

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

ANÁLISE DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO DE SENSORES DE
TEMPERATURA PARA DETERMINAÇÃO DE FONTE DE CALOR NA SOLDAGEM POR
FRICÇÃO LINEAR

por

Rodrigo Brenner Miguel

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.

Porto Alegre, dezembro de 2012

ANÁLISE DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO DE SENSORES DE
TEMPERATURA PARA DETERMINAÇÃO DE FONTE DE CALOR NA SOLDAGEM POR
FRICÇÃO LINEAR

por

Rodrigo Brenner Miguel

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry

Prof. Daniel Dall'Onder dos Santos

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2012.

MIGUEL, R. B. **Análise dos Parâmetros Envolvidos no Posicionamento de Sensores de Temperatura para Determinação de Fonte de Calor da Soldagem por Fricção Linear.** 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

O trabalho analisa a transferência de calor transiente na soldagem por fricção linear (FSW) de duas placas de alumínio AA 2195-T8, com o objetivo de encontrar a influência dos parâmetros de sensibilidade a potência da ferramenta e coeficiente de variação da temperatura dos conjuntos de sensores escolhidos, na qualidade dos resultados obtidos na análise inversa. Para isolar a influência da sensibilidade a potência da ferramenta e analisar a influência do coeficiente de variação nos resultados, grupos com mesma sensibilidade foram escolhidos. Para a análise foi utilizado método dos volumes finitos, para encontrar o campo de temperatura na placa e otimização extrema generalizada (GEO), para encontrar a potência da ferramenta por análise inversa. O método GEO se mostrou robusto em relação a variação dos parâmetros, apresentando erros menores que 3,4% para todos conjuntos de sensores. Apesar de erros intrínsecos ao processo evolutivo do método GEO, de caráter aleatório, ser dominante, há uma tendência maior de encontrar resultados com maior qualidade com a escolha de conjuntos de sensores de maior sensibilidade média ao calor.

PALAVRAS-CHAVE: soldagem por fricção linear, problemas inversos, transferência de calor, otimização extrema generalizada.

MIGUEL, R. B. **Analysis of the Parameters Involved in Temperature Sensors Positioning for Determination of Heat Source in Friction Stir Welding**. 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

1 ABSTRACT

The study analyzes the transient heat transfer in friction stir welding (FSW) of two AA 2195-T8 aluminum plates, Aiming to find the influence of the parameters of the tool's power sensitivity and variation temperature coefficient of sensors sets chosen, in the results quality of inverse analysis. To isolate the influence of the tool power sensitivity and to analyze the coefficient of variation in the results, groups were chosen with equal sensitivity. For this was used the finite volume method, to find the plate temperature field, and generalized extreme optimization (GEO), to find the tool power by inverse analysis. The GEO method proved robust in respect of parameters variation, with errors smaller than 3.4% Despite errors intrinsic to the evolution mechanism of GEO method with dominant random character, there is a greater likelihood to find results with higher quality with the choice of sensor assemblies with greater average sensitivity to heat.

KEYWORDS: friction stir welding, inverse approach, heat transfer, generalized extreme optimization.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1. Soldagem por Fricção Linear.....	1
2.1.1. Resistência Térmica de Contato entre as Peças de Trabalho e a Placa de Suporte.....	1
2.2. Condução de Calor Tridimensional Transiente.....	2
2.2.1. Condições de contorno.....	3
2.3. Método dos volumes finitos.....	3
2.3.1. Solução do Sistema Linear de Equações.....	5
2.4. Problemas Inversos.....	5
2.5. Otimização Extrema Generalizada.....	6
3. ANÁLISE DO PROBLEMA.....	6
4. DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS DOMINANTES.....	7
4.1. Parâmetros Utilizados.....	7
4.2. Análise Direta: Temperatura.....	8
4.3. Análise direta: Sensibilidade.....	9
4.4. Análise dos resultados.....	9
4.5. Análise Inversa.....	10
4.6. Análise dos resultados.....	13
5. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS.....	14
ANEXOS.....	16
APÊNDICES.....	16

1. INTRODUÇÃO

A competitividade do mercado atual leva empresas a aprimorarem seus processos produtivos visando, entre outros aspectos, à redução de custos e aumento de qualidade. Um meio de obter isto é melhorar o controle em tempo real dos processos de produção, aumentar a qualidade do produto e diminuir custos com retrabalho e descarte de peças.

O processo de soldagem por fricção linear (Friction Stir Welding – FSW), por ter baixo custo do acabamento superficial diminui o custo final do processo. As vantagens da união de materiais em estado sólido para placas e perfis de alumínio justificam o número crescente de estudos envolvendo a soldagem por fricção linear. Como exemplo, é possível citar a busca da indústria aeronáutica pela redução de peso em aeronaves, com a substituição de chapas de alumínio rebitadas por chapas soldadas por fricção. Além da vida em fadiga ser similar ou superior dos painéis rebitados, o custo de produção das aeronaves torna-se mais baixo [Genicolo, 2007].

A determinação da fonte de calor mais acurada possibilita o controle em tempo real do processo de soldagem por fricção. Reduz tempo e custo causado pela análise posterior da solda com ensaios destrutivos (tração, compressão, fadiga e dobramento) e ensaios não destrutivos (radiografia, ultrassom e líquidos penetrantes). Reduz-se, assim, o retrabalho e rejeite de peças soldadas por fricção.

Este trabalho tem como objetivo definir a melhor posição dos sensores de temperatura para a determinação acurada da fonte de calor no processo de soldagem por fricção (FSW) pela análise inversa. Busca-se dar continuidade aos resultados encontrados no trabalho de Longhi, 2011, no qual foram encontradas correlações entre desvio de temperatura e sensibilidade dos sensores com erros do resultado da análise inversa. Com isto, objetiva-se estabelecer o critério de posicionamento dos sensores de temperatura, através da análise da influência dos parâmetros térmicos que governam a análise inversa, como a sensibilidade das temperaturas em relação à fonte de calor e o coeficiente de variação de temperatura do conjunto de sensores.

Os dados do problema serão adquiridos através de um programa computacional, que utiliza método de volumes finitos para análise direta, aliada com método estocástico de otimização extrema generalizada para solução do problema inverso. O código fonte, na linguagem FORTRAN, foi desenvolvido e validado por Centeno, 2008.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Soldagem por Fricção Linear

Soldagem por fricção linear (Friction Stir Welding – FSW) é um processo de junção em estado sólido, ou seja, a temperatura do processo é abaixo da temperatura de fusão do metal base, não havendo, portanto, mudança de fase do material durante o processo [Soundararajan et al., 2005].

O processo pode ser dividido em quatro partes. Na primeira parte, a ferramenta já em rotação avança verticalmente e entra na linha de junção entre as peças de trabalho. Na segunda parte, pré-aquecimento, a ferramenta ainda em rotação, fica parada em relação às peças de trabalho. Através de fricção e deformação plástica é produzido calor, que dissipado no material da peça aumenta a temperatura e deixa o material mais macio. Depois destas etapas, a ferramenta movimenta-se ao longo da linha de junção e une as peças. No final do processo, a ferramenta se afasta da peça verticalmente e deixa um furo de saída do pino. A esquematização da soldagem por fricção pode ser observado na Figura 2.1a.

A ferramenta usada na soldagem por fricção linear consiste de duas partes básicas, como visto na Figura 2.1b. O pino é responsável pela união das peças de trabalho, através da deformação plástica do material, amolecido pela alta temperatura, o material base é misturado. Enquanto que a superfície do ombro retém o material sobressalente e aplica pressão sobre o material, evitando-se assim a formação de vazios e porosidades. A maior parte do calor é

gerado pelo ombro da ferramenta, causado pelo atrito do movimento de rotação e a pressão exercida sobre as peças de trabalho. Apesar do pino também gerar calor pela deformação plástica do material base, a quantidade de calor é menor [Schimit et al., 2003].

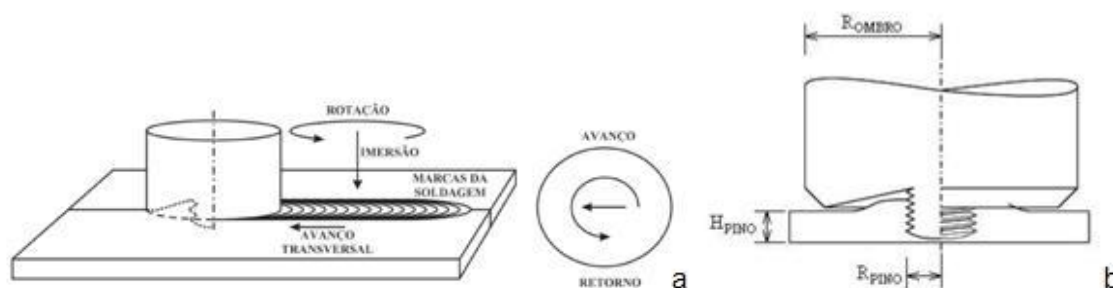


Figura 2.1: a) Esquemática do processo de soldagem por fricção linear. b) Vista lateral da ferramenta de soldagem por fricção linear (Fonte: Centeno, 2008).

No processo de soldagem por fricção linear, os parâmetros de soldagem são escolhidos de tal forma que o amaciamento do material permita a deformação mecânica e o escoamento do material. Entretanto, diferente de muitos outros processos termomecânicos, os mecanismos de geração de calor e o escoamento do material na soldagem por fricção linear são completamente acoplados [Centeno, 2008].

Segundo Chiument, 2012, a união por estado sólido da soldagem por fricção linear tem várias vantagens sobre os métodos de soldagem a arco tradicional, uma vez que todos os problemas da solidificação da poça de fusão são evitados. Defeitos de porosidade e trincas de solidificação, não ocorrem no processo. Soudararajan, 2005, acrescenta as vantagens da ausência de fumaça, baixa geração de calor e quase nenhum custo com acabamento.

2.1.1. Resistência Térmica de Contato entre as Peças de Trabalho e a Placa de Suporte

No processo de Solda por Fricção Linear, as peças de trabalho devem ser fixadas em uma placa de suporte. Devido à falta de pontos de fixação na superfície superior da peça de trabalho, há formação de folgas na interface. Isto gera uma resistência térmica na transferência de calor na superfície inferior da peça de trabalho. Segundo Sounderarajan, 2005, essa resistência térmica terá influência direta no processo de transferência de calor, quando os corpos em contato forem bons condutores e/ou o meio gasoso intersticial tiver uma condutividade térmica baixa. O fluxo térmico na superfície inferior pode ser aproximado pela equação:

$$q''_b = h_b(T_1 - T_2) = Nu_\delta \frac{k}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

onde h_b é o coeficiente de transferência de calor, 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 do ar na folga em $W/(m^2K)$, δ é a distância de separação entre as placas em (m), T_1 e T_2 é a temperatura da peça de trabalho e a temperatura da placa de suporte respectivamente em (K).

2.2. Condução de Calor Tridimensional Transiente

Para quantificar a transferência de calor em um volume de controle infinitesimal em termos de equações de taxa em um meio isotrópico utiliza-se a lei de Fourier:

$$q''_x = -k \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.2)$$

onde q''_x é o fluxo de calor normal a superfície formada pelos planos y e z na direção x em (W/m^2), análogo para as direções y e z , k é a condutividade do material em ($W/(m.K)$) e T é a temperatura em (K).

Segundo Incropera et al, 2008, o campo de temperatura $T(x,y,z)$ em um material que conduz calor é governado pela equação da difusão do calor:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde T a temperatura no ponto (x,y,z) em (K), \dot{q} é a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume do meio (W/m^3), ρ é a massa específica do material (kg/m^3) e c_p o calor específico ($J/(kg K)$), $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio, por unidade de volume.

2.2.1. Condições de Contorno

Para aplicar a equação do calor, é necessário definir as condições iniciais e de contorno do problema. Como a equação do calor é de segunda ordem em relação às coordenadas espaciais, devem ser fornecidas duas condições de contorno para cada coordenada espacial necessária para descrever o sistema. Em relação ao tempo, a equação é de primeira ordem, apenas a condição inicial deve ser especificada.

Os três tipos de condições de contorno frequentemente encontradas na transferência de calor são:

- (i) Condição de primeira espécie, ou condição de Dirichlet corresponde a uma situação na qual a superfície é mantida a uma temperatura fixa T_s :

$$T(0, t) = T_s \quad (2.4)$$

- (ii) Condição de segunda espécie, ou condição de Neumann corresponde a um fluxo de calor q''_s fixo ou constante:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q''_s \quad (2.5)$$

Essa condição pode corresponder a uma superfície perfeitamente isolada, adiabática, igualando q''_s a zero.

- (iii) Condição de terceira espécie, ou condição de Robin corresponde a uma troca de calor na superfície por convecção:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)] \quad (2.6)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em ($W/m^2.K$) e T_∞ é a temperatura do fluido em (K).

2.3. Método dos Volumes Finitos

Neste trabalho, a solução da transferência de calor na soldagem por fricção linear baseia-se no método dos volumes finitos. Neste método, integram-se as equações diferenciais sob certo número de volumes de controle originários da discretização do domínio. Migra-se de volumes infinitesimais em um volume contínuo para volumes finitos em um domínio discretizado, sem perder as hipóteses da mecânica do contínuo [Vielmo, 2010].

A obtenção das equações aproximadas para problemas tridimensionais é feita através da integração de forma conservativa no espaço e no tempo da Eq. (2.3) [Maliska, 1995].

O comportamento do fluxo no intervalo de tempo pode ser descrito como implícito ou explícito. A função de interpolação no tempo é dada por [Vielmo, 2010]:

$$\int_t^{t+\Delta t} \varphi_p dt = [f\varphi_p' + (1-f)\varphi_p^o]\Delta t \quad (2.7)$$

onde φ_p é uma variável genérica, no caso específico φ_p é a temperatura no volume de controle, o superíndice “o” representa o valor da variável genérica na iteração anterior e o f é um parâmetro que vale 0 para a formulação explícita e 1 para formulação totalmente implícita. Na formulação explícita, todas as temperaturas vizinhas ao volume de controle são avaliadas no instante anterior e já são conhecidas. Segundo Maliska, 1995, a distribuição espacial de temperatura ao longo do tempo não está correta, visto que seu comportamento é exponencial no espaço e no tempo. Para uma melhor representação do transiente, são necessárias malhas suficientemente refinadas no espaço e tempo. Na formulação totalmente implícita, a temperatura no volume de controle é calculada no mesmo nível de tempo de seus vizinhos. Por esse motivo necessita-se iterações para chegar ao resultado. No entanto, segundo Vielmo, 2010, esse método assegura a positividade dos coeficientes, o que garante a convergência em passos de tempo longos. Existem outras funções de interpolação, como mostra a linha tracejada da Figura 2.2a, são funções implícitas usadas para seguir o transiente com mais fidelidade em intervalos de tempo maiores.

Tendo em vista a avaliação da derivada da temperatura na interface dos volumes de controle, é preciso definir uma função de interpolação da temperatura entre os pontos centrais dos volumes de controle. Para problemas com efeitos apenas de difusão, é comum a escolha de uma função linear.

Na integração da Eq. (2.3) no espaço e no tempo, considera-se ρc_p constante e T constante dentro do volume de controle, com aproximação das derivadas nas interfaces por diferenças centrais, e com formulação totalmente implícita para a função de interpolação no tempo, resulta em [Vielmo, 2010]:

$$A_p T_P = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + A_f T_F + A_b T_B + B \quad (2.8)$$

os coeficientes são mostrados no Anexo A.

Esta equação é uma aproximação para os volumes internos. Para se obter o sistema de equações algébricas completo, é necessário aplicar condições de contorno para obter equações dos volumes que estão nas fronteiras.

Segundo Maliska, 1995, o procedimento mais adequado para a implementação das condições de contorno, devido ao seu embasamento físico e a possibilidade de generalização para sistemas coordenados mais complexos, é realizar a integração das equações de conservação também para os volumes de fronteira, respeitando a condição de contorno existente. Assim, todos os volumes de controle são considerados como inteiros. Para o caso unidimensional da Figura 2.2b, Vielmo, 2010, descreve os três tipos de condição de contorno possíveis.

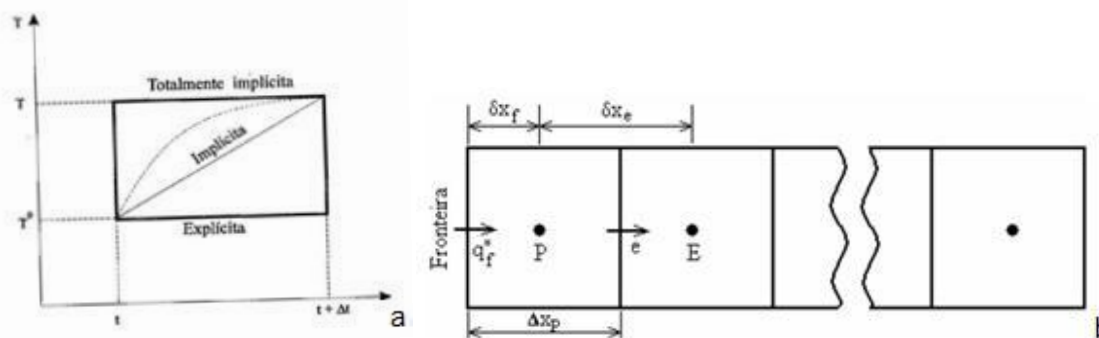


Figura 2.2: a) Função de interpolação no tempo. b) Discretização unidimensional com volumes inteiros [Maliska, 1995].

Para a temperatura prescrita considera-se que a temperatura na fronteira, T_f , seja especificada, enquanto que o coeficiente A_w é dado pela expressão:

$$A_w = k_e \frac{\Delta y_p \Delta z_p}{\Delta x_e / 2} \quad (2.9)$$

No caso de fluxo prescrito, o fluxo de calor através da fronteira é computado no termo fonte do volume P, a superfície é isolada fazendo $A_w = 0$, e a temperatura da fronteira é calculada no pós processamento pelo balanço de energia.

No caso de condição de convecção na fronteira, o termo fonte é obtido da seguinte forma:

$$B = \left(S_{Coriginal} + \frac{T_\infty}{\Delta x_p \left(\frac{1}{h} + \frac{\delta x_w}{k_p} \right)} \right) + \left(S_{Poriginal} - \frac{1}{\Delta x_p \left(\frac{1}{h} + \frac{\delta x_w}{k_p} \right)} \right) T_P \quad (2.10)$$

onde $S_{Coriginal}$ e $S_{Poriginal}$ são correspondentes ao termo fonte original do volume, T_∞ é a temperatura do fluido h é coeficiente convectivo.

As equações descritas acima são para a direção x ; para a direção y e z podem ser aplicadas de forma análoga.

2.3.1. Solução do Sistema Linear de Equações

Os métodos de solução podem ser classificados em diretos e iterativos [Maliska, 1995]. O método utilizado no trabalho é o TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm). Este método consiste em solucionar linha por linha, ou coluna por coluna, diretamente, ou seja, este método resolve um problema unidimensional sem iterações. Para problemas bidimensionais e tridimensionais, é necessário iterações para a convergência da solução.

Segundo Maliska, 1995, o TDMA é um método utilizado intensivamente na área numérica, dada sua facilidade de implementação e boas características de convergência. O algoritmo do método pode ser resumido por:

- i. estimar o campo inicial de variáveis;
- ii. calcular os coeficientes do primeiro volume da linha;
- iii. calcular os coeficientes para o restante da linha;
- iv. calcular a temperatura do ultimo volume da linha;
- v. calcular a temperatura para os outros volumes da linha no sentido inverso;
- vi. no caso de problemas bidimensionais ou tridimensionais, checar a convergência, não sendo satisfeito o critério, repetir ou alternar a direção.

No método em questão, é possível acelerar a convergência para realizar o processo na direção das condições de contorno dominantes.

2.4. Problemas Inversos

O problema inverso determina causas desconhecidas a partir da observação de seus efeitos. A maioria dos modelos de processos físicos são diretos. Para o desenvolvimento de algoritmos de controle, a solução do problema inverso é desejada. Por exemplo, as características desejadas de solda dependem da intensidade da fonte de calor, uma informação que não pode ser medida diretamente, mas que pode ser estimada a partir do conhecimento de seus efeitos, como a elevação da temperatura do material.

Para o caso de Soldagem por Fricção Linear, quando se especifica a energia térmica imposta ao sistema pela ferramenta, com a condutividade do material e coeficientes convectivos, obtêm-se o campo de temperaturas. Este problema é considerado direto. No entanto, para encontrar a energia térmica imposta ao sistema pela ferramenta através do campo de temperatura, é considerado um problema inverso.

2.5. Otimização Extrema Generalizada

Os algoritmos de otimização partem de uma determinada configuração de parâmetros, dispondo do valor da função objetivo, faz alterações de tal forma que em um certo número de avaliações da função objetivo, a solução seja ótima. Apesar disto, sem garantia de que seja o ótimo global.

Segundo Longhi, 2011, os métodos estocásticos buscam o ótimo através de regras de probabilidade, trabalha de maneira “aleatória orientada”, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema, apenas com grande número de avaliações de uma função objetivo.

O algoritmo de Otimização Extrema Generalizada (*Generalized Extremal Optimization* GEO) [Souza et al., 2003], é um algoritmo evolucionário desenvolvido para ser facilmente aplicável a diversos problemas de otimização. Neste método, L espécies são nomeadas, e para cada espécie é nomeado um valor de adaptabilidade, que irá determinar quais espécies estão mais propensas a sofrer mutação. Cada espécie é um bit que pode assumir valores de 0 ou 1.

O número de adaptabilidade é proporcional ao ganho no valor da função objetivo para o bit sofrer mutação. Classifica-se o bit em 1, para o bit menos adaptado, até N para o bit melhor adaptado. Um bit então sofre mutação de acordo com a distribuição de probabilidade. Este processo é repetido até que um critério de parada é alcançado e a melhor configuração de espécies é encontrada (a que fornece o melhor valor da função objetivo).

A probabilidade de um bit sofrer mutação é regulada pelo parâmetro ajustável τ . Quanto maior o valor de τ , menor é a probabilidade de um bit sofrer mutação. A possibilidade de mutações que não melhoram o valor da função objetivo permite o algoritmo a escapar de ótimos locais.

3. ANÁLISE DO PROBLEMA

Este trabalho utiliza o estudo de caso iniciado por Chao et al., 2003, no qual foi analisado o processo de soldagem por fricção linear de duas placas de alumínio AA 2195-T8, com espessura de 8,13mm, 610mm de comprimento e 102mm de largura cada placa. A ferramenta utilizada no caso tem as dimensões de 25,4 mm de diâmetro no ombro, 10mm de diâmetro no pino, com uma rotação de 240 RPM e deslocamento de 2,36 mm/s. Para medição da temperatura na placa foi utilizado 36 sensores termopares do tipo K em 9 locais.

Para o mesmo estudo de caso, Centeno, 2008, implantou um algoritmo de volumes finitos para a determinação do campo de temperaturas na placa de alumínio e, por fim, um algoritmo de GEO para a determinação do calor gerado pela ferramenta através da temperatura medida em pontos da placa.

Para implementação do algoritmo foi utilizada a Eq. (2.8) para a determinação do campo de temperaturas transiente, eliminado o termo fonte B . A ferramenta de soldagem por fricção linear é tratada como uma fonte de calor que se move ao longo do eixo de simetria das peças de trabalho. É possível simplificar a fonte de calor do algoritmo por um fluxo prescrito distribuído linearmente na superfície da peça de trabalho através da equação [Chao et al.,2003]:

$$q''_0(r) = \frac{3Qr}{2\pi R_{ombro}^3} \quad (3.1)$$

na qual Q é a energia total imposta ao sistema, aplicada como uma condição de contorno de segunda espécie, conforme discutido na Seção 2.2.1. Com a aplicação da condição de contorno de fluxo de calor prescrito igual a zero (superfície isolada) no eixo de simetria das peças de trabalho, linha que percorre a ferramenta de solda por fricção linear, é calculado o campo de temperaturas para somente uma das placas. Admite-se que a condução de calor é simétrica em relação a este eixo, reduzindo o custo computacional.

Na superfície inferior ocorre troca de calor com a placa de suporte onde foi aplicada a condição de contorno de convecção descrita na Seção 2.3, com o coeficiente de convecção

aproximado pela Eq. (2.1) e temperatura da placa de suporte não afetada pela temperatura da peça. Para as superfícies restantes, a troca de calor ocorre por convecção natural com a condição de contorno aplicada da mesma forma, com o coeficiente de convecção como segue na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros da soldagem por fricção.

Temperatura da base (não perturbada)	298 K
Temperatura ambiente	298 K
Coeficiente convectivo entre placa e base	350 W/(m ² K)
Energia imposta ao sistema (potencia da ferramenta)	1740 W
Coeficiente convectivo padrão	30 W/(m ² K)

Comparados os dados de temperatura adquiridos experimentalmente por Chao et al., 2003 foi possível o teste do algoritmo por Centeno, 2008. Depois de testado, foi implementado o algoritmo de otimização extrema generalizada conforme Seção 2.5. Como métodos estocásticos necessitam de número elevado de iterações para a convergência, foi feito um estudo de sensibilidade de malha para reduzir o custo computacional. A malha obtida para um resultado satisfatório e facilidade do posicionamento dos sensores na superfície da placa foi de 61x21x4 volumes em x, y e z respectivamente. Para maior redução do custo computacional, a malha tem distribuição não uniforme na direção y e segue uma função tangente hiperbólica a partir do volume 16 onde o gradiente de temperatura é menos significativo. Assim, a malha resultou em 61x (15+6) x4 volumes. A Figura 3.1 mostra a distribuição dos volumes de controle no plano x, y.

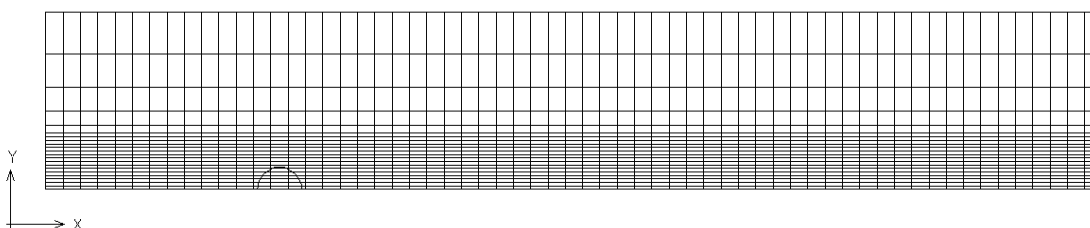


Figura 3.1: Distribuição da malha no plano x, y, com representação da ferramenta na posição $x = 135\text{mm}$.

Na figura foi representada a ferramenta na linha de solda e eixo de simetria para melhor compreensão da distribuição da malha.

4. DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS DOMINANTES

Neste trabalho, objetiva-se determinar os parâmetros dominantes para minimizar o erro obtido na determinação da energia térmica gerada na ferramenta, em soldagem por fricção linear por análise inversa. Para isto, utiliza-se o método dos volumes finitos para a análise direta. Ou seja, a obtenção do campo de temperaturas através dos dados taxa de calor gerado pela fricção entre a ferramenta e a peça, o coeficiente convectivo na superfície em contato com o ar e coeficiente de transferência de calor entre placa e base. Os dados obtidos são utilizados na análise inversa para a determinação da fonte de calor na ferramenta a partir do conhecimento da temperatura de alguns pontos. Com grupos de temperatura com diferentes características, conforme será discutido adiante com o objetivo de avaliar o efeito da escolha das temperaturas medidas na acuracidade da solução inversa.

4.1. Parâmetros Utilizados

Para iniciar a metodologia aplicada neste trabalho, é necessária uma breve verificação dos parâmetros utilizados. A posição inicial da ferramenta e velocidade de translação são

consideradas com 15mm e 2,5 mm/s respectivamente, o que facilita a combinação entre a ferramenta e os volumes de medição. A ferramenta fica parada por 5 segundos na posição inicial para pré-aquecimento. Com o passo de tempo selecionado de um segundo ($\Delta t = 1s$) e ($\Delta x = 10mm$), a cada 4 segundos de tempo a ferramenta se encontra no centro de um volume.

Em termos do algoritmo, o fluxo de calor mantém-se estacionário por cinco iterações no terceiro volume da malha e em cada iteração posterior se move 2,5mm. Como a iteração começa com o valor de zero, na quarta iteração de tempo o fluxo de calor ainda estará na posição de 15mm ou terceiro volume. Na quinta iteração de tempo, a posição do fluxo de calor está a 17,5mm da borda da placa, mas ainda estará no terceiro volume. Na oitava iteração de tempo, o fluxo se encontra no centro do quarto volume a 25mm da borda. Demais relações entre posição da ferramenta e volume da malha são descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação da posição da ferramenta por iterações no tempo.

Passos de tempo	Volume na malha	Posição em x
12	5	35 mm
32	10	85 mm
52	15	135 mm
72	20	185 mm

4.2. Análise Direta: Temperatura

A análise direta consiste em inserir os dados de fonte de calor, do coeficiente de transferência de calor entre placa e base, e do coeficiente convectivo na superfície em contato com o ar. Através de simulação numérica por volumes finitos, o campo de temperatura é gerado na placa.

Foram analisadas quatro situações diferentes, com a ferramenta a 85 mm, 135 mm, 185mm e 235 mm da borda. Na Figura 4.1 observa-se a distribuição da temperatura na placa, com a ferramenta localizada a 135 mm da borda. O caso foi usado para o estudo, pois o campo de temperaturas atinge o padrão final, ao contrário da ferramenta a 85 mm, e tem um custo computacional menor que o caso da ferramenta a 185 mm e 235mm. Outras configurações estão descritas no apêndice A.

É considerada somente a coleta de temperaturas na superfície da peça por ser uma solução mais prática, na qual a perfuração da peça de trabalho para o posicionamento dos sensores inutilizaria a peça. Por não ser possível a colocação de sensores no caminho percorrido pela ferramenta em um teste experimental, os dados destes pontos não são analisados, a temperatura na área foi plotada no gráfico como zero.

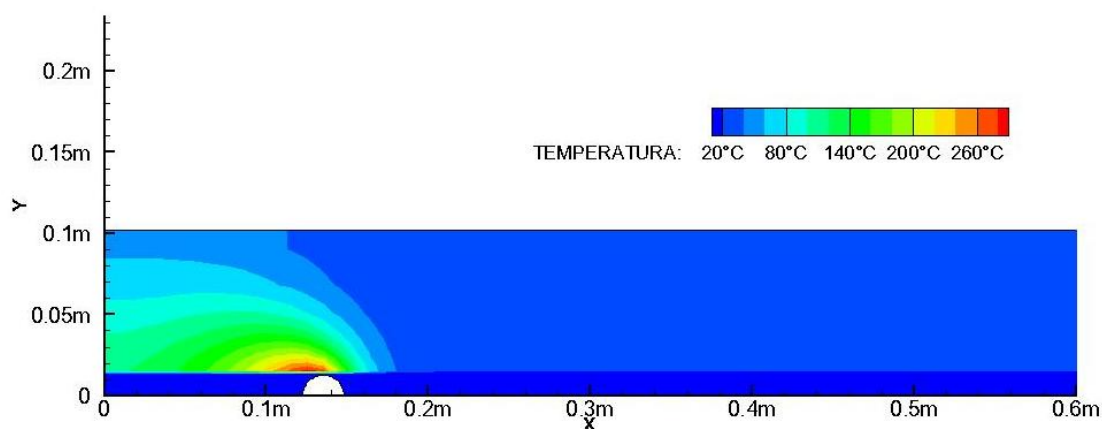


Figura 4.1: Distribuição da temperatura [°C] na placa com a ferramenta em 135 mm.

A temperatura segue o padrão de elipse, característico em processos de soldagem, com temperaturas mais altas perto da ferramenta.

4.3. Análise direta: Sensibilidade

Para avaliar como a variação da potência da ferramenta influencia a temperatura de cada volume da peça de trabalho, fez-se a análise da sensibilidade ao calor. A sensibilidade ao calor quantifica a resposta do sistema a variação imposta ao dado de entrada. Quanto maior a sensibilidade, maior a variação na temperatura para uma mesma entrada. Esse parâmetro é de grande importância na análise inversa, pois se espera que pontos com mais sensibilidade permitam uma recuperação mais efetiva do valor da fonte de calor.

A sensibilidade foi analisada para todas as posições passíveis de sensores, para a ferramenta na posição de 135 mm, como demonstra a Figura 4.2. Para quantificar a sensibilidade, foram utilizadas diferenças finitas centrais:

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

onde Q é a energia térmica imposta ao sistema pela ferramenta, em W, T_{∞} é a temperatura ambiente de referência, utilizada para adimensionalizar a sensibilidade ao calor, ΔQ é a variação imposta à potência da ferramenta de 1% (17,4 W). Para determinar $T_{[Q+\Delta Q]}$ e $T_{[Q-\Delta Q]}$ é seguida a mesma metodologia a Seção 4.2 e utiliza-se 101% e 99% de Q .

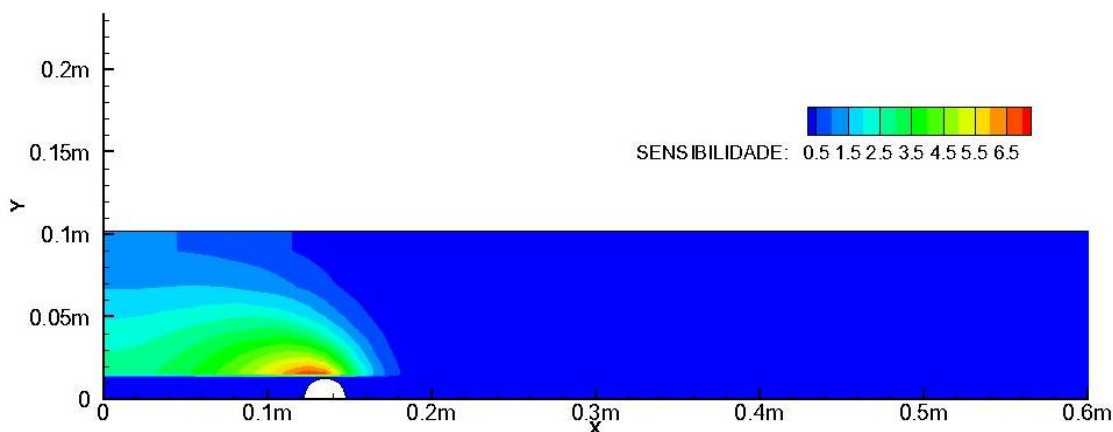


Figura 4.2: Distribuição da sensibilidade a potência da ferramenta.

A sensibilidade à potência da ferramenta segue o mesmo padrão da temperatura. Observa-se que os pontos mais quentes são mais afetados por uma alteração na fonte de calor. Espera-se que sejam esses os melhores pontos para medição da temperatura, a partir dos dados adquiridos aplicar a análise inversa para recuperar a taxa de calor.

4.4. Escolha da Posição dos Sensores

Para separar o estudo entre a sensibilidade ao calor e outros parâmetros, foi isolada a influência da sensibilidade no resultado. Escolheram-se grupos de sensores com mesma sensibilidade média ao calor, em que a sensibilidade média ao calor pode ser definida como:

$$\overline{S_Q} = \frac{[\sum_1^N S_{Qi}]}{N} \quad (4.2)$$

onde N é o número de sensores no grupo.

Foram escolhidas oito configurações de três sensores para as sensibilidades médias iguais a 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 totalizando-se 32 grupos. A Tabela 4.2 mostra os dados dos sensores

escolhidos para sensibilidade média ao calor de aproximadamente 2,0. As posições dos sensores estão representadas no Apêndice B.

Tabela 4.2: Conjuntos de sensores com sensibilidade média de aproximadamente 2,0.

Conjunto	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	\bar{S}_Q	CVT
A	T(18,10,N1)	T(19,17,N1)	T(14,17,N1)	2.01	0.719
B	T(18,9,N1)	T(16,16,N1)	T(9,13,N1)	1.99	0.708
C	T(18,15,N1)	T(20,13,N1)	T(12,15,N1)	2.00	0.903
D	T(18,11,N1)	T(20,9,N1)	T(9,9,N1)	2.00	0.811
E	T(18,16,N1)	T(20,14,N1)	T(10,9,N1)	2.00	0.938
F	T(19,9,N1)	T(20,16,N1)	T(11,11,N1)	1.99	1.013
G	T(19,14,N1)	T(21,12,N1)	T(12,12,N1)	2.00	1.090
H	T(19,13,N1)	T(21,11,N1)	T(11,9,N1)	2.00	1.085

Para a escolha da posição dos sensores, foram eliminados volumes próximos a borda da peça de trabalho, para reduzir a influência desta nos resultados. Todos os sensores estão a mais de 35 mm da borda.

Para comparar a representação do campo de temperaturas por cada grupo de sensores, foi utilizado o parâmetro de coeficiente de variação de temperatura (CVT):

$$CVT = \frac{\text{Desvio padrão da temperatura}}{\text{Média da temperatura do grupo}} \quad (4.3)$$

Este parâmetro tem como objetivo comparar a diversidade das medições de temperatura. Quanto maior o CVT, maior é o gradiente de temperaturas mensuradas pelo conjunto.

4.5. Análise Inversa

Após a escolha dos grupos de sensores aplica-se a análise inversa para a resolução do problema. Nesta etapa, as temperaturas são dados de entrada, enquanto a potência da ferramenta é o principal dado a ser determinado. Os coeficientes de transferência na base e no topo da peça também são tratados como parâmetros a serem determinados, uma vez que normalmente são desconhecidos. Contudo, a determinação desses coeficientes tem importância ligada ao fato de que influem na determinação da taxa de calor.

Para a análise inversa com GEO, é necessário definir alguns parâmetros. Para a escolha do parâmetro τ e o critério de parada do algoritmo, foi analisada a resposta e a convergência de um grupo de sensores para τ variando entre 1,25 a 2 em intervalos de 0,25. Com $\tau = 2$ a convergência foi alcançada em 5000 iterações, mais rápida do que outros valores, e demonstrou resultado satisfatório da potência da ferramenta. Para garantir a convergência, o critério de parada do algoritmo utilizado foi de 7500 avaliações da função objetivo $F(Q)$ definida por:

$$F(Q) = \sum_{i=1}^l \left[(T_i - T_{i,cal})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

onde $T_{i,cal}$ é a temperatura calculada no ponto i para valores de Q , h_b e h_{conv} enquanto l é o número de sensores no grupo, igual a 3. Para tratar do parâmetro IDOM (semente para geração de números pseudo-aleatórios), o caso é solucionado para 5 valores de IDOM e extraída a média dos resultados.

O conjunto de sensores mais preciso é aquele com o resultado mais próximo do calor imposto ao sistema considerado, ou seja, 1740 W (Tabela 3.1). Para quantificar a qualidade do resultado da análise inversa, é utilizada a medida de erro definida por:

$$ERRO = \frac{|Q - Q_{inversa}|}{Q} \quad (4.5)$$

onde $Q = 1740$ W, $Q_{inversa}$ é o valor encontrado para dado conjunto de sensores, a partir da análise inversa. Como o resultado final é a média de cinco resultados, é possível determinar a qualidade do resultado pela variação dos resultados independentes. Para isto, é utilizado o parâmetro coeficiente de variação da potência da ferramenta obtida pela análise inversa (CVQ), dado por:

$$CVQ = \frac{\text{Desvio padrão de } Q_{inverso}}{\text{Média de } Q_{inverso}} \quad (4.6)$$

Para a simulação ser mais condizente com a realidade foi acrescentado uma incerteza de medição de três por cento a temperatura dos pontos, baseado na distribuição gaussiana, para simular a incerteza de medição de sensores de temperatura.

A análise inversa foi feita para todos os 32 conjuntos de sensores escolhidos, com as incertezas de medição de 0% e 3%. A Tabela 4.3 mostra os valores encontrados na análise inversa, para a taxa de calor gerada pela fricção entre a ferramenta e a peça, considerando-se diferentes valores de sensibilidade média. São também apresentados na tabela, os valores dos erros na determinação da taxa de calor.

Tabela 4.3: Resultados da análise inversa e parâmetros dos conjuntos de sensores.

\bar{S}_Q	Conjunt o	CVT	Q (W)	ERRO Q (%)	CVQ	Q 3% (W)	ERRO Q 3% (%)	CV Q 3%
~2,0	A	0.719	1755.074	0.866	0.020	1738.320	0.097	0.019
	B	0.708	1788.134	2.766	0.033	1773.184	1.907	0.028
	C	0.903	1753.299	0.764	0.028	1759.391	1.114	0.022
	D	0.811	1788.570	2.791	0.033	1780.419	2.323	0.028
	E	0.938	1777.210	2.139	0.023	1752.952	0.744	0.046
	F	1.013	1784.594	2.563	0.024	1761.159	1.216	0.022
	G	1.090	1737.986	0.116	0.021	1737.862	0.123	0.023
	H	1.085	1784.872	2.579	0.025	1745.100	0.293	0.029
~3,0	A	0.304	1775.786	2.057	0.023	1777.629	2.163	0.026
	B	0.351	1776.951	2.124	0.023	1773.278	1.913	0.028
	C	0.393	1777.196	2.138	0.023	1776.926	2.122	0.026
	D	0.447	1749.413	0.541	0.013	1747.190	0.413	0.021
	E	0.493	1759.535	1.123	0.011	1734.405	0.322	0.020
	F	0.580	1762.289	1.281	0.023	1762.289	1.281	0.026
	G	0.595	1777.755	2.170	0.023	1797.954	3.331	0.017
	H	0.642	1754.697	0.845	0.020	1761.673	1.246	0.021
~4,0	A	0.183	1777.023	2.128	0.023	1770.053	1.727	0.026
	B	0.214	1776.890	2.120	0.023	1779.800	2.287	0.049
	C	0.222	1776.896	2.120	0.023	1777.188	2.137	0.023
	D	0.238	1781.763	2.400	0.023	1798.424	3.358	0.021
	E	0.262	1777.072	2.131	0.023	1776.465	2.096	0.023

	F	0.283	1777.082	2.131	0.023	1772.953	1.894	0.026
	G	0.294	1782.906	2.466	0.023	1783.000	2.471	0.024
	H	0.323	1759.620	1.128	0.021	1753.307	0.765	0.013
~5,0	A	0.118	1753.292	0.764	0.018	1741.943	0.112	0.018
	B	0.157	1748.019	0.461	0.012	1763.972	1.378	0.016
	C	0.201	1754.247	0.819	0.019	1767.632	1.588	0.020
	D	0.253	1760.690	1.189	0.022	1760.901	1.201	0.020
	E	0.306	1756.411	0.943	0.018	1750.762	0.619	0.014
	F	0.348	1760.477	1.177	0.022	1785.775	2.631	0.022
	G	0.381	1753.741	0.790	0.018	1761.673	1.246	0.021
	H	0.473	1749.383	0.539	0.013	1756.349	0.940	0.017

Para facilitar a citação, os conjuntos de sensores são citados por sua sensibilidade média seguida da letra de identificação do conjunto.

O resultado do conjunto 2G apresentou o menor erro na determinação da taxa de calor devido à fricção ($ERRO = 0,116\%$). Em média, os resultados para as configurações com maiores sensibilidades médias em relação à taxa de calor demonstraram erros menores, o que demonstra dependência entre o erro da análise inversa e a sensibilidade média ao calor.

O método se mostrou robusto para estas configurações de sensores, pois o maior erro é do conjunto 2D de 2,791%, que pode ser considerado baixo para problemas inversos.

A Figura 4.3 mostra o $ERRO$ em função da sensibilidade média, enquanto que o Figura 4.4 mostra CVQ em função da sensibilidade média. Gráficos dos mesmos parâmetros de qualidade em função de CVT localizam-se no Apêndice D.

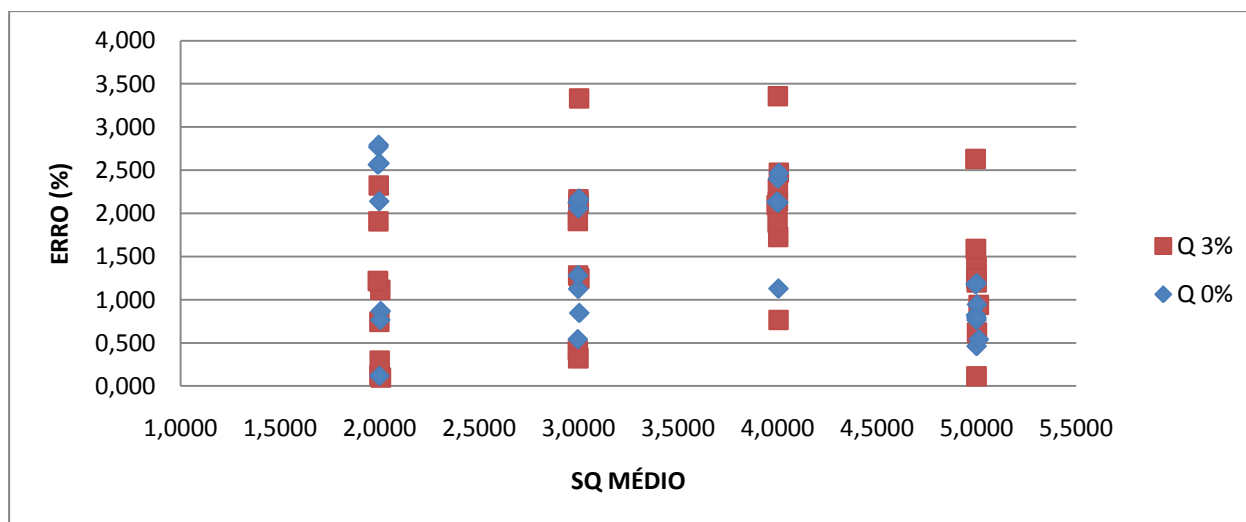


Figura 4.3: $ERRO \times \bar{S}_Q$ para conjuntos com 0% e 3% de incerteza na medição da temperatura.

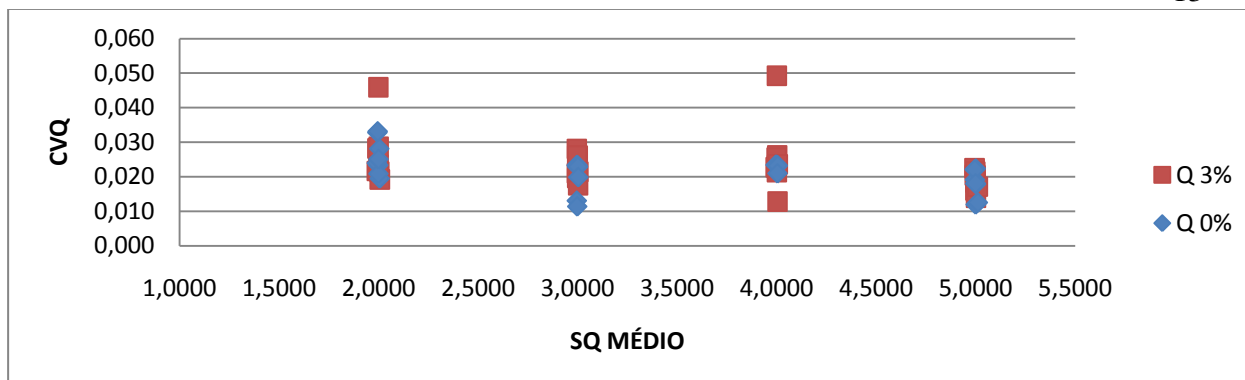


Figura 4.4: $CVQ \times \overline{SQ}$ para conjuntos com 0% e 3% de incerteza na medição da temperatura.

Tanto o *ERRO* máximo quanto o *CVQ* máximo diminuí com o aumento da sensibilidade média, indicando que há maior probabilidade de encontrar resultados de melhor qualidade com grupos de sensibilidade maior.

Para as configurações de sensores estudadas, o erro intrínseco ao método GEO tratado na Secção 4.6, se mostrou dominante no erro causado pela variação dos parâmetros dos sensores. O que impossibilita a determinação de correlações entre erro e outros parâmetros.

Cada conjunto levou aproximadamente seis horas para apresentar a solução computados paralelamente em uma máquina de quatro núcleos de 3,2 GHz, com 8 GB de memória RAM.

4.6. Análise dos resultados

O método GEO se mostrou robusto à variação dos parâmetros dos conjuntos de sensores. Isso se deve ao fato do método destinar-se, primeiramente, a resolver problemas de otimização complexos, no qual pouco ou nada se conhece a respeito do espaço de busca viável e inviável da função a ser otimizada (Galski et al., 2005).

Os erros intrínsecos ao método ocorrem pelo fato do GEO depois de algum tempo ficar preso no que pode ser chamado de “pontos de estagnação”. Segundo Galski et al, 2005, tais pontos de estagnação ocorrem quando o algoritmo se encontra em um ponto do espaço de busca tal que, ao realizar o ordenamento dos bits, todos levam a “pontos piores”. Como o método modifica uma variável por avaliação da função objetivo, o algoritmo somente tem acesso a pontos onde o valor da função objetivo é maior.

Com a análise da função objetivo para as variáveis potência da ferramenta e coeficiente de condução, para o conjunto de sensores 3D com *CVQ* de 0.013, erro de 0,541%, Figura 4.5. É mostrada a distribuição dos cinco pontos resultantes de cada grupo, que podem ser caracterizados pela inclinação da reta (a em $ax+b$) e o *CVQ*.

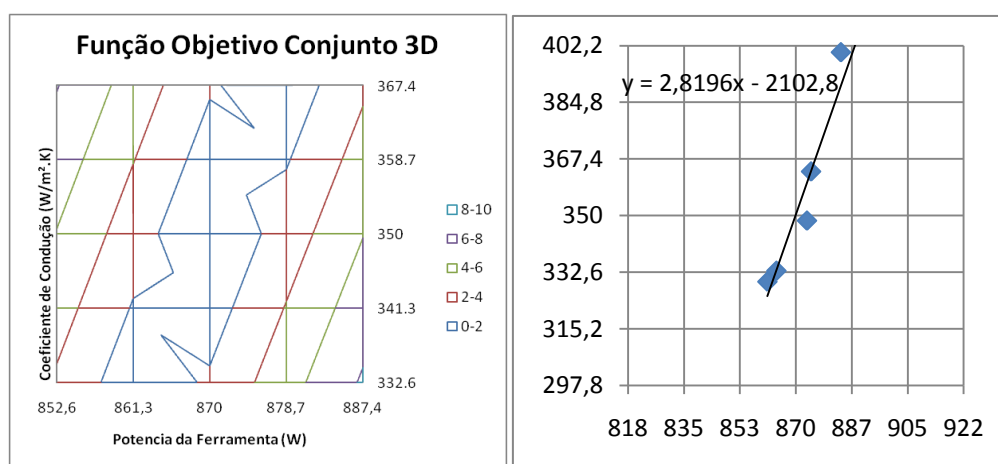


Figura 4.5: Função objetivo. Distribuição dos pontos resultantes do conjunto 3D.

É observado que os pontos de estagnação são próximos ao ótimo global, seguem a tendência da função objetivo. Observa-se também para o conjunto 3D no Apêndice C.

Para tentar uma convergência maior e reduzir o *ERRO* foram ensaiados 8 conjuntos de sensores para τ com variação entre 1,25 e 2,0 em intervalos de 0,25. A Tabela 4.4 mostra os dados obtidos do conjunto de sensores T(14,10,N1), T(8,9,N1) e T(12,20,N1).

Tabela 4.4: Resultado para variação de τ .

τ	1.25	1.5	1.75	2
a	0.71	1.30	2.80	2.81
CVQ	0.05	0.05	0.01	0.01
Q [W]	1601	1712	1752	1751
<i>ERRO</i> %	8.01	1.58	0.68	0.64

Nota-se que a redução de τ afasta os pontos de estagnação do mínimo global e aumenta o *ERRO*, reafirmando a escolha dos parâmetros da GEO.

O motivo de não observar resultados com a tendência logarítmica entre *ERRO*, o produto da sensibilidade e *CVT*, encontrada em Longhi, 2011, no Anexo B, é de não ter analisado sensibilidade e/ou *CVT* baixos, nos quais o erro é mais significativo. No entanto, o comportamento aleatório dos erros, para a faixa entre zero por cento e cinco por cento, foi observado nos dois trabalhos. Indicando que a variação dos erros é causada pelo mesmo motivo descrito nesta Secção.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, foi resolvido o caso de transferência de calor transiente na soldagem por fricção linear por volumes finitos. Através de análise inversa utilizando métodos estocásticos, foi encontrada a energia térmica imposta pela ferramenta, através da medição da temperatura em 32 conjuntos de três pontos.

Com a finalidade de verificar os parâmetros envolvidos na qualidade dos resultados, foi analisada a influência da sensibilidade média do conjunto em relação ao calor e do coeficiente de variação de temperatura com *ERRO* e *CVQ*, que indicam a qualidade dos resultados. Notou-se uma importante dependência da qualidade do resultado em relação sensibilidade do conjunto em relação à taxa de calor por fricção, tanto para conjuntos sem incerteza de medição de temperatura, quanto para conjuntos com 3% de incerteza.

Também conclui-se que a dificuldade de medir as correlações *CVT* \times *ERRO*, e *CVT* \times *CVQ* para quatro sensibilidades médias diferentes, se deve ao mecanismo de busca do método GEO conduzir a erros aleatórios. Apesar disto, a metodologia mostrou-se robusta, gerando erros de no máximo 2,79% para conjuntos sem incerteza de medição de temperatura e 3,36% para conjuntos com 3% de incerteza de medição de temperatura. A continuação do trabalho pode ser dado com a escolha de pontos mais distantes da ferramenta, para aumentar o erro e diminuir a influência do erro aleatório causado pela GEO.

Recomenda-se a implementação do algoritmo GEO descrito em Galski, 2005, para diminuir pontos de estagnação no método. Também recomendam-se testes experimentais das posições dos sensores para verificação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Chiumenti, M., Cervera, M., Agelet de Saracibar, C., Dialami, N., 2012 **“Numerical modeling of friction stir welding processes”**, Submitted to Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.

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.

Galski, R. L.; Ramos, F. M.; Sousa, F. L., 2005, **“Uma nova versão aprimorada do Método da Otimização Extrema Generalizada”**, Workshop dos Cursos de Computação Aplicada do INPE (V WORCAP).

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.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., 2008. **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, LTC Editora.

Longhi, T. F., 2011. **“Definição do Melhor Posicionamento de Sensores de Temperatura para Determinação da Fonte de Calor no Processo de Soldagem por Fricção (FSW)”**, Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS.

Maliska, C. R., 1995. **“Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”**, LTC Editora.

Schmidt, H., Hattel, J., Wert, J., 2003. **“An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding”**, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, vol. 12, pp. 143 – 157.

Soundararajan, V., Zekovic, S., Kovacevic, R., 2005. **“Thermomechanical Model with Adaptive Boundary Conditions for Friction Stir Welding of AL 6061”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, pp. 1577 – 1587.

Souza, F. L., Ramos, F. M., Paglione, P., Girardi, R. M., 2003. **“New Stochastic Algorithm for Design Optimization”**, AIAA Journal, vol. 41., n. 9.

Vielmo, H. A., 2010. **“Notas de Aula da Disciplina: Transferência de Calor e de Mecânica dos Fluidos Computacional – ENG03008”**, Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS.

ANEXOS

ANEXO A: Coeficientes da Eq. (2.20) são dados por Vielmo, 2010:

$$A_e = k_e \frac{\Delta y_p \Delta z_p}{\Delta x_e}$$

A_w, A_n, A_s, A_f, A_b são análogos a A_e

$$B = A_p^o T_p^o + S_c \Delta x_p \Delta y_p \Delta z_p$$

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

ANEXO B: Resultados de Longhi, 2011:

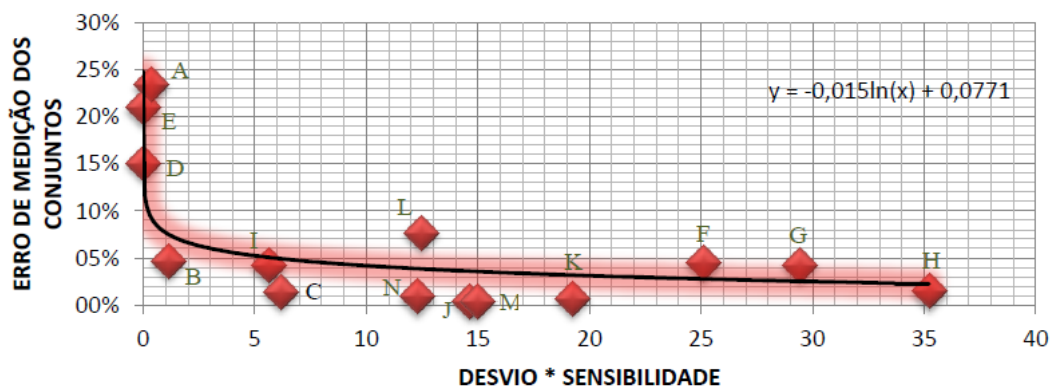


Figura 4.2. Gráfico relacionando sensibilidade, desvio e erro de medição, para o caso 2.

APÊNDICES

APENDICE A: Campo de temperatura

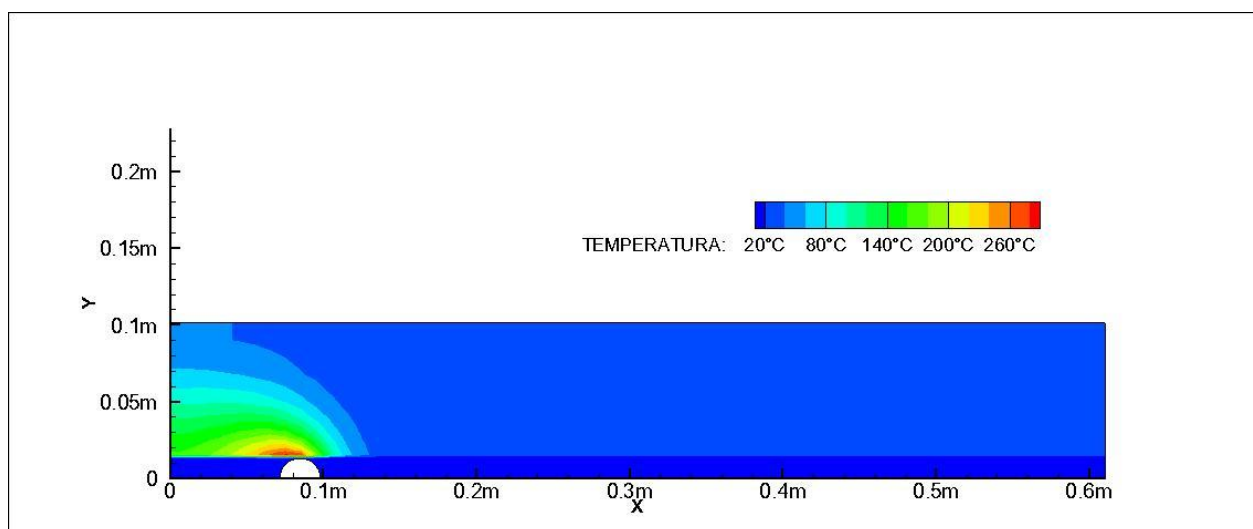


Figura AP A1: Distribuição da temperatura [°C] na placa com a ferramenta em 85 mm.

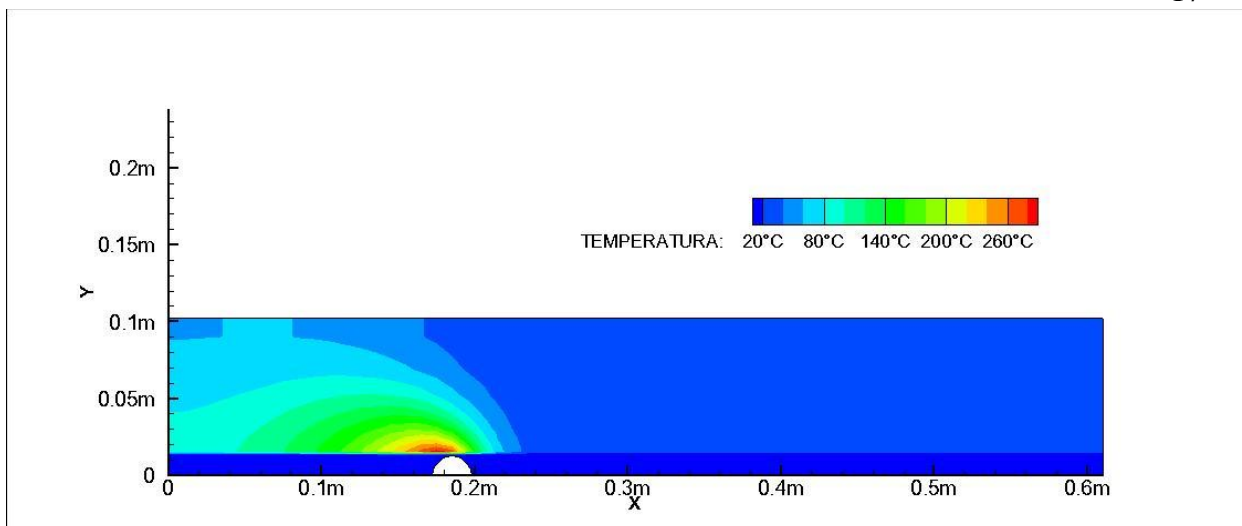


Figura AP A1: Distribuição da temperatura [°C] na placa com a ferramenta em 185 mm.

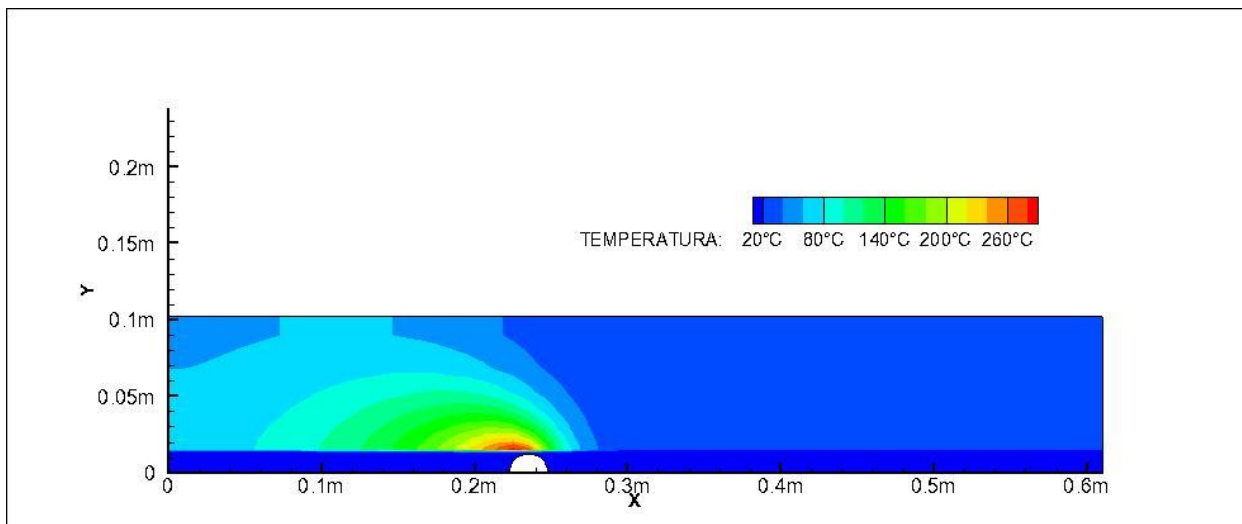


Figura AP A1: Distribuição da temperatura [°C] na placa com a ferramenta em 235 mm.

APENDICE B: Posição dos sensores e \bar{S}_Q CV.

						A3					A2		
							B2		E1		F2		
									C1				
										G1	E2		
	B3									H1	C2		
			F3		G3				D1				G2
									A1				H2
	D3	E3	H3						B1	F1	D2		

Figura AP B1: Posição dos sensores com sensibilidade média igual a aproximadamente 2,0.

Tabela AP B1: Conjuntos de sensores com sensibilidade média igual aproximadamente 3,0.

Conjunto	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	\bar{s}_Q	CV
A	T(6,15,N1)	T(17,14,N1)	T(9,13,N1)	3.00	0.304
B	T(5,12,N1)	T(17,15,N1)	T(9,11,N1)	3.00	0.351
C	T(6,16,N1)	T(17,16,N1)	T(10,13,N1)	3.00	0.393
D	T(17,9,N1)	T(18,9,N1)	T(16,10,N1)	3.00	0.447
E	T(6,17,N1)	T(18,11,N1)	T(14,15,N1)	3.00	0.493
F	T(16,16,N1)	T(18,13,N1)	T(11,11,N1)	3.00	0.580
G	T(5,16,N1)	T(18,14,N1)	T(11,10,N1)	3.00	0.595
H	T(17,10,N1)	T(18,15,N1)	T(11,9,N1)	3.00	0.642

Tabela AP B2: Conjuntos de sensores com sensibilidade média igual aproximadamente 4,0.

Conjunto	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	\bar{s}_Q	CV
A	T(9,13,N1)	T(6,10,N1)	T(11,12,N1)	4.00	0.183
B	T(8,9,N1)	T(6,12,N1)	T(11,11,N1)	4.00	0.214
C	T(8,10,N1)	T(5,9,N1)	T(14,14,N1)	4.00	0.222
D	T(15,16,N1)	T(6,13,N1)	T(12,13,N1)	4.00	0.238
E	T(9,16,N1)	T(5,11,N1)	T(15,12,N1)	3.99	0.262
F	T(8,13,N1)	T(6,15,N1)	T(13,13,N1)	4.00	0.283
G	T(9,15,N1)	T(16,15,N1)	T(11,9,N1)	4.01	0.294
H	T(16,13,N1)	T(5,12,N1)	T(12,11,N1)	4.00	0.323

Tabela AP B3: Conjuntos de sensores com sensibilidade média igual aproximadamente 5,0.

Conjunto	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	\bar{s}_Q	CV
A	T(13,12,N1)	T(13,15,N1)	T(11,14,N1)	5.00	0.118
B	T(14,12,N1)	T(16,9,N1)	T(9,10,N1)	5.00	0.157
C	T(13,11,N1)	T(11,11,N1)	T(14,17,N1)	5.00	0.201
D	T(14,11,N1)	T(11,10,N1)	T(9,16,N1)	5.00	0.253
E	T(13,9,N1)	T(14,14,N1)	T(7,12,N1)	5.00	0.306
F	T(14,10,N1)	T(11,9,N1)	T(5,9,N1)	4.99	0.348
G	T(15,9,N1)	T(12,12,N1)	T(5,14,N1)	5.00	0.381
H	T(14,9,N1)	T(15,12,N1)	T(17,11,N1)	5.01	0.473

APENDICE C: Função objetivo e distribuição dos pontos resultantes do conjunto 3G.

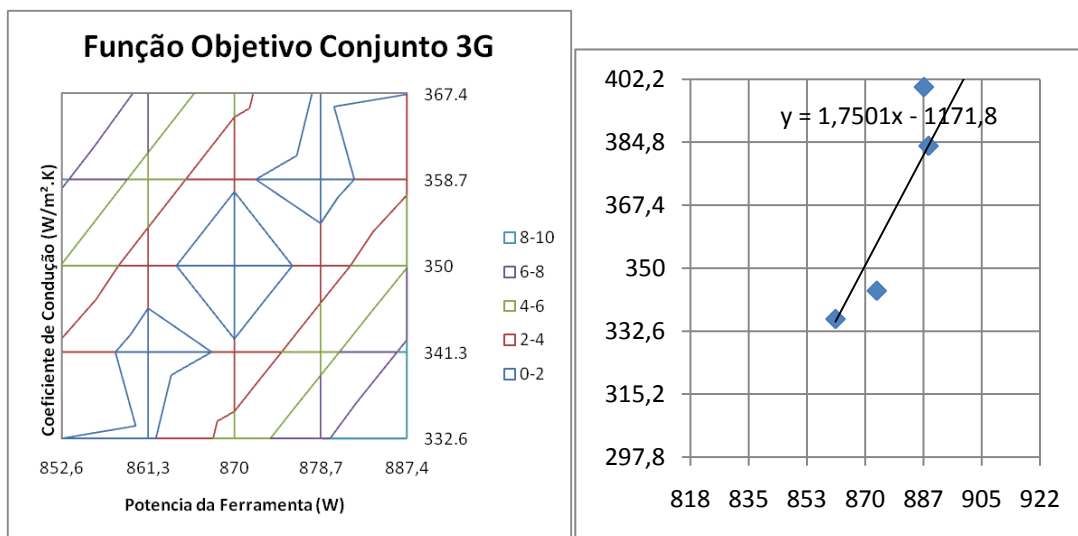


Figura AP C1: Função objetivo do conjunto 3G. Distribuição dos pontos resultantes do conjunto 3G.

APENDICE D: Gráficos CVT.

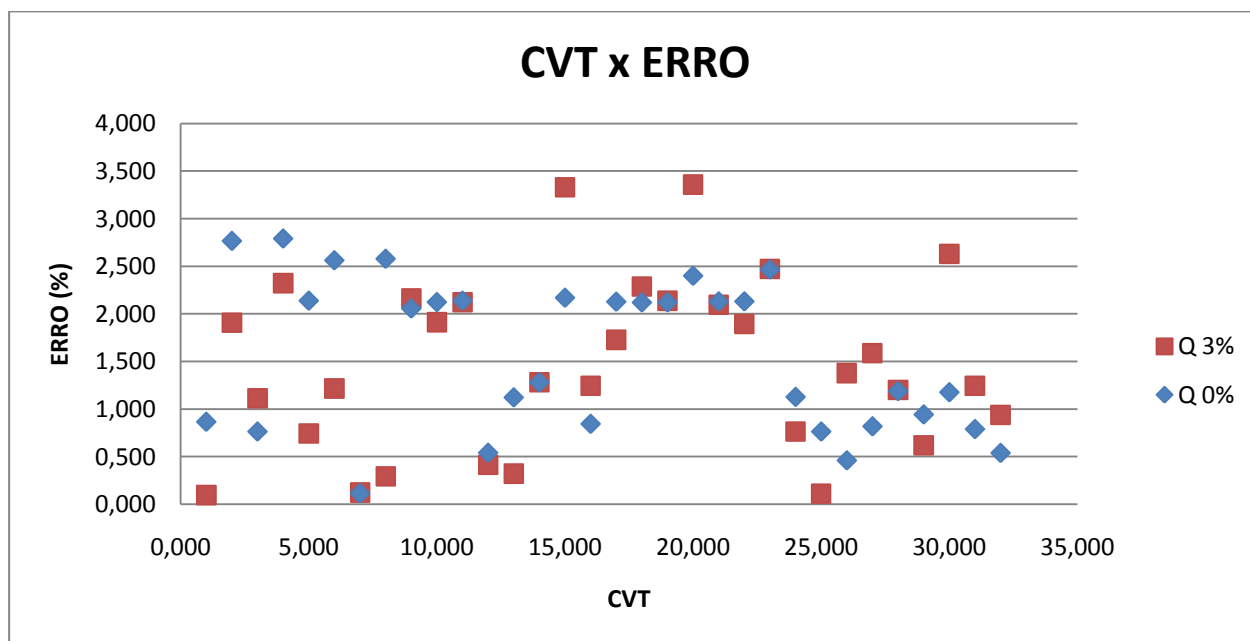


Figura AP D1: ERRO X CVT para conjuntos com 0% e 3% de incerteza na medição da temperatura.

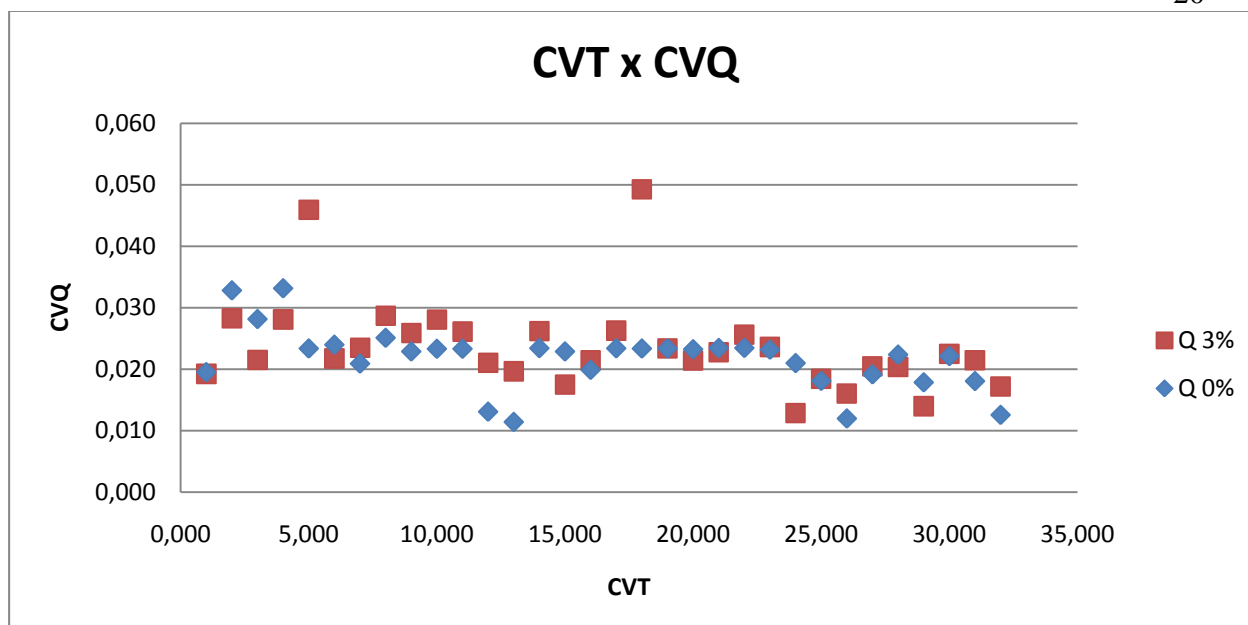


Figura AP D2: CVQ X CVT para conjuntos com 0% e 3% de incerteza na medição da temperatura.