

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TIAGO FILIPI LONGHI

**Definição do Melhor Posicionamento de Sensores de Temperatura para
Determinação da Fonte de Calor no Processo de Soldagem por Fricção (FSW)**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. *Francis Henrique Ramos França*

Porto Alegre

2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**Definição do Melhor Posicionamento de Sensores de Temperatura para
Determinação da Fonte de Calor no Processo de Soldagem por Fricção (FSW)**

TIAGO FILIPI LONGHI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FERNANDO MARCELO PEREIRA
UFRGS/DEMEC

Profa. Dra. THAMY CRISTINA AYASHI
UFRGS/DEMEC

Prof. Dr. SERGIO LUIZ FREY
UFRGS/DEMEC

Porto Alegre

2011

ii

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Henrique e Vania; ao meu irmão Diogo; e à minha “dindinha” Magali.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, como não poderia deixar de ser, agradeço àqueles que me fizeram ser o que sou hoje, por meio do carinho, amor, atenção e dedicação: meus pais, meu irmão, meus tios(as), dindos(as), avós e demais familiares.

Agradeço ao Professor, Orientador e Amigo Francis França, pela confiança depositada em mim, e por estar sempre apto a esclarecer minhas dúvidas.

Agradeço também ao Mestre (e colega) Felipe Centeno, pela dedicação e pela atenção na resolução de muitas das questões levantadas neste trabalho.

Um obrigado especial ainda a todos os professores que contribuíram em minha formação, do primeiro ao décimo semestre. Particularmente, agradeço aos Professores Ruben Gonzalez e Sergio Frey, sempre presentes e dispostos a auxiliar e escutar os alunos da Mecânica

De grande valia em minha formação foram as experiências adquiridas nos lugares em que trabalhei. Um muito obrigado ao pessoal do DEAM, particularmente à Daisy, ao Daniel, à Maria Tereza, à Fran, ao Léo, ao Miguelito, ao Rudi e aos “discípulos” Rafael e Eduardo. Outro agradecimento vai para o pessoal da WEG Motores, em especial ao Álvaro, ao Humphrey, ao Sérgio e à equipe do PMC.

Sair de casa aos 17 anos e ir morar sozinho (mesmo com respaldo de familiares próximos), distante 400 km da família, é complicado para qualquer adolescente. Não foram poucas as noites que dormi com um profundo vazio em meu coração, principalmente por estar distante de meu irmão pequeno, a quem tanto amo. No entanto, nesta jornada vivida em Porto Alegre e na UFRGS, conheci pessoas espetaculares, amigos para toda a vida, que acabaram por fazer valer cada momento aqui vivido.

Alguns dizem que, quem tem muitos amigos acaba por ter nenhum. Mas isso é história de quem, na realidade, poucos os têm.

Seria injusto citar todos aqueles que tornaram melhores meus anos de universidade, pois poderia acabar esquecendo alguém. No entanto, algumas pessoas foram marcantes nesta etapa de minha vida. Estes são o Tiago Andriotty, sempre tímido e eterno cabeludo; o Lúcio Corrêa, prestativo e falador; o Luciano Paludo, grande tecladista e cantador; o Daniel Siwik, quieto, meio teimoso, mas acima de tudo um grande amigo; à Luiza Prass, “gremistona” e linda daquele jeito dela (e que, acho eu, vai ficar furiosa quando ler isso); o Matheus Daniel, mestre da malandragem e da comunicação; o Rafael Torres, dono das melhores e mais inteligentes tiradas; o Maurício Rockenbach, inteligentíssimo e exímio bebedor de Coca-Cola; o Otávio "Maionesa" Pinto, cara que sabe tudo de tudo; e o Pedro Ponte - único colega de semestre sempre junto comigo do início ao fim – pela humildade... e apenas por ser o Pedrão!

Ainda, falarei de algumas pessoas, grandes “amizades”, que me surpreenderam na segunda parte do curso, dado um caminho comum trilhado, e por motivos em particular, que cito a seguir.

Agradeço muito ao Diogo “Gringo” Bettoni, que me ensinou que nunca devemos desistir do que buscamos, e que basta querer correr atrás. Espelho-me muito em ti meu guri.

Agradeço à Daniela Pissanti, uma menina muito, mas muito especial, de quem tanto gosto, que me ensinou a ser uma pessoa melhor, mais compreensiva e com um melhor entendimento de determinadas coisas.

Por fim, agradeço também ao mestre Cassiano Job, por TUDO, seja pela grande amizade, seja pela paciência, pela ajuda prestada à distância, e principalmente por ouvir aquilo que eu tinha a dizer, sempre disposto a dar bons conselhos, e me ajudar a seguir em frente.

Quase cinco anos. O tempo voa.

Você vê coisas e diz: Por quê?
Mas eu sonho com coisas que nunca existiram e digo:
Por que não?

George Bernard Shaw

LONGHI, T. F. **Definição do Melhor Posicionamento de Sensores de Temperatura para Determinação da Fonte de Calor no Processo de Soldagem por Fricção (FSW)**. 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar alguns dos parâmetros térmicos envolvidos na soldagem por fricção (FSW), por meio do estudo do mecanismo de transferência de calor durante o processo, através de métodos numérico-computacionais (volumes finitos) para resolução das equações governantes. Partindo-se de um estudo de caso, em que se analisa a soldagem por fricção de duas placas de alumínio AA 2195-T8, objetivou-se determinar os melhores locais para o posicionamento de sensores de medição de temperatura na superfície das chapas, de forma a se determinar a taxa de calor gerada pela fricção da ferramenta e os coeficientes de transferência de calor. Utilizando-se do princípio de análise inversa, foram considerados como dados de entrada do problema as temperaturas “medidas” numericamente, e os dados de saída foram os parâmetros desejados, sendo o principal destes a fonte de calor. Assim, verificou-se que os resultados obtidos para a melhor configuração de sensores tiveram erros na análise inversa de apenas 0,4%, sendo estes dispostos diagonalmente na superfície da placa. Para os casos com incertezas de medição, os erros em sua maioria foram de 10%. Ainda, averiguou-se que a sensibilidade de um conjunto não é o principal fator determinante no posicionamento dos sensores, e que este depende do gradiente de temperaturas imposto pela fonte de calor, representado pelo desvio das medidas.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por fricção, Análise inversa, Volumes finitos, Transferência de calor.

LONGHI, T. F. **Optimal Placement of Temperature Sensors to Determine Heat Source in the Process of Friction Stir Welding (FSW)**. 2011. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This work aims at examining some of the thermal parameters involved in Friction Stir Welding (FSW), by studying the mechanism of heat transfer during the process, through numerical-computational methods (the finite volumes), for the solution of the governing equations. Starting from a study that examines friction stir welding of two aluminum plates AA 2195-T8, the objective was to determine the best locations for the placement of temperature sensors, on the surface of the plates, in order to determine the rate of heat generated by friction of the tool and also the value of some heat transfer coefficients. Using the principle of inverse analysis, the temperature numerically "measured" was considered the input data of the problem, and the output data were the desired parameters, where the main parameter is the heat source. It was found that the results obtained for the best configuration of sensors had errors of 0,4% in the inverse analysis, and these sensors were placed diagonally on the aluminum plate surface. For cases with measurement uncertainties, the errors were mostly 10%. Still, it was found that the sensitivity of a "group" is not the main factor to determine the placement of sensors, which also depends on the temperature gradient imposed by the heat source, represented by the deviation of the measurements.

KEYWORDS: Friction stir welding, Inverse approach, Finite volume method, Heat transfer.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Soldagem por Fricção Linear	2
2.1.1. Geração de Calor na Soldagem por Fricção Linear: Formulação Analítica.....	3
2.1.2. A Interface entre a Peça de Trabalho e a Placa de Suporte: Resistência Térmica de Contato.....	4
2.2. Condução de Calor Tridimensional Transiente.....	5
2.2.1. Condições de Contorno.....	5
2.3. Modelagem Numérico-Computacional	6
2.3.1. O Método dos Volumes Finitos	6
2.3.2. Equação da Condução de Calor e sua Formulação Aproximada.....	6
2.3.3. O Termo Fonte	6
2.3.4. Aplicação das Condições de Contorno	7
2.3.5. Solução do Sistema de Equações: Método Iterativo Linha a Linha.....	7
2.4. Problemas Inversos	8
2.5. Otimização Extrema Generalizada.....	8
3. ANÁLISE DO PROBLEMA	8
3.1. Estudo de Caso: Validação do Código Computacional	8
3.2. Estudo de Caso: Sensibilidade de Malha	10
4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR POSICIONAMENTO DE SENSORES.....	10
4.1. Visão Geral do Trabalho	10
4.2. Parâmetros Utilizados	11
4.3. Análise Direta: Medidas Numéricas de Temperatura	11
4.4. Análise Direta: Avaliação da Sensibilidade dos Sensores	11
4.3. Determinação da Fonte de Calor por Aproximação Inversa e Verificação de Erros Relativos para os Subconjuntos de Sensores.....	13
4.4. A Correlação Entre Desvio e Sensibilidade	14
4.5. Análise de Resultados com Incertezas de Medição de Temperatura	15
5. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS	16
ANEXOS	17
APÊNDICES.....	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.: Esquemática da soldagem por fricção linear (Fonte: Centeno, 2008).....	2
Figura 2.2.: Exemplificação de ferramentas. Ombro e pino com rosca em detalhe (adaptado de Genicolo, 2007).....	2
Figura 2.3: União entre placas de alumínio e aço. Percebe-se a qualidade do acabamento (Fonte: Genicolo,2007).....	3
Figura 2.4.: Seção transversal de uma típica junta soldada por fricção, mostrando quatro zonas distintas: (A) metal base, e zonas (B) afetada pelo calor, (C) afetada termomecanicamente, (D) de mistura (adaptado de Corrêa, 2011).....	3
Figura 2.5: Calores gerados pela ferramenta em estimativa analítica (adaptado de Centeno, 2008).....	4
Figura 2.6. Discretização com volumes inteiros (Fonte: Centeno, 2008).....	7
Figura 3.1. Campo de Temperaturas e Malha utilizada. Meia peça mostrada, dada à simetria.....	10
Figura 4.1. Vista superior da placa, com disposição de 15 sensores.....	12
Figura 4.2. Gráfico relacionando sensibilidade, desvio e erro de medição.....	14

1. INTRODUÇÃO

O aprimoramento de produtos e processos produtivos tem sido cada vez mais importante para manter empresas competitivas, em um mercado que preza pela alta qualidade e produtividade aliadas a um baixo custo de produção. Ponderadas essas melhorias de processo, a soldagem (considerados seus diversos tipos e características) tem recebido nos últimos anos grande interesse devido a sua versatilidade, sendo considerado atualmente o método mais importante de união de metais na construção de peças e estruturas.

Particularmente, a soldagem por fricção e mistura mecânica é um tipo de união em estado sólido inventado e patenteado pelo “The Welding Institute”, no Reino Unido, em 1991. A união ocorre sem adição de materiais e sem fusão do metal, sendo que a coalescência entre as peças metálicas é obtida por aquecimento, através do atrito. Com este procedimento, obtém-se redução do número de etapas do processo, alta velocidade de soldagem, não necessidade de acabamento, além de esta ser menos agressiva ao meio ambiente (Mishra et al., 2005).

Estudos envolvendo a soldagem por fricção linear têm aumentado significativamente, pois o processo tornou possível implementar a vantagem de união de materiais em estado sólido para placas e perfis de alumínio, e mais recentemente também em algumas ligas de aço, levando a projetos de novos produtos previamente inviáveis, além da melhoria de projetos já existentes. Como exemplificação, cita-se a constante busca da indústria aeronáutica pela redução do peso em aeronaves, com a atual substituição de painéis de liga de alumínio rebitados por painéis soldados por fricção. Segundo Genicolo (2007), além da vida em fadiga ser similar ou superior a dos painéis rebitados, isto torna o custo de produção das aeronaves mais baixo.

No processo de soldagem por fricção, assim como nos demais procedimentos de manufatura, não se utilizam mecanismos de controle em tempo real dos padrões de qualidade de uma peça ou componente. De forma geral, quase sempre se empregam especificações e procedimentos previamente estabelecidos, seguindo-se determinados requisitos de engenharia. Como forma de controle de qualidade, faz-se inspeção da peça após sua fabricação, seja por ensaios destrutivos (de tração, compressão, fadiga, dobramento, etc.) e ensaios não destrutivos (radiografia, ultrassom, líquidos penetrantes, etc.). Ou seja, investe-se tempo e custo para a realização da análise posterior ao processo. Conforme citam Amado-Becker et al. (2007), os possíveis resultados da inspeção tradicional estão limitados em aceitar a peça, rejeitá-la, ou tentar um processo de retrabalho.

Por meio da solução de problemas inversos, pode-se implantar um sistema de controle em tempo real dos parâmetros na soldagem por fricção, tendo em vista que medidas de temperatura em pontos remotos podem determinar a distribuição da fonte de energia. Tal distribuição determina as características da peça soldada, como a dureza, as tensões residuais e a microestrutura. Com a avaliação em tempo real da soldagem por fricção, pode-se chegar a atributos que são desejados para o componente, sem a necessidade de posterior inspeção, apenas controlando-se a velocidade de translação da ferramenta, por exemplo.

Ponderando-se este sistema de avaliação, por meio deste trabalho busca-se determinar a melhor posição de sensores de temperatura instalados em uma placa de alumínio submetida à soldagem por fricção linear, de forma a se encontrar o local que melhor retorna o valor da fonte de calor estabelecida, através de análise inversa, sendo os dados de entrada do problema as temperaturas, e os dados de saída os parâmetros desejados.

Para a análise numérica, foram empregados códigos computacionais desenvolvidos por Centeno (2008), utilizando-se de programação em **FORTAN 90**, sendo a resolução do problema por meio de volumes finitos, aliada ao emprego de métodos estocásticos para otimização.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Soldagem por Fricção Linear

A soldagem por fricção é um processo de união no estado sólido, inventado em 1991 no "The Welding Institute" (Reino Unido). A adesão entre as peças metálicas é obtida por aquecimento, através do calor gerado por atrito. Nesse processo, uma ferramenta não consumível gira rapidamente entre duas chapas posicionadas topo a topo (Figura 2.1) fazendo com que o material de ambas as chapas seja misturado, destruindo a interface de separação entre elas e consolidando a união. Além do movimento de rotação, a ferramenta também é dotada de movimento de translação, pois percorre a peça linearmente. Por ser um processo de estado sólido, a união integral das chapas é determinada pela severa deformação plástica do material, sem que este sofra fusão.

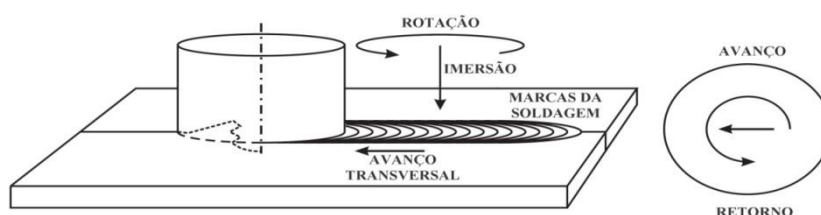


Figura 2.1: Esquemática da soldagem por fricção linear (Fonte: Centeno, 2008).

O procedimento de soldagem inicia-se com a ferramenta, já em alta rotação, sendo adentrada parcialmente na linha de junção entre as peças de trabalho. Conforme pode ser visto na Figura 2.2, a parte que perfura a peça é o pino da ferramenta, cuja limitação vertical se dá quando o "ombro" fica alinhado com a superfície das chapas. No momento em que ocorre esta condição, mantém-se a ferramenta em rotação, porém ainda parada relativamente à peça de trabalho, no que se considera o período de "pré-aquecimento". Esta etapa é fundamental para o processo, pois a interação mecânica entre peça/ferramenta produz calor através do trabalho de fricção e da deformação plástica. Este calor é dissipado pelo material, fazendo a temperatura aumentar (mas ainda ser inferior à temperatura de fusão do metal base) e o material amolecer.

Após estas operações, inicia-se efetivamente a soldagem, com a movimentação da ferramenta transversalmente sobre a peça de trabalho. Nesta etapa, dependendo do material a ser soldado, variam-se os parâmetros do processo, tais como velocidade de translação, força e profundidade de penetração, geometria da ferramenta, ângulo de inclinação da ferramenta, dentre outros, para que se permita a deformação mecânica e o escoamento do metal. Quando a distância a ser soldada for completamente percorrida, extrai-se a ferramenta da peça de trabalho.



Figura 2.2: Exemplificação de ferramentas. Ombro e pino em detalhe (adaptado de Genicolo, 2007).

A superfície do ombro é a área de maior geração de calor, devido à fricção, como já citado. No entanto, cabe a esta parte também a retenção do material sobressalente, de forma que se evite a formação de vazios e porosidades. Assim, consegue-se ainda um excelente acabamento na superfície trabalhada, quando comparada a outros processos de soldagem (Figura 2.3).

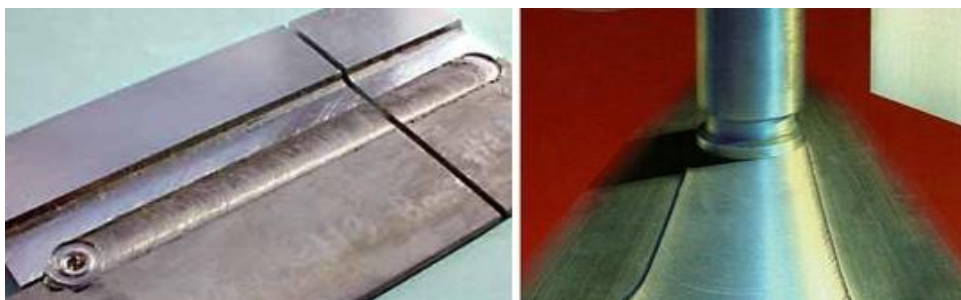


Figura 2.3: União entre placas de alumínio e aço. Percebe-se a qualidade do acabamento (Fonte: Genicolo, 2007).

Já o pino da ferramenta é responsável pela movimentação do material, sendo a região em que os elementos são unidos, embora somente uma pequena fração do calor seja gerada no local. A altura do pino é limitada pela espessura da peça: se o topo do pino penetrar até a parte inferior da chapa, pode-se danificar a placa de suporte.

Considerada a microestrutura da região soldada, percebem-se algumas áreas distintas, conforme demonstrado na Figura 2.4. A zona afetada pelo calor (HAZ - heat affected zone) é similar a da soldagem convencional a arco, embora com temperaturas significativamente menores. Há ainda zonas específicas da soldagem por fricção, como a zona de mistura central, com perfil de anéis circulares (onion ring pattern) - a qual apresenta a deformação mais severa, em consequência do modo em que a ferramenta deposita material da parte anterior para a parte posterior da solda; e também a zona termomecanicamente afetada (TMAZ - thermomechanically affected zone), que fica entre a zona de mistura e a zona afetada pelo calor, cujos grãos são da microestrutura original do metal base, embora muitas vezes em um estado deformado.



Figura 2.4: Seção transversal de uma típica junta soldada por fricção, mostrando quatro zonas distintas: (A) metal base, e zonas (B) afetada pelo calor, (C) afetada termomecanicamente, (D) de mistura (adaptado de Corrêa, 2011).

De forma geral, a soldagem por fricção possui algumas vantagens inerentes ao processo (Hilgert, 2009), tais como: boa estabilidade dimensional e repetitividade; excelentes propriedades metalúrgicas na área da junta e excelentes propriedades mecânicas (como boa resistência a fadiga); não necessidade de gás de proteção e de materiais consumíveis; plena automatização de processo; além de livre posição de soldagem sem a presença de fumos e virtualmente sem barulho. Em termos comparativos, a FSW utiliza cerca de apenas 2,5% da energia necessária da solda a laser, por exemplo. Como desvantagens, citam-se a baixa velocidade do processo para algumas ligas e a necessidade de boa fixação das placas de suporte.

2.1.1. Geração de Calor na Soldagem por Fricção Linear: Formulação Analítica

Para uma estimativa analítica da geração de calor no processo FSW, considera-se um modelo simplificado de ferramenta, com a superfície do ombro cônica ou horizontal (dependente do ângulo α); a superfície do pino cilíndrica; e uma superfície horizontal plana na ponta do pino, conforme verificado na Figura 2.5. Esta situação facilita o equacionamento, e é uma boa aproximação para grande parte das ferramentas disponíveis, que possuem formas específicas para processos específicos.

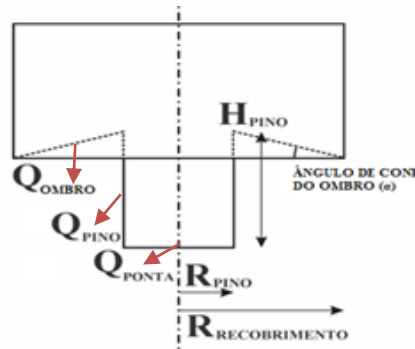


Figura 2.5: Calores gerados pela ferramenta em estimativa analítica (adaptado de Centeno, 2008).

Considerando que o calor é gerado próximo ou nas superfícies de contato da ferramenta, pode-se dividir sua geração como sendo o calor gerado pelo ombro (Q_{OMBRO}), o calor gerado pela superfície lateral do pino (Q_{PINO}) e o calor gerado pela ponta do pino (Q_{PONTA}).

Ressalta-se que, como cada superfície tem uma orientação, as respectivas expressões de geração de calor apresentam dependência em sua particular angulação (consideradas coordenadas cilíndricas), embora todas sejam baseadas na Primeira Lei da Termodinâmica. Para o caso do ombro, já considerada a formatação cônica, tem-se que:

$$Q_{OMBRO} = \int_0^{2\pi} \int_{R_{pino}}^{R_{ombro}} \omega \tau_{contato} r^2 (1 + \tan \alpha) dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau_{contato} \omega (R_{ombro}^3 - R_{pino}^3) (1 + \tan \alpha) \quad (2.1)$$

onde R_{OMBRO} é o raio do ombro, em metros; R_{pino} é o raio do pino, também em metros; α é o ângulo de cone do ombro, em radianos; ω é a velocidade angular de rotação, em rad/s; e $\tau_{contato}$ é a tensão cisalhante de contato, em Pa, considerada uniforme. Por sua vez, ao se tratar do pino, deve-se levar em conta também sua altura (H_{pino} , em metros), o que fornece, para o caso de sua superfície lateral:

$$Q_{PINO} = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_{pino}} \omega \tau_{contato} R_{pino}^2 dz d\theta = 2\pi \tau_{contato} \omega R_{pino}^2 H_{pino} \quad (2.2)$$

e, considerada a ponta do pino, assumindo uma ponta plana, também responsável por parte da geração do calor, tem-se que:

$$Q_{PONTA} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{pino}} \omega \tau_{contato} r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau_{contato} \omega R_{pino}^3 \quad (2.3)$$

Finalmente, consideradas as Equações (2.1), (2.2) e (2.3), tem-se a geração total de calor estimada analiticamente, Q_{TOTAL} :

$$Q_{TOTAL} = Q_{OMBRO} + Q_{PINO} + Q_{PONTA} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contato} \omega \left((R_{ombro}^3 - R_{pino}^3) (1 + \tan \alpha) + R_{pino}^3 + 3R_{pino}^2 H_{pino} \right) \quad (2.4)$$

que pode ser simplificada para o caso de um ombro plano, onde:

$$Q_{TOTAL} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contato} \omega (R_{OMBRO}^3 + 3R_{pino}^2 H_{pino}) \quad (2.5)$$

2.1.2. A Interface entre a Peça de Trabalho e a Placa de Suporte: Resistência Térmica de Contato

Para o correto dimensionamento de solda na soldagem por fricção linear, devem-se fixar as peças de trabalho (consideradas neste trabalho duas chapas de liga de alumínio) em uma placa

de suporte. Este contato acaba por ser um local onde ocorre transferência de calor, da superfície inferior da peça para a base. Esta interface entre os dois corpos, no entanto, pode apresentar folgas/espaçamentos devido à falta de forças de fixação ou irregularidades de superfície. Isto conduz a uma grande resistência térmica de contato, que pode dominar o processo de transferência de calor para o caso em que a condutividade térmica do meio intersticial for muito baixa. Esta transferência de calor é calculada como sendo (Soundarajan et al, 2005):

$$q_b'' = h_b(T_1 - T_2) = Nu_\delta \frac{k}{\delta}(T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

em que h_b é o coeficiente de transferência de calor, em $W/(m^2K)$, entre a placa e a base, Nu_δ é o número de Nusselt (igual a 1 quando a transferência de calor se dá somente por condução), k é o coeficiente de condução para o ar/vácuo na folga, δ é a distância de separação entre as placas, T_1 é a temperatura média da peça de trabalho e T_2 é a temperatura da placa de suporte.

2.2. Condução de Calor Tridimensional Transiente

Segundo Incropera et al. (2008), é possível quantificar processos de transferência de calor em termos de *equações de taxa* apropriadas. Essas equações podem ser usadas para prever a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo. Para a condução térmica (em que há a troca de energia de um lugar com alta temperatura para outro de baixa temperatura pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas), a equação da taxa é conhecida como Lei de Fourier:

$$q_x'' = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

onde Q_x , em W, é a taxa de fluxo de calor através da área A , em m^2 ; q_x'' , em W/m^2 , é o fluxo de calor no sentido positivo dos x ; e k , em $W/(m.K)$, é condutividade térmica do material.

Quando se analisa a condução em um processo como a soldagem, deseja-se quase sempre obter uma representação de como a temperatura varia com a posição no meio em estudo. Ou seja, busca-se conhecer o campo (ou distribuição) de temperaturas de uma peça/objeto.

Para a ciência desta distribuição, deve-se buscar a solução de uma equação diferencial, conhecida como equação do calor. Por definição, *em qualquer ponto do meio, a taxa líquida de transferência de energia por condução para o interior de um volume unitário, somada à taxa volumétrica de geração de energia térmica, deve ser igual à taxa de variação da energia térmica armazenada no interior deste volume*. Ou seja, a equação do calor atende o princípio de conservação de energia. Em coordenadas cartesianas, mostra-se que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

sendo as três primeiras parcelas diferenciais correspondentes ao fluxo *líquido* de calor por condução *para o interior* do volume de controle na direção da coordenada; \dot{q} , W/m^3 , a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio; ρ , kg/m^3 , a densidade do material; c_p , $J/(kg.K)$, o calor específico do material; e $\rho c_p \partial T/\partial t$ a taxa de variação com o tempo da energia térmica do meio, por unidade de volume.

2.2.1. Condições de Contorno

Para se resolver a equação do calor, é necessário que se conheçam as condições físicas nas fronteiras de um sistema, em um dado instante e também a distribuição de temperatura no instante inicial (considerado um processo transiente, em que a situação de um sistema muda ao longo do tempo). Tais condições são conhecidas como condições de contorno, e suas formas gerais são demonstradas resumidamente no Anexo A.

2.3. Modelagem Numérico-Computacional

2.3.1. O Método dos Volumes Finitos

Neste capítulo, busca-se explicar brevemente o método de solução da equação de calor utilizado para analisar a soldagem por fricção linear. No método dos volumes finitos, integram-se as equações diferenciais sob certo número de volumes de controle originários da discretização do domínio. Migra-se, então, de volumes infinitesimais em um domínio contínuo para volumes finitos em um domínio discretizado, sem se perderem as hipóteses da mecânica do contínuo (Vielmo, 2009).

2.3.2. Equação da Condução de Calor e sua Formulação Aproximada

Para problemas tridimensionais, como o considerado neste trabalho, fazem-se as integrações da Equação (2.8) na forma conservativa no espaço e no tempo. No entanto, ao se considerar o comportamento do fluxo de calor, deve-se atentar que o mesmo está presente nas seis faces de um volume “elementar” (norte, sul, leste, oeste, frente, atrás), sendo este o unitário representativo da discretização do domínio.

Dada a análise das interfaces dos volumes de controle, escolhem-se funções lineares de interpolação espacial de temperatura (como diferenças finitas centrais) para as derivações, tendo em vista que se consideram apenas efeitos de difusão (ou transferência de energia devido ao movimento das moléculas) entre os pontos nodais. Ainda, considerado o comportamento do fluxo em um dado intervalo de tempo, pode-se ter formulação explícita e implícita, de acordo com a forma da função de interpolação no tempo, que pode ser considerada (Vielmo, 2009):

$$\int_t^{t+dt} \phi_P dt = [f\phi_P + (1-f)\phi_P^0] \Delta t \quad (2.13)$$

onde ϕ é uma variável genérica (nesse caso ϕ é a temperatura na face do volume de controle); f é um parâmetro que vale 1 para formulação totalmente implícita e 0 para explícita; e o superíndice 0 representa o valor da variável genérica no instante de tempo anterior.

Com a totalmente implícita ($f=1$), derivadas nas interfaces aproximadas por diferenças centrais, e considerando a temperatura T e a parcela ρc_p constantes dentro do volume P (visto na Figura 2.6), tem-se como resultado da integração no espaço e tempo da Equação (2.8), segundo Vielmo, 2009:

$$A_P T_P = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + A_f T_F + A_b T_B + B \quad (2.14)$$

sendo que seus coeficientes são demonstrados no Anexo B. Vale ressaltar que os demais volumes apresentam equações aproximadas idênticas, respeitadas as condições de contorno para as demais posições.

Segundo Maliska (1995), devem ser tomados alguns cuidados especiais na obtenção das aproximações da equação do calor, sendo estes a positividade dos coeficientes (para consistência física do problema) e a conservação do fluxo nas interfaces dos volumes, ou seja, o fluxo deixando um determinado volume de controle deve ser calculado tal qual quando visto como um fluxo entrando no volume de controle vizinho.

2.3.3. O Termo Fonte

Com a utilização de volumes finitos, deve-se tomar o cuidado de não se manter constante o termo fonte durante o passo iterativo. Uma forma de fazer isso é com sua linearização (com declividade negativa), de forma que este seja considerado de maneira mais implícita possível.

Neste trabalho, no entanto, se considera o termo fonte nulo, pois o calor gerado pela fricção da ferramenta com a chapa é tratado como um fluxo de calor na fronteira.

2.3.4. Aplicação das Condições de Contorno

Para se obter o sistema de equações algébricas completo, a partir da Equação (2.14) e seus coeficientes, se faz necessária a aplicação das condições de contorno adequadas ao problema.

Embora possam ser utilizadas diversas metodologias para discretização, neste trabalho realiza-se a integração das equações de conservação tanto para volumes internos quanto para os de fronteira, de forma que, segundo Maliska (1995), todos os volumes elementares são considerados inteiros. Assim, realizam-se os balanços para todos os volumes, independentemente do tipo de contorno aplicado. De forma representativa, demonstra-se o volume “P” na Figura 2.6, unidimensional. Para a situação tridimensional, são válidas as mesmas considerações e procedimentos.

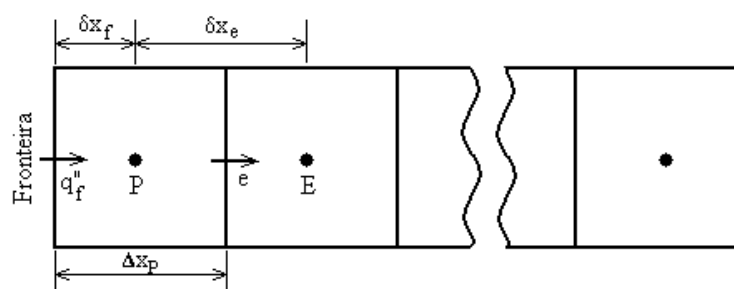


Figura 2.6. Discretização com volumes inteiros (Fonte: Centeno, 2008).

Considerados os três tipos de contorno possíveis, conforme Seção 2.2.1, sua aplicação para o método dos volumes finitos, segundo Vielmo (2009), é descrita como segue:

- 1) Primeira Espécie - Temperatura prescrita: considera-se que a temperatura na fronteira, T_f , é a temperatura especificada;
- 2) Segunda Espécie - Fluxo prescrito: o valor de q_f'' é acrescentado ao valor de S_C (Anexo B). Para pós-processar a temperatura da fronteira após a obtenção de T_P , usa-se a seguinte equação:

$$T_f = \frac{q_f'' \Delta x_f}{k_p} \quad (2.15)$$

onde Δx_f é a dimensão do volume “P” na direção x no MVF, m; e k_p a condutividade térmica do material, W/(m.K), ambos na fronteira considerada.

- 3) Terceira Espécie - Convecção: deve-se igualar o calor que chega por convecção com o calor por condução para dentro do volume de fronteira. Desta forma:

$$q_f'' = h(T_\infty - T_f) = k \frac{T_f - T_P}{\Delta x_f} \quad (2.16)$$

As condições de contorno acima descritas são baseadas na Figura 2.6 (direção x). Para y e z , as situações são análogas.

2.3.5. Solução do Sistema de Equações: Método Iterativo Linha a Linha

Segundo Malalasekera et al. (1995), um método linha a linha resolve diretamente uma linha, ou seja, um método unidimensional. Para problemas tridimensionais, como neste trabalho, torna-se iterativo, com a varredura se processando linha a linha e coluna por coluna. O TDMA

(TriDiagonal Matrix Algorithm) é o algoritmo utilizado na programação em FORTRAN 90. Parte-se da Equação (2.14), de forma que se utilizem relações recursivas específicas para a varredura por linhas e por colunas.

2.4. Problemas Inversos

A maioria dos modelos dos processos físicos baseia-se na formulação direta, como o famoso problema de se determinar o som emitido de um tambor com formato conhecido. No entanto, pelo contrário, como determinar a forma do tambor a partir do conhecimento do som que ele emite (Kac, 1966)? Esse último pode ser considerado um problema inverso, que, em definição, determina as causas desconhecidas baseado na observação de seus efeitos. Para o caso da soldagem por fricção linear, quando se especificam as propriedades do material, a potência da ferramenta (fonte de calor), e velocidades de translação e rotação, etc., as características de solda são previstas diretamente pelo modelo. No entanto, ao se considerar o controle do campo de temperaturas da peça, para assim definir a fonte de calor que determina características desejáveis à linha de solda, tem-se um problema inverso. Neste trabalho, procura-se determinar a intensidade da fonte térmica a partir de medidas transientes de temperatura, ou seja, consideram-se como dados de entrada na programação as temperaturas, e os dados de saída os valores encontrados para a fonte de calor.

2.5. Otimização Extrema Generalizada

Otimizar nada mais é do que buscar a melhor solução para um problema, respeitadas as restrições aplicadas ao domínio das soluções possíveis. Quando se tratam de problemas modelados numericamente, considera-se de importante citação os métodos estocásticos, que buscam o ótimo através de regras de probabilidade, trabalhando de maneira “aleatória orientada”, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema, apenas com um grande número de avaliações de uma função objetivo.

Um destes métodos é o de otimização extrema generalizada (*generalized extremal optimization* - GEO) (Sousa *et al.*, 2003). No GEO, para cada *bit* é nomeado um número de adaptabilidade, que é proporcional ao ganho (ou perda) no valor da função objetivo para mutar o *bit*. Todos os bits são classificados de 1, para o *bit* menos adaptado, até *N* para o melhor adaptado. Um *bit* então sofre mutação de acordo com a distribuição de probabilidade. Este processo é repetido até que um dado critério de parada seja atingido e a melhor configuração de *bits* (aquela que fornece o melhor valor de uma função objetivo) seja encontrada (Centeno, 2008).

Neste trabalho, utilizou-se de uma ferramenta de programação já com a implantação do GEO, sendo necessária apenas a modificação de parâmetros de inicialização do método. Maiores informações sobre o algoritmo GEO e sua implementação neste trabalho são discutidas no Anexo C.

3. ANÁLISE DO PROBLEMA

3.1. Estudo de Caso: Validação do Código Computacional

O presente trabalho utiliza um código computacional desenvolvido por Centeno (2008), com a modelagem numérica de um estudo de caso (iniciado por Chao *et al.*, 2003), em que foi analisado o processo de soldagem por fricção linear de duas placas dispostas simetricamente, de material AA 2195-T8, com espessura 8,13 mm, tendo cada uma 610 mm (milímetros) de comprimento e 102 mm de largura. Considerou-se o ombro da ferramenta com 25,4 mm de diâmetro. Para as medições de temperatura, foram instalados nove termopares do tipo K, dispostos em três colunas com diferentes profundidades (em espessura) na placa.

Utilizando-se destes dados e dos resultados do experimento previamente citado, Centeno (2008) atribuiu ao código um algoritmo de otimização extrema generalizada, para a sequência de avaliações da função objetivo.

Na modelagem, a distribuição transiente de temperatura foi determinada pela solução da Equação (2.8), avaliando o termo fonte nulo, conforme considerações da Seção 2.3.3. Como a fricção da ferramenta é considerada uma fonte de calor concentrada se movendo ao longo da linha de soldagem, pondera-se que há condução de calor para as demais partes da placa.

Ainda, se avalia a ferramenta com ombro plano, e negligencia-se a geração de calor no pino (pois sua contribuição é de apenas 2%). Desta forma, partindo-se da Equação 2.5, com fluxo de calor q_0'' (em W/m²) linearmente distribuído no ombro, tem-se (Chao et al., 2003):

$$q_0''(r) = \frac{3Q_{TOTAL}r}{2\pi R_{OMBRO}^3} \quad (3.1)$$

onde Q_{TOTAL} é a energia total imposta ao sistema (pela ferramenta).

Para uso correto do código, devem-se aplicar as condições de contorno pertinentes ao problema. Na face de simetria (entre-placas) tem-se condição adiabática - segunda espécie, Equação (2.11), enquanto que as demais superfícies expostas perdem calor por convecção - terceira espécie, Equação (2.12). Além disso, há perda de calor por condução na parte inferior da peça de trabalho para a placa de suporte, conforme considerado na Seção 2.1.2.

Os parâmetros a serem utilizados tanto nesta etapa de experimentação e validação, por Chao et al. (2003) e Centeno (2008), como no restante deste trabalho, são mostrados na Tabela 3.1, abaixo:

Tabela 3.1. Valores utilizados na modelagem do processo de soldagem por fricção linear.

Temperatura da base (não perturbada)	T_b	298 K
Temperatura ambiente	T_∞	298 K
Coefficiente convectivo entre placa e base	h_b	350 W/(m ² K)
Energia imposta ao sistema (potência da ferramenta)	Q	1740 W
Coefficiente convectivo padrão	h_{conv}	30 W/(m ² K)

Pode-se assumir, na simulação numérica, que a linha de soldagem se encontra ao longo da linha de simetria. Deste modo facilita-se o procedimento, pois somente metade da placa é modelada.

Na Figura 3.1, pode-se verificar a malha utilizada no método dos volumes finitos, possuindo 122, 40 e 10 volumes nas direções x , y e z . Para a direção y , vale ressaltar que os maiores gradientes de temperatura encontram-se próximos à ferramenta, de forma que, para reduzir o tempo computacional, utiliza-se de uma malha não uniforme, obedecendo a uma equação tipo tangente-hiperbólica de refinamento, onde o maior número de volumes encontra-se próximo à ferramenta.

Como exemplificação, aliado ao fato de que neste trabalho apenas serão considerados sensores colocados na superfície da chapa (buscando uma situação mais real possível) demonstra-se um comparativo, no Anexo D, entre os perfis de temperatura obtidos por Chao e Centeno, o que indica a adequação do código computacional para a modelagem do problema.

Percebe-se, na Figura 3.1 que a temperatura máxima atingida pela peça de trabalho é de 450°C, valor abaixo da temperatura de fusão do alumínio, que é de 659 °C. Ou seja, prova-se que a soldagem por fricção linear é um processo que ocorre em estado sólido (sem troca de fase).

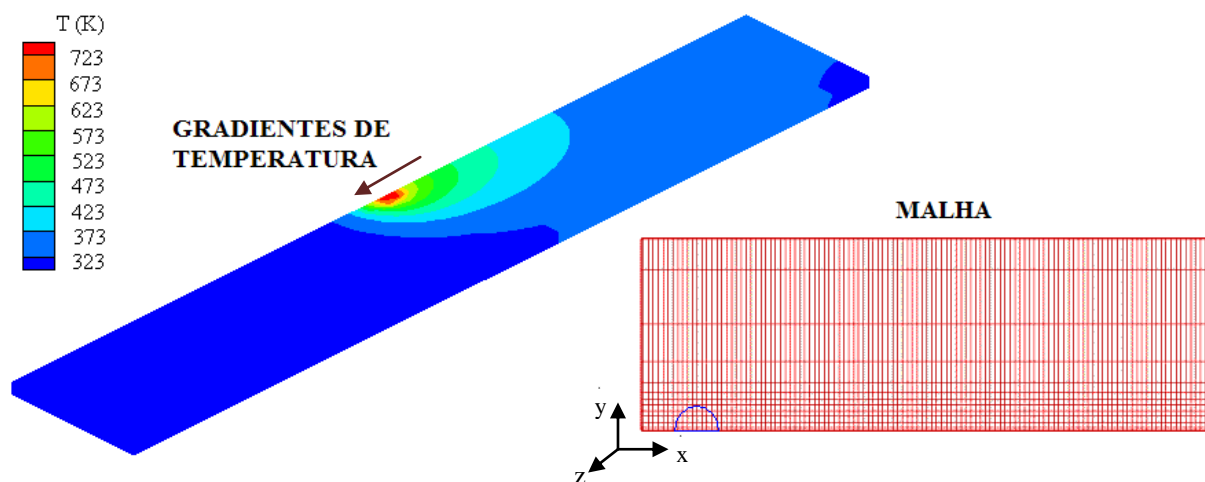


Figura 3.1. Campo de Temperaturas e Malha utilizada. Meia peça mostrada, dada à simetria.

3.2. Estudo de Caso: Sensibilidade de Malha

Depois de validado o código, se faz necessária a avaliação da sensibilidade de malha, de forma que se melhore o tempo de processamento e se facilite o posicionamento de outras configurações de sensores de temperatura. A análise da sensibilidade, para as direções x , y e z , demonstrou que são suficientes cinquenta volumes em x e quinze volumes em y . A espessura da placa (direção z) possui quatro volumes. Esta última não possui tanta importância na análise, pois neste trabalho consideram-se sensores instalados sempre na superfície da placa.

A malha selecionada foi de $61 \times 21 \times 4$, respectivamente em x , y e z . Vale ressaltar que a direção y continua seguindo a função tangente hiperbólica de refinamento (por motivos discutidos na Seção 3.1), sendo que, dos vinte e um volumes, quinze se encontram nos primeiros 30 mm da placa, distribuídos uniformemente, e os outros seis são não-uniformes. Ou seja, pode-se considerar a malha como sendo $61 \times (15+6) \times 4$.

4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR POSICIONAMENTO DE SENSORES

4.1. Visão Geral do Trabalho

Conforme já discutido, neste trabalho objetiva-se avaliar um método de controle em tempo real da potência (ou taxa de calor) imposta pela ferramenta na soldagem por fricção linear. Tal controle tem como fundamento a medida de temperaturas em pontos remotos da placa, para determinar a taxa de energia transferida para a peça, no contato com a ferramenta, na forma de calor de fricção. Como exemplo de aplicação, um bom algoritmo de controle avaliaria durante todo o processo a temperatura atingida pela peça de trabalho, de forma que, quando alcançado um limite superior (ou inferior) do parâmetro, a taxa de calor seria automaticamente regulada. Isto permitiria, por exemplo, o controle da microestrutura resultante da soldagem, das tensões residuais e também da dureza atingida pela peça, dentre outros.

O ponto de partida para o funcionamento deste sistema, já se considerando um código computacional verificado, é a adequação das posições escolhidas para a instalação dos sensores de medição. Ou seja, deve-se avaliar qual o melhor local para posicionamento dos sensores, de forma que, na análise inversa, sejam retornados valores os mais próximos possíveis da taxa de calor aplicada pela ferramenta.

No decorrer das próximas seções, discute-se a abordagem seguida para se determinar as melhores posições, buscando-se ainda uma correlação com os parâmetros governantes do problema.

4.2. Parâmetros Utilizados

Antes de iniciar a metodologia aplicada neste trabalho, se faz necessária uma breve verificação dos parâmetros sopesados na aplicação do código. Para uma melhor combinação entre o movimento da ferramenta nos volumes e as medições de temperatura, consideram-se a posição inicial da ferramenta e a sua velocidade de translação iguais a 15 mm e 2,50 mm/s, respectivamente. Dada a malha utilizada (61×21×4), e selecionando $\Delta t = 1$ segundo (por iteração), tem-se 2,50 mm/iteração. Ou seja, para 33 iterações tem-se $x = 85$ mm ; para 53 iterações tem-se $x = 135$ mm na placa, e assim sucessivamente.

Ponderando-se a disposição dos volumes, com $\Delta x = 10$ mm (vide Figura 2.6), para $x = 15$ mm, por exemplo, tem-se o ponto 3 da malha, ou 2º volume. Demais configurações são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Relação de posições de coordenadas com o ponto na malha utilizada.

<i>Posição em X</i>	<i>Ponto na Malha</i>	<i>Posição em Y</i>	<i>Ponto na Malha</i>
$x = 35$ mm	5	$y = 13$ mm	8
$x = 85$ mm	10	$y = 17$ mm	10
$x = 135$ mm	15	$y = 21$ mm	12
$x = 185$ mm	20	$y = 25$ mm	14
$x = 235$ mm	25	$y = 29$ mm	16

4.3. Análise Direta: Medidas Numéricas de Temperatura

A primeira etapa do trabalho consiste em fazer medições de temperatura para cada sensor instalado “numericamente”, na peça. A análise é feita diretamente, ou seja, impõe-se ao processo uma fonte de calor conhecida.

Foram mensuradas três situações de posicionamento com grande conjunto de sensores. No primeiro caso, considerou-se a ferramenta em 85 mm, de forma que, na placa, foram dispostos 15 sensores (3 colunas e 5 linhas). No segundo caso, considerou-se a ferramenta em 135 mm, com 15 sensores dispostos de forma um pouco diferente (5 colunas e 3 linhas). Para o terceiro e último caso, consideraram-se 25 sensores (5×5), com a ferramenta também em 135 mm. O caso 2 pode ser visualizado na Figura 4.1, e os demais no Apêndice A.

Como já citado, todos os sensores foram instalados na superfície da placa, de forma que as coordenadas ponderadas na programação foram x e y . Como exemplo, para o caso de se desejar o valor da temperatura em um ponto localizado em $(x,y) = (35;13)$ mm, considera-se no código $T(5,8,NI)$, conforme Tabela 4.1 e sendo NI a coordenada de superfície, em Z , no código.

A Tabela 4.2 mostra os valores das temperaturas encontrados para os 15 sensores do caso 2. Como era de se esperar, locais mais próximos da ferramenta apresentam temperaturas mais altas, sendo válido o oposto. As Tabelas AP-A.1 e AP-A.2, no Apêndice A, apresentam as medições de temperatura para os casos 1 e 3.

4.4. Análise Direta: Avaliação da Sensibilidade dos Sensores

Como forma de avaliar se a posição de um único sensor é relevante para as medições de temperatura, foi feita uma análise de sensibilidade, de forma que, em teoria, quanto mais sensível for um sensor, melhor a qualidade de sua medição.

Em termos práticos, a sensibilidade representa a razão na qual a medida de temperatura é “afetada” quando se varia a taxa de calor imposta ao sistema.

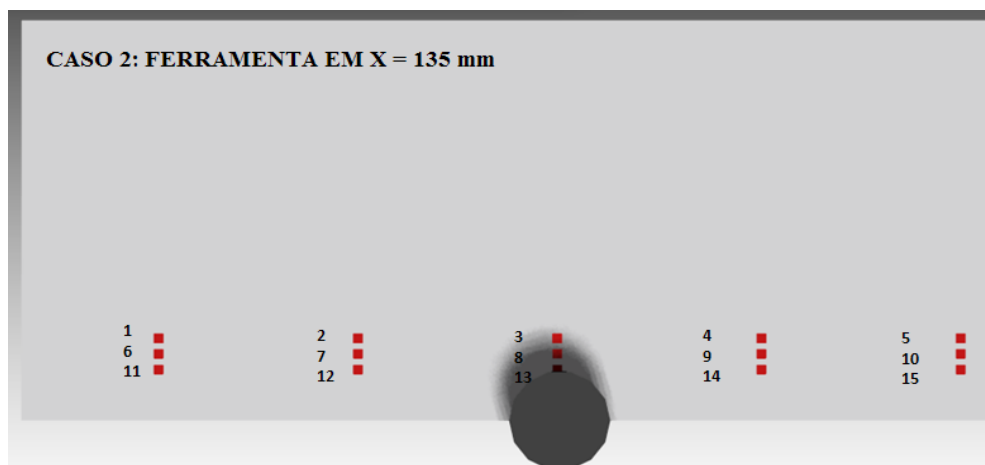


Figura 4.1. Vista superior da placa, com disposição de 15 sensores e sua respectiva identificação.

Assim, a sensibilidade pode ser representada, utilizando-se de diferenças finitas centrais, como sendo:

$$S_Q = \frac{Q}{T_\infty} \left(\frac{\partial T}{\partial Q} \right)_i = \frac{Q}{T_\infty} \left(\frac{T_{[Q+\Delta Q]} - T_{[Q-\Delta Q]}}{2\Delta Q} \right)_i \quad (4.1)$$

onde Q é a taxa de calor imposta pela ferramenta, em W; T_∞ é a temperatura ambiente de referência, utilizada para tornar adimensional o valor de S_Q , de valor igual a 298 K; e “ i ” representa a varredura dos sensores testados. As parcelas $T_{[Q+\Delta Q]}$ e $T_{[Q-\Delta Q]}$ representam os cálculos de temperatura com os incrementos da taxa. Segue-se a mesma metodologia utilizada na Seção 4.2, sendo que, agora, modifica-se o valor da fonte imposta para mais e menos 10%, na análise direta (pela Tabela 3.1, $\Delta Q = 174\text{W}$). Valores da sensibilidade para o caso 2 são apontados na Tabela 4.2. Demais casos são apresentados no Apêndice A.

Tabela 4.2. Valores encontrados para cada sensor da Figura 4.1.

SENSOR	T(°C)	$T_{[Q-\Delta Q]}$ (°C)	$T_{[Q+\Delta Q]}$ (°C)	S_Q do sensor	Posição na malha
1	126.40846	116.59312	136.15563	3.9125	T(5,12,N1)
2	182.46951	167.81670	196.92076	5.8208	T(10,12,N1)
3	211.13668	193.37818	228.68101	7.0606	T(15,12,N1)
4	34.00825	32.96843	35.07506	0.4213	T(20,12,N1)
5	25.20759	25.18345	25.23241	0.0098	T(25,12,N1)
6	129.53451	119.45946	139.53284	4.0147	T(5,10,N1)
7	191.63331	176.27909	206.75567	6.0953	T(10,10,N1)
8	253.20794	232.18498	273.87480	8.3380	T(15,10,N1)
9	34.74910	33.62533	35.90163	0.4553	T(20,10,N1)
10	25.21620	25.19106	25.24205	0.0102	T(25,10,N1)
11	132.08041	121.79529	142.28171	4.0973	T(5,8,N1)
12	199.40908	183.46901	215.09107	6.3244	T(10,8,N1)
13	308.59370	283.52619	333.10842	9.9164	T(15,8,N1)
14	35.40338	34.20574	36.63130	0.4851	T(20,8,N1)
15	25.22333	25.19736	25.25003	0.0105	T(25,8,N1)

Fazendo-se uma breve análise da tabela de resultados, nota-se que a sensibilidade diminui à medida que a distância do sensor para com a ferramenta aumenta. Além disso, a sensibilidade “à frente” da ferramenta (sensor 5, por exemplo) é muito pequena, tendo em vista que a fonte de

calor ainda não passou por estas posições, ou seja, nestes locais ainda não foi realizada a soldagem. Uma exemplificação dos perfis de temperatura antes e após a passagem da ferramenta pode ser visto na Figura 3.1.

4.3. Determinação da Fonte de Calor por Aproximação Inversa e Verificação de Erros Relativos para os Subconjuntos de Sensores

Após a análise da sensibilidade de cada sensor, assim como suas temperaturas durante o processo de soldagem, aplica-se análise inversa para a resolução do problema. Vale lembrar que os valores de entrada serão as temperaturas, e o dado de saída principal será a taxa de calor imposta pela ferramenta.

Como não é viável selecionar todos os sensores mostrados nos três casos, subdividiram-se os sensores em 40 subconjuntos. As configurações utilizadas, com três ou cinco sensores, podem ser verificadas na Tabela 4.3 e no Apêndice B.

Ressalva-se que, para a aplicação do GEO, é mandatório definir qual o melhor parâmetro, chamado τ (que é ajustado no algoritmo e que fornece o menor valor da função objetivo) a ser empregado na obtenção dos valores da taxa de calor (Q , W). Estudos realizados por Centeno (2008) demonstraram que o valor ótimo de τ é 1,25. Detalhamentos sobre o algoritmo aplicado podem ser encontrados no Anexo C. Vale observar, ainda, que se variam os coeficientes h_b e h_{conv} , pois de uma forma indireta é necessária a determinação destes parâmetros, embora neste trabalho o foco seja a fonte de calor.

Com a aplicação do algoritmo, a melhor configuração de sensores será aquela que fornecer os valores de Q mais próximos de seu “alvo”, que é considerado 1740 W (vide Tabela 3.1). Uma forma de quantificar a qualidade do resultado é através de uma medida de erro, sendo que:

$$ERRO = \frac{|Q_{direta} - Q'_{inversa}|}{Q_{direta}} \quad (4.2)$$

onde $Q_{direta} = 1740 \text{ W}$ e $Q'_{inversa}$ é o valor encontrado para dado conjunto de sensores, a partir da análise inversa.

Para cada subconjunto, há ainda um desvio das medições de temperatura, que pode ser considerado:

$$DESVIO = \frac{1}{T_{méd}} \sum_i [(T_i - T_{méd})^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

para a temperatura T_i de cada sensor, mostradas na Tabela 4.2, e que são as mesmas utilizadas para o cálculo da média simples de temperatura ($T_{méd}$) do subconjunto. Este parâmetro mede a “diversidade” das medições, sendo que, quanto maior o desvio, maior é o gradiente de temperaturas mensurado pelo subconjunto.

Na Tabela 4.3, são mostrados os valores encontrados na análise inversa, assim como os valores de desvio e do erro de medição do conjunto para o caso 2, ainda sem a aplicação de incertezas de medição. As sensibilidades de cada subconjunto foram somadas ($\sum_i S_Q$), de acordo com os parâmetros unitários mostrados na Tabela 4.2.

Analisando a Tabela 4.3, verifica-se que o conjunto “M” retornou o menor erro na obtenção da taxa de calor. Este conjunto está disposto diagonalmente na placa, e é composto pelos sensores 2, 8 e 14 (vide Fig.4.1).

Em teoria, quanto maior a sensibilidade do conjunto, menor seriam os erros na análise inversa. Como pode ser verificado na Tabela 4.3, isto não condiz com o observado, pois o

conjunto “C”, que é bem próximo da ferramenta, apresenta uma sensibilidade elevada e um erro de medição três vezes maior.

Tabela 4.3. Resultados da análise inversa para o caso 2 e configurações dos sensores, de acordo com a Figura 4.1.

CONJUNTO	ORIENTAÇÃO	SENSORES UTILIZADOS	$\Sigma (S_{\rho})$	DESVIO	Q (W): ANÁLISE INVERSA	ERRO (%)
A	vertical	1-6-11	12.0245	3.1%	1333.8897	23.340%
B	vertical	2-7-12	18.2405	6.3%	1658.5772	4.679%
C	vertical	3-8-13	23.0723	26.8%	1764.7052	1.420%
D	vertical	4-9-14	1.3617	2.8%	1478.1129	15.051%
E	vertical	5-10-15	0.0305	0.0%	1376.1871	20.909%
F	horizontal	1-2-3-4-5	17.2250	145.8%	1662.4980	4.454%
G	horizontal	6-7-8-9-10	18.9134	155.6%	1813.7215	4.237%
H	horizontal	11-12-13-14-15	20.8338	169.1%	1713.7200	1.510%
I	diagonal	11-7-3	17.2532	32.7%	1813.1498	4.204%
J	diagonal	12-8-4	15.0837	99.6%	1746.8902	0.396%
K	diagonal	13-9-5	10.3815	185.3%	1727.3208	0.729%
L	diagonal	1-7-13	19.9243	62.5%	1873.2091	7.656%
M	diagonal	2-8-14	14.6439	100.1%	1746.8765	0.395%
N	diagonal	3-9-15	7.5264	163.8%	1756.7092	0.960%

Os conjuntos “A” (1-6-11), “E” (5-10-15) e “D” (4-9-14) apresentam os maiores erros, o primeiro por estar distante da ferramenta, e os outros dois por serem posições em que todos os sensores encontram-se em uma região ainda não soldada.

Ressalta-se que a função objetivo, no GEO, foi avaliada cerca de 20000 vezes. Cada conjunto demorou cerca de 8 horas para apresentar a solução, computados paralelamente em uma máquina de quatro núcleos (de 2,8Ghz), com 4 GB de memória RAM. Para os casos 1 e 3, apresentam-se as tabelas de resultados, para fins comparativos, no Apêndice B.

4.4. A Correlação Entre Desvio e Sensibilidade

Conforme verificado na Seção 4.3, a sensibilidade não deve ser avaliada como o único parâmetro para obtenção dos menores erros na análise inversa. Outro valor a ser considerado, de grande importância, é o desvio das medições de temperatura, que também interfere na qualidade dos resultados. Este desvio mostra a diversidade nas medições, sendo que um alto desvio representa, para a região de instalação, um alto gradiente de temperaturas.

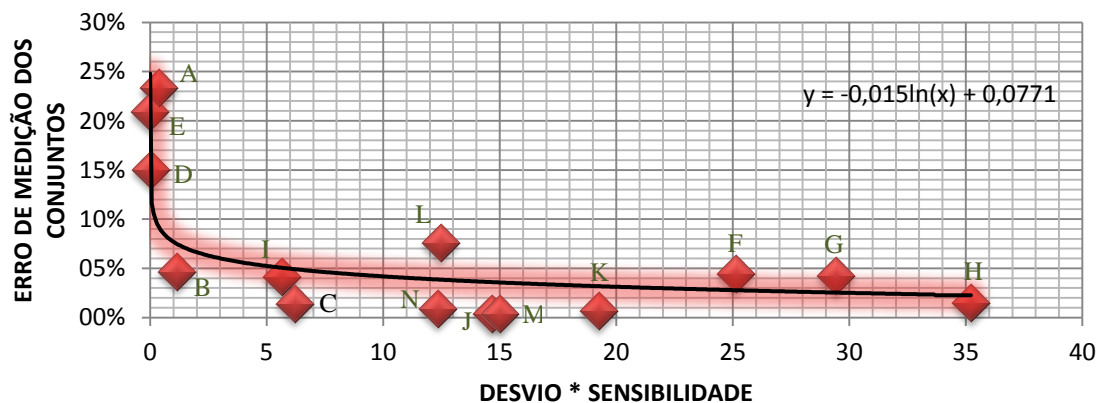


Figura 4.2. Gráfico relacionando sensibilidade, desvio e erro de medição, para o caso 2.

Para uma melhor visualização e entendimento dos resultados, foram plotadas algumas correlações de parâmetros. Na Figura 4.2, verifica-se, no eixo x , a multiplicação entre desvio e sensibilidade, e no eixo y , os erros de medição dos conjuntos, para o caso 2.

Pelo gráfico, (e analisando apenas os conjuntos de três sensores) percebe-se que os *maiores* erros se mostram quando há uma *menor* relação entre desvio e sensibilidade, seja quando um destes é de grandeza muito menor que o outro ou quando ambos são muito pequenos. Para exemplificar, o conjunto “ M ”, embora não possua a maior sensibilidade, possui um desvio de medidas de 100%, ou seja, é alto o produto dos parâmetros. De maneira oposta, o Conjunto “ C ” apresenta alta sensibilidade, mas pequeno desvio. Isso acarreta erros maiores na medição.

É interessante ressaltar que os gráficos para os casos 1 e 3 apresentam o mesmo comportamento, com uma linha de tendência logarítmica, servindo a Figura 4.2 como um representativo dos demais casos. Em resumo, observa-se que para uma boa medição, tanto desvio quanto sensibilidade devem ser considerados, e uma boa relação entre estes parâmetros é obtida em 90% das configurações diagonais. Ainda, em determinado ponto, percebe-se que há estabilidade nos erros encontrados. Mesmo assim, o conjunto que apresenta o menor erro, nos três casos estudados, sempre possui valor considerável no eixo das abcissas.

4.5. Análise de Resultados com Incertezas de Medição de Temperatura

Em uma situação mais condizente com a realidade, ao utilizar-se um sensor de temperatura, podem-se considerar erros de medição inerentes do equipamento. Desta forma, a todos valores obtidos na simulação numérica do caso 3, foram aplicados ruídos nas medidas, de acordo com um desvio padrão (seguindo uma distribuição gaussiana). O procedimento utilizado foi o mesmo descrito nas Seções 4.1 a 4.3. Considerou-se uma incerteza de medição de 2%, e os resultados são mostrados no Apêndice B. Generalizando, os erros de medição foram em média 10% para a orientação diagonal dos conjuntos, sendo que a correlação entre desvio e sensibilidade acorda com a Figura 4.2. Vale ressaltar que o conjunto de sensores “ M ”, do caso 2, também foi avaliado com incertezas, resultando em erros de 4%.

5. CONCLUSÕES

Através deste trabalho, analisou-se a transferência de calor no processo de soldagem por fricção linear, resolvendo-se a equação de condução de calor, por meio de volumes finitos, para a soldagem de duas placas de liga AA 2195-T8. Com a utilização de um algoritmo de otimização, fez-se a análise inversa do problema, em que as temperaturas retornaram o valor da taxa de calor, ou potência imposta pela ferramenta.

Com a avaliação de 40 subconjuntos de sensores, para diferentes casos, verificou-se, de modo geral, que a instalação de três sensores dispostos diagonalmente na superfície da placa fornecem os melhores resultados na análise inversa, resultando em erros de apenas 0,4% (sem incertezas de medição das temperaturas), e de 4% para incerteza de medição de 2%. Mesmo com estas incertezas, é respeitada a correlação entre sensibilidade e desvio do conjunto. Estes dois parâmetros verificam tanto a qualidade da leitura de um sensor na posição em que está instalado, quanto à abrangência de medida em dado campo de temperaturas.

Como perspectiva futura, e considerando o posicionamento ótimo de sensores mostrado neste trabalho, propõe-se que o processo deva ser testado experimentalmente, para verificação “in-loco” dos resultados. Ainda, sugere-se que o código computacional seja adaptado e utilizado em um software comercial, com implementação em máquina de soldagem automatizada, para possível análise em tempo real das características resultantes do processo.

Por fim, ressalta-se que a ferramenta de programação utilizada, desenvolvida por Centeno (2008), em linguagem FORTRAN 90, evidenciou resultados muito satisfatórios, e se mostrou um instrumento muito robusto para analisar o problema, tanto direto quanto inversamente.

REFERÊNCIAS

1. AMADO-BECKER, ZAÑARTU, G. J., 2007. “**Predictive Process Dynamics in Manufacturing**”, Submitted to ASME Journal of Manufacturing Engineering.
2. CENTENO, F. R., 2008. “**Análise Inversa da Transferência de Calor em Soldagem por Fricção Linear Utilizando o Método de Otimização Extrema Generalizada**”, Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS.
3. CHAO, Y. J., Qi, X., Tang, W., 2003. “**Heat Transfer in Friction Stir Welding – Experimental and Numerical Studies**”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 125.
4. CORRÊA, L. A., 2011. “**Modelling of Friction Stir Welding with Bobbin Tool**”, work for Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Deutschland.
5. GENICOLO, M. A. C. , 2007. “**Estudo De Viabilidade Para Implementação De Uniãoes Soldadas Pelo Método Friction Stir Welding em Estruturas Aeronáuticas**”, Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo.
6. HILGERT, J., 2009. “**Modeling Bobbin Tool Friction Stir Welding**”, für Technische Univesität Hamburg.
7. INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., 2008. “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”, LTC Editora.
8. KAC, M, 1966. “**Can you hear the shape of a drum?**”, Amer. Matr. Monthly, vol. 73, pp. 1 -23.
9. MALALASEKERA, W. & VEERSTEG, H. K., 1995. ‘**An Introduction to Computational Fluid Dynamics**’, Longman Group, pp. 156-167.
10. MALISKA, C. R., 1995. “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”, LTC Editora.
11. MISHRA, R. S. Ma, Z. Y, 2005. “**Friction stir welding and processing**”, Materials Science and Engineering, vol 50, pág. 1-78.
12. SOUNDARARAJAN, V., ZEKIVIC, S., KOVACEVIC, R., 2005. “**Thermo-mechanical Model with Adaptive Boundary Conditions for Friction Stir Welding of Al 6061**”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp. 1577 - 1587.
13. SOUSA, F. L., RAMOS, F.M., PAGLIONE, P., GIRARDI, R. M., 2003. “**New Stochastic Algorithm for Design Optimization**”, AAIA Journal, vol. 41., n. 9.
14. VIELMO, H. A., 2009. “**Notas de aula da disciplina: Transferência de Calor de Mecânica dos Fluidos Computacional – ENG03008**”, Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS.

ANEXOS

ANEXO A. Condições de contorno para a equação da condução de calor, para coordenadas normais à superfície (n) (Fonte: Vielmo, 2009).

1. Contorno de primeira espécie (Dirichlet): Temperatura da superfície constante:

$$T(0, t) = T_{\text{sup}} \quad (\text{A.1})$$

2. Contorno de segunda espécie (Neumann): Fluxo térmico na superfície constante:
 - (a) Fluxo térmico finito

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{sup}} = q_{\text{sup}} \quad (\text{A.2})$$

- (b) Superfície adiabática ou isolada

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{sup}} = 0 \quad (\text{A.3})$$

3. Contorno de terceira espécie (Robin): Condição de convecção na superfície:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{sup}} = h[T_{\infty} - T(0, t)] \quad (\text{A.4})$$

ANEXO B – Coeficientes da forma aproximada da equação de condução do calor (Fonte: Vielmo, 2009).

$$A_e = \frac{k_e \Delta y_p \Delta z_p}{\Delta x_e} ; \quad A_w = \frac{k_w \Delta y_p \Delta z_p}{\Delta x_w} ; \quad A_n = \frac{k_n \Delta x_p \Delta z_p}{\Delta y_n}$$

$$A_s = \frac{k_s \Delta x_p \Delta z_p}{\Delta y_s} ; \quad A_b = \frac{k_b \Delta x_p \Delta y_p}{\Delta z_b} ; \quad A_t = \frac{k_t \Delta x_p \Delta y_p}{\Delta z_t}$$

$$B = A_p^o T_p^o + S_C \Delta x_p \Delta y_p \Delta z_p ; \quad A_p^o = \frac{\rho c_p}{\Delta t} \Delta x_p \Delta y_p \Delta z_p$$

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + A_f + A_b + A_p^0 - S_p \Delta x_p \Delta y_p \Delta z_p$$

ANEXO C – Análise de otimização para os conjuntos de sensores: Metodologia de solução (adaptado de Centeno, 2008).

1. Especificar a faixa na qual os parâmetros serão variados durante o processo de otimização, no GEO instalado:
 - a. Calor total gerado pelo atrito: $200 \text{ W} \leq Q \leq 2000 \text{ W}$;
 - b. Coeficiente na superfície inferior da placas: $100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \leq h_b \leq 500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
 - c. Coeficiente de convecção natural: $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \leq h_{\text{conv}} \leq 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;

2. Especificar o número de avaliações da função objetivo (NFE), utilizando o valor de $\tau = 1,25$: $NFE = 20000$;

3. Especificar a função objetivo como $F(Q) = \left[\sum_{i=1}^I (T_i' - T_{i,\text{cal}})^2 \right]^{1/2}$, onde $T_{i,\text{cal}}$ é a temperatura calculada no ponto i para dados valores de Q , h_b e h_{conv} (na análise inversa) e I é igual ao número de pontos de medição, sendo 3 ou 5 pontos, dependendo da configuração (vide Tabelas 4.3, AP-B.1 e AP-B.2).

4. Executar o algoritmo GEO e obter os valores de retorno de Q .

ANEXO D – Validação do Código de Volumes Finitos. Comparação entre Chao et al., (2003) e Centeno (2008).

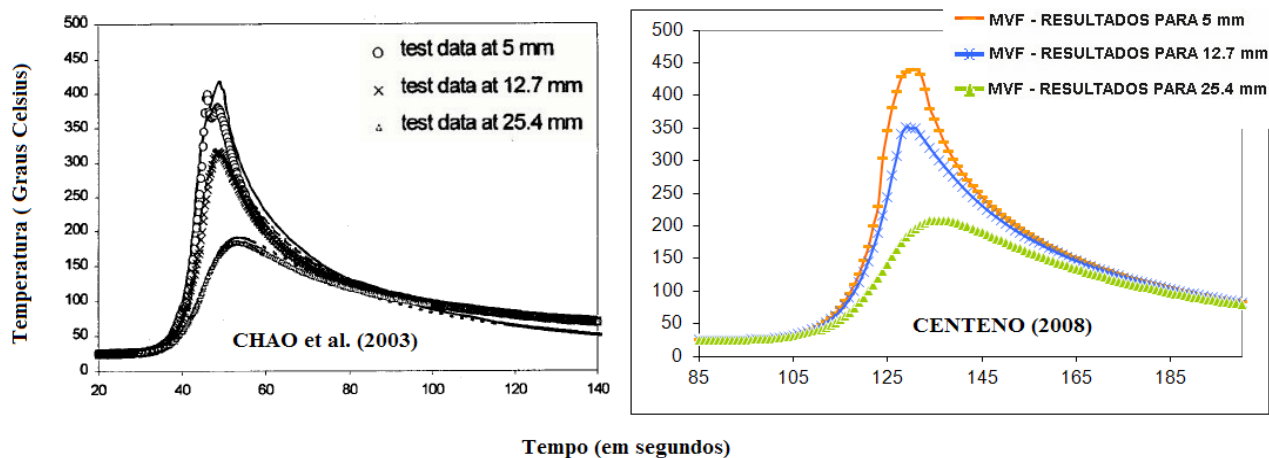


Figura D.1. Comparação entre os perfis de temperatura ao longo do tempo para a camada superior de termopares.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análises de temperatura e sensibilidade para os sensores.

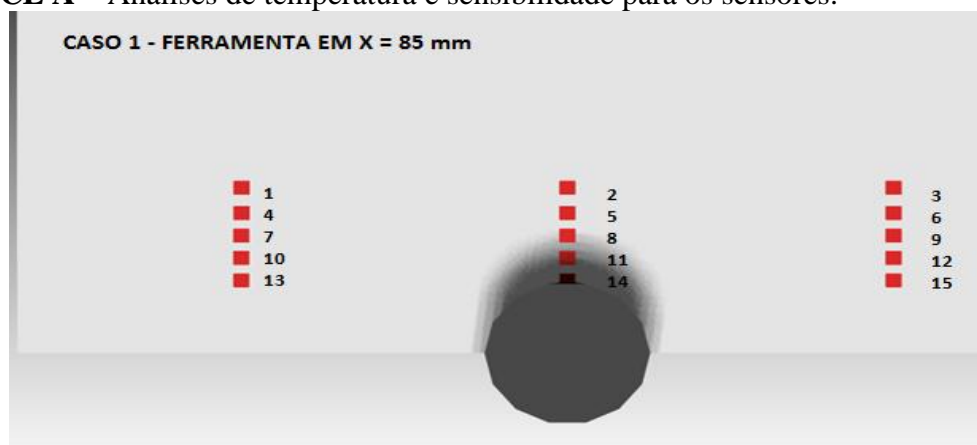


Figura AP-A.1. Vista superior da placa, com disposição de 15 sensores e sua respectiva identificação, para o caso 1 (3 colunas e 5 linhas).

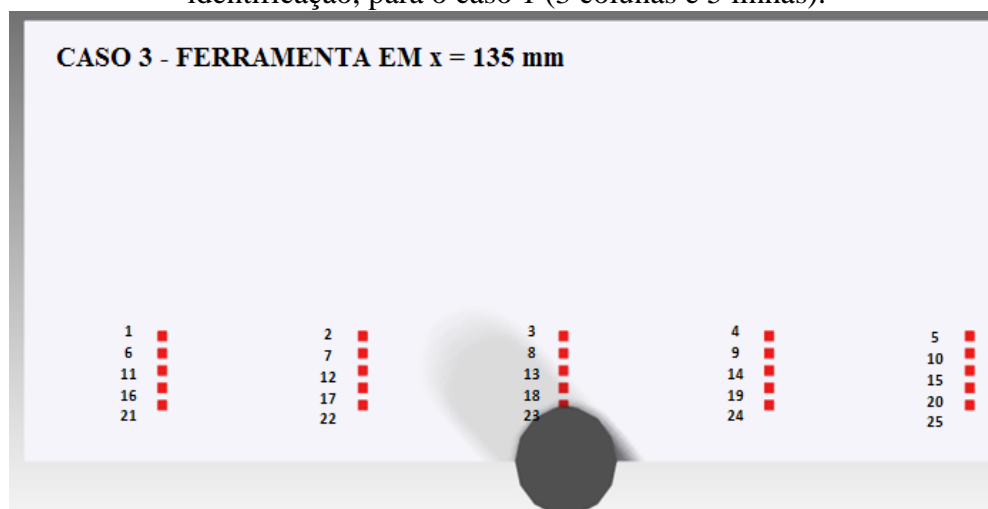


Figura AP-A.2. Vista superior da placa, com disposição de 25 sensores e sua respectiva identificação para o caso 3 (5 linhas e 5 colunas).

Tabela AP-A.1. Valores encontrados para os sensores da Figura AP-A.1

SENSOR	T(°C)	$T_{[Q-\Delta Q]}$ (°C)	$T_{[Q+\Delta Q]}$ (°C)	S_Q do sensor	Posição na malha
1	157.3119	144.6021	169.9056	5.06069	T(5,16,N1)
2	147.1332	134.7988	159.4337	4.92697	T(10,16,N1)
3	31.7058	30.9344	32.4970	0.31252	T(15,16,N1)
4	168.6080	154.9862	182.0796	5.41868	T(5,14,N1)
5	174.0819	159.4126	188.6458	5.84662	T(10,14,N1)
6	32.4823	31.6226	33.3638	0.34824	T(15,14,N1)
7	179.2114	164.7520	193.4872	5.74703	T(5,12,N1)
8	207.5601	190.1322	224.7806	6.92966	T(10,12,N1)
9	33.2492	32.3025	34.2195	0.38339	T(15,12,N1)
10	188.7448	173.5469	203.7281	6.03625	T(5,10,N1)
11	249.7917	229.0735	270.1611	8.21752	T(10,10,N1)
12	33.9724	32.9441	35.0261	0.41641	T(15,10,N1)
13	196.8249	181.0114	212.3971	6.27714	T(5,8,N1)
14	305.3903	280.5979	329.6374	9.80789	T(10,8,N1)
15	34.6125	33.5120	35.7397	0.44552	T(15,8,N1)

Tabela AP-A.2. Valores encontrados para os sensores da Figura AP-A.2, considerando erro de leitura de 2%.

SENSOR	T(°C)	$T_{[Q-\Delta Q]}$ (°C)	$T_{[Q+\Delta Q]}$ (°C)	S_Q do sensor	Posição na malha
1	117.8759	108.7732	126.9310	3.63155	T(5,16,N1)
2	160.3587	147.4505	173.1328	5.13646	T(10,16,N1)
3	149.8704	137.2519	162.4508	5.03977	T(15,16,N1)
4	32.2005	31.3474	33.0765	0.34581	T(20,16,N1)
5	25.0157	24.9941	25.0379	0.00876	T(25,16,N1)
6	126.6708	116.8581	136.4233	3.91303	T(5,14,N1)
7	177.7682	163.4684	191.8938	5.68507	T(10,14,N1)
8	183.4265	167.9268	198.8114	6.17692	T(15,14,N1)
9	34.2772	33.2967	35.2835	0.39736	T(20,14,N1)
10	25.9990	25.9753	26.0234	0.00962	T(25,14,N1)
11	123.2988	113.7249	132.8062	3.81626	T(5,12,N1)
12	177.9808	163.6884	192.0765	5.67762	T(10,12,N1)
13	205.9427	188.6211	223.0555	6.88688	T(15,12,N1)
14	33.1716	32.1574	34.2122	0.41096	T(20,12,N1)
15	24.5875	24.5639	24.6117	0.00955	T(25,12,N1)
16	130.3894	120.2479	140.4538	4.04117	T(5,10,N1)
17	192.8981	177.4425	208.1203	6.13554	T(10,10,N1)
18	254.8791	233.7174	275.6824	8.39299	T(15,10,N1)
19	34.9784	33.8473	36.1386	0.45826	T(20,10,N1)
20	25.3826	25.3573	25.4086	0.01026	T(25,10,N1)
21	130.8389	120.6504	140.9443	4.05877	T(5,8,N1)
22	197.5346	181.7444	213.0692	6.26496	T(10,8,N1)
23	305.6929	280.8610	329.9772	9.82323	T(15,8,N1)
24	35.0706	33.8842	36.2870	0.48055	T(20,8,N1)
25	24.9862	24.9605	25.0127	0.01043	T(25,8,N1)

APÊNDICE B – Resultados das análises para os casos 1 e 3

Tabela AP-B.1. Resultados da análise inversa para o caso 1 e configurações de sensores, de acordo com a Figura AP-A.1. Percebem-se maiores erros com o uso de 5 sensores.

CONJUNTO	ORIENTAÇÃO	SENSORES UTILIZADOS	$\Sigma (S_Q)$	DESVIO	Q (W): ANÁLISE INVERSA	ERRO (%)
A	vertical	1-2-3	10.3002	88.05%	1717.855	1.2727%
B	vertical	4-5-6	11.6135	90.72%	1717.203	1.3102%
C	vertical	7-8-9	13.0601	94.48%	1761.118	1.2137%
D	vertical	10-11-12	14.6702	99.89%	1747.086	0.4072%
E	vertical	13-14-15	16.5306	107.70%	1746.945	0.3991%
F	horizontal	1-4-7-10-13	28.5398	17.64%	1717.189	1.3110%
G	horizontal	2-5-8-11-14	35.7287	57.80%	1725.781	0.8172%
H	horizontal	3-6-9-12-15	1.9061	6.96%	1549.998	10.9197%
I	diagonal	1-5-9	11.2907	89.51%	1746.931	0.3984%
J	diagonal	4-8-12	12.7648	94.22%	1746.931	0.3984%
K	diagonal	7-11-15	14.4101	100.38%	1747.086	0.4072%
L	diagonal	3-5-7	11.9062	92.26%	1715.236	1.4232%
M	diagonal	6-8-10	13.3142	95.10%	1746.931	0.3984%
N	diagonal	9-11-13	14.8780	99.80%	1746.945	0.3991%

Tabela AP-B.2. Resultados da análise inversa para o caso 3 e configurações de sensores, de acordo com a Figura AP-A.2. Considerados erros de medição de 2%.

CONJUNTO	ORIENTAÇÃO	SENSORES UTILIZADOS	$\Sigma (S_Q)$	DESVIO	Q (W): ANÁLISE INVERSA	ERRO (%)
A	vertical	1-2-3-4-5	14.1624	133%	1542.292	11.3625%
B	vertical	6-7-8-9-10	16.1820	138%	1545.605	11.1721%
C	vertical	11-12-13-14-15	16.8013	146%	1549.89	10.9259%
D	vertical	16-17-18-19-20	19.0382	156%	1570.856	9.7209%
E	vertical	21-22-23-24-25	20.6379	169%	1550	10.9196%
F	horizontal	1-6-11-16-21	19.4608	9%	1453.596	16.4600%
G	horizontal	2-7-12-17-22	28.8997	16%	1505.718	13.4645%
H	horizontal	3-8-13-18-23	36.3198	56%	1777.839	2.1747%
I	horizontal	4-9-14-19-24	2.0930	7%	1500.789	13.7477%
J	horizontal	5-10-15-20-25	0.0486	4%	215.8306	87.5959%
K	diagonal	1-7-13-19-25	16.6722	145%	1550	10.9196%
L	diagonal	21-17-13-9-5	17.4873	145%	1570.856	9.7209%