.
- 6 Talwar, D. N., Jogai, B., Loehr, J. P., "Novel type II strained layer superlattices for long wavelength infrared detectors", 1998, Mater Science Engineering, vol. B51, pp. 12-17.
- 7 Can, M., "Simultaneous convective heat and mass transfer in impingement ink drying", 1998, International Comm Heat Mass Transfer, vol. 25, n^o 6, pp. 863-874.
- 8 Luong, M. P., "Infrared thermographic scanning of fatigue in metals", 1995, Nuclear Engineering and Design, vol. 158, pp. 363-376.
- 9 Andrade, R. M., "Tecniche di misura non invasiva per il controllo di processo e di qualità nella produzione ceramica", 1999, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Ancona.
- 10 Maldague Xavier. " Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation".(NTD&E *International*.1996)
- 11 Maldague, X., "Applications of infrared thermography in non destructive evaluation", 2000, Trends in Optical Nondestructive Testing (invited chapter), Pramod Rastogi Ed., pp. 591- 609.
- 12 Maldague, X., Marinetti, S., "Advances in pulse phase infrared thermography", 2002, Infrared Physics & Technology, vol. 43, pp. 175-181.
- 13 Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2003, "Fundamentals of heat and mass transfer", Fifth edidtion, John Wiley & Sons, Inc., New York.