

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA A APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA EM ENSAIOS TÉRMICO NÃO DESTRUTIVOS

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

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

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

Resumo. O desenvolvimento das ciências térmicas, atrelado à opinião comum de que o campo de temperatura contém, por si só, uma enorme gama de informações, tem permitido que técnicas de medição de temperatura sem contato sejam enfaticamente discutidas nas publicações atuais. Apesar disto e das indiscutíveis vantagens apresentadas pela técnica, como o caráter não invasivo e não destrutivo, a facilidade de operação, a alta velocidade de medição e obtenção de respostas, além da possibilidade de utilização sobre objetos em movimento, pouca atenção tem sido dada às metodologias para a sua implementação. Tal situação tem gerado resultados, muitas vezes, mais qualitativos do que propriamente quantitativos e levado a constantes alarmes falsos de irregularidades, subjugando a técnica ao conhecimento do usuário sobre o objeto em análise. Aumentar a confiabilidade das respostas obtidas e vencer a incredibilidade do setor científico na capacidade da termografia em diagnosticar e localizar corretamente anomalias em estruturas e processos passa, necessariamente, pelo conhecimento das limitações impostas pela própria característica da técnica e, sobretudo, pela determinação de uma metodologia de implementação que respeite tais limitações. Neste trabalho é sugerida uma metodologia experimental para a aplicação da termografia nos ensaios não destrutivos. Resultados de medições em amostras de características conhecidas, quando da utilização da metodologia sugerida, serão apresentados e discutidos.

Palavras chave: ensaio térmico não destrutivo, metodologias experimentais

1. Introdução

O Ensaio Térmico Não Destrutivo, NDTE, é um método de diagnóstica que permite identificar anomalias em processos e no funcionamento de equipamentos, bem como caracterizar materiais, quantificar e qualificar defeitos internos em estruturas, baseado na análise temporal do campo de temperatura superficial do objeto em questão (Chrzanowski et al., 2001). A medição do campo de temperatura superficial é feita através da termografia, que é uma técnica que utiliza um sistema de aquisição e processamento de imagem térmica. Este sistema é composto por uma termocâmera que captura a imagem resultante da radiação infravermelha emitida pelo objeto e por um software de análise de imagem, que correlaciona o nível de intensidade da imagem digital com o campo de temperatura superficial, (Clark et al., 2000; Balaras et al., 2002; Tavares et al., 2003).

As principais vantagens do uso da termografia no NDTE são relacionadas a grande sensibilidade e facilidade de operação das termocâmeras modernas, alta velocidade de medição e obtenção de respostas, grande versatilidade no processamento das imagens térmicas ou termogramas, possibilidade de utilização para objetos em movimento e acesso a informações de regiões fechadas ou de risco (Chrzanowski et al., 2001). O caráter não destrutivo e não intrusivo tem permitido uma expansão da aplicação do NDTE em programas de manutenção preditiva nas plantas industriais.

As dificuldades do emprego da termografia para diagnóstica, através do método NDTE, estão associadas ao conhecimento limitado dos valores das propriedades termofísicas de materiais e das propriedades óticas de superfícies, a grande dispersão das ondas térmicas nos meios sólidos, a dificuldade em se depositar uma grande quantidade de energia, de maneira uniforme, sobre a superfície do objeto em análise, em um curto espaço de tempo, a interferência das perdas de calor sobre o contraste das imagens e a limitação na detecção de defeitos em regiões profundas da estrutura, (Maldague, 2000, Titman, 2001).

Estudos publicados na Maintenance Technology Magazine (Sanor, 2001), levantaram a real viabilidade de implementação do NDTE na indústria. Segundo a revista, existe uma relação custo/benefício da razão de 1:4 no uso da NDTE 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.

Em contraposição às vantagens da aplicação do método e da ótima relação custo/benefício, pouca atenção tem sido dada às metodologias para a sua implementação. Tal situação que têm gerado resultados, muitas vezes, mais qualitativos do que propriamente quantitativos e levado a constantes alarmes falsos de irregularidades, subjugando o uso do método ao conhecimento do usuário sobre o objeto em análise. Além disto, relatos dos usuários têm revelado o desconhecimento das limitações do método, bem como das possibilidades de excitação térmica que levariam a otimização dos resultados apresentados e ampliação do campo aplicativo.

Aumentar a confiabilidade dos resultados de medição do campo de temperatura superficial através da termografia permitirá ao NDTE diagnosticar e localizar corretamente anomalias em estruturas e processos. Este aumento passa, necessariamente, pelo aprofundamento no conhecimento das limitações impostas pelas próprias características do método e, sobretudo, pela determinação de uma metodologia de implementação que respeite tais limitações.

Neste trabalho será apresentada e discutida uma metodologia experimental para a aplicação da termografia na medição do campo de temperatura superficial para diagnóstica através do método NDTE. Resultados de diagnóstica em amostras de características conhecidas serão apresentados e discutidos.

2. Termografia infravermelha aplicada ao NDTE

Para aumentar a confiabilidade dos resultados de medição do campo de temperatura superficial através da termografia, é necessária uma análise de incerteza do procedimento de medição e o confronto do resultado desta análise com a tolerância do tipo de não conformidade, permitindo, desta forma, gerar resultados mais consistente do diagnóstico.

A análise de incerteza deve considerar as incertezas intrínsecas da termocâmara e as resultantes de fatores externos, além das incertezas inerentes a análise da imagem digital. Neste sentido, alguns trabalhos têm indicado metodologias para determinação da incerteza devido a fatores internos (ou intrínsecos) e externos (ou de medição) (Chrzanowski, 1996, 2001, Chrzanowski et al., 2000), porém, com resultados ainda inconclusivos. Uma importante revisão sobre análise de incerteza em termografia pode ser encontrada em Tavares et al. (2003).

Uma atenção especial, na análise de incerteza, deve ser dirigida a determinação da emissividade da superfície testada, uma das fontes de incerteza que pode alterar, de forma significativa, os resultados de medição. Condições de contorno não controláveis, representadas, sobretudo, por perdas térmicas para o ambiente, temperatura e transmissividade do meio podem influenciar os resultados da medição, incorrendo em dificuldades de formação dos termogramas. Além disto, a espessura do objeto pode representar uma barreira à obtenção de respostas, em casos em que a análise ocorrer em seções muito profundas do corpo. Neste caso, deve-se redefinir as metodologias de implementação, sobretudo do ponto de vista da excitação térmica (Maldague et al., 1996).

Do ponto de vista da excitação térmica, duas técnicas podem se aplicadas no NDTE: termografia passiva e termografia ativa.

2.1 Termografia 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 NDTE 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. O mesmo ocorre em aplicações médicas, onde o método passivo é o único empregado. Na maioria dos casos, os resultados fornecidos a partir da implementação da metodologia passiva sofrem limitações associadas às características qualitativas do resultado obtido, necessitando-se de um conhecimento prévio por parte do operador a fim de identificar possíveis problemas.

Segundo Maldague et al. (1996), 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 uma modelagem matemática, fornece condições à uma análise mais sofisticada da situação física, levando a resultados quantitativo, em substituição aos de caráter meramente qualitativos obtidos na maioria dos casos.

Neste estudo, aplicou-se, inicialmente, a termografia passiva, utilizando como fonte de excitação térmica o aquecimento natural provocado pelo sol. Devido às condições climáticas presentes durante os procedimentos experimentais, as condições de contorno naturais não foram suficientes para provocar um diferencial de temperatura apropriado na amostra nas seções onde estavam presentes as falhas, em relação às seções integras, dentro da faixa de sensibilidade da termocâmara utilizada. Uma vez que as amostras não tinham restrições quanto à temperatura, optou-se por implementar a metodologia ativa, através do aquecimento artificial da amostras.

2.2. Termografia Ativa

Na termografia ativa faz-se necessário um estímulo térmico que seja 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 et al., 2002). A escolha do tipo de estímulo térmico depende não só das características da superfície a ser testada, bem como do tipo de informação requerida.

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

2.2.1. Termografia Pulsada (PT)

A termografia pulsada, PT, consiste na estimulação térmica de um objeto por um pulso de energia, que poderá ser produzido por lâmpadas, flashes, feixes de laser, jatos ar ou de água, e o monitoramento da variação da temperatura durante o transiente de aquecimento ou resfriamento.

Após a excitação térmica apropriada do objeto, a temperatura superficial do material muda rapidamente devido à frente térmica que se propaga, por difusão, sob a superfície, e também devido às perdas de calor por condução e convecção. Essa variação é, então, medida pela termografia. Imperfeições na estrutura provocam uma redução na taxa de difusão, de acordo com a equação de Fourier, de modo que, observando-se a temperatura da superfície, as falhas podem ser identificadas, pela diferença de temperatura, que mantêm com regiões vizinhas íntegras (Maldague et al., 2002).

A evolução do fenômeno poderá ser acompanhada a partir da observação de uma seqüência de termogramas, que serão posteriormente processados, fornecendo informações sobre dimensão, profundidade e resistência térmica do defeito. A visualização do defeito depende de uma série de parâmetros como da distância da superfície em teste à fonte térmica, da velocidade dos pulsos, do tempo de exposição à fonte de excitação (que poderá ser da ordem de μ s, ms ou até mesmo segundos, dependendo da espessura do material e de suas propriedades térmicas, em especial o coeficiente de condução) e, no caso da utilização de lâmpadas, do número de passagens das mesmas sobre a superfície (Maldague et al., 2002).

Trabalhos como os de Maldague et al. (1996, 2002) tem demonstrado que os resultados obtidos pela aplicação da PT podem ser afetados pela variação da emissividade da superfície e também por aquecimentos não uniformes, o que, conseqüentemente, leva a distorções na avaliação dos defeitos. Portanto, o conhecimento prévio da emissividade e o controle do aquecimento uniforme da superfície do corpo devem representar uma preocupação para o usuário.

2.2.2. Termografia Modulada (MT)

Na Termografia Modulada, utiliza-se um gerador de sinais elétricos não lineares, ou um feixe de laser modulado, enquanto uma termocâmera registra o campo oscilante de temperatura resultante, ou seja, a espécie é submetida a uma onda térmica senoidal, em regime permanente, sendo a resposta ao estímulo também senoidal, com amplitude e ângulo de fase dependentes da frequência de entrada. A equação da onda térmica utilizada é dada pela Eq. (1):

$$T(t, z) \cong T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (1)$$

onde a temperatura, T , medida é função da espessura da amostra, z , e do tempo, t , sendo λ o comprimento de onda, μ , o comprimento da difusão térmica e ω a frequência de modulação.

O comprimento da difusão térmica pode ser calculado através da Eq. (2):

$$\mu \equiv \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (2)$$

onde α é a difusividade térmica e f a frequência da onda.

A Equação (2) sugere uma forte dependência entre o comprimento de difusividade, ou seja, o comprimento de penetração das ondas térmicas sinoidais, e as propriedades do material (calor específico, capacidade térmica e massa específica), ou seja, a magnitude da imagem é proporcional as características da amostra. Desta forma, para várias profundidades o amortecimento da onda revela as condições da amostra.

Nesse tipo de análise, o sistema coleta uma série de imagens e compara cada uma das temperaturas medidas com o padrão de onda senoidal para cada um dos pontos mostrados, dependendo ainda do ciclo da onda. Ainda pela análise da Eq. (2), nota-se que quanto mais lenta for a onda (maiores frequências), mais profunda será a penetração.

A aplicação da MT possibilita a obtenção de informações sobre dimensão, profundidade e resistência térmica que podem ser arquivadas, sem grandes problemas, para processamentos posteriores. Além disso, ela requer baixíssimos diferenciais de temperatura, o que minimiza a possibilidade de danos em objetos sensíveis. Permite ainda uma melhor resolução de profundidade, que se ajusta pela frequência de modulação e altas velocidades de resposta. Outra vantagem da MT é a sua baixa sensibilidade ao aquecimento uniforme, além da possibilidade de inspeção de áreas mais amplas

(logicamente, se a resolução espacial da termocâmara o permitir) e a detecção de defeitos de menores proporções, sendo esse método também menos sensível às variações da emissividade da superfície testada.

As desvantagens dessa metodologia estão relacionadas à dificuldade nos ajustes de modulação da frequência além de que, em frequências altas, restringe-se a utilização a regiões mais superficiais da amostra.

2.2.3. Termografia Pulsada por Fase (PPT)

A PPT combina as vantagens da PT e MT (Calormagno et al., 2002 e Maldague et al., 1996). Enquanto na MT uma simples frequência é testada em regime permanente, na PT um pulso quadrado, em regime transiente, é utilizado ao invés de um pulso ideal de Dirac. Desta forma ondas de calor de diversas frequências e amplitudes não constantes são lançadas sobre o material. Na PPT o pulso utilizado é como na PT, porém devido à aplicação da transformada de Fourier, os resultados são apresentados em termos não só da amplitude e frequência, mas também da fase, como na MT (Calormagno et al., 2002; Maldague et al., 1996, 1998 e 2002)

A transformada da função de Fourier pode ser expressa através da Eq. (3):

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{N=0}^{N-1} h(x) \exp[-j2\pi ux / N] = \text{Re}(u) + j \text{Im}(u) \quad (3)$$

onde $\text{Re}(u)$ e $\text{Im}(u)$ são, respectivamente, a parte real e imaginária da transformada de Fourier do sinal de temperatura $h(x)$, obtido pela termocâmara, para cada pixel no campo de visão.

A fase pode ser calculada para cada termo da transformada através da Eq. (4):

$$\phi(u) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Im}(u)}{\text{Re}(u)} \right) \quad (4)$$

Já a amplitude pode ser obtida através da Eq. (5):

$$A(u) = \sqrt{\text{Re}(u)^2 + \text{Im}(u)^2} \quad (5)$$

A utilização da transformada de Fourier, para a análise da amplitude e do ângulo de fase, permite identificar defeitos localizados em profundidades maiores do que aqueles identificáveis pela MT, com uma velocidade de resposta bem menor, como na PT. Porém, grandes diferenciais de temperatura são necessários, o que limita a aplicação da técnica a situações em que o objeto sob análise não sofra restrições quanto a este fator (Maldague et al., 1996; Meinlschmidt, 1998). A técnica PPT exige, também, o conhecimento prévio sobre análise e tratamento de imagem (Maldague et al., 1996).

3. Procedimento experimental

Os ensaios experimentais foram realizados entre os dias 19 e 23 de Janeiro de 2004 nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. A escolha deste período do ano nasceu da necessidade, a priori, de se otimizar os resultados dos testes, na medida que às condições climáticas típicas de verão favorecem 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.

Para a realização dos testes experimentais, foi projetada e construída uma parede de alvenaria, com dimensão 350mmx300mmx200mm, recoberta com reboco (mistura de cimento e areia). Foram simuladas falhas internas através da inclusão de material com propriedades termofísicas diferentes em relação ao material de base. Para isto foram utilizadas pequenas placas de isopor, de diversas dimensões, dispostas conforme croqui apresentado na Fig. 1.

As placas de isopor foram introduzidas entre a primeira camada de reboco, de 2mm de espessura, e uma segunda camada de reboco. A dimensão e o posicionamento das placas de isopor na amostra possibilitou analisar a capacidade do NDTE em identificar falhas de diversas dimensões e profundidades. A superfície da parede foi recoberta por uma fina camada de tinta preta.

A temperatura da parede foi também monitorada através de termopares tipo K, disponível para o experimento e instalados ao longo da superfície da mesma. Os valores obtidos pelos termopares, observada a sua incerteza, foram utilizados para o ajuste da emissividade da superfície. Uma alternativa a este procedimento é o recobrimento da superfície da amostra por material com emissividade perfeitamente conhecida. Neste estudo, a emissividade da

superfície considerada foi de 0,95. Este valor encontra-se dentro da faixa indicada pelo fabricante da tinta preta utilizada para recobrir a amostra, que é de $0,85 \pm 0,10$.

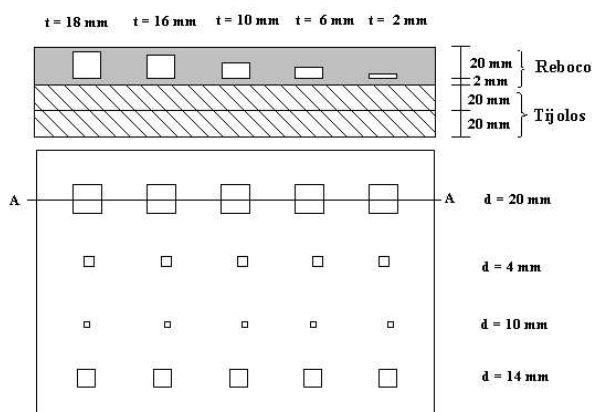


Fig. 1 - Amostra construída para simulação de falhas em uma parede de alvenaria.

A temperatura do meio, durante os ensaios, foi de $26,5^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$, 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.

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. Tal repetição visou a reprodutibilidade do procedimento de medição.

Porém, condições climáticas desfavoráveis não permitiram a utilização da termografia passiva, com uso de condições de contorno naturais na realização dos ensaios. Para resolver este problema optou-se pela termografia pulsada, com aquecimento artificial da superfície da parede através de um aquecedor elétrico com potência de 2,8 kW, instalado em regiões bem próximas à superfície em análise. O tempo de aquecimento adotado foi de 1 minuto, para permitir um aquecimento uniforme da seção sob observação. Este tempo de aquecimento foi definido experimentalmente em termos da saturação da imagem, uma vez que as imagens foram tomadas em intervalos de tempos iguais durante o período de resfriamento da seção.

A termocâmara usada nesse estudo foi a do tipo Cyclops TI35+ Thermal Imager, cujas especificações são apresentadas na Tab. 1

Tabela 1 - Características da termocâmara Cyclops TI35+ utilizada no experimento

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Frequência 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 à diferença de temperatura (para 30°C no corpo negro)	$0,5^{\circ}\text{C}$
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 - 3,9 μm ; 'H' Range - 3,9 μm .

Durante todo o ensaio a termocâmara foi disposta a uma distância de 2,10m da superfície da amostra, 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.

A metodologia utilizada para realização da diagnóstica por NDTE, em resumo, foi:

1) Escolha da metodologia de excitação térmica, observada as características do objeto sob análise e restrições quanto ao aquecimento da superfície. As respostas desejadas devem também estar de acordo com as limitações e características da técnica. Em equipamentos com geração própria de calor, na maioria das vezes, nenhuma excitação adicional é necessária.

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. Porém, deve-se observar que o verão brasileiro é caracterizado por alta nebulosidade, fator prejudicial aos ensaios quando

utilizada termografia passiva. Por outro lado, a menor incidência de raios solares durante o inverno pode ser, em parte, compensada pela baixa incidência de nuvens. 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, preferencialmente, na direção leste-oeste, afim 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. No caso de diagnóstica em obras de arte antigas pode-se utilizar outras técnicas não destrutivas para determinar as características do material ou mesmo registros históricos que permitam avaliar a técnica de execução utilizada pelos artistas da época. 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. Uma das maneiras de determinar a emissividade da amostra é através da medição da temperatura superficial utilizando uma técnica por contato de menor incerteza. Ajusta-se, então, a emissividade na termocâmara para indicar a mesma temperatura. Uma alternativa a este procedimento, em amostra que permitem este procedimento, é o recobrimento da superfície da amostra por material de emissividade conhecida.

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

A Figura 2 representa o resfriamento da amostra. Os tempos indicados referem-se ao período decorrido após a retirada da fonte térmica, nas quais as imagens foram feitas.

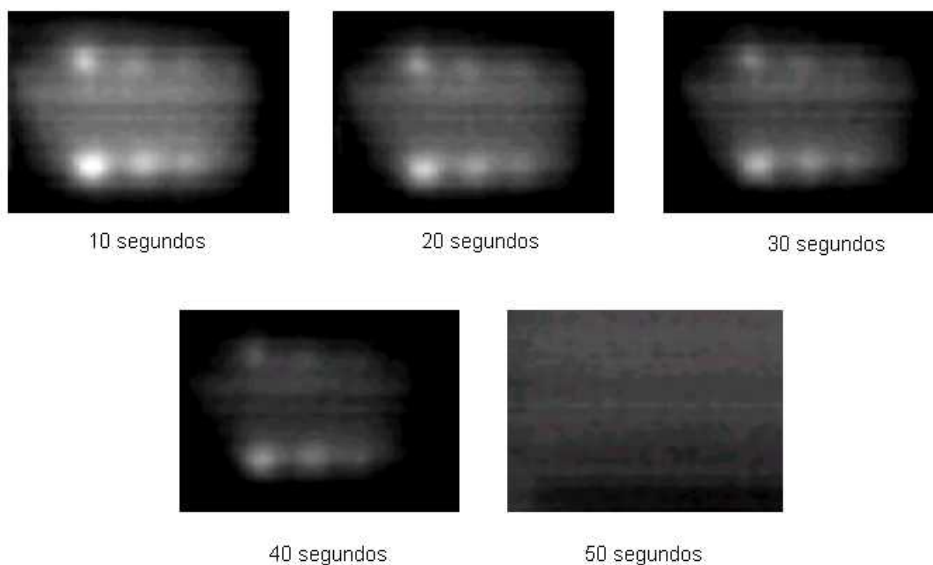


Figura 2. Imagens termográficas da amostra

A técnica foi capaz de identificar a presença das amostras de dimensões maiores e mais superficiais. Quando as falhas apresentavam-se mais profundas ou possuíam dimensões menores, apesar da técnica ter sido capaz de identificar a presença de alguns pontos de temperatura mais alta, caracterizada pela maior intensidade na escala de cinza (região branca da imagem), não foi possível associar, com segurança, estes pontos às falhas internas. Decorridos 50 segundos da retirada da fonte térmica, perdeu-se o contraste que permitia a identificação das falhas. Isto ocorre devido à difusão das ondas térmicas para o interior do material e dissipação para o ambiente.

A incerteza de medição expandida para 95%, determinada segundo metodologia indicada em Tavares et al.(2003) e Chrzanowski et al. (2000) foi de 2,6°C

Faz-se necessário a utilização de programas de tratamento de imagem mais adequados do que aquele disponibilizado, para a identificação das falhas de menores dimensões e localizadas em pontos mais profundos da amostra. Com certeza, a utilização de técnicas de excitação mais apropriadas para este caso (como a PPT) também melhorariam os resultados.

5. Conclusão

Devido às suas inúmeras vantagens e aplicações, o método NDTE, utilizando a termografia para medição do campo transiente de temperatura superficial, é hoje uma das mais emergentes entre os métodos de ensaios não destrutivos.

Dentre as diversas técnicas de excitação térmica ativa, a mais tradicional é a PT, que fornece, através do processamento do sinal, informações sobre a existência, dimensão e profundidade dos defeitos internos em estruturas. Os resultados são afetados, fortemente, pela emissividade da superfície e pelo aquecimento não uniforme da superfície do objeto sob análise, levando à identificação de falhas internas inexistentes na estruturas. Recomenda-se a sua utilização para os casos mais simples, onde a profundidade da falha não é o fator mais importante, uma vez que a sua avaliação é bastante complicada. Por outro lado, as vantagens na sua aplicação estão na facilidade de implementação e da sua rapidez de resposta.

Na MT, as informações sobre existência, dimensão e profundidade dos defeitos são obtidas sem problemas de pós-processamento. Além disto, devido a sua insensibilidade ao aquecimento uniforme e à variação da emissividade da superfície, torna-se uma técnica atraente. Aliado a esta situação, existe ainda a necessidade de apenas pequenos diferenciais de temperatura na sua implementação, o que, no caso de obras de arte, diminui a possibilidade de danos. A desvantagem é o elevado tempo de aquisição de dados além de que, algumas vezes, a faixa de indicações de frequências utilizadas na modulação do fluxo de calor não é suficiente para detectar defeitos mais profundos.

A PPT combina as vantagens da PT e da MT. A superfície é aquecida de acordo com a PT e os resultados apresentados em termos da fase da imagem. Porém, a PPT ainda apresenta algumas limitações. A mais importante é a necessidade de incremento na temperatura da superfície do objeto que não pode ser tão baixo como no caso da MT. Isto porque, na PPT, cada frequência é testada em regime transiente e um certo diferencial de temperatura é necessário entre duas imagens subseqüentes.

A partir da realização de ensaios, sugere-se uma metodologia para realização de diagnóstica por NDTE.

A implementação desta metodologia foi capaz de identificar falhas internas de maiores dimensões e mais superficiais. Porém, para uma identificação mais positiva das falhas profundas e de dimensões menores, outra técnica de excitação térmica deverá ser empregada, assim como um melhor programa de tratamento de imagem.

A incerteza de medição expandida para 95% foi de 2,6°C.

Progressos fundamentais no sentido de racionalizar a utilização da termografia nos NDTE, com diminuição de incertezas, somente poderão ser sentidos quando da ampliação dos estudos que apresentem resultados mais consistentes do que aqueles até agora descritos, o que, necessariamente, passa também pela adequação dos fabricantes aos conceitos de incerteza.

6. Agradecimentos:

Os autores agradecem ao Laboratório Kelvin, da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, pelo apoio na realização dos ensaios experimentais.

7. Referências

- Balaras, C. A., Argiriou, A. A., 2002, "Infrared thermography for building diagnostics", *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 171-183.
- Carlomagno, G. M., Meola, C., 2002, "Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT", *NDT&E International*, vol. 35, pp. 559-565
- Chrzanowski, K., 1996, "Influence of measurement conditions and system parameters on accuracy of remote temperature measurement with dualspectral IR systems", *Infrared Physics & Technology*, vol. 37, pp. 295-306.
- Chrzanowski, K., 2001, "Non-contact thermometry – measurement errors", *Research & Development Treatises*, vol. 7, Polish Chapter of SPIE, Warsaw.
- Chrzanowski, K., Fischer J., Matyszkiew R., 2000, "Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement", *Journal of Optical Engineering* vol. 39, no 9, pp. 2535-2544.
- Chrzanowski, K., S. N. Park, 2001, "Evaluation of thermal cameras for non-destructive thermal testing applications", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 42, pp. 101-105.
- Clark M. R., McCann, D.M, Forde, M. C., 2000, " Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges", *NTD&E International* Vol.36 , pp. 265-275.

- Meinlschmidt P., Bothe, T., Hinsch K., Mehlhorn L., 1998, "Nondestructive testing and evaluation of historical monuments using thermography and electronic speckle pattern interferometry (ESPI)", Proceedings of SPIE, vol. 3396.
- Maldague, X., 2000, "Applications of Infrared Thermography in Non Destructive Evaluation", Trends in Optical Nondestructive Testing (invited chapter), Pramod Rastogi, Editor, pp. 591- 609.
- Maldague X., and Marinetti S., 1996, "Pulse Phase Infrared Thermography", Journal of Applied Physics, Vol. 79, pp. 2694-2698.
- Maldague, X., Largouët, Y. J. Couturie, 1998, "A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments" Ver. Gén. Therm, vol. 37, pp. 704-717
- Maldague X., and Marinetti S., 2002, "Advances in Pulse Phase Infrared Thermography", Infrared Physics & Technology, Vol. 43, pp. 175-181.
- Sanor, S., 2000, "Cost/Benefit Analysis of Infrared Programs", www.mt-online.com/current/0601.Infrared.html.
- 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.
- Titman, D. J., 2001, "Applications of Thermography in Non-Destructive Testing of Structures", NDT&E Internacional, vol. 34, pp. 149-154.

EXPERIMENTAL METHODOLOGY FOR THE THERMOGRAPHY APPLICATION IN NON DESTRUCTIVE THERMAL EVALUATION

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

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

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

Abstract

The development of the thermal sciences, harnessed to the common opinion that the temperature field contains, by itself, an enormous range of information, it has been allowing that non contact temperature measurement techniques are discussed emphatically in the current publications. In spite of this and of the unquestionable advantages presented by the technique, as the non invasive and non destructive character, the operation easiness, the high speed of measurement and answers obtaining, besides the possibility of use on objects in movement, little attention has been given to the methodologies for its implementation. Such situation has been generating results, many times, more qualitative than properly quantitative and taken to constants false alarms of irregularities, subduing the technique to the user's knowledge about the object under analysis. To increase the reliability of the obtained answers and to win the incredibility of the scientific section in the thermography capacity in to diagnose and to locate anomalies correctly in structures and processes raisin, necessarily, for the knowledge of the limitations imposed by the technique own characteristic and, above all, for the determination of an implementation methodology that respects such limitations. In this work will be suggested an experimental methodology for the thermography application in non destructive testing. Results of measurements in samples of known characteristics, when of the use of the suggested methodology, they will be presented and discussed.

Keywords: non destructive thermal testing, experimental methodologies