

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA DETECÇÃO DE DEFEITO EM SOLDA COBRE AÇO

TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS FOR THE USE OF THE THERMOGRAPHY ON THE DETECTION OF DEFECT IN WELDING COPPER STEEL

Clinton André Merlo¹, Marcelo de Souza Lima Guerra²

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Câmpus de Itabira, MG. E-mail: clintonmerlo@unifei.edu.br

²Lumar Metals, Santana do Paraíso, MG. E-mail: marcelo.guerra@lumarmetals.com.br

RESUMO

Algumas formas mais comuns de defeitos causados por descontinuidade em soldas cobre aço é a falta de fusão e falta de penetração. Estes defeitos afetam diretamente os mecanismos de transferência de calor do objeto, além de apresentarem eminente falha ao sistema. São difíceis de serem detectados visivelmente, portanto necessitam do auxílio de equipamentos ou procedimentos especiais para verificação. Neste sentido, foram realizados experimentos usando termografia para verificar a sua viabilidade na detecção de defeito em solda cobre-aço, uma vez que é uma técnica sem contato e com alta velocidade de inspeção, o que permite o uso em pequenas e grandes estruturas.

Palavras-chave: solda cobre aço; termografia ativa; superfície de resposta.

ABSTRACT

Some common forms of defects caused by discontinuities in welds copper steel is the lack of fusion and lack of penetration. These defects directly affect the mechanisms of heat transfer of the object, besides presenting imminent failure to the system. Are difficult to detect visibly therefore need the help of special equipment or procedures for verification. Field experiments were conducted using thermography to verify its feasibility for detection of defect in welding copper steel, since it is a non-contact technique, high inspection speed, which allows use in small and large structures.

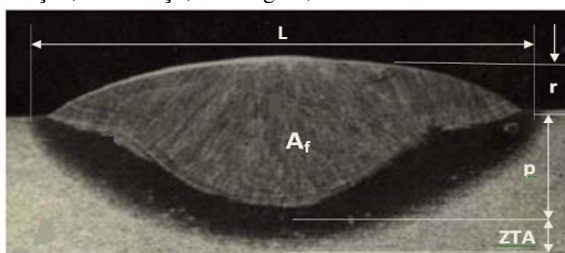
Keywords: welding copper steel; active thermography; response surface.

1 – INTRODUÇÃO

A solda cobre aço está presente em muitas etapas da fabricação de peças fundidas, forjadas e centrifugadas em cobre que são acopladas a outras peças de aço usadas em aciarias e alto fornos. Como exemplo de peças usadas na aciaria temos os blocos refrigerados, os injetores, os queimadores e os bicos de limpeza. Além disso, os altos fornos usam diversas peças compostas de cobre e aço como as placas refrigeradas e as ventaneiras.

Os parâmetros básicos que determinam uma solda aceitável, conforme Figura 1, inclui penetração, largura e altura do cordão na área da secção transversal (LIMMA *et al.*, 2005). Dependendo do tipo de junta estes parâmetros podem ser especificamente diferentes. A ideia é manter uma adequada fusão a expensas de variação da energia de entrada e da dissipação de calor.

Figura 1 – Características geométricas de um cordão de solda p = penetração, r = reforço, L = largura, Af = área fundida.



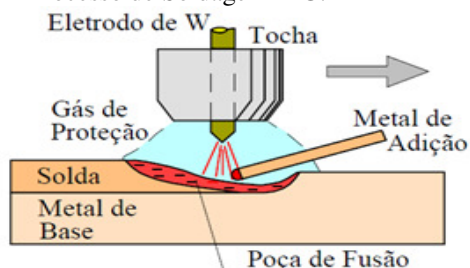
A qualidade da solda também depende das características metalúrgicas, incluindo parâmetros como dureza, resistência e tensões residuais. Essas características são dificilmente medidas *on-line* e também são resultados de um número complexo de fatores. Além disto, todas dependem da energia e do calor subministrado no processo de solda. Assim para obter propriedades metalúrgicas satisfatórias se controlam os eventos térmicos que tomam lugar durante o processo (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005).

Esses eventos térmicos podem ser quantificados usando critérios tais como: temperatura pico no metal, distribuição de temperatura e taxas de resfriamento do metal. A medição destes parâmetros *on-line* reflete o comportamento do processo. A temperatura pico indica o ponto no qual o material se funde e qual temperatura deve ser alcançada para garantir boa fusão. A distribuição de temperatura indica como o calor está sendo dissipado na peça de trabalho, é importante para manter a distribuição de temperatura uniforme centrada na junta. Finalmente, as taxas de resfriamento são responsáveis em grande parte pelas propriedades metalúrgicas do cordão de solda. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005)

Comumente, a soldagem cobre aço é feita por meio do procedimento GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) ou TIG (*Tungsten Inert Gas*), onde se obtém a união de materiais metálicos pelo superaquecimento e fusão localizados em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível e a peça de trabalho, conforme

Figura 2. A proteção do eletrodo e da poça de fusão contra a oxidação pelo ar é feita por um gás inerte, geralmente argônio, hélio ou uma mistura destes (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005).

Figura 2 – Processo de Soldagem TIG.



A tocha sustenta e energiza o eletrodo de tungstênio e direciona o gás de proteção para a região de soldagem. Ela pode ser refrigerada a ar ou água, sendo que, neste caso, pode ser usado um sistema de circuito fechado. A tocha usualmente possui um gatilho para iniciar e terminar a soldagem. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005)

Parâmetros e procedimentos corretos de soldagem estão ligados diretamente com a qualidade do produto final, quando estes são realizados de forma incorreta, descontinuidades surgem no cordão de solda.

Designa-se como descontinuidade a qualquer interrupção da estrutura típica (ou esperada) de uma junta de solda. Neste sentido, pode-se considerar como descontinuidade, a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda. A existência de descontinuidade em uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende da aplicação a que se destina o componente e é, em geral, caracterizado pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedades medidas com níveis estabelecidos em um código, projeto ou contrato pertinente.

Os mecanismos de transferência de calor de condução, radiação e convecção são afetados pelas características dos materiais (tais como o calor específico, densidade, condutividade térmica, coeficiente de convecção, emissividade) e a inspeção térmica depende das variações locais das mencionadas características para estabelecer uma diferença de temperatura de fácil medição (PLOTNIKOV; WINFREE, 2004). Por esta razão é preciso conhecer o máximo possível dos mecanismos de transferência de calor para poder obter maior sensibilidade na análise de imagens térmicas (GONZÁLES, 2006).

Com base na análise do campo de temperatura, a termografia é capaz de identificar anomalias no funcionamento de equipamentos sem que seja necessária a interrupção do processo produtivo, assim como revelar a existência, quantificar e qualificar defeitos internos em materiais, quando a estrutura vem submetida a uma excitação térmica (KRAPEZ *et al.*, 1994; CLARK; MCCANN; FORDE, 2003). Isto porque o processo de difusão térmica, afetado pela presença de falhas, inclusões, umidade, dentre outras ocorrências, gera uma alteração do campo de temperatura superficial da estrutura em

comparação ao campo de temperatura gerado por uma estrutura íntegra (TAVARES; CUNHA; ANDRADE, 2005).

Atualmente a termografia é o método mais avançado de teste não destrutivo existente. Durante o processo de soldagem, onde ocorre a distribuição da temperatura (KOMANDURI; HOU, 2000 e 2001), é comumente utilizada como uma técnica de detecção de descontinuidades no processo GTAW por meio do monitoramento da poça de fusão (PALACIOS, 2010). Porém, a termografia ainda é pouco explorada como uma técnica de inspeção em soldas já executadas.

A termografia é o conjunto de instrumentos sensíveis à radiação infravermelha – termovisores e radiômetros – que permite visualizar o perfil térmico e medir as variações de calor emitido pelas diversas regiões da superfície de um corpo sem a necessidade de contato físico com o mesmo.

Baseada no modo de excitação, a termografia pode ser classificada em passiva ou ativa. Particularmente, na termografia ativa o material é excitado termicamente por uma fonte externa e em resposta, emite radiação infravermelha que é captada e convertida em imagens pela câmera termográfica. Havendo algum defeito no material, o fluxo de calor na região do defeito será alterado em relação ao restante do material, o que confere regiões de temperaturas distintas nas imagens, sendo esta diferença o principal mecanismo de detecção de defeitos, tanto superficiais quanto subsuperficiais.

Não detectar um defeito presente na solda antes que o equipamento entre em operação pode resultar em acidentes graves e/ou até perdas de vidas. Equipamentos de inspeção baseados em ultrassom e raios-X são capazes de detectar tais defeitos, porém limitam-se no tempo para realização, tamanho e geometria das peças e o alto custo para realização.

A motivação em usar a termografia seria uma tentativa para concorrer com estes processos a um custo mais baixo. Além disso, é uma técnica sem contato e com alta velocidade de inspeção, o que permite o uso em pequenas e grandes estruturas.

Neste sentido, foram realizados experimentos usando termografia ativa para verificar a sua viabilidade na detecção de defeito em solda cobre aço.

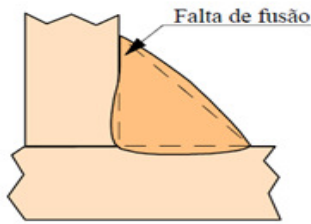
2 – DEFEITOS EM SOLDA COBRE AÇO

Algumas formas mais comuns de descontinuidade em soldas cobre aço é a falta de fusão e falta de penetração, outros mecanismos também ocorrem, porém estes são os mais comuns. Estes defeitos afetam diretamente os mecanismos de transferência de calor do objeto, além de apresentarem eminente falha ao sistema. São difíceis de ser detectado visivelmente, portanto necessitam do auxílio de equipamentos ou procedimentos especiais para verificação.

A falta de fusão, conforme Figura 3, refere-se à ausência de união por fusão entre passes adjacentes de solda ou entre a solda e o metal base. Normalmente é causada por um aquecimento inadequado do material sendo soldado como resultado de uma manipulação inadequada do eletrodo, do uso de uma energia de

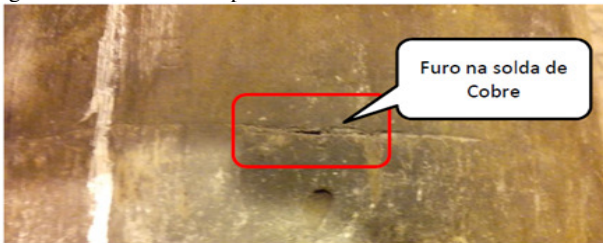
soldagem muito baixa, da soldagem em chanfros muito fechados ou, mesmo, da falta de limpeza da junta. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005)

Figura 3 – Ilustração de uma solda com falta de fusão.



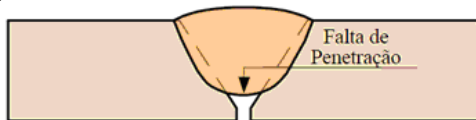
Esta descontinuidade é um concentrador de tensões severo, podendo facilitar a iniciação de trincas, além de reduzir a seção efetiva da solda para resistir a esforços mecânicos. Na Figura 4 é mostrada uma solda com falta de fusão, a qual apresenta um furo e trinca.

Figura 4 – Furo na solda por falta de fusão.



A falta de penetração refere-se à falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta conforme Figura 5, pode ser causada por diversos fatores, como manipulação incorreta do eletrodo, projeto inadequado da junta (ângulo de chanfro e abertura da raiz pequenos) ou, alternativamente, a escolha de um eletrodo muito grande para um dado chanfro (em ambos os casos, torna-se difícil, ou impossível, direcionar o arco para a raiz da junta) e o uso de uma baixa energia de soldagem. Falta de penetração causa redução da seção útil da solda além de ser um concentrador de tensões. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005)

Figura 5 – Ilustração de solda com defeito por falta de penetração.

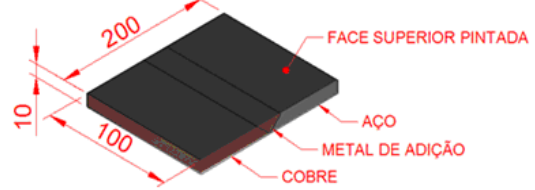


3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Corpos de prova

Para condução dos ensaios foram produzidos dois corpos de prova sendo um soldado com parâmetros recomendados pelas normas e outro com parâmetros (corrente e tensão) alterados para que a soldagem gerasse supostas descontinuidades. As características dimensionais, em mm, dos corpos de prova estão presentes na Figura 6.

Figura 6 – Características geométricas do corpo de prova.



Como indicado, a face superior foi pintada para que a emissividade seja igual em toda face do corpo de prova para evitar grandes desvios ao longo da face.

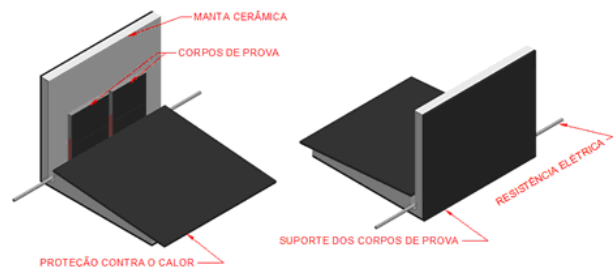
Aparato para realizar os ensaios

Para realização dos ensaios foi montado na bancada de testes uma proteção em "L" na qual os dois corpos de prova (com a solda defeituosa e a perfeita) foram posicionados na posição vertical lado a lado. Estes estarão sobre uma resistência elétrica de 250 ohms ligado à uma rede de 110 volts, o que resulta-se em uma potência de 48,4 watts.

Para retenção do calor foi utilizado manta cerâmica, com o intuito de conduzir o máximo de calor para a peça e evitar que o calor da resistência se dissipasse por radiação para o centro do corpo de prova. Além disso, foi posicionada uma proteção sobre a manta cerâmica pressionando-a sobre a base do corpo de prova e a resistência.

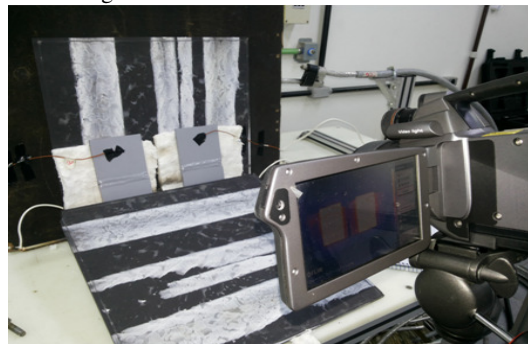
As características e as disposições de como foi montado o aparato de testes são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Aparato de testes.



Uma fotografia dos corpos de prova posicionados para realização dos ensaios à frente do termovisor é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Fotografia da bancada de testes.



Procedimento dos ensaios

Para realização de cada ensaio foi adotado os seguintes procedimentos:

- 1- Posicionar o suporte dos corpos de prova na bancada;
- 1- Distribuir uniformemente a manta cerâmica sobre o suporte;
- 2- Posicionar a resistência elétrica;
- 3- Posicionar os corpos de prova equidistantes sobre a resistência elétrica;
- 4- Colocar a manta cerâmica sobre a base dos corpos de prova e a resistência e em sequência a proteção contra o calor;
- 5- Fixar os termopares nos corpos de prova e ligá-los a um *datalog* para registro das temperaturas;
- 6- Posicionar o termovisor Flir SC660 com o tripé a uma distância de 60 cm dos corpos de prova;
- 7- Configurar o termovisor com parâmetros ambientais e características da face do corpo de prova;
- 8- Programar o termovisor para capturar imagens de 1 em 1 minuto;
- 9- Iniciar as capturas e então ligar a resistência na rede elétrica;
- 10- Aguardar 15 minutos;
- 11- Desligar a resistência elétrica;
- 12- Parar a captura das imagens;
- 13- Aguardar o esfriamento das peças e então desmontá-las.

4 – MODELAGEM NUMÉRICA

Neste trabalho, os resultados experimentais obtidos pelo método termográfico foram validados por meio da implantação de modelo matemático de difusão térmica de solução numérica.

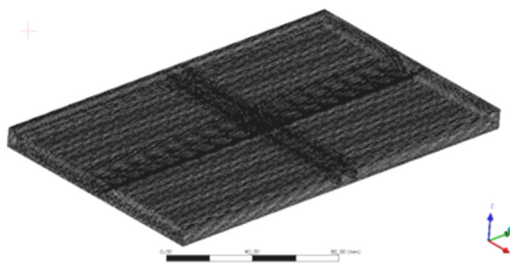
Para simulação numérica foi utilizado o *software* ANSYS CFX-14, o qual utiliza modelagem diferencial, onde é possível estimar o avanço da temperatura ao longo do tempo calculando-a por meio da solução das equações diferenciais de massa, momento e de energia (INCROPERA; DEWITT, 2011), pelo método de volumes finitos proposto por Patankar (1980). As etapas para solução do problema foram:

- 1- Desenho da geometria do domínio a ser estudado, com dimensões semelhantes aos corpos de prova;
- 2- Geração de uma malha de volumes finitos a partir da geometria desenhada;
- 3- Definição das condições de contorno do problema (entradas, saídas etc.) e das propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos;
- 4- Definição do método de resolução de acordo com a etapa da simulação;
- 5- Resolução do problema definido acompanhando as curvas de resíduos;
- 6- Avaliação da adequação da malha;
- 7- Refino da malha e, quando necessário, execução de nova simulação;

- 8- Análise dos resultados em termos de perfil de temperatura ao longo do tempo.

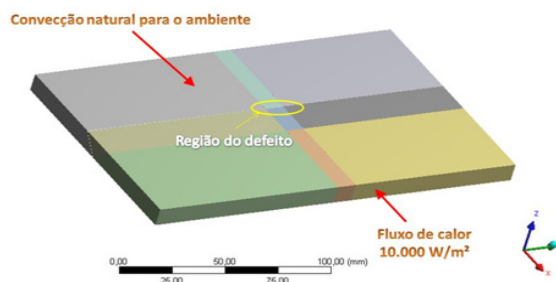
Na Figura 9 é apresentada a visualização da malha gerada pelo ANSYS CFX 14 com 285.200 elementos para a simulação dos corpos de prova.

Figura 9 – Malha gerada pelo ANSYS CFX-14.



As condições de contorno são apresentadas conforme Figura 10, sendo o passo de tempo de 1 segundo em um tempo total físico de aproximadamente 600 segundos.

Figura 10 – Geometria e condições de contorno utilizadas no modelo numérico. Em destaque a região do defeito.



Para representar o defeito na solda, foi considerado que a região destacada conforme Figura 10 possuiria 0,01 mm de vazio entre o contato do metal de adição e o aço.

O *software* ANSYS CFX 14 utiliza a forma diferencial da equação da energia obtida por meio de um balanço de energia num cubo diferencial para solução dos problemas resolvidos por meio de métodos numéricos avançados.

Cada volume presente na malha é considerado um elemento diferencial que compõe uma matriz de solução iterativa. Para solução deste problema, o qual é composto por 285.200 elementos, gastaram-se aproximadamente 13 horas para completar a solução.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados experimentais

Foram realizadas três baterias de testes para avaliar a influência do acabamento superficial e da solda na emissividade e conseqüente variação na temperatura:

- 1- Sem pintura superficial e sem usinagem da solda;

- 2- Com pintura superficial e sem usinagem da solda;
- 3- Com pintura superficial e solda usinada.

Na Figura 11 é apresentada a imagem térmica capturada na 2ª bateria de testes com a maior temperatura em 126°C. Observou-se que o fato da solda não estar usinada tem pouco impacto na emissividade, sendo a pintura a maior responsável por uniformizar a emissividade.

Figura 11 – Termograma da 2ª bateria de testes



Observou-se que os corpos de prova quando não pintados sofrem grandes variações na emissividade superficial, o que poderia comprometer as medidas de temperatura. Desta forma, optou-se pelos corpos de prova com pintura superficial e solda usinada, conforme Figura 12, pois apresentaram resultados mais uniformes sem grandes efeitos de variação correlacionados a emissividade.

Figura 12 – Termograma da 3ª bateria de testes.



Nas Figuras 13, 14, 15 e 16 é apresentada uma sequência de imagens para os tempos de dois, cinco, dez e quinze minutos de ensaio dos corpos de prova com pintura superficial e solda usinada.

Figura 13 – Termograma do tempo em dois minutos de ensaio.

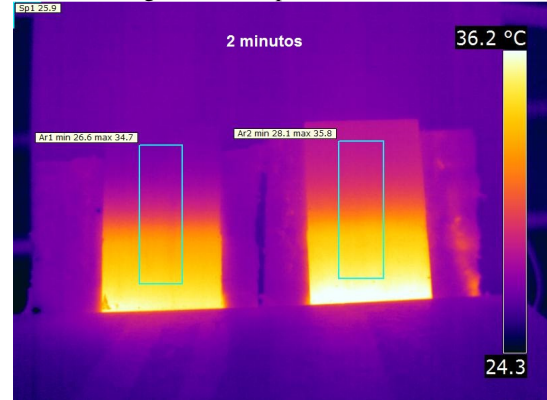


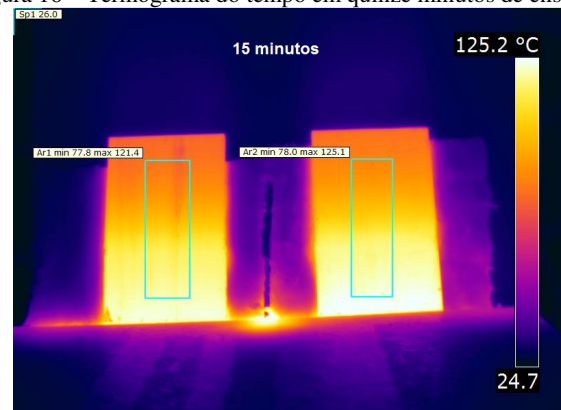
Figura 14 – Termograma do tempo em cinco minutos de ensaio.



Figura 15 – Termograma do tempo em dez minutos de ensaio.

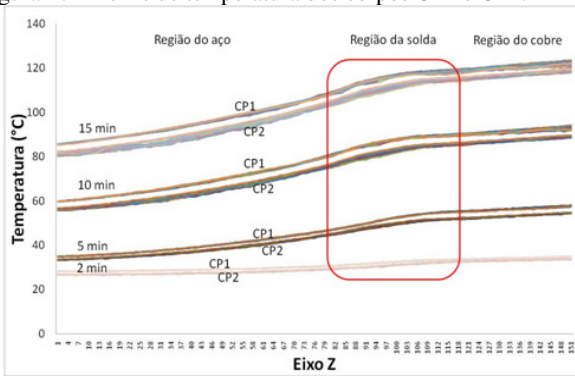


Figura 16 – Termograma do tempo em quinze minutos de ensaio.



Os resultados dos termogramas foram exportados para uma planilha eletrônica com auxílio da ferramenta de seleção de área disponível no *software Flir QuickReport* 1.2. Trinta linhas de medições com cento e cinquenta tomadas de temperatura cada uma foram exportadas para os mesmos passos de tempo. Os corpos de prova foram nomeados como CP1 (solda boa) e CP2 (solda ruim), e foi gerado o gráfico de perfil de temperatura, conforme Figura 17.

Figura 17 – Perfis de temperatura dos corpos CP1 e CP2.



Observa-se que há uma diferença de temperatura entre o CP1 e CP2 em cada um dos passos temporais. Estima-se que esta diferença tenha ocorrido por diferença de aquecimento ocorridos na própria resistência elétrica.

Ao observar os gráficos de temperatura não se encontrou variações de temperatura que pudessem apontar defeitos presentes na região da solda.

Análise da incerteza na termografia

O cálculo da incerteza de medição da temperatura representa ferramenta de fundamental importância na validação definitiva da termografia visto que confere a confiabilidade metrológica desejada aos resultados obtidos.

Para a estimativa da incerteza padrão combinada, aplicou-se a metodologia proposta por Chrzanowski *et al.* (2001), o qual utilizam a equação abaixo para estimar a incerteza padrão combinada do sinal de temperatura:

$$u_c(T_{out}) = \sqrt{(c_\epsilon u(\epsilon_r))^2 + (c_T u(T_{ba(r)}))^2 + (c_\tau u(\tau_{a(r)}))^2 + u_{int}^2}$$

Em que: $u(\epsilon_r)$ é a incerteza padrão na determinação da emissividade efetiva do objeto, $u(T_{ba(r)})$ é a incerteza padrão na determinação da temperatura ambiente efetiva, $u(\tau_{a(r)})$ é a incerteza padrão de determinação da transmitância atmosférica efetiva e u_{int} é a incerteza intrínseca combinada da termocâmara. Esta derivada parcial indica quanto o sinal de saída para temperatura, T_{out} , varia com os sinais de entrada ϵ , T_{ba} , τ_a . Os coeficientes c_ϵ , c_T e c_τ , correspondem aos coeficientes de sensibilidade obtidos pela derivada da função $T_{out}(\epsilon, T_{ba}, \tau_a)$. Devido a complexidade do modelo matemático $T_{out}(\epsilon, T_{ba}, \tau_a)$ torna-se inconveniente a determinação analítica dos coeficientes de sensibilidade uma vez que se deseja maximizar a incerteza padrão

combinada do sinal de temperatura. Assim, optou-se por utilizar os seus valores máximos absolutos, ou seja, todos iguais a 1.

Para o cálculo da incerteza padrão combinada é necessário calcular as incertezas padrão $u(\epsilon_r)$, $u(T_{ba(r)})$ e $u(\tau_{a(r)})$. Assumindo uma distribuição uniforme para todas estas variáveis, pode-se dizer que:

$$u(\epsilon_r) = \frac{\Delta\epsilon}{\sqrt{3}} \quad u(T_{ba(r)}) = \frac{\Delta T_{ba}}{\sqrt{3}} \quad u(\tau_{a(r)}) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{3}}$$

Em que: $\Delta\epsilon$, ΔT_{ba} e $\Delta\tau$ são, respectivamente, o desvio padrão da média da emissividade da superfície da amostra, da temperatura ambiente no momento dos ensaios e da transmissividade do meio.

A temperatura ambiente, componente indispensável para o cálculo da incerteza de medição, foi monitorada por meio de um termômetro com incerteza expandida igual a $\pm 0,5^\circ\text{C}$. A transmissividade foi considerada igual a $0,99 \pm 0,01$. A emissividade da superfície foi determinada durante os ajustes da termocâmara nos ensaios realizados, sendo sua incerteza estimada em 0,1.

A incerteza intrínseca combinada foi estimada em $u_{int} = 0,5459^\circ\text{C}$ por meio de um procedimento de calibração da termocâmara Flir SC660, no qual foi utilizado um corpo negro (modelo 4181).

Com base nas incertezas da emissividade, da temperatura ambiente e da transmissividade do meio foram calculadas as respectivas incertezas padrão:

$$u(\epsilon_r) = \frac{\Delta\epsilon}{\sqrt{3}} = 0,0577$$

$$u(T_{ba(r)}) = \frac{\Delta T_{ba}}{\sqrt{3}} = 0,2887$$

$$u(\tau_{a(r)}) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{3}} = 0,0058$$

Desta forma, a incerteza padrão combinada é dada por:

$$u_c(T_{out}) = \sqrt{(0,0577)^2 + (0,2887)^2 + (0,0058)^2 + (0,5459)^2} = \pm 0,62^\circ\text{C}$$

Chrzanowski (2001) sugere que, no cálculo da incerteza padrão combinada, seja considerada uma distribuição normal de probabilidades, uma vez que é aplicado o teorema estatístico do limite central. Isto levaria a temperatura obtida T_{ob} estar definida dentro do intervalo:

$$T_{out} - u_c(T_{out}) \leq T_{ob} \leq T_{out} + u_c(T_{out})$$

A qual é considerada verdadeira para um nível de confiança de 68%. A incerteza expandida $U_c(T_{out})$ pode, então, ser calculada para um nível de confiança de 95,44%, multiplicando-se a incerteza padrão combinada por 2.

Portanto, para o problema em questão teremos uma incerteza expandida de:

$$U_c(T_{out}) = \pm 1,24^\circ\text{C}$$

Tabela 1 – Contribuição das variáveis na incerteza expandida.

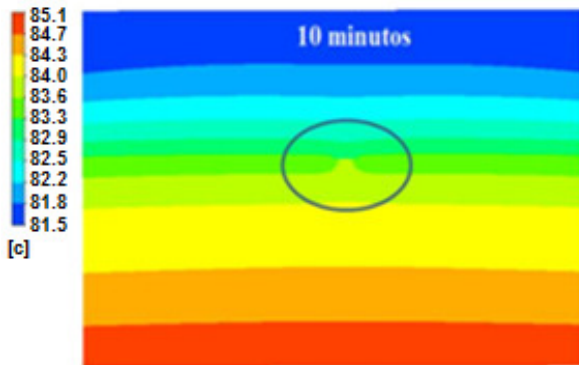
Variável de entrada	Contribuição (%)
\mathcal{E}	6,42
T_{ba}	32,14
τ_a	0,64
u_{int}	60,8

Portanto, conforme Tabela 1, as maiores contribuições na incerteza de medidas efetuadas com termovisores são devidas a temperatura ambiente e a incerteza intrínseca do próprio equipamento.

Resultados numéricos

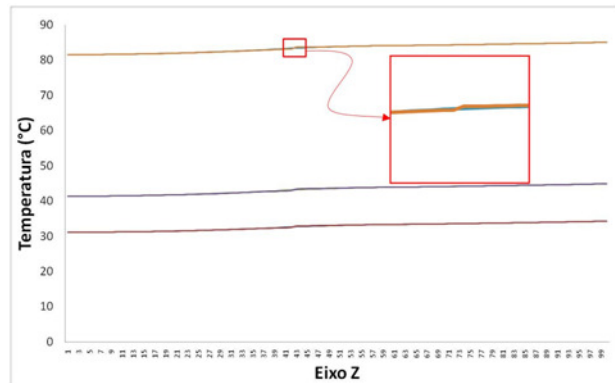
Na Figura 18 são apresentados os resultados do perfil de temperatura obtido por meio do modelo numérico proposto. Como se pode observar, no interior do círculo uma pequena variação de temperatura ocorreu, e esta variação se deu pela presença do defeito implantado por meio das condições de contorno. No entanto, as temperaturas sofreram variações pequenas da ordem de $0,5^\circ\text{C}$ aproximadamente.

Figura 18 – Resultado do modelo numérico, com destaque a região defeituosa.



Para melhor visualização dos resultados numéricos, o gráfico da Figura 19 foi construído ao traçar seis curvas, destacando-se duas delas, sendo a primeira na região defeituosa e a segunda na região sem defeito. Como se pode observar a variação da temperatura foi um degrau de aproximadamente $0,5^\circ\text{C}$.

Figura 19 – Gráfico do perfil de temperatura extraído do modelo numérico.



Comparando-se os resultados numéricos com os experimentais e considerando a incerteza expandida presente nos valores mensurados pela termografia, pode-se afirmar que o modelo numérico representou o problema de forma satisfatória.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inspeção visual dos dois corpos de prova não revelou quaisquer discontinuidades das soldas, principalmente do corpo de prova cuja solda fora executada fora dos parâmetros recomendados. Desta forma, o corpo de prova com solda executada fora das especificações (corrente e tensão) caso apresente realmente alguma discontinuidade deve ser interna e provavelmente de dimensões reduzidas. Porém, não foi utilizado outro procedimento como ultrassom ou raios-X para verificar a existência ou não de defeito, bem como sua real dimensão.

Os resultados experimentais obtidos pela termografia não conseguiram detectar qualquer disfunção em razão da solda executada fora dos parâmetros. Além disso, comparando-se os resultados experimentais com os numéricos observa-se que apesar de ser possível, os defeitos de soldagem mais brandos talvez sejam mais difíceis de serem detectados pela termografia, isto se deve às seguintes hipóteses:

1. A falta de fusão do metal base no processo de soldagem apresenta regiões de vazios muito pequenos (em torno de $0,01\text{mm}$) o qual permite contato entre o metal de adição e o metal base, permitindo a condução de calor quase normalmente;
2. Para obter bons resultados por meio da termografia, necessita-se um acabamento superficial muito uniforme devido a emissividade, só sendo possível por meio da pintura. Sendo assim a própria tinta pode esconder os possíveis defeitos de solda, visto que a diferença estimada pelo modelo numérico seria de aproximadamente $0,5^\circ\text{C}$;
3. A termografia somente é capaz de identificar e caracterizar falhas, de forma clara e segura, se o diferencial de temperatura existente entre a região da falha e região íntegra for superior aos limites de incerteza de medição. Isto leva à necessidade de uma análise comparativa entre a incerteza de medição e a

tolerância característica do problema, tida como o menor diferencial de temperatura superficial gerado entre uma área íntegra e uma área com a menor falha.

A possibilidade de detectar defeitos de soldagem pela termografia não pode ser descartada, visto que este trabalho não obteve resultados conclusivos. Talvez soldagens com descontinuidades de dimensões maiores possam ser detectadas pela termografia.

Mais ensaios e estudos seriam necessários para se concluir sobre o assunto. Sugere-se realizar experimentos por meio da termografia pulsada, ou alterar a forma de aquecimento do objeto estudado, bem como a utilização de outras técnicas como ultrassom e raios-X para confirmar a presença de descontinuidades e suas reais dimensões no corpo de prova com defeito.

REFERÊNCIAS

- CHRZANOWSKI, K.; FISCHER, J.; MATYSZKIEL, R.; BARELA, J. Evaluation of uncertainty of temperature measurement with thermal cameras. **Journal of Optical Engineering**, v. 40, n. 6, 2001.
- CHRZANOWSKI, K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 Standards. **Proceedings of SPIE**, v. 4360, p. 387-401, 2001. <http://dx.doi.org/10.1117/12.421015>.
- CLARK, M.; MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges. **NDT&E International**, v. 36, p. 265-275, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00060-9).
- GONZÁLES, D. A. F. **Contribuciones a las Técnicas no Destructivas para Evaluación y Prueba de Procesos y Materiales basada en Radiaciones Infrarrojas**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria, 2006.
- INCROPERA, F.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7 ed., LTC, 2011.
- KOMANDURI R.; HOU, Z. B. Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part I. General Solutions. In: **Metallurgical and Materials Transactions B**, December, v. 31B, p. 1352-1370, 2000.
- KOMANDURI R.; HOU Z. B. Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of the thermophysical properties with temperature. In: **Metallurgical and Materials Transactions B**, June, p. 483-500, 2001.
- KRAPEZ, J. C.; BALAGEAS, D.; DEOM, A.; LEPOUTRE, F. Early detection by stimulated infrared thermography. Comparison with ultrasonics and holo/shearography. **Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Material**, Ed. X. Maldague, Nato ASI Series E., Kluwer Academic Publishers, v. 262, p. 303-321, 1994.
- LIMMA E. J.; CASTRO C. A. C.; BRACARENSE A. Q.; CAMPOS M. F. M. Determinação da Relação entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspecto do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 10, out./dez., p. 182-189, 2005.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2005, 362 p.
- PALACIOS, A. M. G. **Uso de Técnicas de Termografia para Detecção de Descontinuidades no Processo GTAW através do Monitoramento da Poça de Fusão**. Dissertação de Mestrado. Brasília. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer Fluid Flow, Hemisphere Heat Transfer and Fluid Flow**, 1980. PMCid:PMC3013606.
- PLOTNIKOV Y. A.; WINFREE W. P. **Advanced Image Processing for Defect Visualization in Infrared Thermography**. **NASA Langley Research**, 2004. PMCid:PMC1809245.
- TAVARES. S. G.; CUNHA, A. M.; ANDRADE, R. M. Theoretical and experimental study of heat diffusion in structures with internal flaws. **Anais do 18th International Congress of Mechanical Engineering**, 6-11 November, Ouro Preto, MG, Brasil, 2005.