

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

ANÁLISE DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TERMOPAR PARA MEDIÇÃO DE
TEMPERATURAS PRÓXIMAS A CORDÕES DE SOLDA

por

Igor Luis Diehl

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 2013

Análise de Diferentes Configurações de Termopar para Medição de Temperaturas
Próximas aos Cordões de Solda

por

Igor Luis Diehl

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. Thamy Cristina Ayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio Esmério Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Profa. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Ivan Guerra Machado

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 29 de novembro de 2013.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Marlos e Débora que são exemplo de caráter e dedicação, me incentivaram a estudar e são os “mestres” da minha vida.

À minha esposa Carla que andou sempre ao meu lado em todos os momentos, pela cumplicidade, entendimento, amor, me encorajar nas horas mais angustiantes e me dar o suporte para terminar esta etapa da vida.

À minha segunda mãe e tia Daiane que sempre me apoiou e acolheu, me ajudou nos momentos difíceis pelos puxões de orelha nas horas certas.

Aos meus irmãos Daniel e Victor pela amizade e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois sem Ele, nada seria possível.

Ao Professor José Antônio Esmério Mazzaferro pela atenção, tempo dedicado ao trabalho, ajuda nos experimentos, comentários e sugestões fundamentais.

Ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, na figura do Professor Ivan Guerra Machado, pelas palavras motivadoras, disponibilização do espaço e dos equipamentos utilizados neste trabalho.

Ao Professor Paulo Cezar Adamczuk, pelo conhecimento transmitido e ajuda com os experimentos.

Aos colegas Eng. Diego Aires de Freitas e Tec. Luiz Henrique Machado Zaniratti pelo apoio, troca de conhecimentos, pela ajuda nos cortes de chapas e preparação dos termopares.

Diehl, I. L. **Análise de Diferentes Configurações de Termopar para Medição de Temperaturas Próximas a Cordões de Solda**. 2013. 20p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A soldagem é um processo industrial complexo que requer uma detalhada avaliação antes da execução e o controle sobre as variáveis, tanto de entrada como de saída, torna-se cada vez mais necessário para obtenção de juntas de qualidade. Assim sendo, o presente trabalho visa estudar experimentalmente a influência de diferentes configurações de juntas de termopares na medição de temperatura na zona afetada pelo calor de uma junta soldada. Três configurações de junta para termopares do tipo K (Cromel-Alumel) foram analisadas: com os fios enrolados na ponta, ponta simples e com os fios soldados individualmente ao metal base. Os experimentos foram feitos sobre uma chapa de aço com depósito do cordão de solda feito pelo processo MAG automatizado usando braço robótico. Os termopares foram unidos à chapa através de descarga capacitiva. Quatro cordões de solda foram feitos em cada chapa, alterando-se a distância do cordão de solda ao ponto de medição e a energia de soldagem. As temperaturas de pico de cada tipo de junta do termopar foram comparadas entre si e confrontadas com os resultados teóricos. Os resultados mostram que o termopar que tem os fios da sua junta quente soldados individualmente é o mais adequado para este tipo de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: soldagem MAG; junta termopar; temperatura de pico; instrumentação.

Diehl, I. L. **Analysis of Different Settings for Thermocouple Temperature Measurement Around the Weld Filet**. 2013. 20 pg. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Welding is a complex industrial process that requires a detailed assessment before execution and control over the variables of both entrance and exit are important to produce sound joints. Therefore, the present work aims to study experimentally the influence of different joint configurations of thermocouples in temperature measurement in the heat affected zone of a welded joint. Three types of joint configurations for thermocouples type K (Chromel - Alumel) were analyzed: with wires coiled at the tip, simple tip and wires jointed individually to the base metal. The experiments were performed on a low carbon steel plate with deposit of weld filet made by MAG process automated using robotic arm. The thermocouples were attached to the plate by capacitive discharge. Four weld fillets were made on each plate, changing the distance from the weld to point of measurement and welding energy. The peak temperatures of each joint thermocouple type were compared and collated with the theoretical results. The results show that the thermocouple wires has a hot joint welded individually is most suitable for this type of application.

KEYWORDS: MAG welding; thermocouple joint; temperature peak; instrumentation.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1.	Processos de Soldagem.....	2
3.2.	Soldagem MAG	2
3.3.	Fluxo de Calor na Soldagem	2
3.3.1.	Modelagem Analítica do Processo de Soldagem	3
3.3.2.	Extração Bidimensional do Calor (2D).....	5
3.4.	Efeito termoelétrico.....	5
3.4.1.	Termopares.....	6
4.	METODOLOGIA.....	7
4.1.	Preparação dos termopares	8
4.2.	Aquisição de Dados.....	8
4.3.	Soldagem	8
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
5.1.	Medições de temperatura	9
5.1.1.	Primeira Chapa.....	9
5.1.2.	Segunda Chapa	12
6.	CONCLUSÕES	13
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A integridade de uma junta soldada, em aplicações críticas, é avaliada pelas suas propriedades mais relevantes, as quais dependem principalmente do metal de solda e da zona afetada pelo calor (ZAC). Devido à morfologia da solidificação, o metal depositado é, por comparação, a região menos resistente de uma peça e devido a isso, um controle sobre a microestrutura do metal de solda, especialmente no que diz respeito à melhoria em suas propriedades, muitas vezes torna-se uma questão de grande interesse (Ghosh, 2002).

A morfologia do metal de solda é definida, predominantemente, pela sua taxa de resfriamento, a qual depende principalmente da eficiência na dissipação e distribuição de calor no metal base. A distribuição de temperaturas na ZAC, afetada pelo pico de temperatura e pela geometria da poça de fusão, dita o comportamento do ciclo térmico e influencia a solidificação. Por isso, uma estimativa do comportamento térmico definido pela distribuição de temperatura, pico de temperatura da ZAC pode ser muito útil para o controle da soldagem e do procedimento para alcançar a qualidade desejada da junta soldada (Ghosh, 2000).

O comportamento do ciclo térmico pode ser determinado baseando-se nas equações de fluxo de calor ou através de correlações matemáticas para casos conhecidos existentes na literatura. Entretanto, sempre haverá grande incerteza nos resultados vindos de soluções analíticas. Em aplicações muito peculiares ou que requerem maior fidelidade dos valores do campo de temperaturas e taxas de resfriamento, faz-se necessário o emprego de ensaios experimentais, demandando o uso de sensores de temperatura.

Termopares são transdutores usados para medir temperatura, sendo muito populares devido à ampla faixa de temperaturas que se consegue medir, estabilidade e baixo custo. Apesar de medir a temperatura pontualmente, com algumas unidades de termopares, pode-se monitorar uma região (Moreira et al, 2007).

Todavia, sob o ponto de vista da instrumentação, este é um problema complexo devido às condições do ambiente de soldagem como muito ruído e baixa amplitude do sinal de temperatura. Consequentemente alguns aspectos envolvendo a medição de temperatura na soldagem com termopares devem ser considerados. Um dos aspectos mais importantes é a dinâmica da variação da temperatura que no aquecimento pode chegar a uma taxa superior a 400°C/s. Um sensor ideal é aquele em que a medida consegue acompanhar esta característica.

As propriedades que mais exercem influência sobre a dinâmica da resposta de um termopar são o diâmetro dos fios e a construção da junta. Quanto menor for o seu diâmetro, menor será a sua massa e, portanto, a inércia térmica do termopar será também menor. O modo como é formada a junta e seu acoplamento ao metal base serão os alvos deste estudo.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente a influência de diferentes configurações de juntas de termopares na medição de temperatura na zona afetada pelo calor de uma junta soldada. Além disso, contribuir para conhecimento detalhado do comportamento dos termopares comumente utilizados neste tipo de tarefa. Pois, como a soldagem é um processo industrial complexo que requer uma detalhada avaliação antes da execução, o controle sobre as variáveis tanto de entrada como de saída torna-se cada vez mais rigoroso para que se possa ter um maior controle dimensional. Assim, pode-se automatizar tanto quanto possível o processo de soldagem e, adicionalmente, obter produtos com mais qualidade com relação a distorções e propriedades físicas e mecânicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processos de Soldagem

A soldagem é o grupo de processos que, dentre os processos de união de materiais, mais se destaca devido ao seu largo emprego e grande volume de atividades que envolvem. Este processo propicia a união através da fusão de ambos os materiais e a adição de um terceiro ou apenas pela adição de um terceiro material fundido a dois materiais em contato na fase sólida. Para que haja uma solda satisfatória, o processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos (Machado, 2007):

- Fornecer energia para realizar a união;
- Possuir mecanismos para remover contaminação das superfícies a serem unidas;
- Prevenir a contaminação atmosférica, ou seus efeitos;
- Permitir que os mecanismos e fenômenos envolvidos sejam controlados.

Os processos de soldagem podem ser classificados considerando a origem da energia, métodos de proteção ou natureza da união.

3.2. Soldagem MAG

O processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) ocorre pela formação do arco elétrico entre a peça e o eletrodo consumível que geralmente é nu, maciço ou tubular e alimentado continuamente. A proteção da poça de fusão é feita através de gás de proteção oxidante expelido na tocha. Em geral, é empregado dióxido de carbono ou oxigênio misturado ao gás argônio como gás de proteção. Desse modo, na soldagem de metais ferrosos, há uma maior estabilidade do arco elétrico, por formar grande número de pontos catódicos na ponta do arame consumível e se obtém maior fluidez do metal fundido.

O início do processo se dá quando o arame energizado encosta na peça abrindo o arco elétrico, o gás flui e o arame avança em direção à peça. A fonte de potência normalmente é do tipo tensão constante com transformador retificador e podem ser ajustados os seguintes parâmetros: tensão; velocidade de alimentação do arame, acoplado ao da corrente; vazão do gás de proteção; ajuste da indutância. Devido a isso e ao fato de não haver um fluxo de soldagem a ser manipulado, como é o caso da solda por arco submerso, é que esse processo tem alto grau de automatização podendo ser soldado em todas as posições de soldagem.

3.3. Fluxo de Calor na Soldagem

A energia envolvida na soldagem é responsável pela formação da poça de fusão, que ocorre a cada deslocamento da fonte de energia, e aquecimento da peça na região próxima ao metal fundido. Tais fatores geram distorções ou tensões residuais, modificações metalúrgicas no material e conseqüentemente as suas propriedades mecânicas serão alteradas. A energia de soldagem, E (J/mm) é definida pelos parâmetros de soldagem como mostra a equação 3.1 (Machado, 2000).

$$E = \frac{q}{v} = \frac{U}{v} I \quad (3.1)$$

Onde q é potência de soldagem (W), U a tensão elétrica (V), I a corrente elétrica (A) e v a velocidade de soldagem (mm/s), velocidade com a qual a tocha de soldagem se desloca. Entretanto, nem toda a energia gerada pelo arco elétrico é transferida para peça, há uma distribuição de energia de soldagem que pode se ver na figura 3.1 e o balanço de energia, neste caso, é como mostrado na equação 3.2 (Dupont e Marde, 1995).

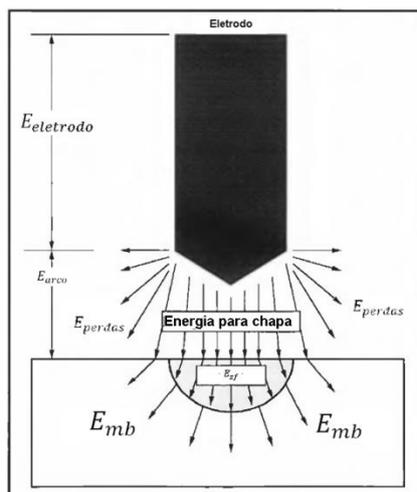


Figura 3.1 - Ilustração esquemática da distribuição de energia de soldagem (adaptado de Dupont e Marde, 1995).

$$E = E_{perdas} + E_{zf} + E_{mb} \quad (3.2)$$

No lado direito da equação acima, o termo E_{perdas} representa a quantidade de energia perdida para o ambiente e é quantificada pelo coeficiente de rendimento térmico do arco (η_a), E_{zf} representa o calor utilizado para gerar a zona de fusão e E_{mb} representa o calor que é transferido para o metal base no seu entorno. A eficiência térmica na soldagem depende da quantidade de energia de soldagem é perdida na forma de calor para o ambiente por radiação e convecção, sendo apenas uma parcela desta energia usada para elevar a temperatura na peça soldada. Assim o rendimento térmico é determinado pela equação 3.3 (Dupont e Marde, 1995).

$$\eta_a = \frac{E_{zf} + E_{mb}}{E} \quad (3.3)$$

O rendimento térmico varia de processo para processo devido às peculiaridades de cada processo e a outros fatores que influenciam este coeficiente que pode ser apurado com maior exatidão ao se medir a voltagem do arco diretamente a partir da ponta do eletrodo até o metal base, o que é muito difícil atualmente. Desse modo, é comumente utilizada a voltagem combinada do eletrodo com a do arco para basear o rendimento térmico (equação 3.4). Dupont e Marde, 1995, determinaram experimentalmente que a eficiência térmica na soldagem por MAG não varia expressivamente em função da variação da corrente de soldagem. Os valores encontrados foram de $0,84 \pm 0,04$ (Dupont e Marde, 1995).

$$E = E_{arco} + E_{eletrodo} \quad (3.4)$$

onde E_{arco} é a energia gerada no arco elétrico e $E_{eletrodo}$ é a energia produzida no eletrodo de solda.

3.3.1. Modelagem Analítica do Processo de Soldagem

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de obter a gradiente de temperatura de soldagem, morfologia da poça de fusão, alterações metalúrgicas dentre outras características de uma união soldada. Daí vem a necessidade de se modelar o processo de soldagem. Segundo Machado, 2000, a partir da década de 40, Rosenthal apresenta propostas para solução analítica do problema térmico envolvendo a soldagem derivando da equação de fluxo de calor como mostra a equação 3.5 para o caso de coordenadas cartesianas.

$$\frac{\delta^2 T}{\delta w^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = \frac{v}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta w} \quad (3.5)$$

Sendo que o sistema de coordenadas tem o formato (w,y,z) , onde a fonte de calor se movimenta na direção OX, como demonstrado na figura 3.2, tem-se a equação 3.6.

$$w = x - vt \quad (3.6)$$

onde v é a velocidade com a qual a fonte se desloca (mm/s), t é o tempo (s). Qualquer ponto P na figura 3.2 pode ser determinado pelo vetor \vec{r} , com módulo $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

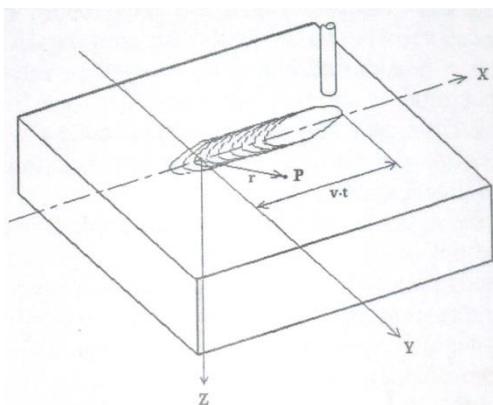


Figura 3.2 - Soldagem sendo realizada sobre a superfície de um corpo (adaptado de Machado, 2000).

Como o processo é bastante complexo, algumas considerações e simplificações foram adotadas:

- O Fluxo de calor deve ser considerado estacionário;
- A fonte de calor é pontual;
- O calor utilizado para mudanças de estado é desprezado;
- As propriedades térmicas não variam com a temperatura;
- Não há perda de calor na superfície;
- Não há convecção na poça de fusão;

O trabalho desenvolvido por Rosenthal norteou os trabalhos de autores que vieram posteriormente incluindo soluções numéricas computacionais, incluindo Rykalin, 1948, de quem se devem algumas equações a seguir. Dentre as propostas para solução da equação 3.5, podemos destacar três modelos de extração de calor da solda que podem ser bidimensional, tridimensional e intermediária de acordo com a penetração da solda (figura 3.3).

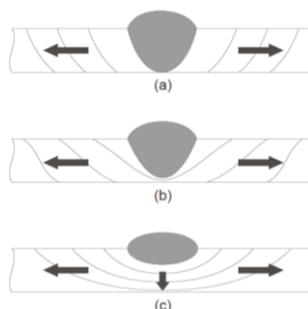


Figura 3.3 - Representação dos modos de extração do calor. (a) 2D. (b) 2,5D. (c) 3D (Machado, 2000)

A extração do calor é dita bidimensional (2D) quando o cordão de solda apresenta penetração completa. Nesse caso as linhas de isotermas se apresentam paralelas à linha de fusão.

Quando a penetração é incompleta e a superfície oposta à solda é aquecida, o regime de extração de calor é denominado intermediário (2,5D). Já no caso de a superfície oposta à solda não sofrer aquecimento, a extração de calor é dita tridimensional (3D).

3.3.2. Extração do Calor em Regime Intermediário (3D)

Neste caso a fonte de energia é considerada pontual e a superfície oposta do cordão de solda é pouco aquecida conforme figura 3.3 (c), desloca-se em X no sistema móvel de coordenadas (w,y,z) e a chapa é dita infinita no plano XY. A temperatura num ponto que se encontra na posição $R = (w^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ pode ser aproximada resolvendo a equação 3.5, resultando na equação 3.7 (Machado, 2000).

$$\Delta T = \frac{q}{2k\pi R} \exp(-\lambda v(R + w)) \quad (3.7)$$

onde q, é a potência da fonte, k a condutividade térmica do metal de solda, para facilitar a resolução $\lambda = 1/(2\alpha)$, v a velocidade de soldagem e α a difusividade térmica do material.

3.4. Efeito termoelétrico

Segundo Kasap, 2001, Thomas Seebeck observou, em 1821, o efeito termoelétrico usando dois diferentes metais em que uma diferença de temperatura entre dois pontos em um condutor resulta em uma diferença de potencial entre esses dois pontos. Dito de outra forma, um gradiente de temperatura em um condutor dá origem a um campo interno, devido a maior agitação dos elétrons livres na região mais quente. Consequentemente há uma difusão resultante dos elétrons da região quente para a região fria, a qual provoca o acúmulo de elétrons na região fria tornando-a eletricamente negativa e a região quente torna-se eletricamente positiva. Assim forma-se uma diferença de potencial entre as duas regiões do condutor. A diferença de potencial através do material devido à diferença de temperatura é chamada de efeito Seebeck, que é medido através da equação 3.8 (Kasap, 2001).

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (3.8)$$

Para medir a diferença de potencial entre a região fria e a região quente é necessário o uso de um material com coeficiente de Seebeck diferente, do contrário, a voltagem entre os dois condutores será nula, como mostra a figura 3.4.

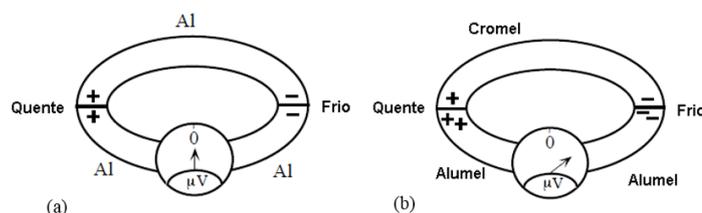


Figura 3.4 - (a) Diferença de potencial nula entre juntas quente e fria devida a condutores com mesmos coeficientes de Seebeck. (b) Materiais com diferentes coeficientes de Seebeck produzem voltagem diferente de zero entre juntas quente e fria. (Adaptado de Kasap, 2001)

A voltagem elétrica gerada por um dos fios é obtida através da equação 3.9, convencionalmente partindo da ponta fria para a ponta quente.

$$\Delta V = \int_{T_0}^T S dT \quad (3.9)$$

E, então, a voltagem referente a um par de fios com metais diferentes, soldados juntos numa de suas extremidades expostos a uma temperatura diferente da temperatura do outro terminal é dada pela equação 3.10.

$$V_{AB} = \int_{T_0}^T (S_A - S_B) dT = \int_{T_0}^T S_{AB} dT \quad (3.10)$$

Sendo, S_B o coeficiente de Seebeck de um dado metal A e metal B respectivamente, V_{AB} a diferença de potencial gerada entre estes materiais e S_{AB} o coeficiente de Seebeck do termopar constituído dos metais A e B. Na tabela 3.1 estão listados os coeficientes de Seebeck para diversos materiais.

Tabela 3.1 - Coeficiente de Seebeck para materiais selecionados (adaptado de Kasap, 2001).

Metal	Na	K	Al	Mg	Pb	Pd	Pt	Mo	Li	Cu	Ag	Au
S @ 0°C ($\mu V/K$)			-1,6	-1,3	-1,15	-9	-4,45	+4.71	14	+1.70	+1.38	+1.79
S @ 100°C ($\mu V/K$)	-5	-12.5	-1.8		-1.3	-9.99	-5.28	+5.57		+1.84	+1.51	+1.94

3.4.1. Termopares

O método preferencial para se medir temperatura nos processos de soldagem, por várias razões, é por meio de termopares. Este método pode reproduzir a taxa de variação de temperatura exigida para medição, é relativamente barato, permite uma ampla faixa de utilização e, o que é mais importante, permite que as medições sejam feitas nas seções não visíveis. De particular importância é a medição da temperatura na poça de fusão onde nenhum dos outros métodos pode atender a esses requisitos básicos (Slania et al, 2007).

Suárez et al, 2003, compararam o uso de termopares e sensores de fibra ótica para medições de temperatura na soldagem por TIG de chapas de Al-Mg. Concluíram em seu trabalho que existe uma boa correlação entre as temperaturas e taxas de resfriamento por estes dois sensores. Entretanto, há a necessidade de correção do valor da emissividade do material de solda, durante o aquecimento, devido à camada de óxido formada.

No circuito de um termopar, um terceiro metal pode ser introduzido, mas, contanto que a temperatura da junta seja uniforme não haverá erro na medição mesmo que este metal esteja na junta de medição, de referência ou em qualquer posição intermediária. Isso é ilustrado na figura 3.5 onde V é a tensão gerada pela diferença de temperatura entre a temperatura medida T e a junta de referência.



Figura 3.5 - Demonstração de que um terceiro metal no circuito termopar não interfere na medição.

Na tabela 3.2 estão listados os principais tipos de termopares encontrados no comércio com sua faixa de aplicação de temperaturas e na figura 3.6 estão suas respectivas curvas de tensão de resposta em função da diferença de temperatura entre a junta de referência (junta fria) e a junta exposta a temperatura que se deseja medir (junta quente). É bastante comum que se use um banho de gelo fundente como temperatura de referência para aplicações mais precisas, caso contrário é necessário o conhecimento prévio e com muita exatidão da temperatura ambiente, por exemplo, onde a junta fria está posicionada.

Tabela 3.2 – Tipos de termopares disponíveis no mercado (Araújo, 2012).

Tipo	Metal		Padrão U.S. Código de cores		Coeficiente Seebeck S ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)@T($^\circ\text{C}$)		Erro in $^\circ\text{C}$		
	+	-	+	-			Faixa	Desvio	Especial
B	Platina - 30% Ródio	Platina - 6% Ródio	Cinza	Vermelho	5.96	600	870 to 1700	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.25\%$
E	Nickel- 10% Chromium	Constantan	Violeta	Vermelho	58.67	0	0 to 900	± 1.7 or $\pm 0.5\%$	± 1 or $\pm 0.4\%$
J	Ferro	Constantan	Branco	Vermelho	50.38	0	0 to 750	± 2.2 or $\pm 0.75\%$	± 1.1 or $\pm 0.4\%$
K	Niquel- 10% Chromium	Niquel	Amarela	Vermelho	39.45	0	0 to 1250	± 2.2 or $\pm 0.75\%$	± 1.1 or $\pm 0.4\%$
N	Nicrosil	Nisil	Laranja	Vermelho	25.93	0	0 to 1250	± 2.2 or $\pm 0.75\%$	± 1.1 or $\pm 0.4\%$
R	Platina - 13% Ródio	Platina	Preto	Vermelho	11.36	600	0 to 1450	± 1.5 or $\pm 0.25\%$	± 0.6 or $\pm 0.1\%$
S	Platina - 10% Ródio	Platina	Preto	Vermelho	10.21	600	0 to 1450	± 1.5 or $\pm 0.25\%$	± 0.6 or $\pm 0.1\%$
T	Cobre	Constantan	Azul	Vermelho	38.75	0	0 to 350	± 1 or $\pm 0.75\%$	± 0.5 or $\pm 0.4\%$

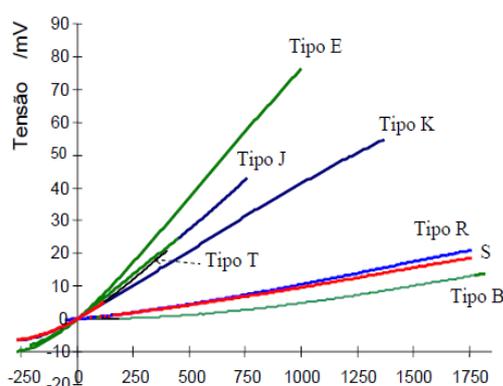


Figura 3.6 - Curva de termopares de tensão gerada em função da temperatura aplicada (Araújo, 2012).

De acordo com Machado, 2000, o termopar empregado para aquisição do ciclo térmico do metal de solda deve ter o seu limite superior no mínimo 200°C acima do ponto de fusão do metal de solda para que se possa fazer a medição da temperatura da poça de fusão com o termopar mergulhado nela. Para esse fim, na soldagem de aços, recomenda o termopar de Pt/Pt-10% Rh do tipo S, que em se tratando de um metal deveras raro, torna esse termopar pouco acessível devido ao seu preço. Porém, para aquisição do ciclo térmico situados no metal base pode ser empregado o termopar de Chromel-Alumel tipo K.

4. METODOLOGIA

Uma vez que o objetivo deste trabalho é contribuir para o conhecimento acerca da aquisição do ciclo térmico de soldagem e a comparação entre as configurações de ponta de

termopares, foi estabelecida uma metodologia que deve contemplar ensaios experimentais e sua validação, que neste trabalho foi feito através de cálculos analíticos.

Os procedimentos práticos foram realizados no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Foram realizadas soldas de topo utilizando o processo MAG com CO_2 como gás de proteção. Para uma melhor controle dos parâmetros de soldagem foi utilizado um braço robótico específico para esse processo Yaskawa Motoman em conjunto com a fonte de potência Fronius TransPuls Synergic 4000. Como metal base foram utilizadas chapas de aço ao carbono SAE 1020, com dimensões de 300 x 250 x 5mm.

4.1. Preparação dos termopares

Neste trabalho foram empregados nove termopares de Chromel-Alumel tipo K para a aquisição do ciclo térmico de soldagem. Os termopares foram divididos em três grupos, cada grupo teve a junta de medição confeccionada de uma forma diferente, como se pode observar na figura 4.1. Os tipos de junta confeccionados foram os seguintes:

- (a) Extremidades dos fios torcidos duas voltas, as pontas soldadas por TIG e unido à peça por descarga capacitiva;
- (b) Junta simples, as pontas foram unidas com descarga capacitiva e depois unido a peça por descarga capacitiva
- (c) Pontas unidas à peça individualmente, por descarga capacitiva, com uma distância praticamente nula uma da outra.

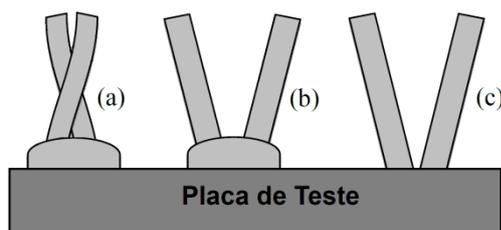


Figura 4.1 - Esquema das configurações dos termopares utilizados nos experimentos: (a) fios enrolados na ponta; (b) ponta simples; (c) extremidades dos fios soldadas individualmente na peça. (Adaptado de Araújo, 2012).

4.2. Aquisição de Dados

Com os nove termopares soldados à chapa, a leitura dos seus sinais foi feita através de um sistema de aquisição de dados constituído por amplificador, conversor analógico/digital, junta fria para referência de temperatura e um computador. Os sinais gerados pelos termopares são convertidos em temperatura através das correlações que sistema de aquisição possui armazenado na memória.

4.3. Soldagem

Foram feitos quatro cordões de solda de 300mm em cada chapa, sendo três deles no lado oposto à superfície onde estão os termopares e um cordão no mesmo lado, como mostra a figura 4.2. Os termopares foram posicionados colinearmente, distanciados cerca de 5mm um dos outros, na linha longitudinal à chapa e no meio da sua largura de modo a ocupar a região central desta linha. A sequência e os parâmetros de soldagem usados para cada cordão estão mostrados na tabela 4.1. A largura do cordão de solda chegou a 10mm. O procedimento descrito acima foi executado em duas chapas.

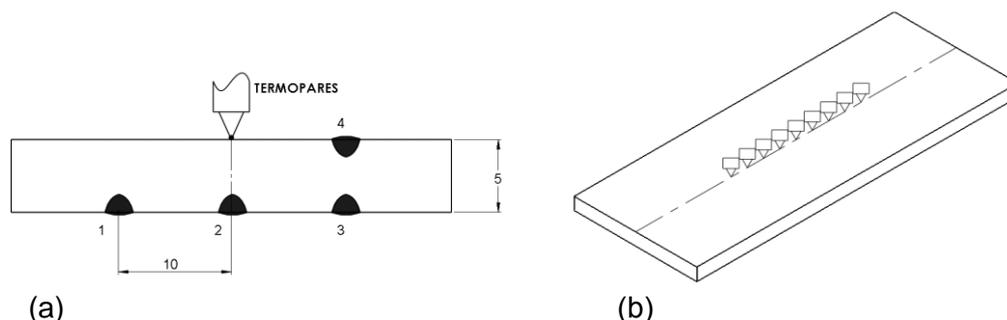


Figura 4.2 - Diagrama esquemático da (a) sequência de soldagem e (b) representação da disposição dos termopares na região central da chapa.

Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho.

Cordão	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Energia (J/mm)
1	130	5	250
2	130	2,5	500
3	130	2,5	500
4	130	2,5	500

Os termopares e os cabos de extensão foram devidamente identificados e alternados durante os procedimentos, bem como foram alternados os tipos de juntas entre os termopares.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Medições de temperatura

Realizados os cordões de solda, os dados foram tratados e geraram-se as curvas que mostram o ciclo térmico obtido. As curvas a seguir mostram as curvas médias de cada um dos termopares que compõem os grupos do tipo A, B e C, respectivamente, conforme esquematizado na figura 4.1.

5.1.1. Primeira Chapa

Na figura 5.1 podemos ver o resultado do ciclo térmico dos cordões 1, 2, 3 e 4 respectivamente, dispostos conforme esquema apresentado na figura 4.2. O tempo entre um passe de solda e outro foi de aproximadamente cinco minutos.

Percebe-se nas curvas da figura 5.1 que há uma tendência de que os termopares que possuem a junta quente do tipo C, que tem os fios soldados individualmente na peça, tenham uma maior dinâmica quanto à mudança de temperatura ocorrida na chapa em função da fonte de calor da soldagem, se comparados os outros tipos de juntas. Assim, estes termopares alcançam uma maior temperatura de pico. Os termopares que possuem a junta quente do tipo B, que são fios simplesmente unidos e posteriormente soldados a peça soldada, apresentam um pequeno atraso ao medir o aquecimento e conseqüentemente os picos de temperatura alcançados ficam sempre abaixo dos dos termopares do grupo C. Isso se deve à massa acumulada na junta (figura 5.2 (a)) deste termopar no momento da fusão dos fios. Esta massa acaba por aumentar ligeiramente a inércia térmica do sensor. Já no termopar com junta quente do tipo C a massa é praticamente inexistente, como pode ser visto na figura 5.2 (b).

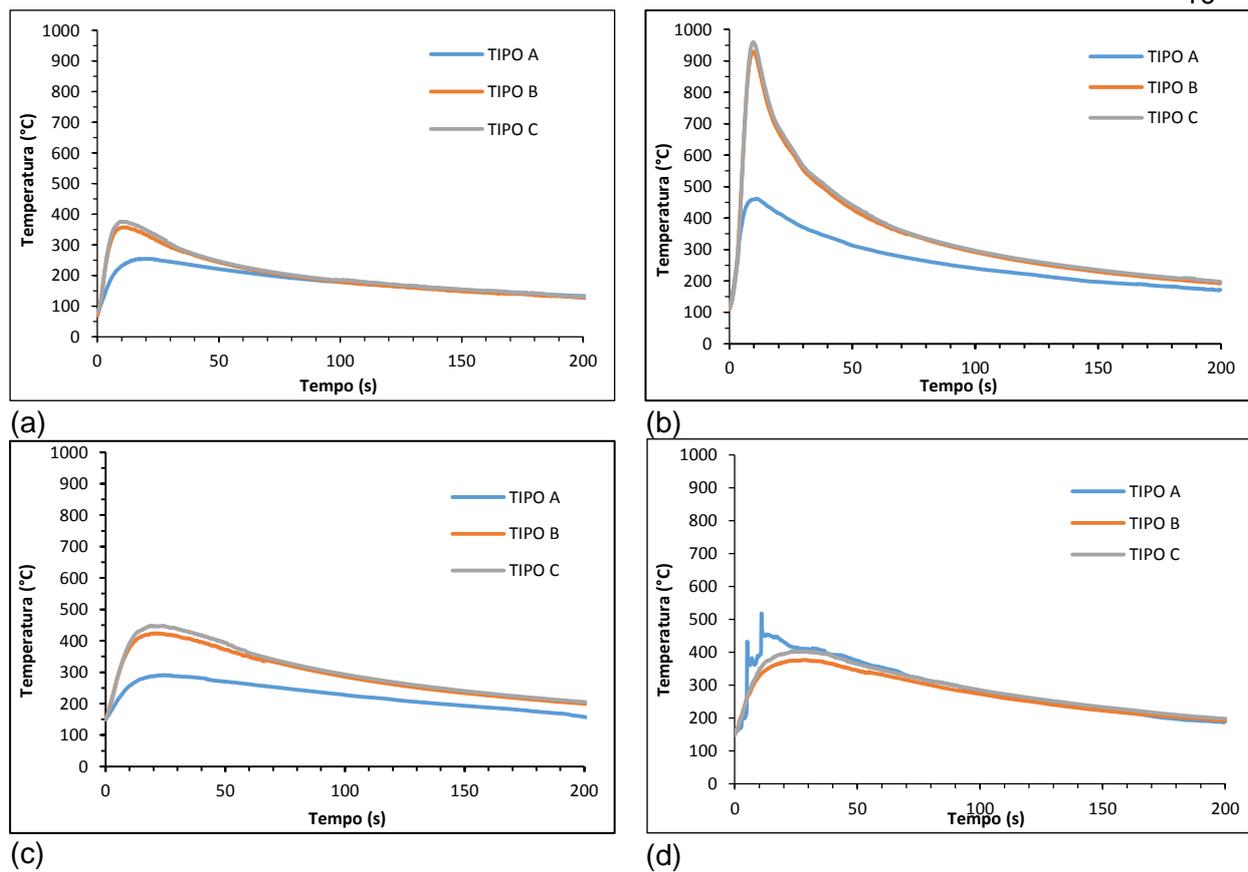


Figura 5.1 - Ciclo térmico cordão primeira chapa. (a) Cordão 1. (b) Cordão 2. (c) Cordão 3. (d) Cordão 4.

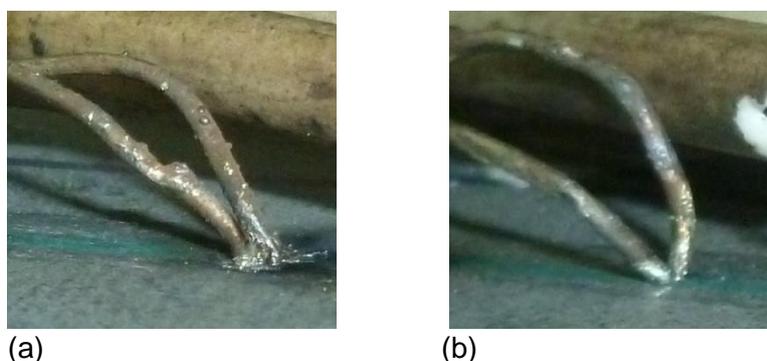


Figura 5.2 - Exemplo de juntas de termopares produzidas neste trabalho. (a) Junta tipo B, simples. (b) Junta do tipo C, fios unidos a peça individualmente.

Os termopares que possuem a junta do tipo A apresentam grande retardamento com relação aos outros dois tipos de junta. A isto se deve ao enrolamento dos fios, que acaba formar outros pontos de contato anteriores a junta quente do termopar que está colado na chapa e, portanto, o sensor mistura os sinais devido à temperatura da chapa e a do ar que é aquecido pelo calor dissipado pela chapa. As juntas formadas nos termopares do tipo A estão exemplificadas na figura 5.3.



Figura 5.3 - Exemplo de termopar com junta do tipo A. As setas indicam onde são formadas as juntas neste tipo de configuração.

No cordão 4, em que o a solda e os termopares estão no mesmo lado da chapa, houve forte interferência do arco elétrico sobre os termopares que possuíam união do tipo A que gerou a instabilidade do sinal vista na figura 5.1 (d). Isto ocorreu porque o arco elétrico passou muito próximo aos termopares aquecendo todos os pontos de contato e aqueles pontos que não estão soldados a chapa acabam dispersando menos calor gerado pelo arco elétrico. Assim, o sinal gerado pelo termopar não reflete a temperatura da chapa, mas, alguma combinação dos sinais vindo da chapa e dos pontos de contato anteriores a junta quente colada na chapa. Por isso, não é possível utilizar os dados do grupo de termopares com junta do tipo A quando o arco elétrico passa próximo deste sensor.

Os picos de temperatura calculados, de acordo com a equação 3.7 para o caso de extração de calor bidimensional, para cada cordão de solda estão anotados nas tabelas 5.1 a 5.4, respectivamente. Também estão anotadas nas tabelas as diferenças percentuais do valor medido para o calculado de cada grupo de termopar e os desvios padrão calculado a partir dos valores de pico dos termopares de cada grupo de tipo de junta.

Tabela 5.1 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 1 da primeira chapa.

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		430	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	45,7	9,2	3,9
Desvio padrão (°C)	75,1	7,28	6,48

Tabela 5.2 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 2 da primeira chapa.

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		1150	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	59,6	11,9	8,7
Desvio padrão (°C)	193,02	24,43	13,9

Tabela 5.3 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 3 da primeira chapa

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		490	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	14,5	4,6	1,4
Desvio padrão (°C)	193,02	24,43	13,9

Tabela 5.4 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 4 da primeira chapa

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		510	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	42,9	16,2	9,7
Desvio padrão (°C)	22,55	9,84	8,46

De acordo com os dados das tabelas 5.1 a 5.4 podemos ver que a diferença máxima entre o valor teórico e o valor medido com o termopar usando a junta do tipo C é de 9,0% e na média a diferença é de 5,5%. Já para o termopar com junta do tipo B é de 15,0%. A diferença média de temperatura encontrada entre os termopares com junta do tipo B e C é de 10,9%.

Os desvios padrão mostrados nas tabelas de 5.1 a 5.4 mostram que o termopar com junta do tipo C apresenta menor dispersão dos valores medidos. Isso pode ser explicado pelo fato de que ao se usar descarga capacitiva para soldar os sensores na chapa, este termopar é que funde a menor quantidade de metal. E também porque a secção transversal do metal soldado é praticamente a mesma da secção dos fios do termopar.

5.1.2. Segunda Chapa

Na figura 5.4 estão dispostos os ciclos térmicos obtidos nos experimentos com a segunda chapa. Neste procedimento os termopares tiveram suas pontas desfeitas e foram rearranjados, de forma aleatória, nos grupos de acordo com o tipo de junta. Os cabos de compensação e os canais do sistema de aquisição também foram trocados aleatoriamente a fim de evitar qualquer tendência por causa de um eventual erro em algum dos dispositivos utilizados nos experimentos aqui expostos.

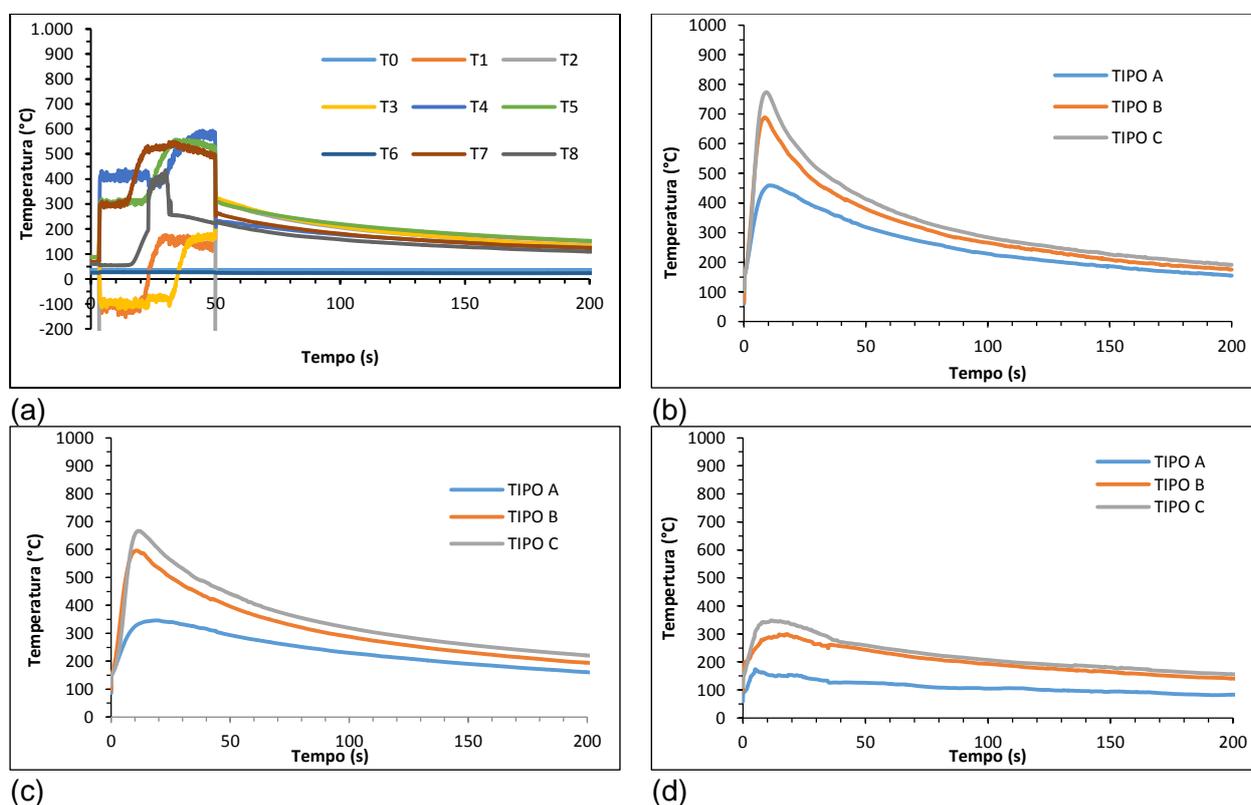


Figura 5.4 - Ciclo térmico da segunda chapa. (a) Cordão 1. (b) Cordão 2. (c) Cordão 3. (d) Cordão 4.

A figura 5.4 (a) está mostrando, neste caso peculiar, as curvas de cada um dos termopares ao invés das médias por grupo de tipos de junta para evidenciar a importância do aterramento da mesa de soldagem no intuito de evitar a interferência do arco elétrico no sinal dos sensores. É possível observar nesta figura que no momento da abertura do arco elétrico os sinais dos termopares divergem de forma grosseira além de apresentar um forte ruído.

As figuras 5.4 (b), (c) e (d) reforçam a tendência evidenciada na figura 5.1 de que os termopares com junta do tipo C alcançam valores de pico de temperatura maiores do que os do tipo B.

Os picos de temperatura calculados, de acordo com a equação 3.7 para o caso de extração de calor bidimensional, para cada cordão de solda estão anotados nas tabelas 5.5 a 5.7, respectivamente. Também estão anotadas nas tabelas as diferenças percentuais do valor medido para o calculado do pico de temperatura de cada grupo de termopar e os desvios padrão calculado a partir dos valores máximos dos termopares de cada grupo de tipo de junta.

Tabela 5.5 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 2 da segunda chapa.

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		1050	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	60,1	27,8	27,9
Desvio padrão (°C)	33,0	35,83	28,99

Tabela 5.6 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 3 da segunda chapa.

Tipo de termopar	A	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)		490	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	43,2	35,2	23,76
Desvio padrão (°C)	99,60	10,74	5,86

Tabela 5.7 – Temperatura máxima, por termopar do ciclo térmico do cordão 4 da segunda chapa.

Tipo de termopar	B	C
Temperatura máxima teórica (°C)	510	
Diferença do valor medido para o teórico (%)	17,2	11,2
Desvio padrão (°C)	24,43	13,9

De acordo com os dados das tabelas 5.5 a 5.7 podemos ver que a diferença máxima entre o valor teórico e o valor medido com o termopar usando a junta do tipo C é de 25,8% e na média a diferença é de 19,3%. Já para o termopar com junta do tipo B, a diferença média é de 24,8%. A diferença média de temperatura do termopar com junta do tipo B para o tipo C é de 11,9%.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma contribuição no campo da instrumentação para medições de temperatura de soldagem e traz considerações importantes a respeito do uso de termopares para a medição de temperatura durante o processo de soldagem MAG. Três configurações de junta para termopares do tipo K (Cromel-Alumel) foram analisadas: com os fios enrolados na ponta, ponta simples e com os fios soldados individualmente à peça. Com a aquisição dos ciclos térmicos foi possível comparar as temperaturas atingidas pelos sensores e confrontá-las com valores calculados.

Baseado nos resultados experimentais e matemáticos conclui-se que:

- Os resultados foram obtidos com bom nível de exatidão mesmo estando sob condições de elevada interferência. Portanto, boas condições de aterramento são necessárias ao serem utilizados termopares em processos de soldagem por arco elétrico.
- A forma como a junta quente é formada influencia na sua capacidade de medir corretamente os níveis de temperaturas de soldagem.
- Quanto menor a massa do termopar, menor o seu tempo de resposta e consequentemente maior a temperatura de pico medida.

- O termopar que possui a junta do tipo C é o que apresenta melhor resultado em termos de temperatura de pico alcançando sempre os maiores valores e, ainda apresenta resultado mais próximo ao calculado pela equação analítica apresentada.
- Em relação às juntas termopares, o do tipo C com as extremidades dos fios soldadas individualmente na peça mostram maior repetibilidade nos resultados da união do sensor na chapa. Este tipo de junta, ao contrário dos outros tipos, devido a menor massa fundida a cada operação com descarga capacitiva, sofre menos variação com relação à geometria da junta quente formada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, D. B. **Estudos de Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**. Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Tese (Doutorado), Uberlândia, 2012.

Dupont, J. N., Marde, A. R. **Thermal Efficiency of Arc Welding Process**. *Welding Journal*, p. 406-416, dez. 1995.

Ghosh, P.K., Gupta, S.R., Randhawa, H.S. **Analytical studies on characteristics of vertical up bead on plate weld deposition using pulsed current GMAW**. *International Journal of the Joining of Materials*, vol 12, p. 76–85, 2000.

Ghosh, P.K., Hussain, H.M., 2002. **Morphology and porosity content of multipass pulsed current GMA weld of Al–Zn–Mg alloy**. *International Journal of the Joining of the Materials*, vol. 14, p. 16–26, 2002.

Kasap, S O. **Thermoelectric effects in metals: thermocouples**. *Web-Materials* (<http://materials.usask.ca/>), 2001.

Machado, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**. Porto Alegre. Imprensa Livre, 2000.

Machado, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre, 2ª ed, 2007.

Moreira, P. M. G. P., Frazão, O., Tavares, S. M. O., Figueiredo, M. A. V., Restivo, M. T., Santos, J. L., Castro, P. M. S. T. **“Temperature Field Acquisition During Gas Metal Arc Welding Using Thermocouples, Thermography and Fibre Bragg Grating sensors”**. *Measurement Science and Technology*, vol. 18, 2007.

Rykalin, N. N. **Calculation of Heat Flux in Welding**. Moscow, 1951.

Slania, J., Mikno, Z.; Wojcik, M. **Temperature Measurement Problems in Welding Processes**. *Welding International*, v. 21, p. 589-592. 2007.

Suárez. J. C., Remartínez, B., Menéndez. J. M., Güemes. A., Molleda, F. **Optical fibre sensors for monitoring of welding residual stresses**. *Journal of Material Processes Technology*, 143-144, p. 316–320, 2003.