

Levantamento do erro experimental relativo aos parâmetros ambientais de uma câmera de infravermelho na gravação do resfriamento de amostras de gesso

Experimental error assessment regarding the environmental parameters of infrared camera recording in the plaster samples cooling



Submetido em 21.05.15 | Aceito em 31.08.15 | Disponível on-line em 20.09.17

Renata Nunes Tavares da Silva ^{*}, **Alcides Luiz dos Anjos Hora**, **Fábio Santana Magnani**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco | ^{*}renatanunes@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

A termografia por infravermelho é uma técnica de ensaio não-destrutivo onde se obtém imagens térmicas de objetos, sejam eles equipamentos ou pessoas. Os termogramas resultantes dessa técnica podem ser utilizados em análises qualitativas e quantitativas. Nestas é fundamental o conhecimento da ordem de grandeza dos erros envolvidos no processo de medição. O objetivo principal deste trabalho é quantificar o erro experimental relativos aos parâmetros ambientais do experimento que podem estar presentes no registro termográfico de temperaturas. A metodologia consiste em registrar o resfriamento natural de duas amostras de gesso utilizando-se uma câmera de infravermelho. As informações das temperaturas superficiais dessas amostras são processadas em função da temperatura média, que representam a distribuição de temperatura superficial. Três experimentos foram realizados com cada uma das amostras para que fossem calculados os desvios padrões. Os valores de erro ficaram abaixo do estabelecido pelo fabricante da câmera de infravermelho. Fato que mostra a importância do estudo dos erros envolvidos no processo de medição quando as informações dos termogramas forem utilizadas em análises quantitativas.

Palavras-chaves: erro experimental, parâmetros ambientais, termografia por infravermelho.

ABSTRACT

Infrared thermography is a non-destructive testing technique where thermal images are made of objects, equipment or people. The thermograms resulting from this technique can be used in qualitative and quantitative analyzes. These knowledge of the order of magnitude of the errors involved in the measurement process is important. The main objective of this study is to quantify the experimental error regarding the environmental parameters of the experiment that may be present in the thermographic temperature record. The methodology consists in registering the natural cooling two gypsum samples using an infrared camera. The information of the surface temperatures of these samples are processed on the basis of mean temperature, representing the distribution of surface temperature. Three experiments were performed for each sample and the standard deviations were calculated. The error were lower than established by the manufacturer of the infrared camera. This fact shows the importance of studying the errors involved in the measurement process when information of thermograms are used in quantitative analysis..

Keywords: environmental parameters, experimental error, infrared thermography.

1. Introdução

A termografia como técnica não destrutiva era inicialmente utilizada de forma qualitativa para fins militares na detecção de pessoas. Atualmente são diversas as áreas de pesquisa como a engenharia, a saúde, construção civil, entre outras, que a utilizam tanto qualitativa quanto quantitativamente.

Pode ser considerada uma técnica com relativa baixa precisão ($+2^{\circ}\text{C}$), quando comparada aos termopares ($+0,1^{\circ}\text{C}$), por exemplo. No entanto, diferentemente destes, possui uma quantidade muito maior de pontos de temperatura que podem ser medidos simultaneamente. Essa característica permite analisar de forma rápida e prática a distribuição superficial de temperatura de qualquer objeto, equipamento ou pessoa.

Apesar da praticidade, muito destes estudos ficam limitados a informações qualitativas do objeto, devido a essa baixa precisão. Assim, estas análises auxiliam principalmente na identificação de perturbações térmicas causadas por sobrecorrente em circuitos elétricos, baixa isolação térmica de um forno industrial, atrito gerado por uma falha de um componente rotativo, entre outros.

As análises quantitativas são possíveis devido à quantidade de pontos (na ordem dos milhares) de temperaturas medidos simultaneamente. Este tipo de análise também tem sido utilizada na estimativa de parâmetros termofísicos e geométricos. Diferentemente da análise qualitativa, ela necessita de informações mais precisas sobre as características térmicas e superficiais dos objetos, do ambiente ao seu redor, e de fontes de calor próximas a estes. De maneira geral, podemos estimar um parâmetro termofísico a partir da comparação de um fenômeno físico simulado por um modelo matemático teórico *versus* os dados

experimentais deste mesmo fenômeno que podem ser obtidos a partir de imagens termográficas.

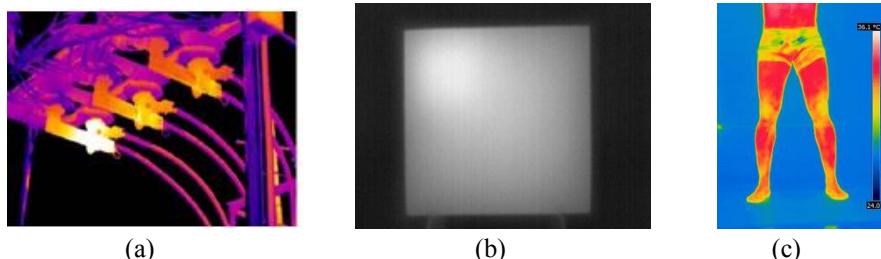
Na indústria, estas aplicações economizam tempo e dinheiro a partir da detecção de problemas em potencial, evitando falhas de equipamentos ou elementos. Huda e Taib (2013) apresentaram uma aplicação da câmera termográfica na manutenção preventiva e preditiva em equipamentos elétricos como forma de antecipar falhas. Esta informação foi importante para auxiliar o aumento de produção, redução de manutenção em reparos desnecessários, prevenção de falhas eventuais e redução no custo de manutenção do equipamento.

Na construção civil, Balaras e Argirou (2002) utilizaram a imagem termográfica para avaliar perdas de energia e riscos de falha em potencial. O objeto de estudo foi um prédio em operação. Seu objetivo foi compreender melhor a influência das instalações de ventilação e ar condicionado, bem como as instalações mecânicas e elétricas nesta avaliação. A câmera termográfica foi apresentada como uma ferramenta não invasiva de excelente custo-benefício para avaliação de estruturas civis.

A termografia ativa é caracterizada pela introdução sistemática de calor para avaliação de um determinado objeto. Geralmente esta técnica de inspeção é utilizada para detecção de impurezas, falhas, vazios e delaminações na integridade estrutural. Também auxilia na área da saúde na prevenção de doenças como o câncer (ARAÚJO et al., 2006). A Figura 1 apresenta três exemplos de inspeção termográfica, sendo a 1(a) a detecção de falha de um componente da rede de transmissão elétrica; a 1(b) a detecção de uma inclusão em placa de gesso após ser aquecida em estufa; e 1(c) a variação de temperatura do corpo de um jogador após treino físico. Em todas as três imagens a cor mais clara

representa a temperatura mais alta, e as cores

Figura 1. Inspeções termográficas: (a) inspeção de um sistema de energia; (b) resfriamento de amostra de gesso aquecida em estufa; e (c) jogador após treino físico.



Fonte: Land, 2004.

Fatores que influenciam na medição do infravermelho

O processo de medir a temperatura real de um objeto utilizando uma câmera termográfica não é simples, e ainda depende da experiência do operador e das informações térmicas a respeito do material do objeto observado.

Assim como a medição, a análise dos resultados devem ser realizados com atenção, antes e durante os ensaios termográficos, pois se trata de um procedimento complexo que pode conduzir a conclusões erradas, principalmente quando o objetivo desta análise é quantitativo. Para este fim, é necessário avaliar os erros envolvidos na medição (BARREIRA, 2012).

De maneira geral, devemos avaliar os erros devido ao método experimental, ao objeto em estudo, e à calibração do equipamento, pois estes erros aumentam o risco de uma má interpretação na análise das imagens termográficas (MINKINA; DUDZIK, 2009).

Os erros de método podem ser associados aos dados que devem ser inseridos na câmera de infravermelho durante o processo de registro e aquisição das imagens térmicas. São eles: emissividade, distância entre o objeto e a câmera, temperatura refletida, temperatura

mais escuras as temperaturas mais baixas.

Figura 1. Inspeções termográficas: (a) inspeção de um sistema de energia; (b) resfriamento de amostra de gesso aquecida em estufa; e (c) jogador após treino físico.

ambiente, e umidade relativa, conforme orientação do próprio fabricante *Flir Systems*.

A emissividade influencia os resultados de um ensaio termográfico e baseia-se no fato de ser função da temperatura superficial do material, do comprimento de onda da radiação e do ângulo de observação. A partir de intervalos de temperaturas com amplitudes pequenas, pode-se considerar a emissividade constante, desde que o comportamento do corpo seja idêntico ao do corpo cinzento e se o ângulo da medição for perpendicular à superfície ou menor que 40° em relação à sua normal (MINKINA; DUDZIK, 2009; BARREIRA, 2012). Catálogos de emissividades são geralmente fornecidos pelas empresas que comercializam as câmaras termográficas, além dos livros que são referências nesta área da transferência de calor.

Os dados, distância entre o objeto e a câmera, e umidade relativa do ar podem ser interpretados a partir da influência atmosférica. O processo de medição da câmera termográfica envolve a transmissão da radiação infravermelha através da atmosfera. Essa transmissão é afetada pelas características de absorção, dispersão, emissão, e turbulência dos elementos que constituem essa atmosfera. Composta de gases, líquidos e partículas sólidas, é responsável por atenuar e dispersar a radiação infravermelha em

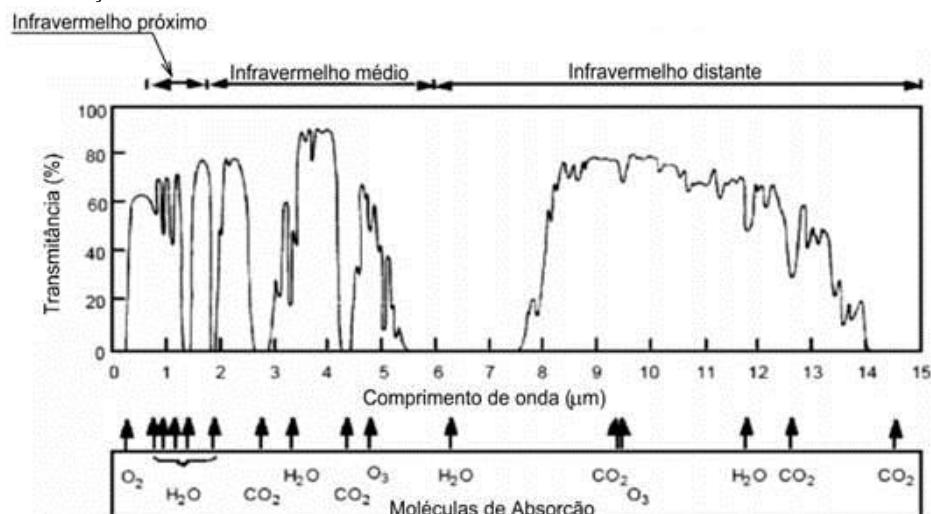
várias direções, e transmitir a outra parcela de radiação incidente emitida pelo objeto, antes de

A atenuação da radiação infravermelha devido à absorção dependerá principalmente do comprimento de onda. Gases como o CO₂ (dióxido de carbono), O₃ (ozônio) e o H₂O (vapor de água), podem causar severas

ser captada pela câmera.

atenuações em determinadas faixas dos comprimentos de onda do infravermelho, limitando a transmissão a comprimentos de ondas específicos, como pode ser visto na Figura 2 (HOLTS, 2000).

Figura 2. Atenuações atmosféricas do infravermelho



Fonte: Adaptado de Willebrand, 2001.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram confeccionadas duas amostras quadradas de gesso de dimensões 10cm x 10cm x 3,5 cm, que foram posteriormente aquecidas e resfriadas para registro termográfico de suas superfícies.

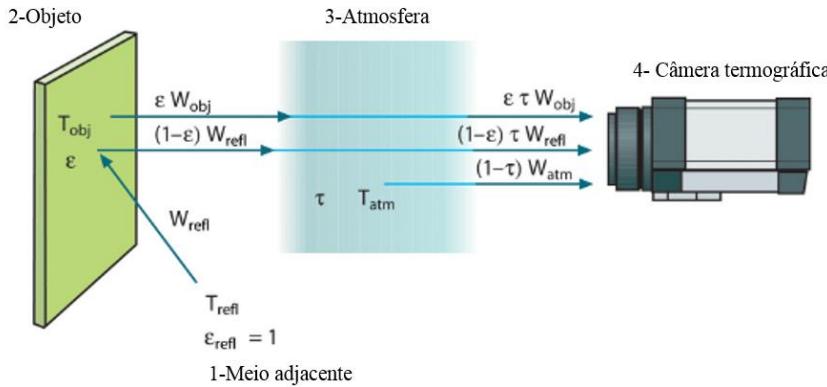
As amostras são confeccionadas a partir da mistura de uma parte (mássica) de água com uma parte (mássica) de pó de gesso. A proporção correta é fator fundamental para se obter o mesmo comportamento de transferência de calor em todas as amostras.

2.2 Método

A termografia é uma técnica capaz de “enxergar” a região do infravermelho, ou seja, a região que não é visível aos nossos olhos. Para os experimentos foi utilizada uma câmera termográfica da FLIR Systems, modelo S45, sistema de microbolômetros de 320 x 240 pixels, frequência de imagens de 50/60 Hz, faixa de temperaturas de -40°C a 1500°C, precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou 2% de leitura, e faixa espectral de 7,5 a 13 μm. A Figura 3 Erro! **Fonte de referência não encontrada.** ilustra o

processo de medição de uma câmera de infravermelho.

Figura 3. Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. (1) Meio adjacente; (2) Objeto; (3) Atmosfera; (4) Câmera termográfica.



Fonte: Adaptado de ThermaCam S45, Manual do Operador, 2005.

Para que a câmera termográfica, Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (4), interprete a distribuição de temperatura de um determinado objeto, Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (2), **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ela não mede somente a radiação emitida pelo objeto, W_{obj} , mas também as radiações: (a) refletida pelo objeto, W_{refl} (Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (1)); e (b) emitida pela atmosfera, W_{atm} , (Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (2), **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (3)). Tanto as radiações do objeto e a refletida do meio adjacente são transmitidas através da atmosfera antes de serem captadas pela câmera.

Os dados de temperatura refletida e temperatura ambiente dizem respeito ao meio adjacente onde está sendo realizada a imagem termográfica, como mostrado na Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Caso não haja fontes intensas de radiação, a influência

destes parâmetros não é tão importante, e a temperatura refletida não precisa ser exata.

2.2.1 Experimentos

As duas amostras foram aquecidas em uma estufa, marca Quimis e modelo Q-317B232, e deixadas para aquecer por um período de 24 horas e depois, uma a uma, foram retiradas para que fosse registrado pela câmera de infravermelho o processo de resfriamento da mesma por convecção natural. A câmera ficou posicionada a uma distância de 40 cm da amostra em análise. De acordo com simulações computacionais realizadas por Da Silva (2007), 4 horas é o tempo necessário para que as amostras estejam com uma temperatura homogênea.

Após o período de 24 horas e com a câmera já configurada a partir dos parâmetros de entrada, cada amostra foi então retirada da estufa, em seu devido tempo, utilizando-se uma luva de raspa de couro. A manipulação entre a retirada e o posicionamento no suporte metálico não durava mais que 15 segundos.

Para determinar os parâmetros temperatura ambiente, temperatura refletida e umidade relativa foi utilizado um termo-higroanemômetro luxímetro digital, modelo THAL-300, da Instrutherm. Em todos os experimentos essas medições eram realizadas imediatamente antes de ser dado início ao registro das imagens termográficas. Após a medição, os dados eram inseridos na câmera e então se iniciava o registro. A emissividade do gesso foi considerada como sendo 0,91 (INCROPERA, 2003).

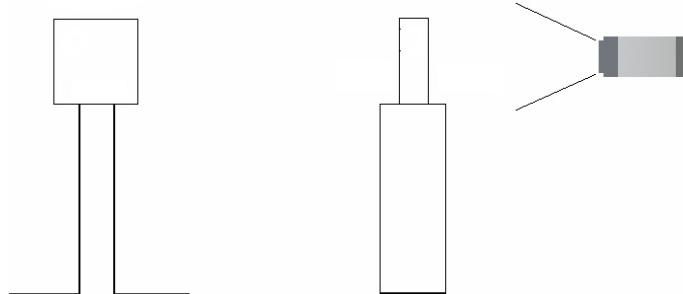
A câmera foi configurada para capturar as imagens de 10 em 10 segundos por um período pré-determinado para cada tipo de amostra, independentemente do experimento. As amostras foram registradas por, aproximadamente, uma hora. Esse tempo de

registro foi determinado com base em simulações computacionais (Da Silva et al., 2010).

Durante cada experimento as amostras e a câmera eram dispostas de acordo com a ilustração da Figura 4. Um suporte metálico foi utilizado para apoiar a amostra e um tripé regulável foi utilizado para fixação da câmera. Antes de ser dado início a um novo experimento a fixação e ajustes da câmera eram realizados.

A bancada (suporte metálico + mesa de apoio do suporte) utilizada para este experimento ficou localizada bem próximo à estufa, em uma sala com as janelas fechadas. Esta configuração minimiza o efeito da convecção forçada sofrida pela amostra devido ao seu deslocamento da estufa para suporte. A intenção do experimento era que a amostra resfriasse por convecção natural.

Figura 4. Disposição da amostra durante aquisição de imagens termográficas.



Fonte: Adaptado de Da Silva, 2007.

2.2.2 Curvas de resfriamento

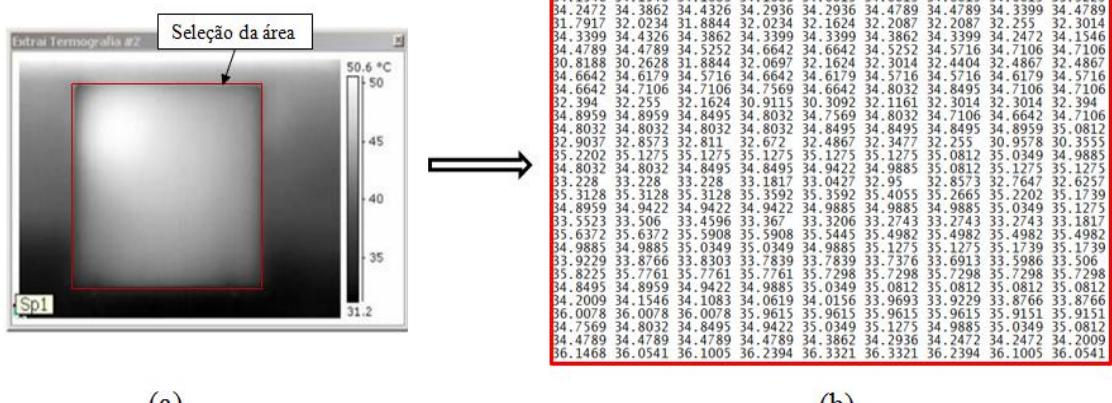
Inicialmente o que se obtém do registro realizado pela câmera de infravermelho são imagens no formato JPEG. Estas imagens foram convertidas para um novo formato, GIF. A necessidade de convertê-las é devido à próxima etapa para transformar as imagens termográficas em matrizes de temperaturas. Um programa, Extraitermo, associa cada pixel da imagem a uma

temperatura, mediante seleção manual dos cantos superiores e inferiores da região da imagem que vai ser estudada (superfície da amostra) e dos dados de entrada - temperaturas máxima e mínima - relativos àquela imagem (Figura 5(a)). O formato do arquivo gerado por este programa é o TXT (Figura 5(b)).

Uma vez que todas as termografias são processadas, os arquivos em TXT servirão como dados de entrada para outro programa que segue

uma rotina específica dividida em três etapas: (1) Utilizar os arquivos TXT's gerados pelo Extraitermo para criar um vetor de matrizes para cada amostra, associada a um tipo e experimento (Figura 6); (2) Calcular o índice temperatura média para caracterizar o comportamento

Figura 5. Processo de extração de temperaturas dos termogramas: (a) seleção da imagem termográfica; e (b) arquivo .txt gerado



(a)

(b)

Fonte: Os autores.

Figura 6. Geração do vetor temperaturas.

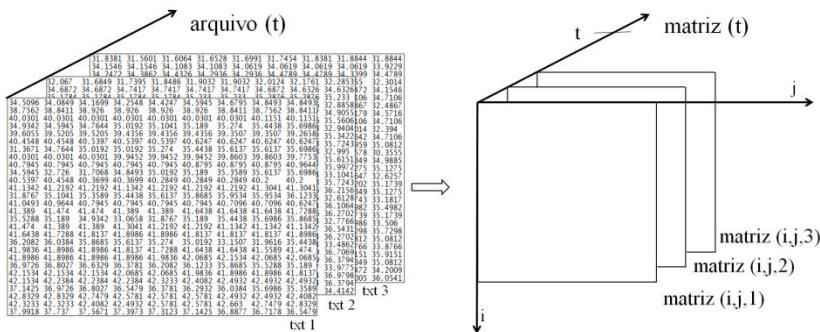
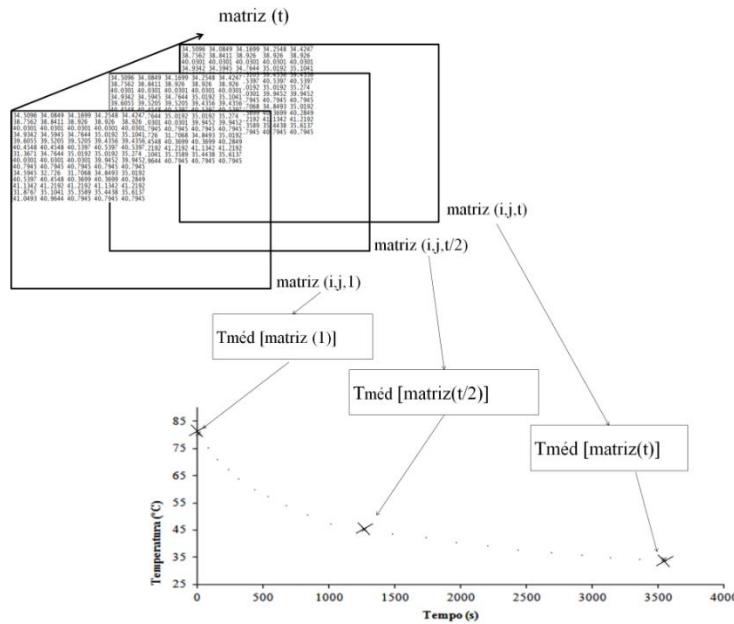


Figura 7. Geração do gráfico de decaimento de temperatura.



Fonte: Os autores

2.2.3 Erros experimentais

A partir dos resultados de resfriamento das amostras caracterizado pela temperatura média superficial é possível encontrar o erro entre os experimentos, representado aqui pelo desvio padrão. A Equação 1 calcula o desvio padrão entre as temperaturas de cada experimento para uma amostra em função do tempo. Ou seja, a cada tempo existe um desvio padrão correspondente. E este caracteriza o erro que ocorre quando é realizado mais de um experimento para uma mesma amostra.

$$\sigma_{[amostra]} = \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} \left[\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{na} x_j^2 - \frac{1}{na} (\sum_{j=1}^{na} x_j)^2}{na-1}} \right] \quad (1)$$

onde,

$\sigma_{[amostra]}$ - erro entre experimentos para uma amostra [°C]

nt - número total de pontos considerados no tempo

i - passo de tempo considerado

na - número de experimentos realizados por amostra

x_j - temperatura em cada ponto [°C]

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O erro entre experimentos σ caracteriza o erro aleatório que ocorre quando é realizado mais de um experimento para uma mesma amostra σ_1 (amostra 1) ou σ_2 (amostra 2). As Figuras 8 e 9 ilustram as curvas de resfriamento da amostra 1 (representada por Gesso_1 na Figura 8) e da amostra 2 (representada por Gesso_2 na Figura 9), respectivamente, para os três experimentos realizados com cada uma delas. Pode-se observar que a amostra 1 apresenta temperatura inicial um pouco maior do que a amostra 2, provavelmente porque esta última resfriou um pouco quando a estufa foi aberta para a retirada da amostra 1. Mas no final da gravação dos termogramas ambas estavam no mesmo nível térmico. Também se observa uma

dispersão entre as curvas de resfriamento dos experimentos.

De maneira geral este erro está associado a variações de parâmetros do ambiente que ocorrem entre um experimento e outro. Alguns deles são: emissividade, temperatura ambiente, temperatura refletida, umidade relativa, e distância entre a câmera termográfica e o objeto em estudo. Todos esses parâmetros são inseridos na câmera e considerados constantes ao longo de todo experimento. No entanto, o único que se mantém fixo é a distância entre o objeto e a câmera. Todos os outros são parâmetros variáveis no tempo durante a realização dos experimentos.

Figura 8. Curvas de resfriamento dos três experimentos da amostra 1

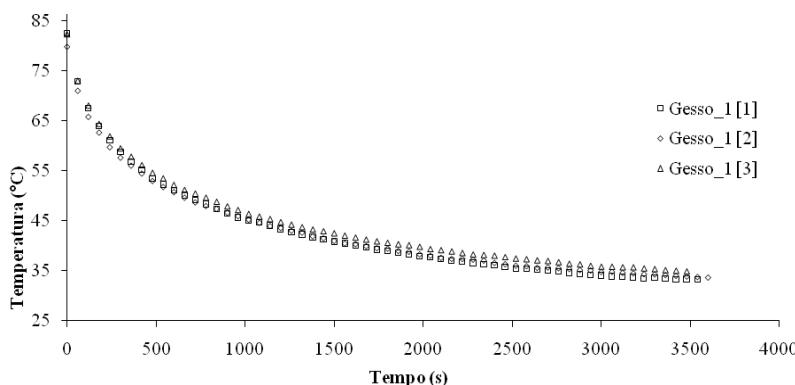
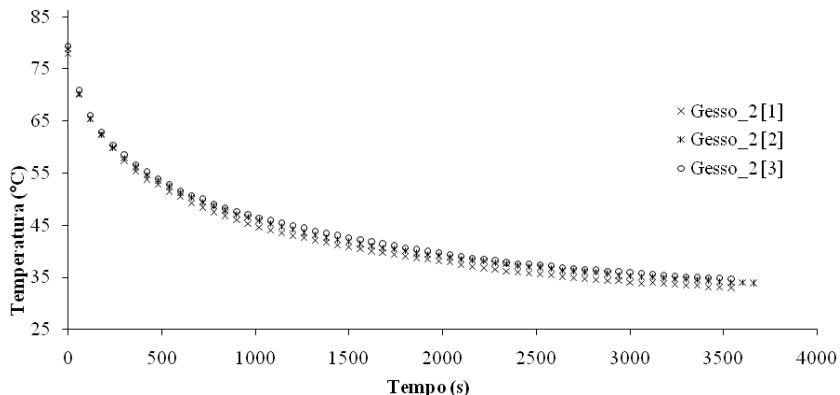


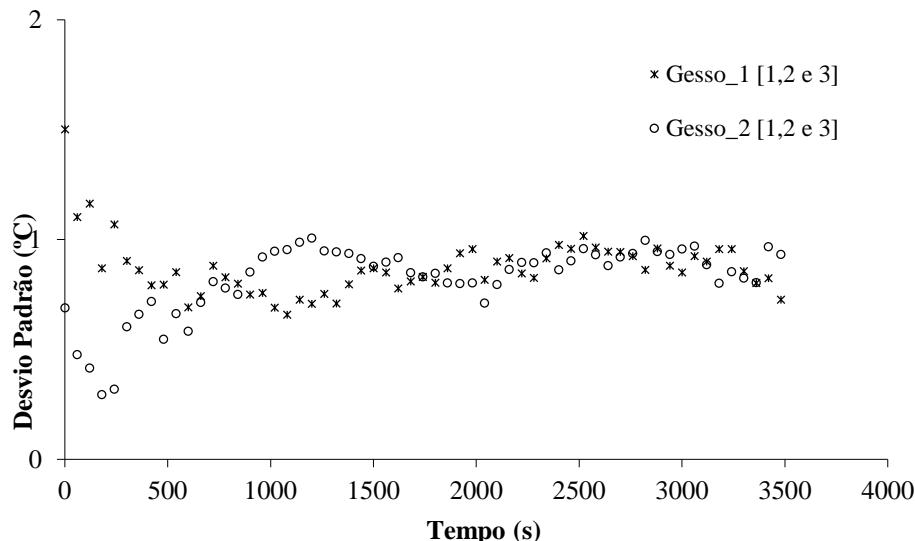
Figura 9. Curvas de resfriamento dos três experimentos da amostra 2



A Figura 10 mostra os desvios para cada tempo em que foi gravada uma imagem térmica. Pode-se observar que os desvios apresentam uma variação maior nos primeiros instantes do experimento, que corresponde à fase de convecção forçada devido à retirada da amostra da estufa, e tende a se estabilizar com pequenas

flutuações devido ao processo de resfriamento por convecção natural. No entanto, devido à baixa condutividade térmica do gesso, este efeito é bastante minimizado a partir de 300 s até o final do processo.

Figura 10. Desvios entre experimentos das amostras 1 e 2



Outro parâmetro para representar o erro relativo ao ambiente em gravações de termogramas é a média dos desvios padrões.

Realizando uma média dos desvios obtém-se: $\sigma_{1\text{ médio}}(\text{amostra 1}) = 0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\sigma_{2\text{ médio}}(\text{amostra 2}) = 0,81\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores que comprovam a

necessidade do cuidado com a confecção das amostras e com o controle dos parâmetros do ambiente. Pois, apesar de o desvio padrão indicar o grau de espalhamento que ocorre em cada amostra específica, esse resultado não distingue a diferença entre as amostras. No entanto, é possível que esses valores sejam iguais. O cálculo da média dos desvios foi limitada ao intervalo de tempo a partir 300s até o tempo final dos experimentos.

valores de 0,80 °C para a amostra 1 e de 0,81 °C para a amostra 2. Esses valores de erro ficam abaixo do estabelecido pelo fabricante como sendo de ± 2 °C ou 2% no valor registrado pela câmera de infravermelho. Fato que mostra a importância do estudo dos erros envolvidos no processo de medição quando as informações dos termogramas forem utilizadas em análises quantitativas. Para que os erros sejam considerados na ordem de grandeza mais próxima do real.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi levantado o erro experimental relativo aos parâmetros ambientais em gravações de termografias por infravermelho. O objetivo desse levantamento foi dar subsídio para análises quantitativas das imagens térmicas. Pois nessas análises é fundamental o conhecimento da ordem de grandeza do erro da câmera.

Foi feito o registro termográfico de um processo de resfriamento de placas quadradas de gesso. A caracterização do comportamento térmico das amostras foi feito através da temperatura média superficial em cada termograma gravado. No experimento foram levantadas curvas experimentais que representam o processo de resfriamento para cada uma dessas amostras. Com essas curvas foi possível identificar o erro (desvio padrão) relativo ao ambiente entre os experimentos.

As amostras apresentaram curvas de desvios padrões muito semelhantes. Isso se deve à padronização do procedimento para confecção de amostras e para a realização dos experimentos. Para se ter um valor erro de referência para cada amostra, foi realizada a média dos desvios padrões ao longo dos instantes dos experimentos. Obteve-se os

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. C.; LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; SANTOS, F. G. S.; DA SILVA, R. N. T. Uma Investigação Preliminar da Possibilidade de Utilização de Câmera de Infravermelho para Detecção de Diferentes Patologias em Clima Tropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 20, 2006. São Pedro-SP: Anais do CBEB 2006.

BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. Energy and Buildings, v. 34, n. 2, p. 171–183, fev. 2002.

BARREIRA, E. S. B. M. Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. 15 fev. 2012.

DA SILVA, R. N. T. . Estudo da Termografia por Infravermelho: Aplicações na Engenharia e Determinação de Parâmetros Termofísicos e Geométricos de Materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 2007.

DA SILVA, R. N. T.; MAGNANI, F. S.; HORA, A. L. A. . SENSITIVITY ANALYSIS APPLIED IN ESTIMATION OF GEOMETRIC PARAMETERS FROM DATA OBTAINED BY INFRARED THERMOGRAPHY DURING SAMPLE COOLING. In: 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010, Uberlandia. Proceedings of ENCIT 2010.

FLIR Systems, ThermaCAM™ S45, Manual do operador, abril 2005, publ. n° 1 558 007.

HUDA, A. S. N.; TAIB, S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. *Applied Thermal Engineering*, v. 61, n. 2, p. 220–227, nov. 2013.

INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P. Transferência de Calor e de Massa. Quinta edição. Singapura: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MINKINA, W.; DUDZIK, S. Infrared Thermography. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

WILLEBRAND, H.; GHUMMAN, B. S.–Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Network. Editora Sams. Indianapolis USA.