

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

Análise da distribuição de calor em juntas soldadas dos tipos Cordão sobre Chapa e Ângulo
para diferentes níveis de energia de soldagem

por

Henrique Garbin Susin

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, novembro de 2016



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

Análise da distribuição de calor em juntas soldadas dos tipos Cordão sobre Chapa e Ângulo
para diferentes níveis de energia de soldagem
por

Henrique Garbin Susin

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto, Fabricação e Automação Industrial**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Cíntia C. Petry Mazzaferro

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, novembro de 2016

SUSIN, H.G. **Análise da distribuição de calor em juntas soldadas dos tipos Cordão sobre Chapa e Ângulo para diferentes níveis de energia de soldagem.** 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O presente trabalho desenvolve um estudo de ciclos térmicos em uniões soldadas, avaliando temperaturas de pico e modos de extração de calor. Inicia-se com procedimento experimental e, após, compara-se os resultados com modelos matemáticos usuais. São analisados dois tipos de junta, cordão sobre chapa (simples deposição) e ângulo T, e três diferentes níveis de energia de soldagem, 640 J/mm, 1050 J/mm e 1500 J/mm. As soldas são realizadas em chapas de aço carbono 1020 com espessura 6,35 mm (1/4”), utilizando o processo de soldagem MAG convencional, realizado através de sistema robotizado. A aquisição das temperaturas é feita por termopares tipo K fixados à superfície das chapas através de descarga capacitiva. Verificou-se a importância da correta fixação dos termopares e a influência deste fator na aquisição dos ciclos térmicos, principalmente no que se refere às temperaturas de pico. Para uma mesma energia de soldagem, foi constatado que as juntas cordão sobre chapa apresentam maiores temperaturas de pico e menores velocidades de resfriamento, quando comparadas às juntas ângulo T. Para ambos os tipos de junta e energias de soldagem, descartou-se o modo de extração 2D de calor. Para as juntas cordão sobre chapa, o modelo para extração de calor 2,5D apresentou variações da temperatura de pico entre 49% (menor energia) e 71% (maior energia), enquanto o modelo 3D manteve a variação entre -44% e -41%, considerando as três energias de soldagem. Apesar da maior variação nas temperaturas de pico, uma análise qualitativa dos ciclos completos das juntas cordão sobre chapa revela que o modelo 2,5D apresenta-se mais próximo ao ciclo obtido nos ensaios. Para as juntas ângulo T, a diferença das temperaturas de pico manteve-se entre 75% e 126% para o modelo 2,5D e -37% e -22% para o modelo 3D.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclos térmicos, modos de extração de calor, processo de soldagem MAG, distribuição de calor na soldagem.

SUSIN, H. G. **Heat distribution analysis of Bead-on-Plate and TEE joints to different welding energy levels.** 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The present work develops a study of thermal cycles in welded joints, evaluating peak temperatures and modes of heat extraction. It starts with an experimental procedure and then compares the results with usual mathematical models. Two joint geometries, Bead-on-Plate and TEE, and three different welding energy levels, 640 J/mm, 1050 J/mm and 1500 J/mm, are analyzed. The welds are made in 1020 carbon steel sheets with a thickness of 1/4" (6.35 mm), using the conventional MAG welding process, performed through a robotized system. The temperature acquisition is done by K type thermocouples fixed to the surface of the plates through capacitive discharge. It was verified the importance of the correct fixation of the thermocouples and the influence of this factor in the acquisition of the thermal cycles, mainly in relation to the peak temperatures. For the same welding energy, it was found that the Bead-on-Plate joints have higher peak temperatures and lower cooling rates when compared to the TEE joints. For both welding geometries and energies, 2D extraction mode was discarded. For the Bead-on-Plate the 2.5D heat extraction model presented variations of the peak temperature between 49% (lower energy) and 71% (higher energy), while the 3D model maintained the variation between -44% and -41 %, considering the three welding energies. Despite the greater variation in peak temperatures, a qualitative analysis of the complete cycles of the Bead-on-Plate joints reveals that the 2.5D model is closer to the cycle obtained in the tests. For Tee joints, the difference in peak temperatures remained between 75% and 126% for the 2.5D model and -37% and -22% for the 3D model.

KEYWORDS: Thermal cycles, heat extraction, MAG welding process, heat distribution in welding.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1 Ciclos térmicos em processos de soldagem	1
2.2 Modelos teóricos para extração de calor	2
3. METODOLOGIA.....	3
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	6
4.1 Resultados experimentais junta Cordão sobre Chapa.	6
4.2 Resultados experimentais junta ângulo T	8
4.3 Comparação entre os diferentes tipos de junta	10
4.4 Modelos teóricos devido a Rosenthal e comparações com resultados experimentais.....	11
4.5 Macrografias	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

Processos de soldagem por fusão utilizam grandes aportes de energia para realizar a união entre materiais. Essa energia é transferida em forma de calor à peça e, invariavelmente, gera transformações metalúrgicas e alterações das propriedades mecânicas do material na zona de solda. Wainer et al. (2015) descreve que o ciclo térmico durante a soldagem, o tempo de permanência do metal em altas temperaturas e a velocidade de resfriamento da zona de solda estão entre os principais fatores que devem ser observados em estudos da transferência de calor em juntas soldadas. Tais fatores descrevem as consequências dos grandes aportes de energia aos quais uniões soldadas estão expostas devido às particularidades do processo e ajudam a prever e compreender o seu comportamento.

Equações para o cálculo da temperatura de pico e taxa de resfriamento em cordões de solda foram desenvolvidas por Rosenthal (1941) considerando dois modos de extração de calor, um bidimensional e outro tridimensional. A escolha entre os modos de extração propostos por Rosenthal deve levar em consideração a geometria e composição do metal base, assim como os parâmetros de soldagem.

A influência de diferentes modos de união de termopares em chapas metálicas na aquisição de fluxos térmicos em soldas realizadas pelo processo MAG foi estudada por Diehl (2013).

O presente trabalho pretende desenvolver um estudo dos ciclos térmicos de uniões soldadas por processo robotizado ao arco elétrico com gás de proteção e eletrodo consumível, analisando temperatura de pico e modo de extração de calor para juntas do tipo cordão sobre chapa e ângulo T. Pretende-se uma melhor compreensão dos ciclos térmicos gerados pelo processo de soldagem MAG, identificando as diferentes características entre os dois modelos de juntas estudados, para uma mesma energia de soldagem. Pretende-se, também, verificar a adequação dos modelos teóricos aos resultados obtidos experimentalmente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em processos de soldagem MAG, o calor necessário para fundir os materiais é fornecido principalmente pelo arco elétrico e, devido à grandeza desse parâmetro, demais possíveis fontes de calor podem ser desprezadas. Como o arco se desloca em velocidade constante, a quantidade de calor entregue à peça é dada por unidade de comprimento, e é chamada comumente de Energia de Soldagem, E . A energia de soldagem é um indicador que permite a comparação entre juntas produzidas através de diferentes processos, e é representada pela Equação 2.1 (Machado, 2000).

$$E = \eta \frac{UI}{v} \quad (2.1)$$

Onde η é o rendimento térmico do processo, U é a tensão do arco elétrico (V) I é a corrente (A) e v é a velocidade de soldagem (mm/s).

Esta transferência de calor, e consequente variação de temperaturas, à qual a peça é submetida altera a estrutura cristalina e as propriedades metalúrgicas do material e pode, ainda, gerar distorções e aparecimento de tensões residuais (Wainer, 2015), por isso a importância do estudo destes acontecimentos.

2.1 Ciclos térmicos em processos de soldagem

Tomando-se em consideração um ponto no metal de solda, e analisando a variação da sua temperatura à medida que a fonte de energia se desloca durante determinado período de tempo, pode-se caracterizar o ciclo térmico ao qual tal região será submetida. O ciclo térmico, esquematizado de forma genérica na Figura 2.1, segue um padrão característico onde, nos momentos iniciais de aproximação da tocha, o material é submetido à uma alta taxa de aquecimento até atingir a máxima temperatura do ciclo (temperatura de pico) e, em seguida, sofre um resfriamento gradual até a temperatura ambiente, à medida que o tempo transcorre.

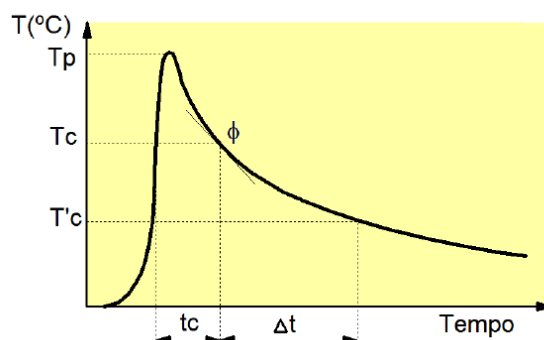


Figura 2.1: Representação de ciclo térmico obtido em processos de soldagem. (Modenesi, 2012).

Algumas informações importantes são conseguidas através da aquisição dos ciclos térmicos. Entre elas estão a taxa de aquecimento do material, a máxima temperatura atingida T_p , o tempo de permanência acima de determinada temperatura de interesse, t_c , e a taxa de resfriamento, ϕ . A variação destas grandezas está intimamente relacionada aos parâmetros do processo de soldagem e ao modo de extração de calor ao qual a peça está submetida. Este, por sua vez, é dependente do tipo da junta, da espessura da chapa, das propriedades físicas e termodinâmicas do metal base e, também, dos parâmetros de soldagem.

A extração de calor na soldagem pode acontecer de diferentes modos. Para chapas avaliadas como de pequena espessura (chapas finas) é considerado que o fluxo de calor na direção da espessura da chapa é nulo, e a extração acontece exclusivamente em duas direções, caracterizando o regime de extração de calor bidimensional, 2D. Chapas onde essa simplificação não pode ser feita, ou seja, o calor proveniente da fusão não atinge a parte inferior da peça, são consideradas chapas grossas, e estão sujeitas a um regime de extração de calor tridimensional, 3D. Entretanto, existem situações onde o fluxo de calor atinge parcialmente a parte inferior da chapa, causando um aumento de temperatura nesta região, mas de menor intensidade se comparado à temperatura da linha de fusão. Neste caso, a extração de calor é considerada como intermediária, 2,5D. Segundo Machado (2000), o erro no cálculo do fluxo térmico através de modelos 2D ou 3D para regimes avaliados como 2,5D é de no máximo 20%.

No âmbito deste trabalho será considerada, inicialmente, a extração de calor bidimensional para as juntas do tipo cordão sobre chapa e tridimensional para as juntas em ângulo T, conforme ilustrado nas seções transversais representadas na Figura 2.2.

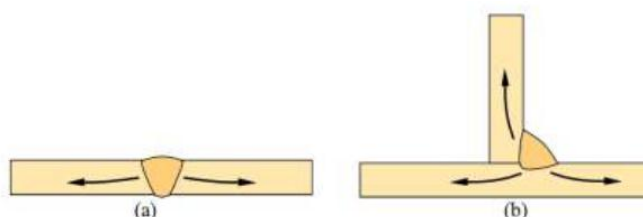


Figura 2.2: Representação do modo de extração de calor (a) 2D, para juntas cordão sobre chapa com penetração completa e (b) 3D, para juntas em ângulo T. (Modenesi, 2012).

2.2 Modelos teóricos para extração de calor

Partindo-se da equação do balanço de energia, Equação 2.2, é possível encontrar soluções analíticas capazes de representar as variações de temperatura oriundas dos processos de soldagem (Modenesi, 2012).

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (cT) + \rho v \cdot \nabla (cT) = \nabla \cdot (k \nabla T) + s \quad (2.2)$$

Onde ρ é a massa específica do material (kg/m^3), c é o calor específico do metal base (J/kgK), T é a temperatura ($^\circ\text{C}$), t é o tempo (s), k é a condutividade térmica do material (W/mK) e s é o calor gerado (J).

É interessante, também, definir o chamado regime quase-estacionário considerado no estudo dos fluxos térmicos na soldagem. Segundo Wainer et al. (2015), este regime é caracterizado por uma distribuição de temperaturas uniforme em torno de um observador que se movimenta junto com a fonte de calor. Matematicamente esta condição é conseguida através da inserção da coordenada móvel w no lugar da coordenada x , conforme Equação 2.3.

$$w = x - vt \quad (2.3)$$

Para encontrar a solução da Equação 2.2 de acordo com os modelos de extração de calor na soldagem, Rosenthal (1941) definiu as seguintes simplificações:

- Não ocorrem alterações das propriedades físicas e da microestrutura do material de base com a variação da temperatura imposta pela fonte de calor;
- É desprezado o aquecimento produzido pela resistência à passagem da corrente elétrica;
- A temperatura da peça permanece inalterada à grande distância da fonte de calor;
- A extração de calor se dá somente por condução, ignorando-se as trocas por convecção e radiação.

No modelo de extração de calor bidimensional, a fonte de calor é considerada uma linha paralela e de comprimento igual à espessura da peça. Com esta idealização, e utilizando as premissas acima, Rosenthal obteve a Equação 2.4 para o cálculo da variação da temperatura.

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi g k} \cdot e^{-\left(\frac{vw}{2\alpha}\right)} \cdot K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (2.4)$$

Onde q é a potência efetiva no arco (W) e é dada por $q = \eta UI$, g é a espessura da peça (m), α é a difusividade térmica do metal base (m^2/s) e é dada por $\alpha = k/\rho c$, K_0 é a função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero e r é a posição do ponto analisado, dada por $r^2 = x^2 + y^2$.

Já no modelo tridimensional, a fonte de calor é considerada como um ponto e a extração de calor ocorre em todas as direções. Desse modo, e considerando as mesmas simplificações, a variação da temperatura pode ser dada pela Equação 2.5.

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi k R} \cdot e^{-\left[\frac{v(w+R)}{2\alpha}\right]} \quad (2.5)$$

Onde R , a posição do ponto em análise, é definido por $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

No modelo de extração de calor intermediário, 2,5D, a variação das temperaturas é fornecida pela Equação 2.6.

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi g k} \cdot e^{-\left(\frac{vw}{2\alpha}\right)} \cdot \left\{ K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} K_0\left[r \sqrt{\frac{v^2}{2\alpha} + \left(\frac{\pi n}{g}\right)^2}\right] \cdot \cos\frac{\pi n z}{g} \right\} \quad (2.6)$$

3. METODOLOGIA

Todo o procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O experimento foi realizado em chapas de aço carbono 1020, com espessura 6,35 mm (1/4"), e as suas propriedades físicas, à temperatura ambiente, estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas do aço carbono 1020, à 20°C (Material Property Data).

Condutividade térmica [W/mK]	Calor específico [J/kgK]	Densidade [kg/m³]
51,9	486	7870

Foram analisados dois diferentes tipos de juntas, cordão sobre chapa (simples deposição) e ângulo (T), e três diferentes níveis de energia de soldagem. Para as juntas cordão sobre chapa e para a aba das juntas em ângulo T foram usadas chapas com 150 mm de largura e 250 mm de comprimento, na alma das juntas T as dimensões são 300 mm de largura e 250 mm de comprimento. Foram definidos como parâmetros fixos do processo a distância bico de contato peça (DBCP), o metal de adição, o gás de proteção, assim como a sua vazão, e os ângulos de trabalho e deslocamento da tocha. Os parâmetros fixos são listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de soldagem mantidos fixos na realização dos ensaios.

Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	Metal de adição (Consumível)	Diâmetro Consumível	Gás de Proteção	Vazão Gás de Proteção	Ângulo de Trabalho	Ângulo de Deslocamento
15 mm	AWS ER 70S-6	1,2 mm	Ar + 25% CO ₂	15 l/min	Neutro	Neutro

Os parâmetros variados na análise são, a velocidade de alimentação do arame W , e consequentemente a corrente I , a tensão U e a velocidade de soldagem v . Os parâmetros variáveis têm como objetivo alcançar três diferentes níveis de energia de soldagem, que é o valor de interesse neste trabalho, e ambos estão elencados na Tabela 3.3. A energia de soldagem é calculada considerando-se um rendimento térmico do processo de 80%.

Tabela 3.3: Parâmetros de soldagem variados na realização dos ensaios e valores nominais das energias de soldagem que serão objeto de estudo.

Velocidade de Alimentação do arame W [m/min]	Corrente I Nominal [A]	Tensão do Arco U Nominal [V]	Velocidade de Soldagem v [mm/s]	Energia de soldagem Calculada (Nominal) E [J/mm]
4	180	22	5	634 (640)
5	200	23	4	920 (1050)
6	230	24	3	1472 (1500)

Para a realização das soldas foi utilizado o processo de soldagem MAG convencional, realizado através de um sistema robotizado composto por robô MA1400, fabricado pela Yaskawa Motoman Robotics, associado à fonte TransPlus Synergic 4000R da marca Fronius. A fonte foi mantida em modo sinérgico durante as soldagens.

As temperaturas foram obtidas através de termopares tipo K (cromel-alumel), com faixa de medição de temperatura entre -200 °C e 1260 °C e sensibilidade de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, conectados à um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo NI Edaq-9184. Os sinais das temperaturas foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 10 Hz. Os termopares foram fixados à superfície das chapas através de descarga capacitiva. Para as juntas do tipo cordão sobre chapa foram utilizados 4 termopares por ensaio, ambos posicionados à uma distância de 10 mm do centro do cordão de solda, e em uma região em que a solda se encontraria em regime quase-estacionário. Para a junta ângulo os mesmos cuidados foram tomados, posicionando-se a 12 mm do encontro entre as chapas, dois termopares na chapa horizontal (alma), dois termopares na chapa vertical (aba) e mais 2 termopares, também na alma, mas no lado oposto à solda, a fim de caracterizar a distribuição de calor também nessa região. Ambas as configurações podem ser observadas na Figura 3.1.

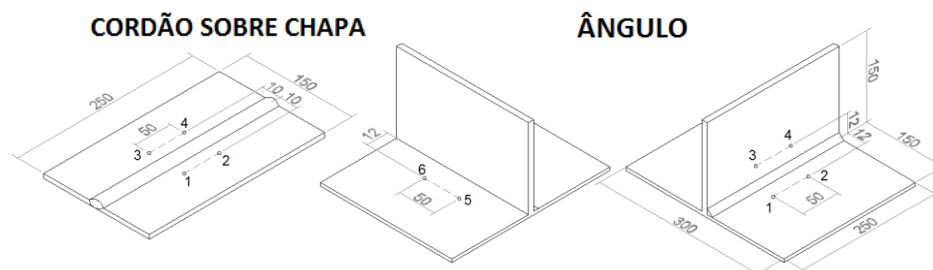


Figura 3.1: Posicionamento dos termopares nas juntas. Medidas em milímetros.

Também foram coletados os valores das tensões e correntes do processo através do sistema de aquisição portátil SAP, disponibilizado por IMC Soldagem.

Para cada um dos três diferentes níveis de energia estudados foram realizadas três repetições, totalizando 9 ensaios para cada modelo de junta. As repetições foram organizadas conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Planejamento dos ensaios considerando três réplicas para cada nível de energia estudado.

Repetição	640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
1	1	4	7
2	2	5	8
3	3	6	9

A sequência dos experimentos foi aleatorizada com o intuito de distribuir o efeito de fatores não considerados no experimento. O procedimento adotado, mostrado na Tabela 3.5, foi idêntico para ambos os tipos de juntas (cordão sobre chapa e ângulo T).

Tabela 3.5: Sequência adotada na realização dos experimentos.

Sequência de ensaio	Sequência Aleatorizada	W [m/min]	U [V]	v [mm/s]	Energia de Soldagem
1	6	5	23	4	1050
2	2	4	22	5	640
3	1	4	22	5	640
4	7	6	24	3	1500
5	5	5	23	4	1050
6	9	6	24	3	1500
7	3	4	22	5	640
8	4	5	23	4	1050
9	8	6	24	3	1500

Após a realização dos 18 ensaios, foram retiradas amostras de cada junta para a realização de macrografias e definição das geometrias dos cordões de solda. Cada amostra foi preparada, lixada gradativamente com lixas de granulometria variando entre 80 e 600 e, por fim, atacadas com nital 10% durante um tempo de vinte segundos. As macrografias foram obtidas através de lupa digital. Com o auxílio do programa computacional Image J foram medidos os parâmetros geométricos dos cordões de solda, conforme exemplificado na Figura 3.2. Para a junta ângulo T, a distância do centro do cordão até o ponto de análise do ciclo térmico foi calculada após a realização dos ensaios. Este valor foi obtido somando-se metade da largura do cordão de solda mais a distância entre a borda do cordão e o termopar. As tabelas com as médias dos parâmetros das juntas cordão sobre chapa e ângulo T, assim como as macrografias, são mostradas na seção 4.5.

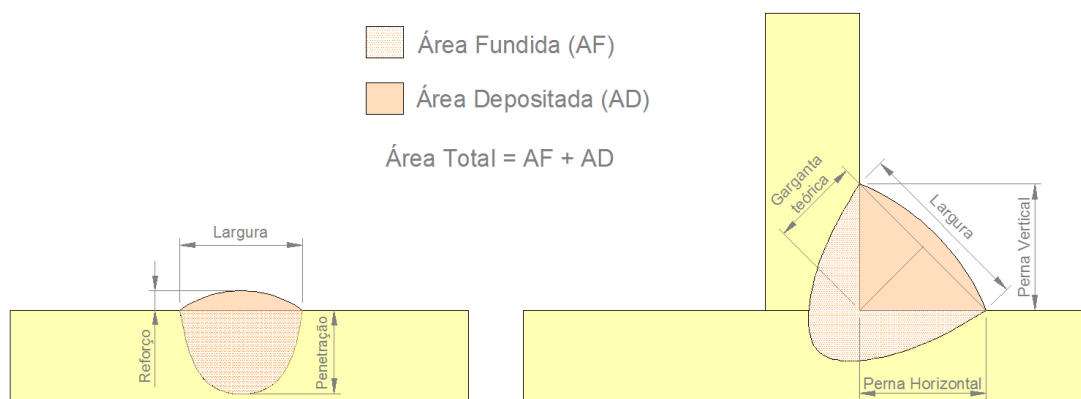


Figura 3.2: Parâmetros geométricos das juntas cordão sobre chapa e ângulo T.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um ponto crítico em análises de ciclos térmicos na soldagem é o posicionamento dos sensores para aquisição das temperaturas. Devido aos elevados gradientes de temperaturas, pequenos desvios de localização podem atingir diferentes isotermas e assim promover resultados distorcidos. Tal problema é agravado quando a sistemática de inserção dos termopares é feita de modo manual, como é o caso deste trabalho. Sabendo-se destas questões, uma avaliação criteriosa dos dados experimentais foi realizada, com o intuito de minimizar a influência desta variável. Os resultados são discutidos nas seções subsequentes.

4.1 Resultados experimentais junta Cordão sobre Chapa.

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são comparadas as curvas dos 4 termopares utilizados na junta cordão sobre chapa, para as energias de soldagem baixa (640 J/mm), média (1050 J/mm) e alta (1500 J/mm) respectivamente. Cada curva foi obtida através da realização das médias das temperaturas de um mesmo ponto de análise, considerando as três repetições para cada energia. Por exemplo, a curva *MÉDIA - K1* das figuras foi obtida fazendo-se a média entre os resultados de cada uma das três réplicas, na posição 1 de medição. As curvas foram sobrepostas para facilitar a comparação entre elas.

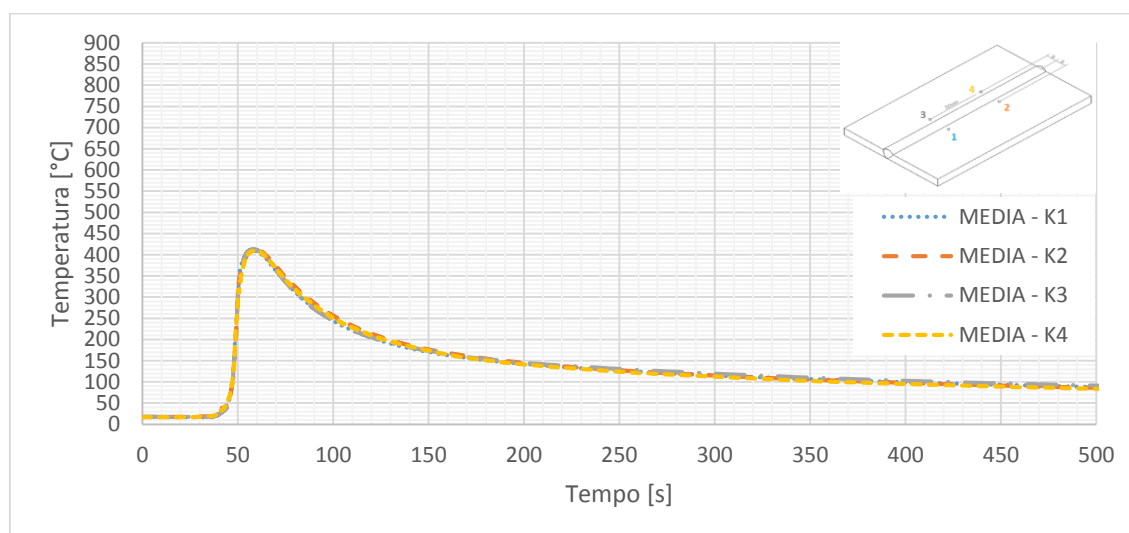


Figura 4.1: Comparação entre os termopares, junta cordão sobre chapa, energia de soldagem 640 J/mm.

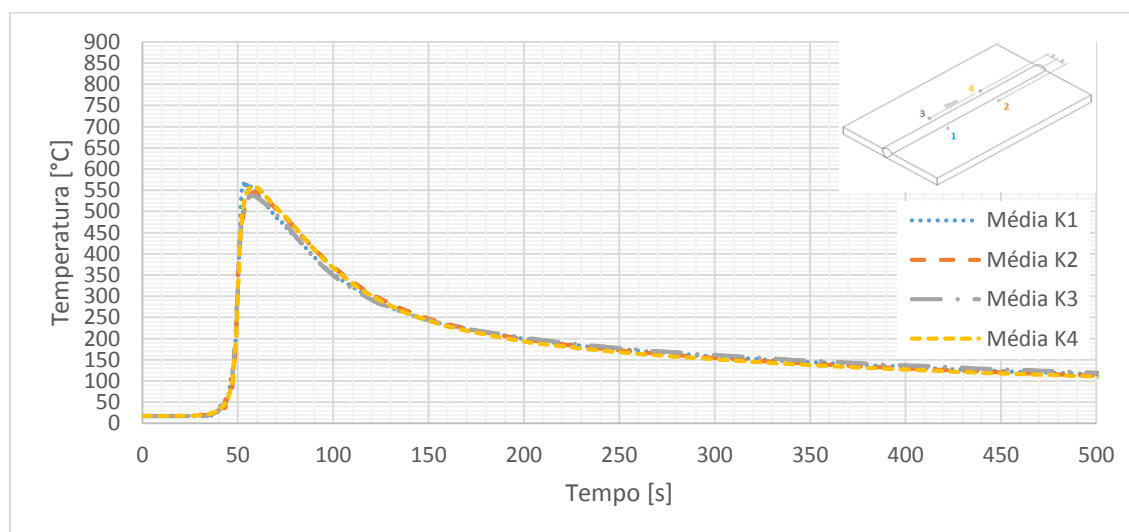


Figura 4.2: Comparação entre os termopares, junta cordão sobre chapa, energia de soldagem 1050 J/mm.

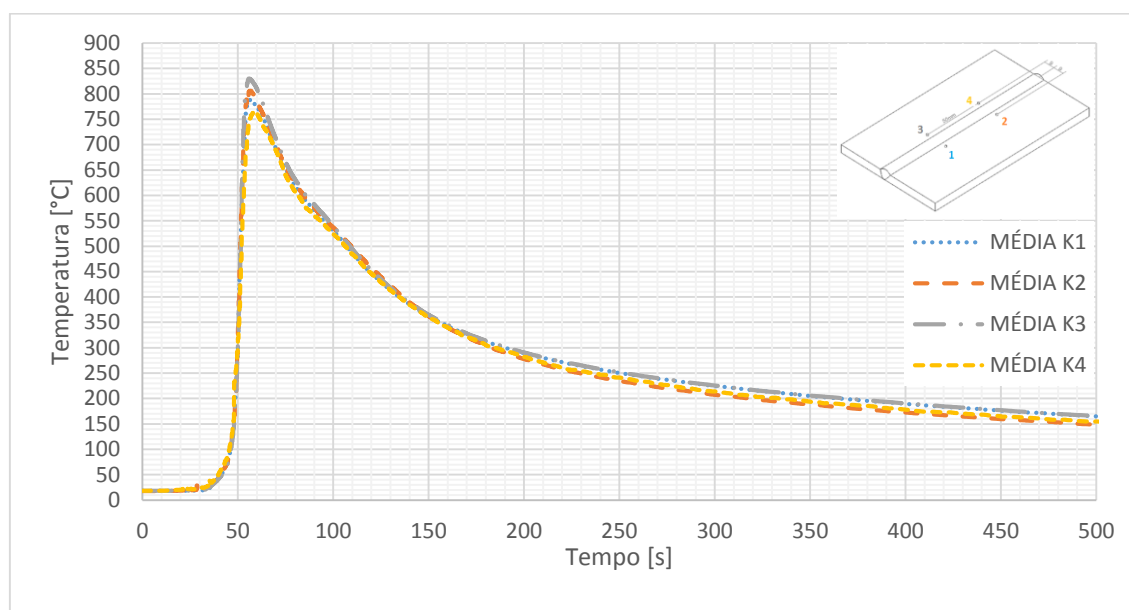


Figura 4.3: Comparação entre os termopares, junta cordão sobre chapa, energia de soldagem 1500 J/mm.

O objetivo desta análise é verificar a precisão do sistema de medição experimental. Pode ser observado, de forma direta nos gráficos e através dos dados de temperatura na Tabela 4.1, um aumento na variação das temperaturas de pico à medida que aumenta a energia de soldagem. A inserção dos termopares foi realizada de maneira manual, o que invariavelmente gera pequenos desvios entre as posições destes em relação à margem do cordão soldado. No entanto, neste experimento, não foi encontrada relação direta entre a variação das temperaturas de pico e as pequenas variações da distância de fixação dos termopares em relação à margem da solda, considerando uma mesma energia de soldagem. Embora exista essa variação nas temperaturas de pico, é fácil notar a baixa variabilidade na obtenção da curva de resfriamento considerando as diferentes posições, o que caracteriza uma boa representatividade dos dados obtidos.

Tabela 4.1 – Temperatura de pico, média e desvio-padrão para as juntas cordão sobre chapa.

Cordão sobre Chapa - Temperaturas de Pico [°C]			
Energia Soldagem	640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
Termopar 1	410,4	569,4	788,7
Termopar 2	414,8	545,2	806,1
Termopar 3	413,5	537,7	830,2
Termopar 4	409,5	558,3	765,8
Média	412,1	552,7	797,7
Desvio-Padrão	2,2	11,9	23,6

Nota-se o aumento da dispersão referente às temperaturas de pico à medida que cresce a energia de soldagem. Este comportamento poderia ser creditado, entre outros fatores, à proximidade do ponto de medição em relação à margem do cordão, a característica instável do arco elétrico ou ainda à possíveis salpicos gerados no processo que possam ter atingido as proximidades dos termopares.

A Figura 4.4 apresenta a comparação entre os diferentes níveis de energia para a solda do tipo cordão sobre chapa, verificando, em conjunto com a Tabela 4.1, o aumento da máxima temperatura alcançada e do aporte total de energia, à medida que se aumenta a energia de soldagem. Cada curva representa a média entre os quatro pontos de medição.

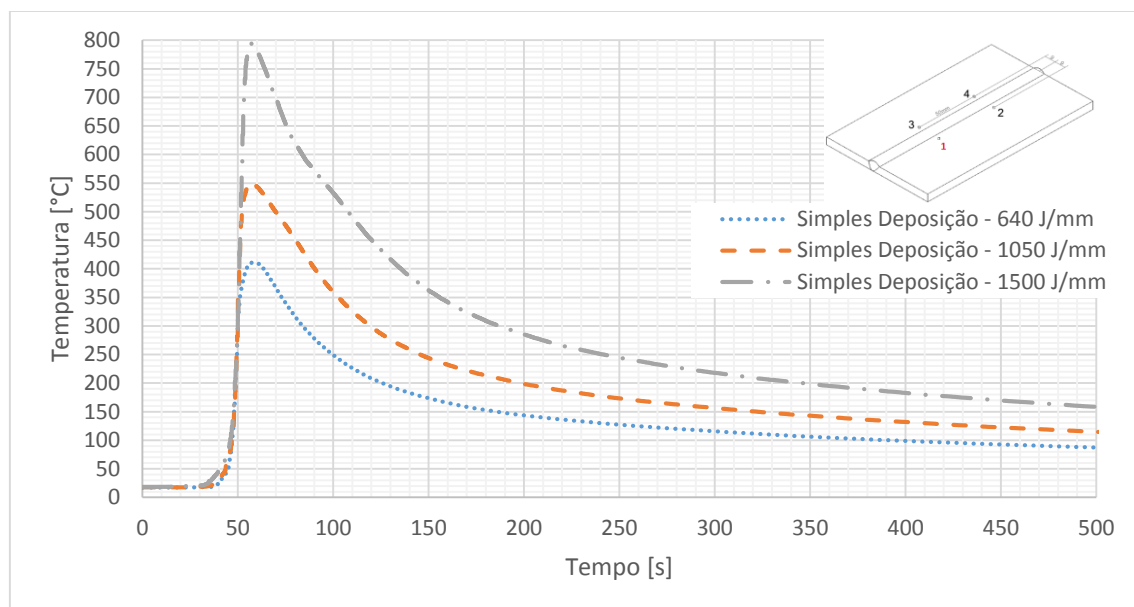


Figura 4.4 – Comparação entre os níveis de energia usados nas soldagens das juntas cordão sobre chapa.

4.2 Resultados experimentais junta ângulo T

O mesmo procedimento da seção 4.1 foi adotado para a análise das juntas ângulo T. As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram a variação das temperaturas sofrida pelos 6 termopares em questão. Aqui a variação das temperaturas máximas foi mais acentuada se comparada às juntas cordão sobre chapa. De modo geral, as curvas de resfriamento dos quatro pontos situados do lado da solda seguem um mesmo padrão, não sendo verificadas diferenças significativas entre os termopares da alma e da aba. Nos dois pontos situados do lado oposto à solda, a variação das temperaturas de pico foi baixa.

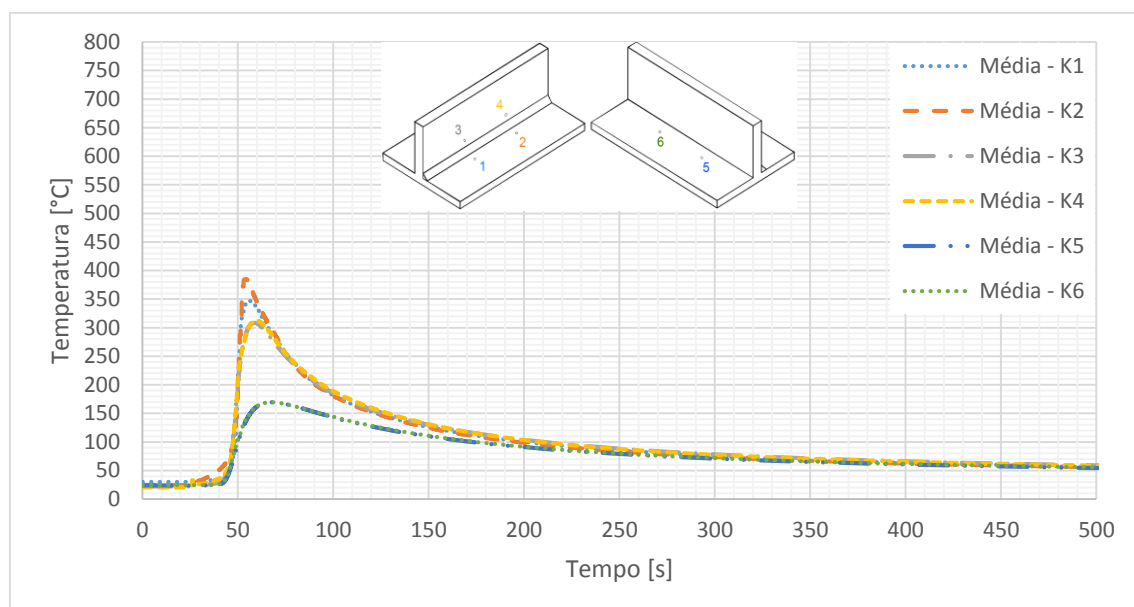


Figura 4.5: Comparação entre os termopares, junta ângulo T, energia de soldagem 640 J/mm.

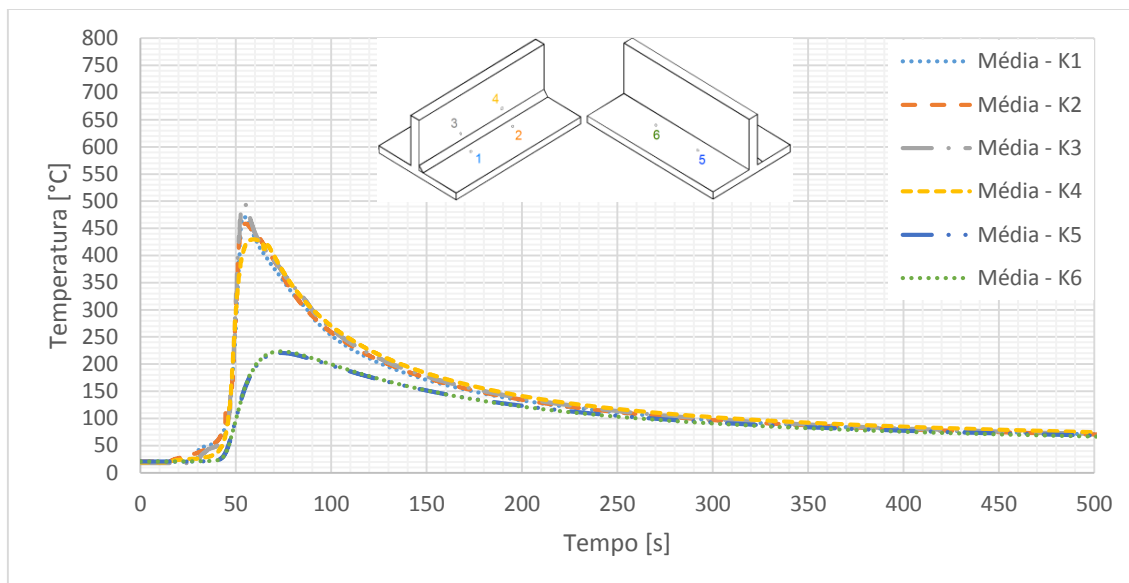


Figura 4.6: Comparação entre os termopares, junta ângulo T, energia de soldagem 1050 J/mm.

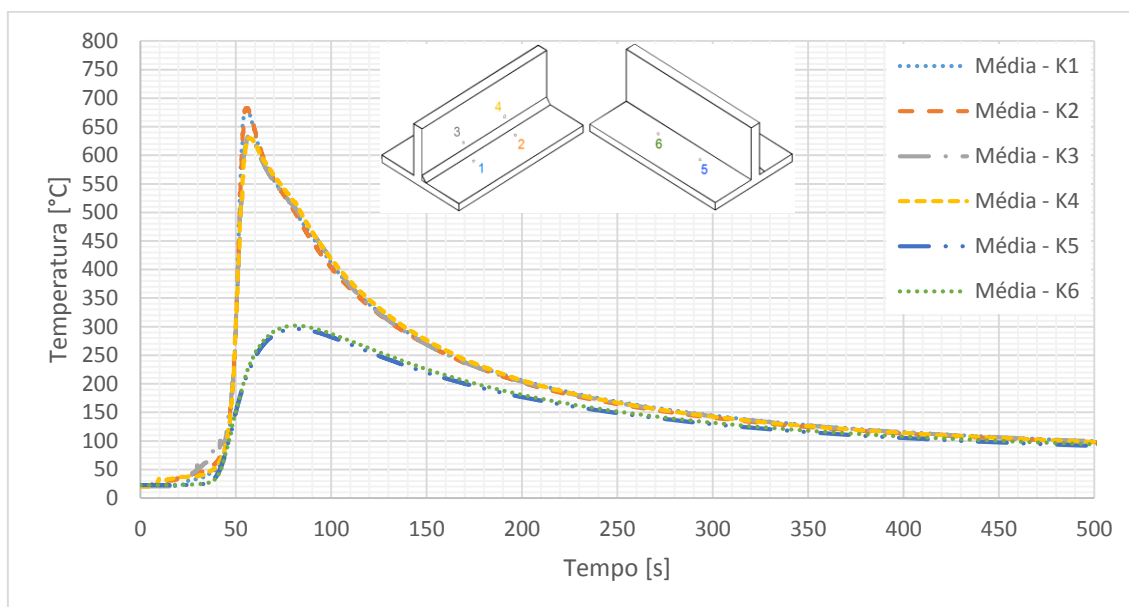


Figura 4.7: Comparação entre os termopares, junta ângulo T, energia de soldagem 1500 J/mm.

A Tabela 4.2 mostra as temperaturas de pico para os termopares 1, 2, 3 e 4, situados no mesmo lado da solda. A Tabela 4.3 apresenta as temperaturas de pico para os termopares 5 e 6, no lado oposto à solda.

Tabela 4.2 - Temperaturas de pico, média e desvio-padrão dos termopares situados do mesmo lado da solda nos ensaios das juntas do tipo ângulo T.

Junta ângulo T - Temperaturas de pico [°C]			
Energia de Soldagem	640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
Termopar 1	347,3	471,7	684,9
Termopar 2	384,9	458,5	682,7
Termopar 3	308,5	495,6	632,9
Termopar 4	312,5	429,6	629,9
Média	338,3	463,8	657,6
Desvio-Padrão	30,8	23,8	26,2

Tabela 4.3 - Temperaturas de pico, média e desvio-padrão dos termopares situados do lado oposto à solda nos ensaios das juntas do tipo ângulo T.

Junta ângulo T - Temperaturas de pico [°C]			
Energia de Soldagem	640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
Termopar 5	169,4	220,6	296,0
Termopar 6	169,5	223,5	301,5
Média	169,4	222,0	298,8
Desvio-Padrão	0,0	1,4	2,8

Diferente do observado nas juntas cordão sobre chapa, as variações no desvio-padrão das temperaturas de pico dos termopares situados no mesmo lado da solda não seguem um padrão atrelado ao aumento da energia de soldagem. Para os termopares do lado oposto à solda, praticamente não houve diferenças nas temperaturas medidas entre os termopares 5 e 6. Este comportamento pode ser explicado pela maior distância da fonte de calor, onde as isoterms são mais afastadas e pequenas diferenças de posição dos termopares têm pouca influência. Além disso, os termopares do lado oposto à solda estão protegidos de salpicos e da radiação imposta pelo arco elétrico.

A Figura 4.8 apresenta a comparação entre os diferentes níveis de energia para a solda em ângulo T, onde verifica-se o aumento da máxima temperatura alcançada e do aporte total de calor, à medida que se aumenta a energia de soldagem. Para facilitar a visualização, foram priorizadas as curvas dos termopares localizados no lado da solda, suprimindo as curvas dos termopares 5 e 6.

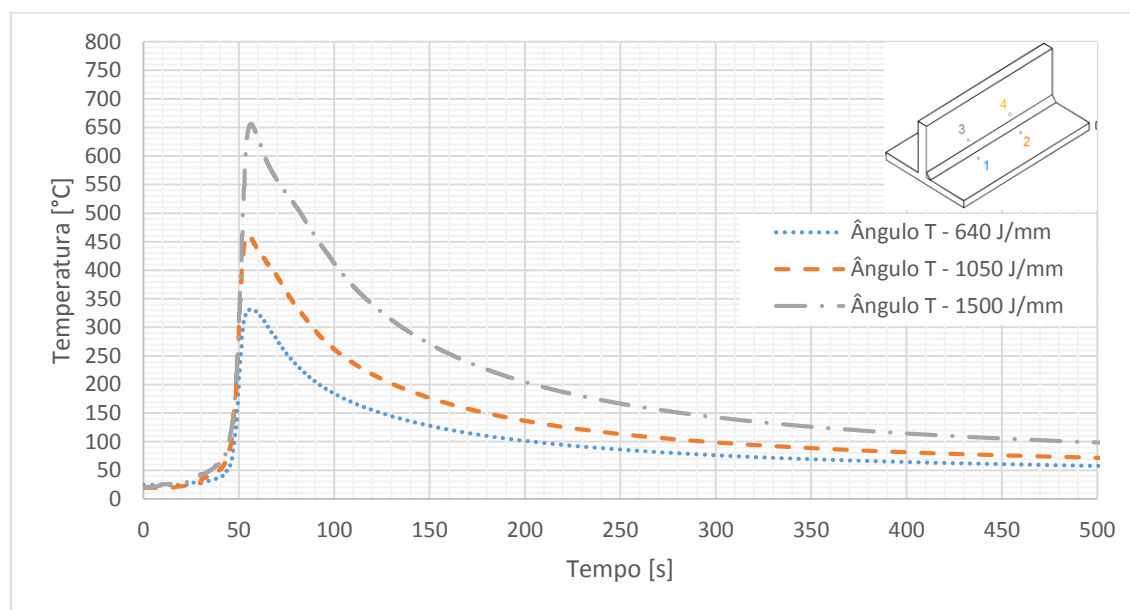


Figura 4.8 - Comparação entre os níveis de energia ensaiados para as juntas ângulo T.

4.3 Comparação entre os diferentes tipos de junta

A Figura 4.9 compara os ciclos térmicos das juntas cordão sobre chapa e ângulo T, considerando uma energia de soldagem de 1050 J/mm. As comparações para os outros dois níveis de energia estudados seguem o mesmo padrão do apresentado na Figura 4.9 e podem ser vistas no APÊNDICE A. É possível notar as maiores temperaturas de pico e menores velocidades de resfriamento para a junta cordão sobre chapa, independentemente do nível de energia. Em um primeiro momento, esse comportamento poderia ser creditado à hipótese de existência de dois modos de extração de calor, um bidimensional para a junta cordão sobre chapa, e um tridimensional para a junta ângulo T, mas, como será discutido na seção seguinte, não foi possível concluir à qual modelo de extração cada junta está exposta, existindo a possibilidade de um mesmo modelo atuar sobre ambas as juntas, o que não explica a diferença

vista na Figura 4.9. Pode-se supor, então, que a junta ângulo T apresente melhores condições para a dissipação do calor proveniente do arco elétrico, devido, provavelmente, à maior quantidade de metal de base presente nesta configuração, quando comparada à junta cordão sobre chapa.

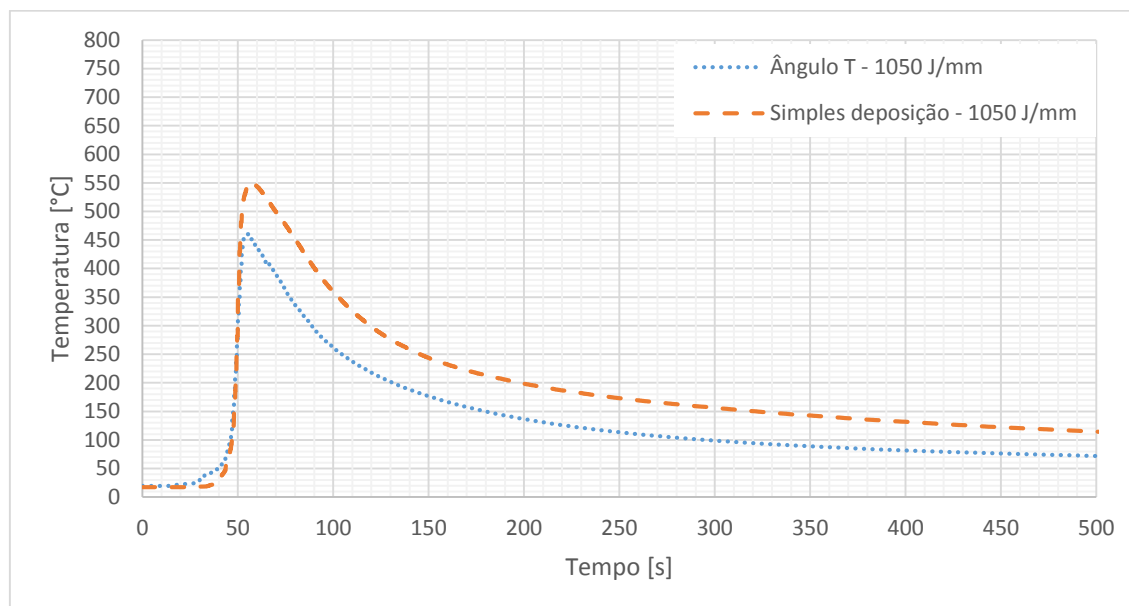


Figura 4.9 – Comparação entre os ciclos térmicos das juntas cordão sobre chapa e ângulo T, energia de soldagem 1050 J/mm.

4.4 Modelos teóricos devido a Rosenthal e comparações com resultados experimentais.

Conforme mencionado no Capítulo 3, foram coletados os valores de tensão, corrente e potência gerados nas soldagens. A Tabela 4.4 apresenta as médias destes valores, por energia de soldagem, para as soldas do tipo cordão sobre chapa.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios para as soldas do tipo cordão sobre chapa.

Energia de Soldagem Nominal	W (m/min)	Tensão U		Corrente		U (V)*	I (A)*	E*0,8	P (W)*
		Nominal (V)		I Nominal (A)	v (mm/s)				
640	4	22		180	5	22,8	177	623	3976
1050	5	23		200	4	24,1	205	943	4876
1500	6	24		230	3	25,3	229	1468	5742

* Corresponde à média entre os resultados das três repetições realizadas.

Através dos resultados mostrados na Tabela 4.4 e das equações descritas na seção 2.2 para os modelos teóricos desenvolvidos por Rosenthal, foram modeladas as distribuições de temperaturas da configuração estudada. A Figura 4.10 traz os resultados encontrados para os modelos de extração de calor 2D, 2,5D e 3D, em comparação com os resultados experimentais obtidos para as juntas cordão sobre chapa. Para a exposição dos resultados foi escolhido somente o menor nível de energia de soldagem, as curvas dos demais níveis de energia ensaiados seguem um padrão similar ao da Figura 4.10 e podem ser vistas no APÊNDICE B.

Percebe-se que, para os parâmetros em análise, as curvas resultantes dos modelos 2D e 2,5D são praticamente idênticas, com a diferença sendo notada apenas nas temperaturas de pico. Observa-se, também, que o modelo intermediário de extração de calor fornece temperaturas máximas mais próximas daquelas encontradas experimentalmente, se comparado ao modelo bidimensional. Além disso, uma análise das macrografias das juntas, seção 4.5, revela que não houve penetração completa em nenhum dos ensaios, para qualquer nível de energia. Com isto posto, é possível refutar o modelo de extração 2D para as juntas e parâmetros

estudados e, a partir daqui, seguir analisando apenas os modelos 2,5D e 3D. A Tabela 4.5 apresenta as temperaturas de pico das curvas expostas na Figura 4.10.

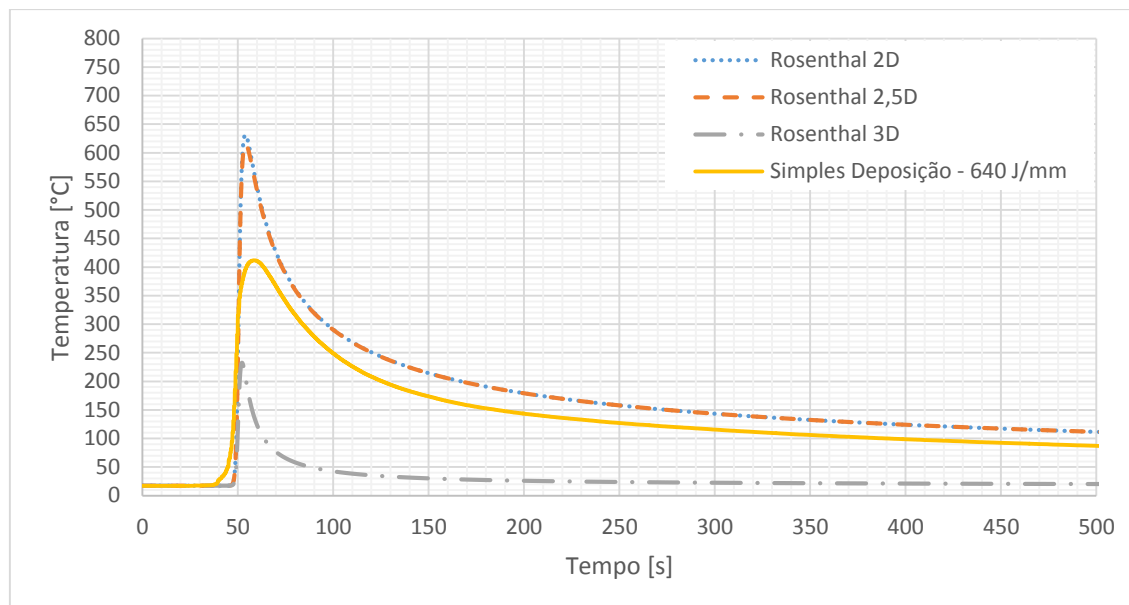


Figura 4.10 - Comparação entre o ciclo térmico real da junta cordão sobre chapa e ciclos teóricos para regimes de extração 2D, 2,5D e 3D. Energia de soldagem 640 J/mm.

Tabela 4.5 – Temperaturas de pico dos modelos teóricos e experimental para a junta cordão sobre chapa.

Energia de Soldagem		640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
Rosenthal 2D	[°C]	631,5	947,3	1439,0
Rosenthal 2,5D	[°C]	615,6	911,4	1360,0
Experimental	[°C]	411,8	548,5	794,0
Rosenthal 3D	[°C]	232,5	325,4	450,0

Seguindo a análise, nota-se que, para ambos os modelos, a diferença entre as temperaturas de pico teóricas e experimentais aumenta à medida que a energia de soldagem se torna mais elevada. O modelo tridimensional fornece valores de temperaturas máximas mais próximos dos obtidos nos ensaios. Apesar disso, fazendo-se uma análise qualitativa através da Figura 4.10, pode-se considerar o desenvolvimento da curva do modelo 2,5D mais adequado para descrever o ciclo térmico real, se o comparado com a curva do modelo 3D.

Para a junta ângulo em T, as médias dos resultados experimentais são mostradas na Tabela 4.6, organizadas por energia de soldagem.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios para as soldas do tipo ângulo T.

Energia de Soldagem Nominal	W (m/min)	Tensão U Nominal (V)	Corrente I Nominal (A)	v (mm/s)	U (V)*	I (A)*	E*0,8	P (W)*
640	4	22	180	5	22,9	178	628	4009
1050	5	23	200	4	24,1	206	949	4946
1500	6	24	230	3	25,4	235	1504	5949

* Corresponde à média entre os resultados das três repetições realizadas.

O comparativo entre os modelos teóricos, 2,5D e 3D, e a curva experimental do ensaio de menor energia de soldagem é apresentado na Figura 4.11. Os comparativos dos demais níveis de energia da junta ângulo T seguem um padrão similar ao da Figura 4.11 e estão disponíveis no APÊNDICE C.

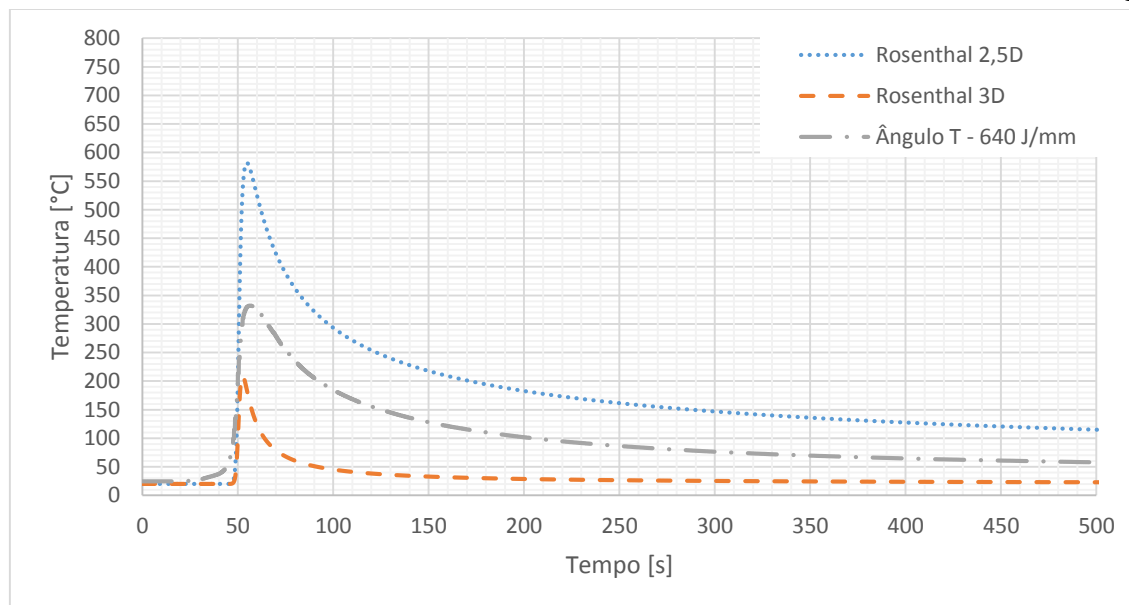


Figura 4.11 - Comparação entre o ciclo térmico real da junta ângulo T e teóricos dos regimes de extração 2,5D e 3D. Energia de soldagem 640 J/mm.

Assim como nas juntas cordão sobre chapa, os modelos teóricos apresentam restrições ao representar o ciclo térmico obtido nos ensaios das juntas ângulo T. As temperaturas de pico das curvas da Figura 4.11 são quantificadas na Tabela 4.7, para os três níveis de energia de soldagem. Nota-se que o modelo 3D se aproxima do valor real neste quesito tanto quanto aumenta a energia de soldagem. Uma análise qualitativa da Figura 4.11, porém, revela que as curvas de ambos os modelos se encontram afastadas da curva do ciclo térmico ensaiado.

Tabela 4.7 - Temperaturas de pico dos modelos teóricos e experimental para a junta ângulo T.

Energia de Soldagem		640 J/mm	1050 J/mm	1500 J/mm
Rosenthal 2,5D	[°C]	582,0	926,9	1484,8
Experimental	[°C]	331,9	460,5	656,0
Rosenthal 3D	[°C]	209,6	332,4	514,5

Com base nos resultados apresentados, constata-se que nenhum dos modelos teóricos conseguiu descrever com exatidão os ciclos térmicos reais, considerando as juntas estudadas e os parâmetros de soldagem utilizados. Esta situação pode estar vinculada, provavelmente, às simplificações às quais os modelos teóricos são submetidos, elencadas na seção 2.2. Além disso, os modelos teóricos não fazem distinção entre o tipo da junta, o que pode explicar uma melhor adequação para a junta cordão sobre chapa, enquanto existe uma maior discrepância dos resultados para a junta ângulo T. As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam, para as juntas cordão sobre chapa e ângulo T respectivamente, a variação em termos percentuais entre os modelos teóricos e os ciclos térmicos ensaiados, em tempos selecionados.

Tabela 4.8 – Diferença percentual entre modelos teóricos e ciclo real em pontos selecionados, junta cordão sobre chapa.

TEMPO		Temp. PICO	75s	100s	150s	200s	250s	300s	350s	400s
Energia Baixa 640 J/mm	2,5D	49%	14%	17%	23%	25%	24%	24%	25%	26%
	3D	-44%	-81%	-83%	-83%	-82%	-81%	-80%	-80%	-79%
Energia Média 1050 J/mm	2,5D	66%	22%	21%	31%	34%	34%	34%	36%	37%
	3D	-41%	-81%	-84%	-85%	-85%	-84%	-84%	-83%	-83%
Energia Alta 1500 J/mm	2,5D	71%	37%	26%	35%	42%	45%	47%	48%	50%
	3D	-43%	-80%	-85%	-87%	-87%	-87%	-86%	-86%	-86%

Tabela 4.9 – Diferença percentual entre modelos teóricos e ciclo real em pontos selecionados, junta ângulo T.

TEMPO		Temp. PICO	75s	100s	150s	200s	250s	300s	350s	400s
Energia Baixa 640 J/mm	2,5D	75%	53%	60%	70%	80%	87%	93%	96%	98%
	3D	-37%	-73%	-75%	-74%	-72%	-69%	-67%	-65%	-63%
Energia Média 1050 J/mm	2,5D	101%	64%	70%	85%	99%	110%	118%	124%	128%
	3D	-28%	-74%	-77%	-77%	-76%	-74%	-72%	-70%	-68%
Energia Alta 1500 J/mm	2,5D	126%	76%	70%	88%	107%	122%	134%	143%	150%
	3D	-22%	-74%	-80%	-81%	-80%	-78%	-77%	-76%	-74%

4.5 Macrografias

De maneira a complementar os resultados alcançados, foram realizadas medições dos parâmetros geométricos das juntas, através de macrografias. Para as juntas cordão sobre chapa, a Figura 4.12 apresenta as macrografias referentes a um dos ensaios de cada energia, as médias dos parâmetros geométricos de todas as repetições são listadas na Tabela 4.10.

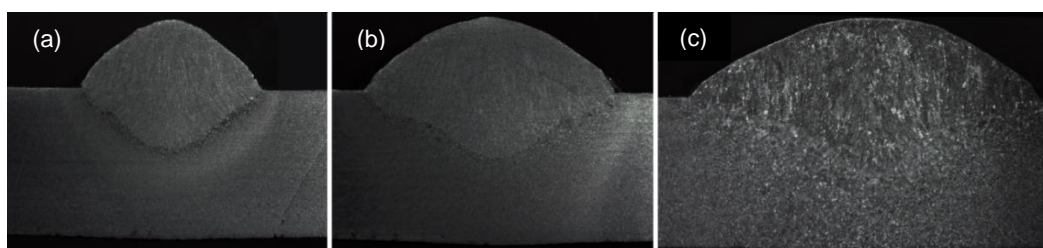


Figura 4.12 – Macrografias juntas cordão sobre chapa, energias de soldagem (a) 640 J/mm, (b) 1050 J/mm e (c) 1500 J/mm.

Tabela 4.10 – Parâmetros geométricos junta cordão sobre chapa. Medidas em milímetros.

Energia de Soldagem	Largura	Reforço	Penetração	Área Total	Área Fundida	Diluição
Baixa - 640 J/mm	7,96	2,88	2,50	26,91	11,72	44%
Média - 1050 J/mm	10,99	3,11	2,71	38,48	15,85	41%
Alta - 1500 J/mm	14,96	3,38	3,12	55,01	20,10	37%

Nota-se que nenhuma das energias de soldagem causou penetração total na solda e, mesmo para a mais baixa energia, é possível perceber o desenvolvimento da zona afetada pelo calor por toda a espessura da chapa, o que pode ser indício de que o calor atingiu a face inferior, caracterizando o modo de extração de calor intermediário 2,5D.

As macrografias das juntas ângulo T são apresentadas na Figura 4.13, assim como as médias das medições na Tabela 4.11.

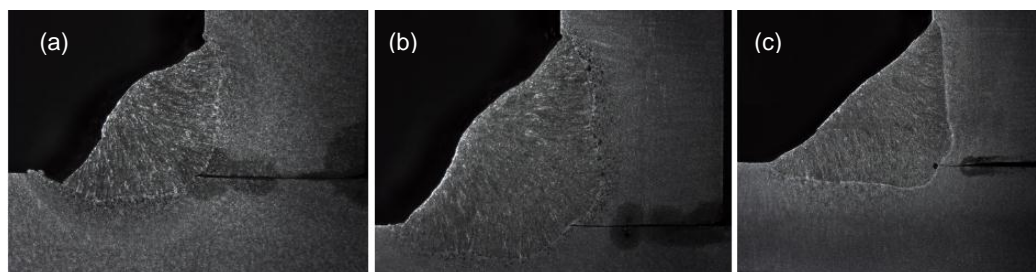


Figura 4.13 – Macrografias juntas ângulo T, energias de soldagem (a) 640 J/mm, (b) 1050 J/mm e (c) 1500 J/mm.

Tabela 4.11 – Parâmetros geométricos junta ângulo T. Medidas em milímetros.

Energia de Soldagem	Garganta teórica	Perna Vertical	Perna Horizontal	Largura	Área Total	Área Fundida	Diluição
Baixa - 640 J/mm	3,61	4,82	5,52	7,36	22,10	5,56	25%
Média - 1050 J/mm	4,16	6,15	5,62	9,60	30,65	10,44	32%
Alta - 1500 J/mm	6,41	8,94	9,24	12,70	54,83	17,18	31%

5. CONCLUSÃO

O procedimento experimental para aquisição dos ciclos térmicos demonstrou a importância da correta fixação dos termopares. Medições de temperaturas realizadas próximas ao cordão de solda sofrem variação da temperatura de pico com pequenos desvios na montagem dos sensores. Esta variação pode estar ligada a fatores como salpicos, influência da radiação emitida pela tocha, entre outros. Nas juntas ângulo T, a variação nos valores das temperaturas máximas do mesmo lado da solda foi mais acentuada em comparação às juntas cordão sobre chapa, provavelmente devido à própria configuração da junta, onde existe uma menor distância entre a tocha e os termopares. Ainda na junta ângulo T, não foram verificadas diferenças entre os ciclos térmicos dos pontos situados na alma e na aba. Apesar das variações nas temperaturas de pico, para todos os ensaios, os sensores apresentaram curvas de ciclos térmicos bastante próximas entre si, caracterizando uma boa representatividade dos dados obtidos.

Os diferentes tipos de juntas apresentaram diferentes ciclos térmicos para os mesmos parâmetros de soldagem, sempre com as juntas cordão sobre chapa obtendo maiores temperaturas de pico e menores velocidades de resfriamento em comparação com as juntas ângulo T. Estas temperaturas menores evidenciadas na junta ângulo T podem ser reflexo da maior quantidade de metal base existente nesta configuração. Deste modo, o calor aportado pelo arco elétrico é melhor dissipado e o resfriamento torna-se mais rápido. Apesar disso, apenas com esta análise, não é possível caracterizar se as duas juntas estão sujeitas a diferentes modos de extração de calor.

Para as configurações e parâmetros estudados, os modelos teóricos não descrevem com exatidão o ciclo térmico real, obtido experimentalmente. Essa diferença está provavelmente ligada as simplificações dos modelos teóricos, além do fato desses modelos não fazerem distinção entre os tipos de juntas. Inicialmente pode-se pensar que juntas T estão sujeitas ao regime de extração 3D, mas os resultados não permitem confirmar tal suposição. Como os modelos são descritos para juntas cordão sobre chapa, essas são melhor representadas, podendo-se notar maior semelhança entre o modelo intermediário, 2,5D, e a curva real, em detrimento ao modelo tridimensional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Diehl, I. L. **“Análise de Diferentes Configurações de Termopar para Medição de Temperaturas Próximas a Cordões de Solda”**. UFRGS, Porto Alegre, 2013.

Machado, I. G. **“Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicações”**. Imprensa Livre, 1ª Edição, Porto Alegre, 2000.

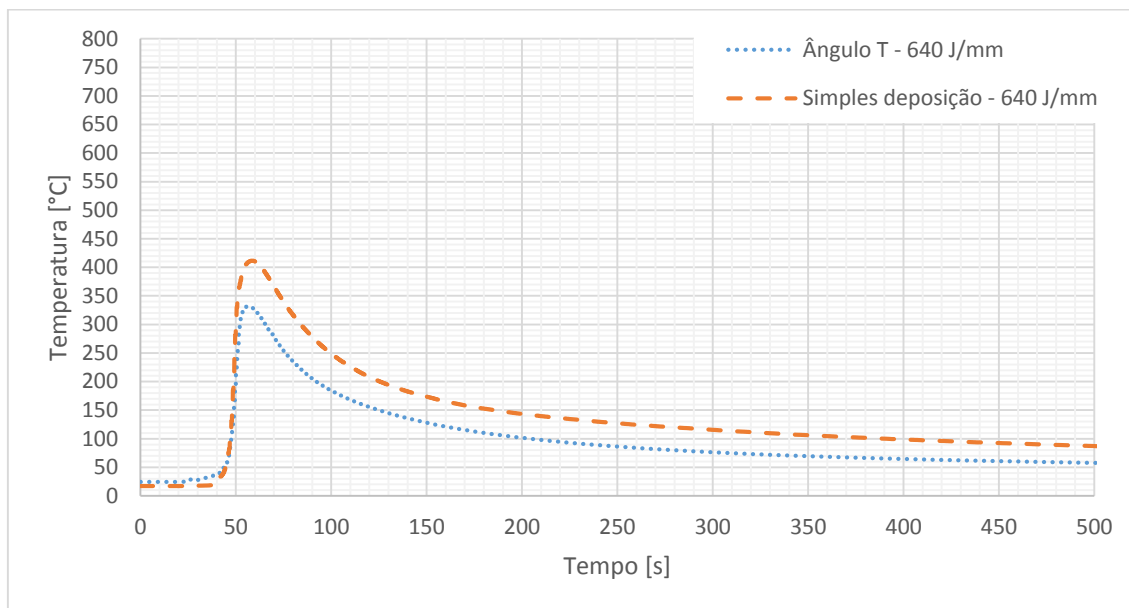
Material Property Data, AISI 1020 Steel. Disponível em <<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1>>. Acesso em 06 de outubro de 2016.

Modenesi, P. J., Marques, P. V., Santos, D. B. **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

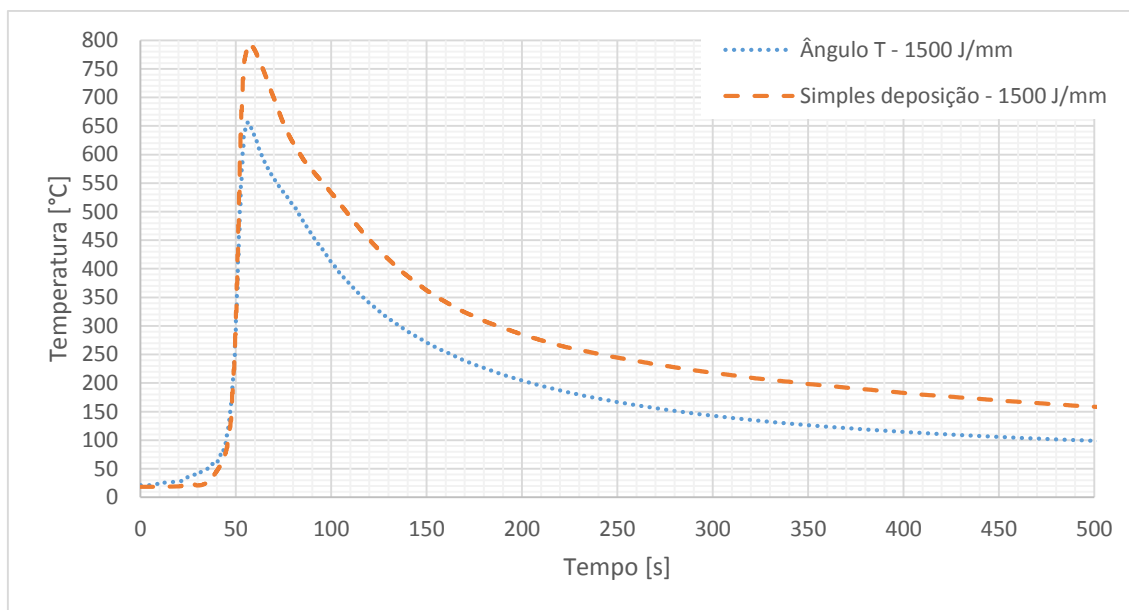
Rosenthal, D. **“Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting”**. Welding Journal 20, pp 220–234, 1941.

Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H. **“Soldagem – Processos e metalurgia”**. Blucher, 10ª reimpressão, 2015.

APÊNDICE A

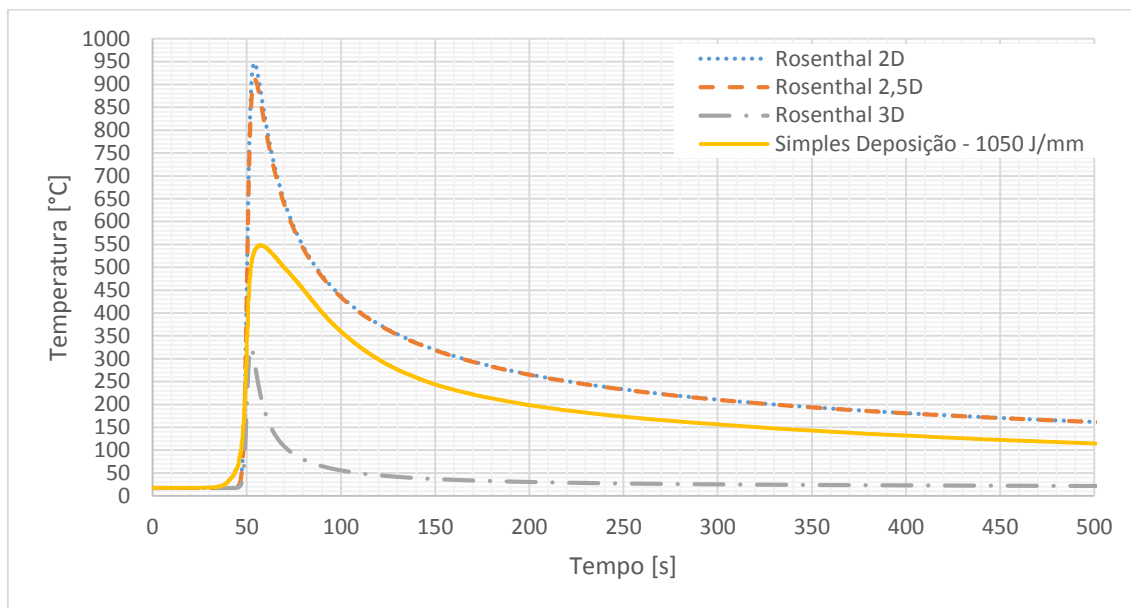


Comparação entre os ciclos térmicos das juntas cordão sobre chapa e ângulo T, energia de soldagem 640 J/mm

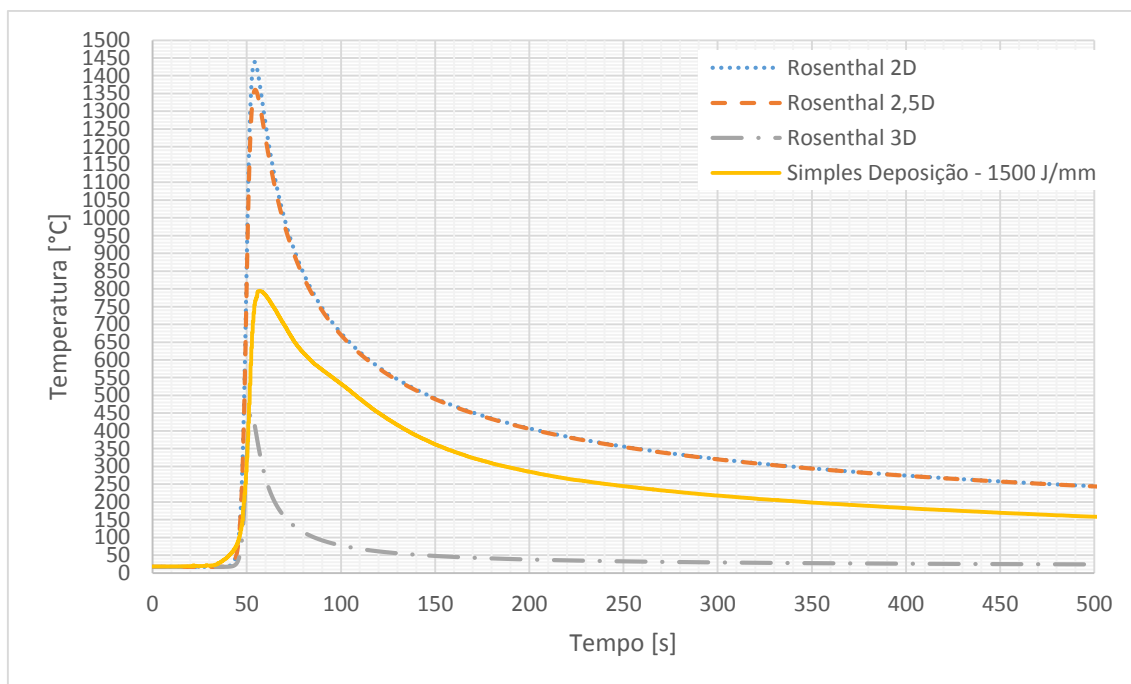


Comparação entre os ciclos térmicos das juntas cordão sobre chapa e ângulo T, energia de soldagem 1500 J/mm

APÊNDICE B

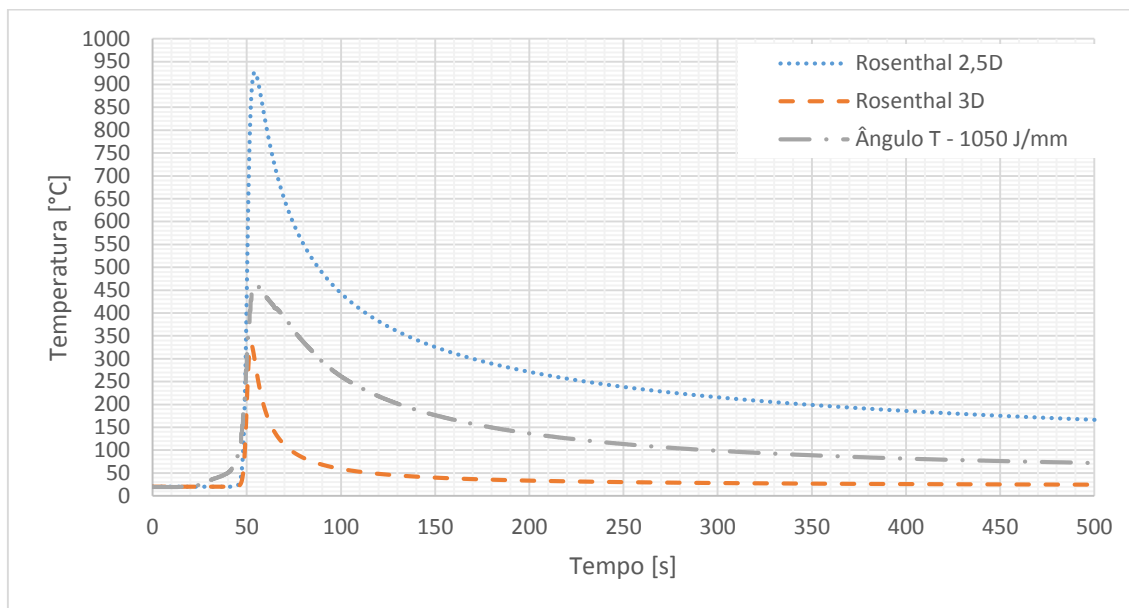


Comparação entre o ciclo térmico real da junta cordão sobre chapa e ciclos teóricos para regimes de extração 2D, 2,5D e 3D. Energia de soldagem 1050 J/mm.

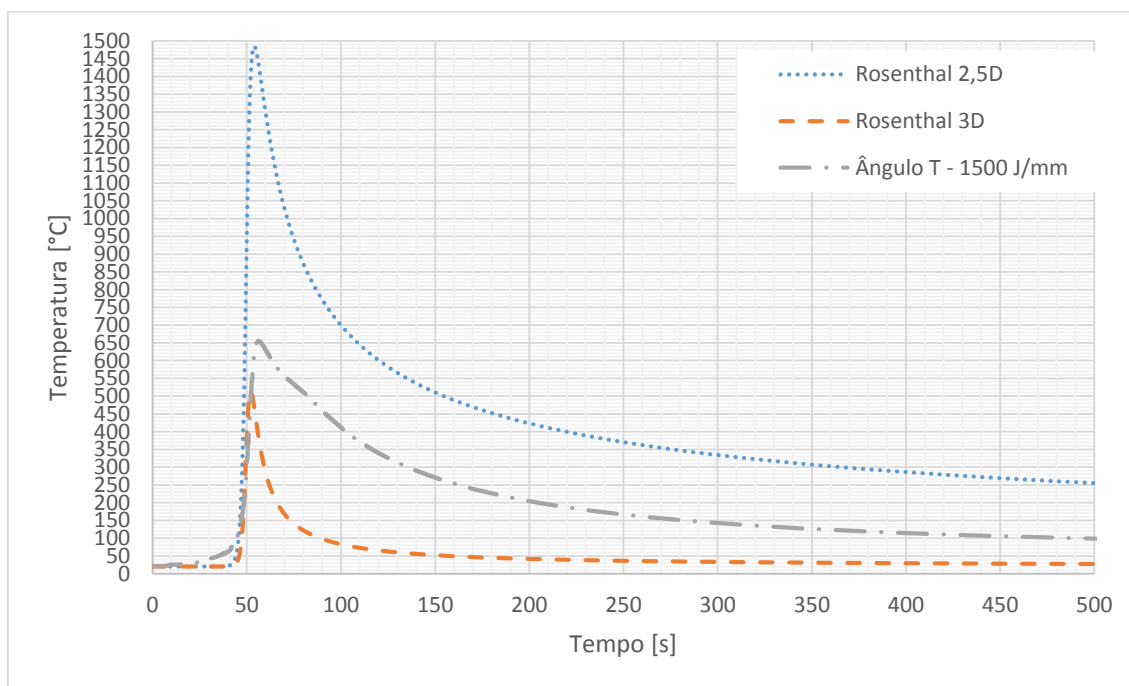


Comparação entre o ciclo térmico real da junta cordão sobre chapa e ciclos teóricos para regimes de extração 2D, 2,5D e 3D. Energia de soldagem 1500 J/mm.

APÊNDICE C



Comparação entre o ciclo térmico real da junta ângulo T e ciclos teóricos dos regimes de extração 2,5D e 3D. Energia de soldagem 1050 J/mm.



Comparação entre o ciclo térmico real da junta ângulo T e ciclos teóricos dos regimes de extração 2,5D e 3D. Energia de soldagem 1500 J/mm.