

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

ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE  
JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO MAG

por

Vinicius Borges Rigo

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, Julho de 2015



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

ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE  
JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO MAG

por

Vinicius Borges Rigo

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 e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Dr. Thiago Becker

Porto Alegre, 02, Julho de 2015.

*Para Luiz Geraldo Rigo, Vera Mar Borges Rigo,  
Karina Borges Rigo e Bárbara Clivatti.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família pela ajuda e carinho recebidos diariamente. Obrigado por estarem sempre ao meu lado.

À minha namorada, por sua motivação e afeto. Embora distante, sempre esteve presente na minha vida.

Agradeço ao meu orientador do trabalho de conclusão de curso, o professor José Antônio Esmério Mazzaferro pela sua dedicação e disposição tornando possível a realização deste projeto.

Um Agradecimento especial a todas as pessoas do LS&TC (Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas - UFRGS) pelo companheirismo e cooperação durante a minha estada no laboratório.

E por fim, a todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado contribuindo para meu crescimento pessoal.

RIGO, V.B. **Análise do ciclo térmico em diferentes configurações de juntas soldadas pelo processo MAG**. 2015. 29 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## RESUMO

O ciclo térmico é de suma importância para a compreensão das transformações microestruturais, distorções e propriedades mecânicas resultantes das juntas soldadas. Este trabalho aborda a análise da condução do calor em chapas finas de aço baixo carbono com diferentes configurações de juntas soldadas. O procedimento experimental consiste em produzir juntas soldadas utilizando três níveis de energia com o processo MAG convencional, variando-se apenas tensão e corrente. As juntas estudadas foram: sobreposta, em ângulo tipo "T", de topo, e cordão sobre chapa. Os três níveis de energia foram repetidos em todas as juntas estudadas, sendo as temperaturas adquiridas por termopares tipo K. Verificou-se que as temperaturas de pico do modelo Rosenthal apresentaram grande variação se comparadas com os dados obtidos no experimento, enquanto que os modelos sugeridos pela *American Welding Society* tiveram relativa proximidade com os resultados encontrados. Em uma mesma energia, a extração bidimensional apresentou maior temperatura de pico e menor taxa de resfriamento se comparadas com a extração tridimensional. Verificou-se que para chapas finas e finitas a área superficial das juntas influencia diretamente a taxa de resfriamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ciclo térmico, Juntas, Energias.

RIGO, V.B. **Analysis of thermal cycle with different configurations of welded joints by MAG process**. 2015. 29 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **ABSTRACT**

The thermal cycle is of great importance for the understanding of microstructural changes, distortions and mechanical properties in welded joints. The objective of this work is to analyze the heat conduction on thin plates of low carbon steel with different joint geometries. The experimental procedure consists on producing welded joints using a conventional MAG process and three different energy levels varying the voltage and current. The joints studied are: lap joint, T-joint, butt joint and bead-on-plate. During the experiments, the temperature of the joints was acquired by type K thermocouples. These measured temperatures were compared to a theoretical analysis using Rosenthal's models. The comparison has shown great variation between the temperatures obtained experimentally and theoretically. On the other hand, the American Welding Society (AWS) presents models that give a better approximation with the measured temperatures. The models are known as two-dimensional heat flow and three-dimensional heat flow. For the same energy, the two-dimensional heat flow model presented a higher peak temperature and lower cooling rate compared with three-dimensional heat flow model. It was also observed that the surface area of the joint with thin and finite plates have a direct influence to the cooling rate.

**KEYWORDS:** Thermal Cycle, Joint, Energy.

## LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia de soldagem (J/mm)
q	Potência gerada no arco (J/s)
U	Diferença de potencial (V)
I	Corrente elétrica (A)
$\eta$	Rendimento térmico do processo
$\tau$	Espessura de chapa relativa
h	Espessura real da chapa (m)
$\rho$	Densidade do metal base (Kg/m <sup>3</sup> )
C	Calor específico do metal base (J/Kg.K)
$T_c$	Temperatura em que a taxa de resfriamento é calculada (°C)
$T_0$	Temperatura inicial da chapa (°C)
$H_{het}$	Entrada de calor líquido na chapa (J/m)
g	Espessura da chapa(m)
$\alpha$	Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)
$K_0$	Função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero
v	Velocidade de soldagem (m/s) - (mm/s)
k	Condutividade térmica do material (W/m.k)
r	Posição do ponto no espaço ( $x^2 + y^2$ ) <sup>1/2</sup>
w	Posição da fonte no instante t (x- v t)
$T_p$	Temperatura de pico (°C)
$T_0$	Temperatura inicial da chapa (°C)
Y	Distância da borda do cordão de solda (m)
$T_m$	Temperatura liquidus do metal a ser soldado (°C)
A	Área do metal de adição fundido (mm <sup>2</sup> )
B	Área do metal base fundido (mm <sup>2</sup> )

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
1	INTRODUÇÃO..... 1
2	OBJETIVOS ..... 1
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 1
3.1	Processo de soldagem MAG ..... 1
3.1.1	Parâmetros de soldagem MAG ..... 1
3.2	Condução do calor na soldagem ..... 2
3.3	Modos de extração de calor..... 2
3.4	Modelos clássicos sobre o Fluxo Térmico em soldagem ..... 3
3.4.1	Modelo de extração do calor Bidimensional (2D) ..... 4
3.4.2	Modelo de extração do calor Tridimensional (3D) ..... 4
3.4.3	Modelo de extração do calor intermediário (2,5 D) ..... 4
3.5	Modelo sobre a Temperatura de pico ..... 4
4	METODOLOGIA ..... 5
4.1	Materiais utilizados ..... 5
4.2	Procedimento de soldagem ..... 5
4.3	Posicionamento dos corpos de prova em relação à tocha e mesa..... 6
4.4	Aquisição de dados ..... 6
4.5	Análise Macrográfica ..... 6
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 7
5.1	Comparação das temperaturas de pico dos experimentos com modelos teóricos ..... 7
5.1.1	Modelos de Rosenthal para extração do calor..... 8
5.1.2	Modelo da AWS para temperatura de pico..... 11
5.2	Análises do ciclo térmico por Energia ..... 11
5.3	Macrografias da juntas soldadas ..... 12
6	CONCLUSÃO ..... 15
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 15
	APÊNDICE..... 16
	Apêndice I - Localização dos termopares nas juntas soldadas..... 16
	Apêndice II – Temperatura de pico por posição nas juntas soldada ..... 16
	ANEXO ..... 20
	Anexo I – Fonte e Robô Industrial utilizados nos experimentos..... 20
	Anexo II – Sistema de aquisição de dados..... 20

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES:

Figura 3.1: Ciclo térmico e a taxa de resfriamento ( $dT/dt$ ) [Modonesi et alli, 2012].	2
Figura 3.2: Esquematização dos modos de extração do calor. Fonte: AWS, 2001.	3
Figura 5.1: Ciclo térmico de diferentes energias de um bead-on-plate.	8
Figura 5.2: Ciclo térmico de diferentes energias de uma junta de topo.	8
Figura 5.3: Ciclo térmico do modelo 2D de Rosenthal.	9
Figura 5.4: Ciclo térmico de diferentes energias para uma Junta do tipo "T".	9
Figura 5.5: Ciclo térmico de diferentes energias para uma junta sobreposta.	9
Figura 5.6: Ciclo térmico do modelo 3D de Rosenthal.	10
Figura 5.7: Ciclo térmico com energia de soldagem = 555,43 J/mm.	12
Figura 5.8: Ciclo térmico das juntas com energia de soldagem = 691,43 J/mm.	12
Figura 5.9: Ciclo térmico das juntas com energia de soldagem = 829,71 J/mm.	12
Figura 5.10: Macrofotografias das Juntas sobrepostas.	13
Figura 5.11: Macrofotografias da junta em ângulo do tipo "T".	13
Figura 5.12: Macrofotografias da Junta de Topo.	14
Figura 5.13: Macrofotografias da Bead-on-plate.	14

## LISTA DE TABELAS:

Tabela 4.1: Composição química do aço SAE 1020.	5
Tabela 4.2: Composição do consumível utilizado.	5
Tabela 4.3: Parâmetros de soldagem.	5
Tabela 4.4: Nomenclatura a ser utilizada nos experimentos.	6
Tabela 5.1: Propriedades térmicas do aço 1020. Fonte: Callister, W.D.Jr.	8
Tabela 5.2: Temperaturas de pico por energia e configuração de juntas soldadas.	10
Tabela 5.3: Variação percentual das temperaturas de pico.	10
Tabela 5.4: Temperaturas de pico do Modelo AWS e experimentos.	11
Tabela 5.5: Variação percentual da temperatura de pico para o modelo da AWS.	11
Tabela 5.6: Parâmetros geométricos da Junta Sobreposta.	13
Tabela 5.7: Parâmetros geométricos da junta Tipo "T" (em ângulo).	13
Tabela 5.8: Parâmetros geométricos da junta de topo.	14
Tabela 5.9: Parâmetros geométricos da Bead-on-plate.	14

## 1 INTRODUÇÃO

A história da soldagem tem seu início a mais de 4.000 A.C quando as peças eram soldadas por forjamento. Este método foi utilizado até o início do século XIX, quando ocorreu a descoberta do arco elétrico e o desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica que possibilitaram o processo de soldagem por fusão [Modenesi et alli, 2011]. Contudo, apenas nos últimos sessenta anos é que ocorreram grandes evoluções na tecnologia da soldagem, conforme descrito por Wainer et alli, 1992, “O processo de fabricação por soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados”.

Na literatura, existem distintas conceitualizações sobre o significado da palavra “soldagem”. A definição mais usual é fornecida pela AWS (*American Welding Society*), 2001 que define a soldagem como: “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

O ciclo térmico produzido por operações de soldagem influencia as transformações microestruturais e produz tensões residuais e distorções. Existem modelos teóricos clássicos de extração de calor baseados nas teorias de condução de calor nos sólidos que auxiliam na melhor compreensão do fluxo térmico produzido durante a soldagem. Baseado nisso, foram realizados experimentos no LS&TC para uma melhor compreensão destes fenômenos físicos.

No presente estudo, realizam-se soldagens utilizando o processo MAG (*Metal Active Gas*) em diferentes níveis energéticos. O gás utilizado na proteção da poça de fusão é o dióxido de carbono (100% -  $\text{CO}_2$ ) e as chapas são de aço baixo carbono SAE 1020.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal abordar a análise da condução de calor em chapas finas de aço carbono com diferentes configurações de juntas soldadas e energias de soldagem. Para isto, foi realizada a avaliação do ciclo térmico dos experimentos, comparando as temperaturas de pico encontradas nos experimentos com modelos teóricos clássicos, com o objetivo de verificar a adequação dos modelos para cada uma das configurações de juntas soldadas. Ademais, busca-se compreender melhor o processo de soldagem e da aquisição de dados de temperatura através de uma metodologia adequada para a interpretação dos resultados obtidos.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Processo de soldagem MAG

O processo MAG (*Metal Active Gas*) utiliza como fonte de calor um arco elétrico, onde o consumível é alimentado continuamente, podendo ocorrer nas modalidades semi-automática ou automática. Verifica-se que esta tecnologia possui ótimas características para a automação devido à estabilidade do arco em diversas posições de soldagem [Machado, 1996].

Basicamente, o equipamento utilizado neste processo consiste em uma fonte de energia, uma tocha de soldagem, um alimentador de arame e o gás de proteção [Modenesi e Marques, 2000]. Conforme descrito por Wainer et alli, 1992, o processo MAG é comumente utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços baixa liga.

#### 3.1.1 Parâmetros de soldagem MAG

O parâmetro de maior influência na penetração e taxa de deposição do consumível é a corrente elétrica. Para escolher a corrente de soldagem deve-se observar a espessura das peças, o diâmetro do eletrodo e a geometria desejada do cordão [Modenesi et alli, 2011].

Além disto, sobre a influência da tensão de soldagem Okumura e Taniguchi, 1982, explicam que: de modo qualitativo, para se obter um cordão estreito deve-se usar uma baixa tensão de soldagem, ao passo que uma tensão elevada tende a achatá-lo e conseqüentemente alargá-lo. A velocidade de deslocamento da tocha influencia na geometria da poça de fusão. Sendo um importante fator na produtividade, este parâmetro deve ser o maior possível para uma dada aplicação. Entretanto, uma excessiva velocidade de soldagem pode provocar certos defeitos, entre eles o *hot cracking* [Machado, 1996].

### 3.2 Condução do calor na soldagem

Segundo Modenesi et alii, 2011, um fator importante nos processos de soldagem a arco elétrico é a energia de soldagem. Nestes processos pode-se considerar o arco elétrico como a única fonte de calor e, portanto, a energia de soldagem pode ser expressa pela equação 3.1.

$$E = \eta \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} \quad (3.1)$$

Onde: E = Energia de soldagem (J/mm); q = Potência gerada no arco (J/s);  
 U = Diferença de potencial (V); I = Corrente elétrica (A);  
 $\eta$  = Rendimento térmico do processo e v = Velocidade de soldagem (mm/s).

Além disso, verifica-se a importância dos ciclos térmicos a que são submetidos os materiais soldados. Eles alteram diretamente a estrutura cristalina, e como resultado, as propriedades físicas dos materiais.

Um ciclo térmico de soldagem consiste, basicamente, de três fases: no início do processo ocorre o aquecimento rápido do material; em seguida ocorre a fase em que a temperatura máxima do ciclo é atingida; e por fim, a etapa de resfriamento gradual, até que a temperatura retorne ao seu valor inicial [Okumura e Taniguchi, 1982].

Modenesi et alii, 2012, ressaltam os principais parâmetros para analisar o ciclo térmico sendo eles: a Temperatura de pico ( $T_p$ ), indicando a possibilidade de transformações microestruturais no metal, o tempo de permanência ( $t_c$ ) acima da temperatura crítica ( $T_c$ ) podendo produzir o crescimento de grãos, além da taxa de resfriamento ( $\phi$ ), parâmetro importante na determinação da microestrutura.

Na figura 3.1 pode-se verificar, de forma esquemática, o ciclo térmico de um ponto no metal base próximo a região de soldagem.

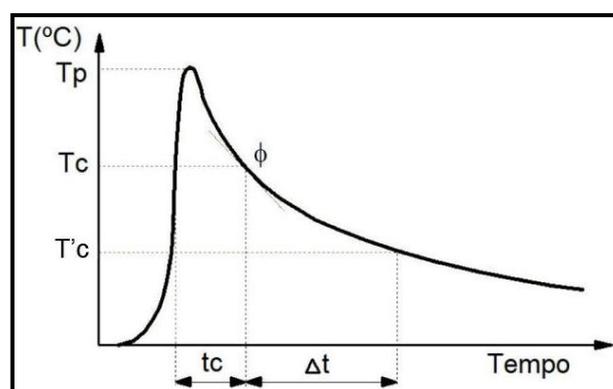


Figura 3.1: Ciclo térmico e a taxa de resfriamento ( $dT/dt$ ) [Modonesi et alii, 2012].

### 3.3 Modos de extração de calor

Existem modos básicos de extração de calor durante a soldagem. Quando o cordão de solda apresenta penetração completa, como por exemplo, em juntas de topo e bead-on-plate, o calor é extraído essencialmente em duas direções, sendo as isotermas paralelas à linha de

fusão. Este regime de extração denomina-se bidimensional (2D). No modo de extração tridimensional (3D), verificado em juntas em ângulo, a condução do calor ocorre em todas as direções, tornando cilíndricas as isothermas na linha central do cordão de solda.

Quando a penetração da solda é incompleta e os campos de temperatura nas superfícies inferior e superior não são equivalentes tem-se o regime de extração intermediário denominado 2,5D, comumente verificado em juntas sobrepostas [Machado, 2000].

Para a verificação do regime de extração do calor seria necessário realizar macrografias do cordão ou utilizar um sistema de aquisição de temperatura a fim de constatar a penetração e a zona afetada pelo calor (ZAC). Essa abordagem dificulta o estudo dos fenômenos de condução do calor. Para isso a AWS, 2001 e ASM, 1993, sugerem utilizar o conceito de espessura relativa, podendo a mesma ser definida pela seguinte equação:

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{het}}} \quad (3.2)$$

Onde:

$\tau$  = Espessura de Chapa Relativa;  $h$  = espessura real da chapa (m);  $\rho$  = Densidade do metal base (kg/m<sup>3</sup>);  $C$  = calor específico do metal base (J/kg.K) ;  $T_c$  = Temperatura em que a taxa de resfriamento é calculada(°C);  $T_0$  = Temperatura inicial da chapa(°C) ;  $H_{het}$  = Entrada de calor líquido na chapa (J/m).

Mediante a equação (3.2) é possível prever o regime de extração do calor do objeto a ser analisado. Conforme observado na figura 3.2 é possível relacionar a espessura relativa com o modo de extração do calor em regime 2D, 3D e 2,5 D.

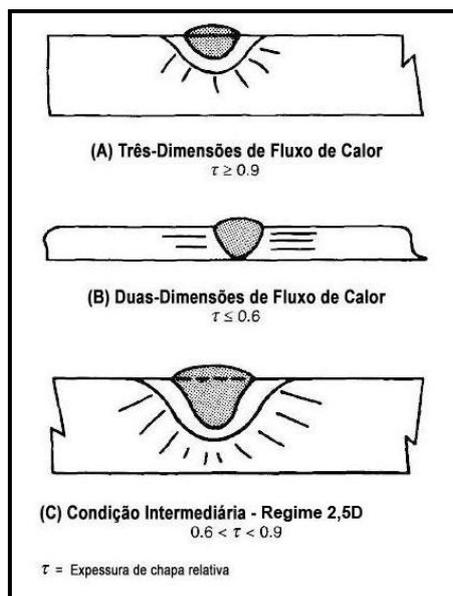


Figura 3.2: Esquematização dos modos de extração do calor. Fonte: AWS, 2001.

### 3.4 Modelos clássicos sobre o Fluxo Térmico em soldagem

Conforme descrito por Rosenthal, 1941, algumas hipóteses devem ser assumidas para a simplificação dos modelos de soldagens. Deve-se, portanto, considerar as seguintes premissas para a análise:

- As propriedades do material base não variam com a temperatura, desta forma, consideram-se valores médios para as propriedades físicas;
- A solução é obtida para um estado quase-estacionário. Ou seja, não há alteração de temperatura ao redor da fonte;
- Desconsidera-se o efeito Joule;

- A fonte de calor é simplificada para um ponto (condução 3D) ou uma linha (condução 2D).

Partindo da primeira lei da termodinâmica e com as devidas considerações mencionadas anteriormente, Rosenthal obteve três modelos matemáticos para a condução do calor produzido por processos de soldagem conforme equações 3.3 – 3.5.

### 3.4.1 Modelo de extração do calor Bidimensional (2D)

O modelo de extração do calor bidimensional considera a fonte de energia como uma linha e a temperatura da peça permanece inalterada a grande distância da fonte de calor. A variação da temperatura neste regime é dada pela seguinte equação:

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi g k} e^{\frac{vw}{2\alpha}} K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (3.3)$$

Onde:

$g$  = espessura da chapa (m);  $\alpha$  = Difusividade térmica ( $m^2/s$ );  $K_0$  = Função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero;  $v$  = velocidade de soldagem (m/s);  $k$  = Condutividade térmica do material (W/m.k),  $r$  = posição do ponto no espaço  $(x^2 + y^2)^{1/2}$  e  $w$  = posição da fonte no instante  $t$  ( $x - vt$ ).

### 3.4.2 Modelo de extração do calor Tridimensional (3D)

O modelo de extração do calor tridimensional considera a fonte de energia como um ponto e a temperatura da peça permanece inalterada a grandes distância da fonte de calor.

A variação da temperatura neste regime é dada pela seguinte equação:

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi k} \frac{e^{-\frac{v(r+w)}{2\alpha}}}{r} \quad (3.4)$$

### 3.4.3 Modelo de extração do calor intermediário (2,5 D)

Machado, 2000, ressalta que a variação máxima em substituir este modelo pelo bidimensional ou tridimensional é de aproximadamente 20%. A variação da temperatura neste regime é dada pela seguinte equação:

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi g k} e^{\frac{-vr}{2\alpha}} \left\{ K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} K_0 \left[ r \sqrt{\frac{v^2}{2\alpha} + \left(\frac{\pi n}{g}\right)^2} \right] \cos \frac{\pi n z}{g} \right\} \quad (3.5)$$

### 3.5 Modelo sobre a Temperatura de pico

A *American Welding Society* (AWS), 2001 sugere a utilização da equação 3.6 para encontrar a temperatura de pico para pontos adjacentes à poça de fusão e localizados na ZAC. A importância desta equação (3.6) está relacionada com o fato de que é possível estimar a zona afetada pelo calor, além de verificar o efeito do pré-aquecimento sobre a temperatura de pico. Neste trabalho, a equação 3.6 será utilizada apenas para encontrar a temperatura de pico.

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h Y}{H_{het}} + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (3.6)$$

Onde:

$T_p$  = Temperatura de pico ( $^{\circ}C$ );  $T_o$  = temperatura inicial da chapa ( $^{\circ}C$ );  $Y$  = Distância da borda do cordão de solda (m),  $T_m$  = temperatura *liquidus* do metal a ser soldado ( $^{\circ}C$ ).

## 4 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no laboratório de soldagem e técnicas conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Nesta seção serão descritos os materiais utilizados, a metodologia para a aquisição dos dados, o procedimento de soldagem utilizado bem como a metodologia para a obtenção das macrografias.

### 4.1 Materiais utilizados

Para a execução dos experimentos foi selecionado o aço SAE 1020 como metal base das chapas soldadas devido à sua grande utilização industrial. A composição química do aço pode ser visualizada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química do aço SAE 1020.

Elemento (%)			
C	Mn	P máx.	S máx.
0,18-0,23	0,30-0,60	0,03	0,05

O metal soldado constitui-se de chapas de duas dimensões. A primeira apresentou dimensões de 100x250x4,75 mm, enquanto que, a segunda apresentou dimensões de 200x250x4,75 mm, sendo as mesmas cortadas por plasma no intuito de evitar empenamentos.

O gás utilizado para proteger a poça de fusão é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> -100%). A escolha deste gás deve-se a sua contribuição para aumentar a penetração da solda além de possuir baixo custo operacional. O arame utilizado tem diâmetro de um milímetro, estando de acordo com a norma da AWS ER-70S6. A composição do consumível é demonstrada na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição do consumível utilizado.

∅	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu
1 mm	0,06-0,15	1,40-1,90	0,80-1,85	< 0,025	< 0,035	<0,50

Para o procedimento de soldagem MAG-Robotizado utilizou-se um Robô fabricado pela empresa *Yaskawa Motoman*, modelo MA 1400 com seis graus de liberdade com uma fonte de soldagem da marca *Fronius Trans Puls*, os mesmos podem ser visualizados no Anexo I.

### 4.2 Procedimento de soldagem

Inicialmente foram realizadas soldagens com diversos parâmetros com o objetivo de selecionar três níveis de energia para o experimento. Os parâmetros escolhidos são visualizados na tabela 4.3. Deve-se salientar que em todas as soldagens foi mantido o DBCP (distância bico de contato - peça) de 15 mm além de ajustar uma vazão de 15 l/min aferida no bocal da tocha.

Tabela 4.3: Parâmetros de soldagem.

	Tensão [V]	Corrente [A]	Velocidade [mm/s]	Energia [J/mm]
01	21,6	180	7,0	555,43
02	24,2	200	7,0	691,43
03	26,4	220	7,0	829,71

Para cada nível de energia foram executadas quatro soldagens com diferentes tipos de juntas. As juntas selecionadas para este processo são: sobreposta, em ângulo (ou tipo "T"), topo e uma simples deposição sobre chapa (*bead-on-plate*). A nomenclatura utilizada neste experimento é demonstrada na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Nomenclatura a ser utilizada nos experimentos.

Energia [J/mm]	Angular	Bead-on-Plate	Sobreposta	Topo
555,43	A-180	B-180	S-180	T-180
691,43	A-200	B-200	S-200	T-200
829,71	A-220	B-220	S-220	T-220

#### 4.3 Posicionamento dos corpos de prova em relação à tocha e mesa

As chapas soldadas foram apoiadas, mas não fixadas nos apoios, sendo assim, não se restringe as deformações oriundas do processo de soldagem. Os apoios eram de cerâmica refratária na tentativa de eliminar a extração de calor entre a mesa e o metal base, ficando apenas a convecção natural e radiação térmica como forma de propagação de troca de calor para o meio ambiente.

Na execução da soldagem foi importante observar o posicionamento da tocha em relação à peça a ser soldada. Nas soldagens das juntas *bead-on-plate* e topo, a tocha permaneceu na posição neutra, ou seja, zero grau de ângulo de deslocamento e noventa graus de trabalho. Nas soldagens das juntas em ângulo e sobreposta adotou-se o mesmo ângulo de deslocamento, entretanto utiliza-se 45° de ângulo de trabalho.

Por se tratar de uma soldagem linear com apenas um passe, foi necessário indicar ao robô apenas as coordenadas de dois pontos, sendo a primeira no início da solda e a segunda no final.

#### 4.4 Aquisição de dados

Devido ao fato de soldar diferentes geometrias de juntas com a mesma energia de soldagem é previsto que o cordão de solda não tenha a mesma largura, isso dificulta o posicionamento dos termopares, pois tem-se mais uma variável a ser controlada. Esta variável é a posição do termopar em relação ao cordão de solda. Na tentativa de evitar esta análise, será proposto fixar os termopares a dez milímetros da intersecção das chapas afim de termos um ponto de referência na mediação.

Os termopares utilizados para essa medição são do tipo K (Cromel / Alumel), um termopar popularmente conhecido com baixo custo de matéria prima. Possui uma sensibilidade de 41µV/°C e uma faixa de medição de temperatura esta entre -200 °C e 1260 °C. Para sua fixação na chapa utilizou-se uma descarga capacitiva fazendo com que os mesmos fiquem soldados na superfície das chapas. Foram utilizados os mesmos canais no sistema de aquisição para as mesmas posições dos termopares indicadas no Apêndice I, onde os termopares 2 e 5 encontram-se a 125 mm da extremidade da peça e os demais pontos 50 mm equidistantes dos termopares centrais.

O Sistema de aquisição de dados é fabricado pela empresa *National Instruments*, cujo modelo é o NI eDAQ-9184 com o módulo TB-9214 acoplado ao sistema NI 9214 conforme Anexo II. Utilizou-se o software *Labview*, da mesma empresa fabricante do sistema de aquisição, como plataforma para a criação de um programa para o sistema de medição de temperatura. Utilizou-se uma taxa de amostras de 10 amostras/segundo para a aquisição dos dados.

#### 4.5 Análise Macrográfica

As análises macrográficas foram realizadas após o procedimento de soldagem com o propósito de analisar a geometria do cordão de solda, a zona afetada pelo calor, além de verificar defeitos oriundos do processo de soldagem. O procedimento consistiu, primeiramente, em lixar os corpos de prova com diferentes granulometrias. Deve-se destacar que durante todo o processo da preparação da superfície o lixamento ocorreu com água. As granulometrias

selecionadas das lixas são: 80, 220, 400 e 600 e por fim 1200. Em seguida todos os corpos de provas foram atacados com solução NITAL 10% para reagir com a superfície a ser analisada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo analisam-se os diferentes ciclos térmicos das juntas soldadas. Os gráficos que serão mostrados posteriormente foram construídos utilizando o software Excel. Os resultados nos subcapítulos desta seção são oriundos de 24 experimentos e de 144 medições de temperaturas realizadas no laboratório *LS&TC*. Para validação dos resultados e das informações encontradas, todos os experimentos foram refeitos.

Para a compilação dos dados foi adotado o princípio de que todos os termopares estão posicionados em uma mesma distância perpendicular ao cordão de solda da chapa soldada e que o campo de temperatura associado à fonte de energia é considerado como um estado quase-estacionário. Através destas premissas foi possível realizar médias aritméticas do campo de temperatura com a finalidade de ter um valor médio mais preciso. Nas juntas em regime de extração bidimensional foram realizadas médias aritméticas de todos os seis termopares, uma vez que, o resultado depende apenas do posicionamento do termopar. Para as chapas com regime de extração tridimensional foram consideradas duas médias aritméticas: uma para a chapa inferior (termopares 1, 2 e 3) e outra para a chapa superior (termopares 4, 5 e 6). Desta forma, é possível compreender a mudança de temperatura por chapa, dado que esta observação é relevante neste tipo de regime de condução.

No Apêndice II, são mostrados os gráficos relativos às médias dos termopares por posicionamento na chapa. As posições consideradas são: início (termopares 1 e 6), meio (termopares 2 e 5) e fim (termopares 3 e 4). Observando estes gráficos, é possível verificar a tendência ao estado quase-estacionário mencionado anteriormente. Atenta-se que a variação da temperatura de pico é de aproximadamente 25 °C entre as posições dos termopares em uma mesma junta soldada. Acredita-se que esta variação não ocorre devido ao aquecimento da chapa resultante do deslocamento da fonte de calor, mas a pequenos erros da ordem de 0,1 mm (medidos utilizando o *software ImageJ*) no posicionamento dos termopares ou até mesmo devido a diferenças na fabricação e fixação dos termopares na superfície da chapa, posto que esse processo foi realizado de forma artesanal.

Durante a aquisição de dados observou-se grande quantidade de salpicos oriundos do processo de soldagem. Estes salpicos fixaram-se em alguns dos termopares e como resultado, estes deixaram de medir corretamente a temperatura sendo excluídos das médias. Estes salpicos foram relacionados ao gás de proteção utilizado no experimento (dióxido de carbono 100%).

Os resultados apresentados serão divididos em partes. No primeiro momento comparam-se as temperaturas de pico das diferentes juntas soldadas com as equações mostradas no capítulo 2. Após, analisa-se o ciclo térmico de diferentes juntas para uma mesma energia e por fim verificam-se as microfotografias das soldas.

### 5.1 Comparação das temperaturas de pico dos experimentos com modelos teóricos

Será considerado nos cálculos analíticos um rendimento térmico para o processo MAG de 80%, um valor sugerido pela AWS. Deve-se salientar que um método mais exato para encontrar a eficiência do arco elétrico é utilizando um calorímetro ou analisando a “eficiência de fusão” (*melting efficiency*) que consiste em examinar as áreas fundidas de metal base, metal de solda e área da ZAC. Estas análises não foram realizadas neste trabalho sendo um futuro objeto de estudo.

As propriedades térmicas do aço SAE 1020 adotadas podem ser encontradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades térmicas do aço 1020. Fonte: Callister, W.D.Jr.

SAE 1020		
Condutividade térmica [w/m.k]	Calor específico [ J/Kg.k]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]
51,9	486	7850

### 5.1.1 Modelos de Rosenthal para extração do calor

Na Figura 5.1 é possível verificar os diferentes ciclos térmicos das chapas com uma simples deposição. Nota-se o aumento na temperatura de pico devido ao aumento da energia imposta ao sistema.

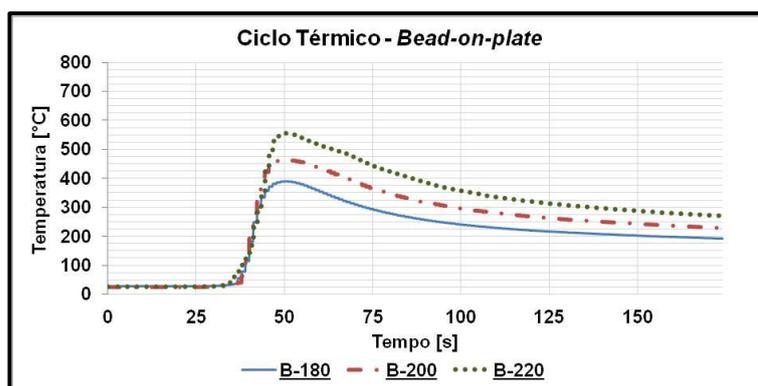


Figura 5.1: Ciclo térmico de diferentes energias de um bead-on-plate.

Os ciclos térmicos da junta de topo podem ser observados na figura 5.2. Em virtude das características do posicionamento de soldagem, energia de soldagem e espessura das chapas serem as mesmas da bead-on-plate, verifica-se que, as temperaturas de pico encontradas para esta junta tendem a valores próximos daqueles observados na figura 5.1.

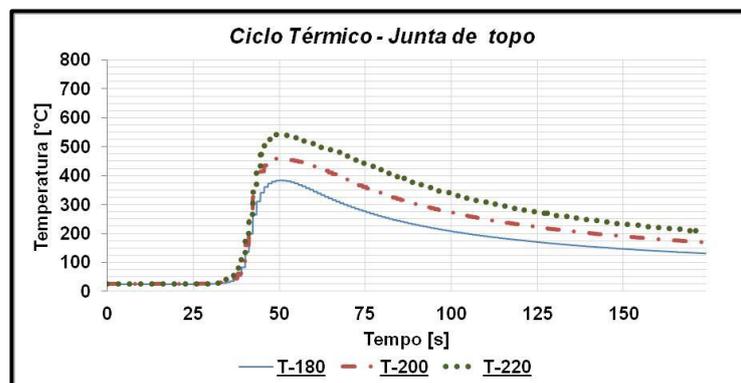


Figura 5.2: Ciclo térmico de diferentes energias de uma junta de topo.

Utilizando a equação 3.2 – espessura relativa – como referencial teórico, constata-se que o regime de extração de calor para as juntas *bead-on-plate* e de topo é considerado bidimensional. Gerou-se um gráfico do ciclo térmico em regime 2D fundamentado na fórmula 3.3. O gráfico pode ser visualizado na figura 5.3

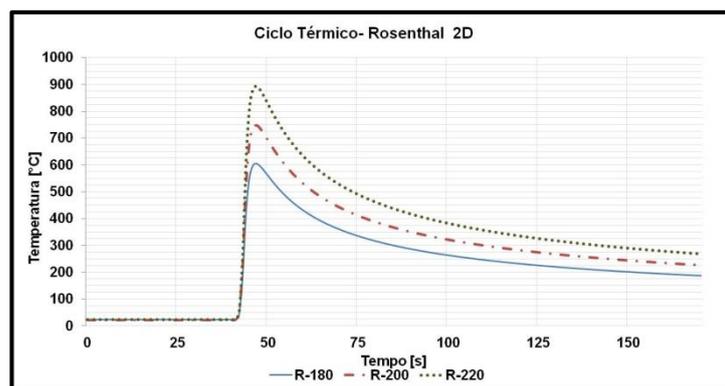


Figura 5.3: Ciclo térmico do modelo 2D de Rosenthal.

Para as juntas em ângulo do tipo “T”, observa-se nos ciclos térmicos da figura 5.4, que a chapa vertical apresenta uma temperatura de pico maior do que a horizontal. Isto pode ser explicado pelo fato das chapas serem finitas de modo que a chapa vertical não conseguiu extrair o calor tão rapidamente se comparada com a chapa horizontal.

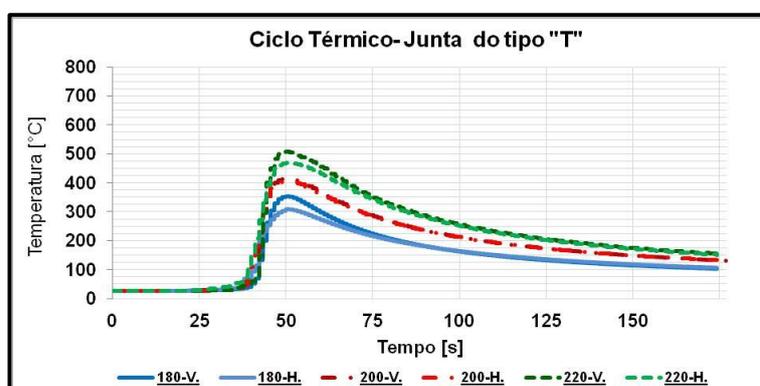


Figura 5.4: Ciclo térmico de diferentes energias para uma Junta do tipo “T”.

Na junta sobreposta, a temperatura de pico na chapa inferior é maior que na chapa superior para os pontos analisados. Este resultado está coerente, pois neste tipo de junta a perna horizontal do cordão de solda tende a crescer paralelamente a superfície da chapa com o aumento da energia. Recebendo assim, mais energia e como resultado, uma maior temperatura máxima. Na chapa superior o crescimento do cordão de solda é perpendicular à superfície da chapa de modo que a extração de calor ocorre na superfície lateral da chapa diminuindo assim a temperatura de pico para o ponto em análise. Os ciclos térmicos podem ser observados na figura 5.5:

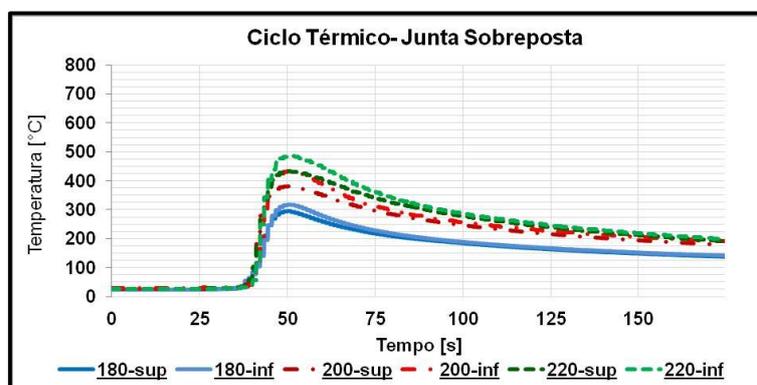


Figura 5.5: Ciclo térmico de diferentes energias para uma junta sobreposta.

Nas juntas em ângulo do tipo "T" e sobreposta é comumente adotada a premissa que o modo de extração de calor é tridimensional. Através dessa informação, foi construído o gráfico da figura 5.6, referente ao modelo de Rosenthal 3D - de acordo com equação 3.4. Apenas deve-se salientar que uma das simplificações no modelo de Rosenthal é admitir que a tocha esteja em posição neutra com zero grau de ângulo de arraste e de trabalho.

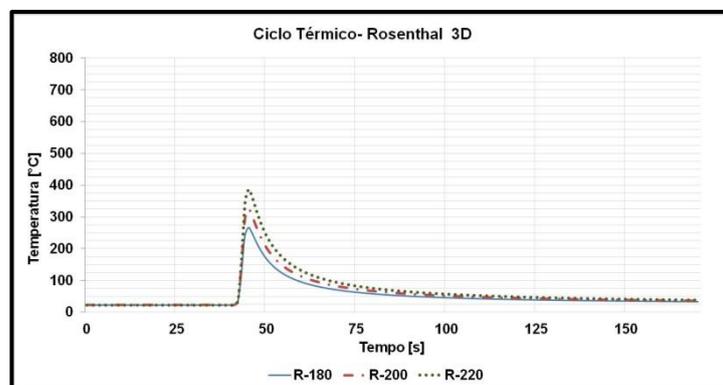


Figura 5.6: Ciclo térmico do modelo 3D de Rosenthal.

Em conformidade com as informações acima, tem-se um comparativo de temperaturas de pico e tipo de junta soldada conforme demonstrado na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Temperaturas de pico por energia e configuração de juntas soldadas.

Tipo de junta	Temperatura de pico por energia [°C]					
	444,34 [J/mm]		553,14 [J/mm]		663,77 [J/mm]	
<b>Rosenthal 2D</b>	<b>605,10</b>		<b>747,63</b>		<b>892,55</b>	
<b>Rosenthal 3D</b>	<b>265,78</b>		<b>325,23</b>		<b>385,68</b>	
Junta Topo	384,43	T-180	460,31	T-200	542,76	T-220
<i>Bead-on-Plate</i>	388,44	B-180	464,25	B-200	556,25	B-220
Junta tipo "T" Vert.	352,76	A-180	414,24	A-200	506,54	A-220
Junta tipo "T" H.	309,43	A-180	405,55	A-200	468,7	A-200
Junta Sobreposta Super.	279,09	S-180	381,94	S-200	432,24	S-220
Junta Sobreposta Infer.	304,48	S-180	432,47	S-200	485,09	S-220

A variação percentual entre os modelos de Rosenthal e os valores dos experimentos encontra-se na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Variação percentual das temperaturas de pico.

Modelo	Variação das temperaturas de pico baseados nos modelos de Rosenthal [%]											
	A-180	A-200	A-220	S-180	S-200	S-220	T-180	T-200	T-220	B-180	B-200	B-220
<b>Rosenthal 2D</b>	71,53%	80,48%	76,21%	116,81%	95,75%	106,49%	57,40%	62,42%	64,45%	55,78%	61,04%	60,46%
<b>Rosenthal 3D</b>	-24,66%	-21,49%	-23,86%	-4,77%	-14,85%	-10,77%	-30,86%	-29,35%	-28,94%	-31,58%	-29,95%	-30,66%
	-14,11%	-19,81%	-17,71%	-12,71%	-24,80%	-20,49%						

O modo de extração do calor das juntas em ângulo e sobrepostas é o tridimensional, nota-se que, ocorreram variações na ordem de 10% entre o modelo teórico de Rosenthal 3D e o experimental. Para juntas em regime de extração bidimensional (junta topo e *bead-on-plate*) as variações permaneceram na ordem de 60%, mostrando que, os modelos de Rosenthal não são adequados para estas configurações de juntas soldadas

### 5.1.2 Modelo da AWS para temperatura de pico

A AWS sugere a utilização da fórmula 3.6 para encontrar a temperatura máxima em uma chapa plana com apenas um único passe. Portanto, foram utilizadas as junta de topo e a *Bead-on-Plate* para comparação de resultados. Na tabela 5.4 é possível comparar as temperaturas obtidas do experimento com os dados da equação e na tabela 5.5 sua variação percentual. Nota-se que o modelo da AWS possui pouca variabilidade com os dados do experimento

Tabela 5.4: Temperaturas de pico do Modelo AWS e experimentos.

Tipo de junta	Temperatura de pico por energia [°C]		
<i>Bead-on-Plate</i>	388,44	464,25	556,25
Junta Topo	384,43	460,31	542,76
Modelo AWS	430,73	499,62	561,57

Tabela 5.5: Variação percentual da temperatura de pico para o modelo da AWS.

Tipo de junta	Variação da temperatura [%]		
<i>Bead-on-Plate</i>	10,89%	7,62%	0,96%
Junta Topo	12,04%	8,54%	3,47%

## 5.2 Análises do ciclo térmico por Energia

Através das figuras 5.7, 5.8 e 5.9 é possível comparar as diferentes temperaturas de pico e taxas de resfriamentos para uma mesma energia de soldagem. Verifica-se que as juntas em regime de extração de calor bidimensional (Topo e sobreposta) tiveram suas temperaturas de pico maiores do que aquelas em regime de extração tridimensional (Juntas em ângulo e sobreposta).

Observa-se que, mesmo em chapas finas com dimensões finitas, as juntas em ângulo apresentam as maiores taxas de resfriamento de todas as configurações analisadas e a *bead-on-plate* as menores.

Nos experimentos foram utilizados apoios de cerâmica na base com o propósito de eliminar a extração de calor entre o metal base e a mesa, deste modo, consideram-se nos estudos apenas perdas de energia através da convecção natural e radiação térmica. Portanto, embora tenham regimes de extração de calor diferentes, a perda de energia por convecção e radiação pode ser notada se compararmos as taxa de resfriamento da junta de topo e sobreposta. A junta de topo, embora em regime 2D, possui uma área significativamente maior e consequentemente maior decréscimo de temperatura ao longo do tempo se comparada à sobreposta.

Como resultado disso, constata-se que, em chapas finas e finitas a área superficial do metal base tem grande influência nas trocas térmicas e, portanto deve ser considerada em análises de condução de calor mais complexas.

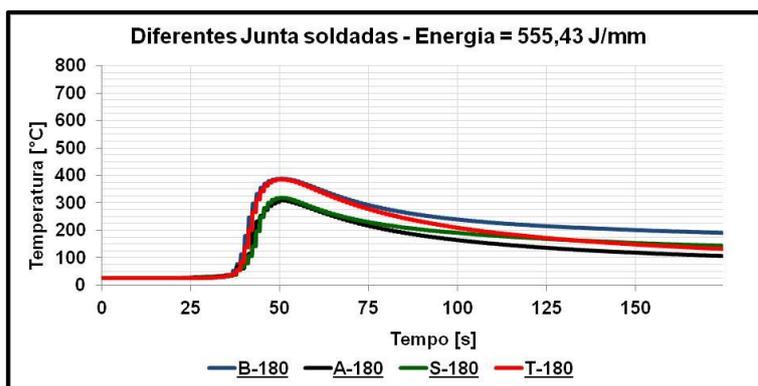


Figura 5.7: Ciclo térmico com energia de soldagem = 555,43 J/mm.

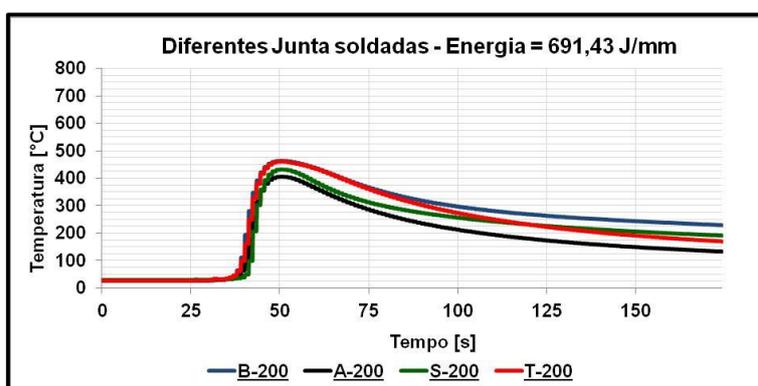


Figura 5.8: Ciclo térmico das juntas com energia de soldagem = 691,43 J/mm.

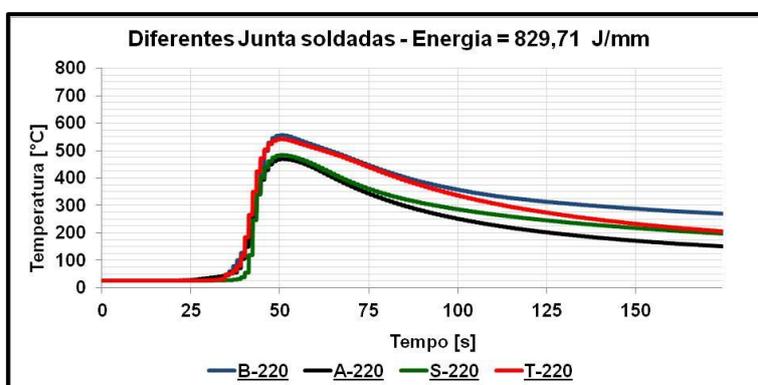


Figura 5.9: Ciclo térmico das juntas com energia de soldagem = 829,71 J/mm.

### 5.3 Macrografias da juntas soldadas

Na Figura 5.10 é possível observar as macrografias dos cordões de solda das juntas sobrepostas. Os parâmetros geométricos podem ser observados na tabela 5.6.

Com base na tabela 5.6 é possível verificar o aumento na área do metal base fundido e da diluição com o aumento da energia de soldagem. É possível verificar a forma tridimensional da extração do calor através da geometria da ZAC e o seu aumento decorrente do aumento da corrente de soldagem.

Identifica-se um início de mordedura (defeito de soldagem) na chapa superior da junta S-200 e o seu aumento na junta S-220. O metal de solda foi depositado de forma adequada, verificando assim o bom posicionamento da tocha.

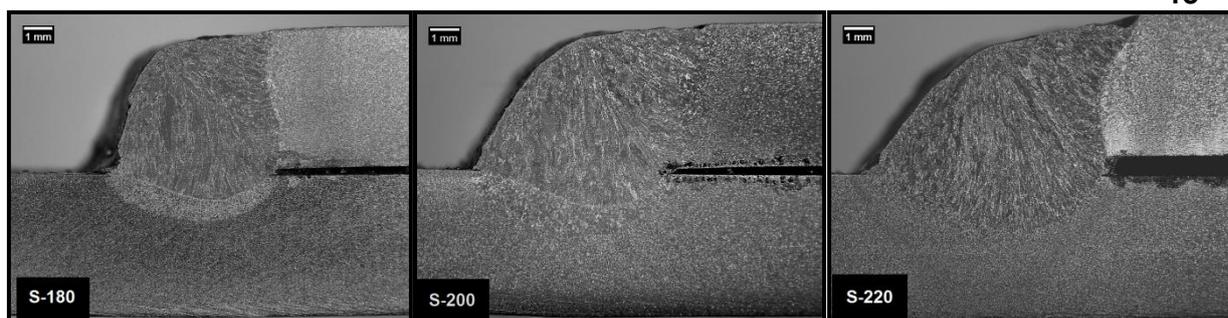


Figura 5.10: Macrofotografias das Juntas sobrepostas.

Tabela 5.6: Parâmetros geométricos da Junta Sobreposta.

Junta sobreposta							
Junta	Garganta [m]	Penetração [m]	Perna Horiz. [mm]	Perna Vert. [mm]	Área A+B [mm <sup>2</sup> ]	B [mm <sup>2</sup> ]	Diluição %
A-180	3,48	1,02	4,52	4,75	24,21	8,36	34,53%
A-200	3,61	1,15	5,45	4,75	31,27	13,41	42,87%
A-220	3,82	1,63	6,04	4,75	38,76	17,08	44,07%

A figura 5.11 identifica as macrografias da junta em ângulo e na Tabela 5.7 os seus respectivos parâmetros geométricos. Nos ciclos térmicos desta junta foi observado que a chapa vertical tem temperaturas de pico maiores do que na chapa horizontal, fato esse, comprovado pelo significativo aumento da área da ZAC com o aumento da temperatura.

Observa-se que todas as juntas possuem um bom formato e não foram verificados defeitos oriundos do processo de soldagem.

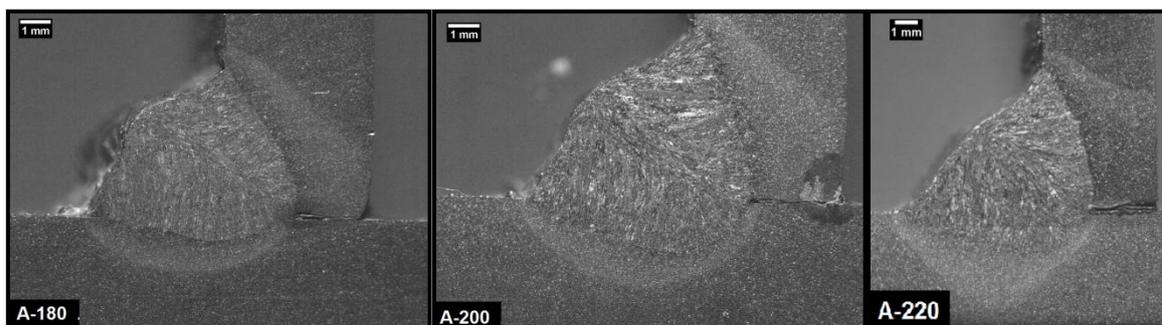


Figura 5.11: Macrofotografias da junta em ângulo do tipo "T".

Tabela 5.7: Parâmetros geométricos da junta Tipo "T" (em ângulo).

Junta Ângulo- Tipo "T"							
Junta	Garganta [m]	Penetração [m]	Perna Horiz. [mm]	Perna Vert. [mm]	Área A+B [mm <sup>2</sup> ]	B [mm <sup>2</sup> ]	Diluição %
A-180	3,25	0,96	4,45	4,85	23,51	10,02	42,62%
A-200	3,78	1,30	5,14	5,32	30,84	13,86	44,94%
A-220	4,23	1,78	6,15	6,27	38,87	19,39	49,88%

Na figura 5.12 têm-se as macrografias da junta de topo, onde é possível verificar a extração em regime 2D através da geometria da ZAC. Comprova-se, portanto a utilização da equação da espessura relativa para prever o modo de extração do calor. Na tabela 5.8 têm-se os parâmetros geométricos.

Na junta T-180 é possível notar um reforço excessivo, maior que a penetração. Na junta T-200 é possível verificar um desalinhamento entre as chapas soldadas. Na junta T-220 temos uma ZAC com características da extração bidimensional.

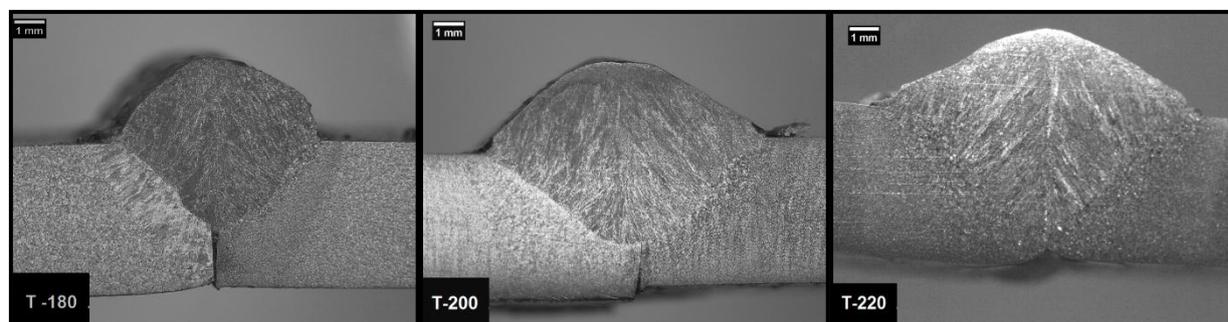


Figura 5.12: Macrofotografias da Junta de Topo.

Tabela 5.8: Parâmetros geométricos da junta de topo.

<b>Junta Topo</b>						
Junta	Altura do reforço [m]	Penetração [m]	Largura do cordão [m]	Área A+B [mm <sup>2</sup> ]	Área B [mm <sup>2</sup> ]	Diluição %
<b>T180</b>	3,02	2,85	6,87	23,05	10,27	44,56%
<b>T200</b>	2,98	3,36	9,33	34,02	16,97	49,88%
<b>T220</b>	2,48	3,86	11,13	38,19	20,59	53,91%

Na figura 5.13, é possível verificar as macrofotografias das chapas com simples deposição de um cordão de solda. Verifica-se o modo de extração do calor das chapas através de sua ZAC, onde nota-se o regime bidimensional de extração de calor. Os parâmetros geométricos podem ser observados na tabela 5.9.

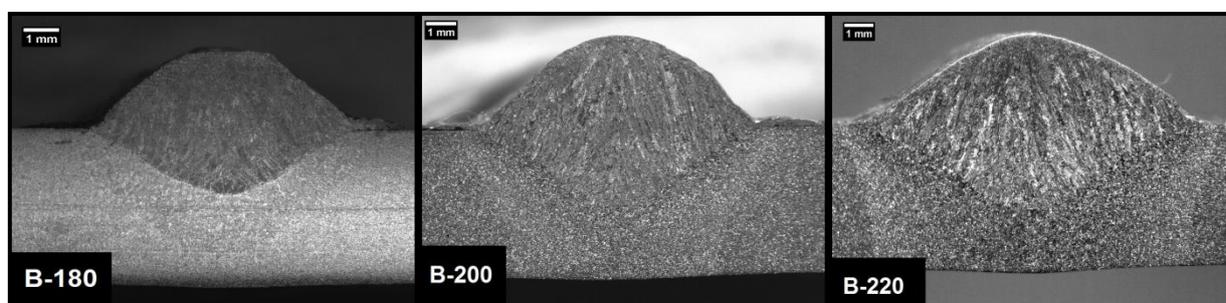


Figura 5.13: Macrofotografias da Bead-on-plate.

Tabela 5.9: Parâmetros geométricos da Bead-on-plate.

<b>Bead-on-plate</b>						
Junta	Altura do reforço [m]	Penetração [m]	Largura do cordão [m]	Área A+B [mm <sup>2</sup> ]	B [mm <sup>2</sup> ]	Diluição %
<b>T180</b>	2,39	2,03	7,51	20,05	8,23	41,05%
<b>T200</b>	3,06	2,63	9,29	29,59	12,88	43,53%
<b>T220</b>	2,81	3,06	11,54	38,05	17,71	46,54%

## 6 CONCLUSÃO

Os objetivos do trabalho foram atingidos uma vez que foi possível correlacionar os resultados dos experimentos com os modelos teóricos existentes. Para as temperaturas de pico, infere-se que o modelo sugerido pela AWS proporcionou grande proximidade com os resultados encontrados (variações de 12%). Observou-se através da equação da espessura relativa que é possível prever de forma rápida o modo de extração do calor. Devido às simplificações dos modelos propostos por Rosenthal, notou-se uma grande variabilidade nos resultados encontrados. Para regimes em 3D houve variações em torno de -20% e em regimes 2D diferenças de 60% mostrando que os modelos não foram considerados adequados para estas configurações de juntas soldadas e energias de soldagem. Foi possível comprovar que, diferente dos modelos teóricos a chapa fina comportou-se como um sólido finito. A premissa do estado quase-estacionário da fonte de calor foi constatada através dos gráficos dos ciclos térmicos das diferentes juntas soldadas. Ademais, observou-se que a área superficial - para juntas com chapas finas e finitas - influencia diretamente a taxa de resfriamento.

Para uma mesma energia, comprova-se que o regime de extração em 2D produz uma maior temperatura de pico e que o regime de extração de calor em 3D dispõe de uma taxa de resfriamento maior. Verificou-se que a confecção e o correto posicionamento dos termopares durante o processo de medição da temperatura têm grande influência nas análises térmicas posteriores, uma vez que erros na ordem de 0,1 milímetros geram grandes variações nos resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM; **“welding Brazing and Soldering”**, Volume 06, 10ª edição, 1993.

AWS; **“welding Handbook – Welding science and Technology”**, Vol. 01, 9ª edição, 2001.

Callister; W.D.Jr. **“Ciência e engenharia de Materiais: Uma introdução”**. LTC, Rio de Janeiro, 5ª edição, 2000.

Machado, I.G.; **“Soldagem & Técnicas conexas: Processos”**, 1ª Edição, Porto Alegre, 1996.

Machado, I.G.; **“Condução do Calor na soldagem: Fundamentos & Aplicações”**, Imprensa Livre, 1ª Edição, 2000.

Modenesi, P.J; Marques, P.V; **“Soldagem I – Introdução aos processos de soldagem”**. UFGM, Belo Horizonte ,2000.

Modenesi, P.J ;Marques, P.V; Bracarense; A.Q. **“Soldagem : Fundamentos e Tecnologia”**. Editora UFGM, Belo Horizonte, 3ª Edição, 2011.

Modenesi, P.J; Marques, P.V; Bracarense; B.S. **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**, UFGM, Belo Horizonte, 2012.

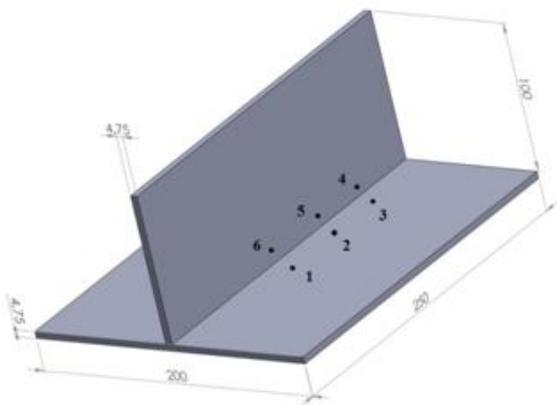
Okumura, T.; Taniguchi,C.; **“Engenharia de Soldagem e aplicações”**, Rio de Janeiro, 1ª Edição 1982.

Rosenthal, D.; **“Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting”**, Welding Journal 20: 220-s-234-s, 1941.

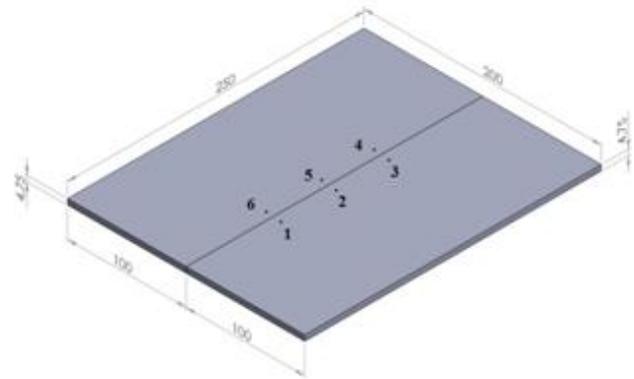
Wainer,B.; Brandi,S.D; Mello,F.D.H. **“Soldagem:Processos e Metalurgia”**, Edgar Blucher, 1992.

## APÊNDICE

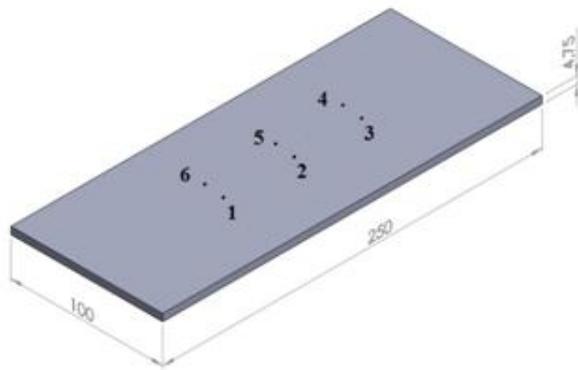
### Apêndice I - Localização dos termopares nas juntas soldadas



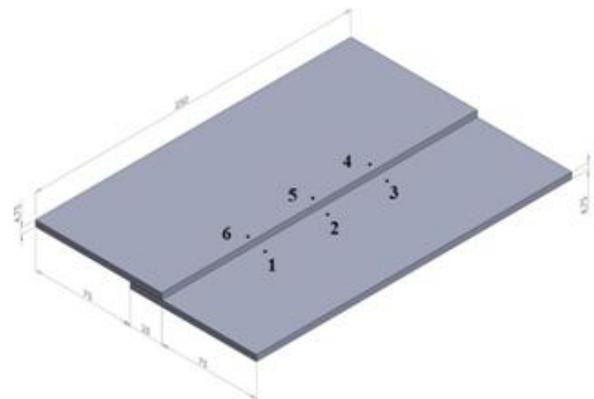
**Junta em Ângulo**



**Junta Topo**



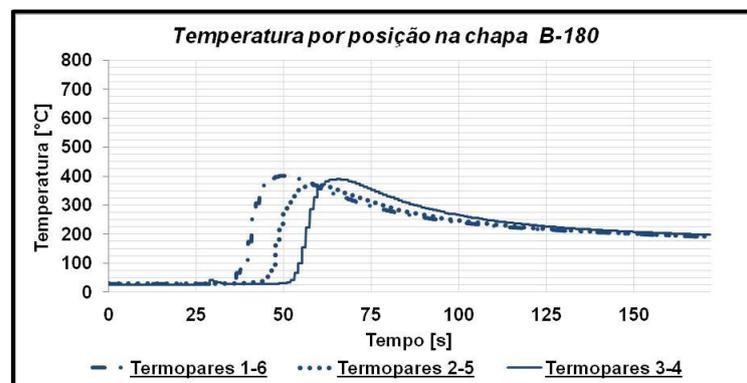
**Bead-on-plate**

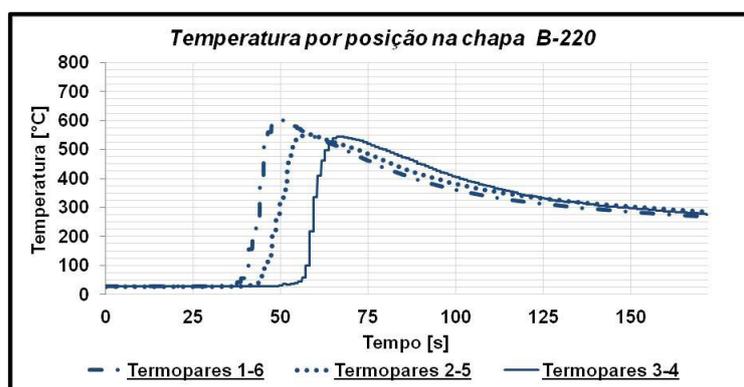
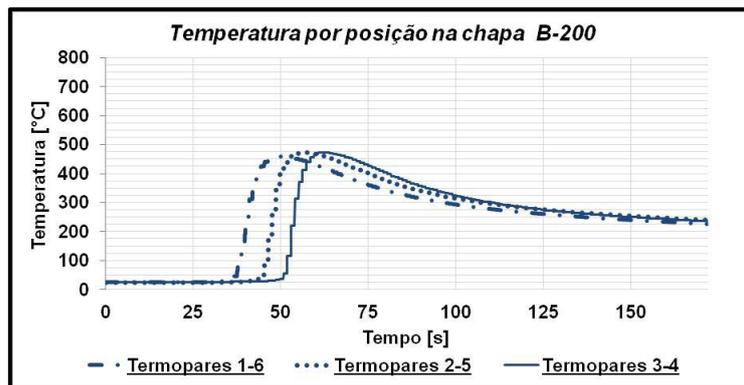


**Junta Sobreposta**

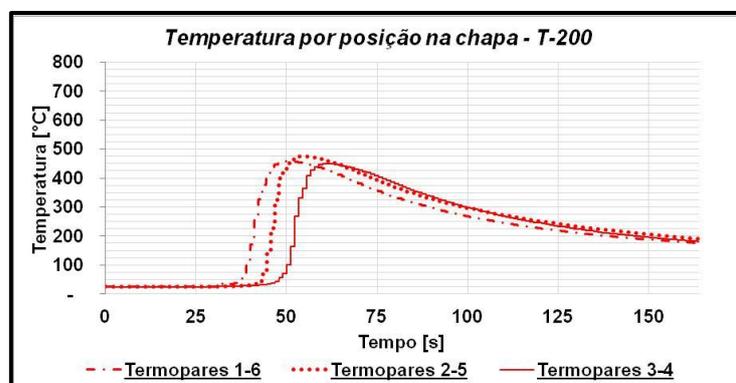
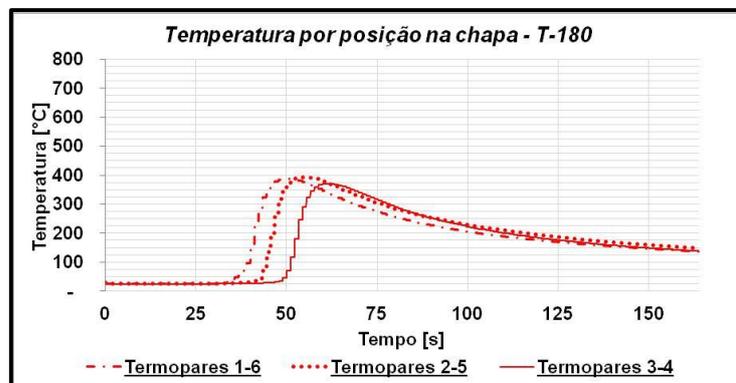
### Apêndice II – Temperatura de pico por posição nas juntas soldada

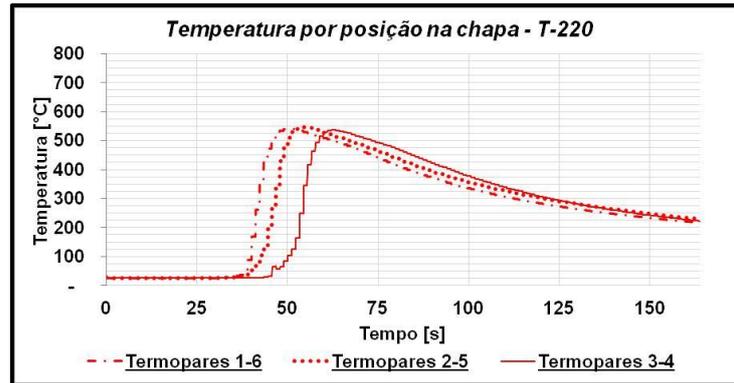
Chapa com simples deposição:



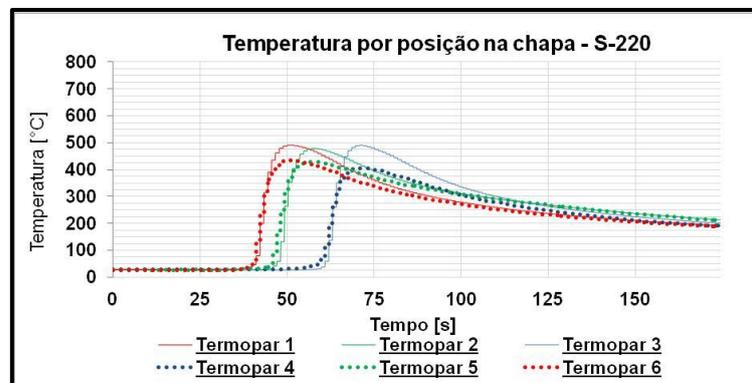
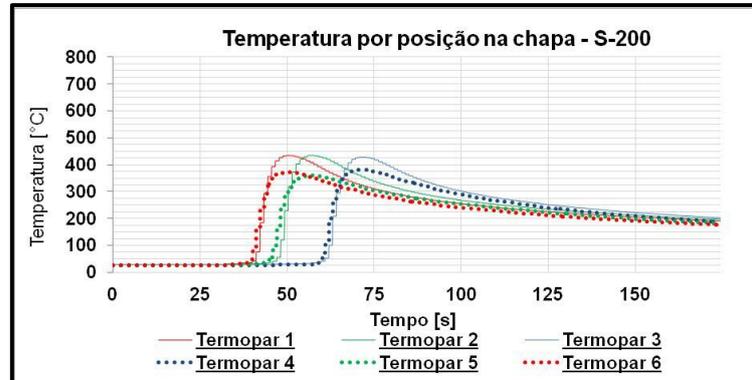
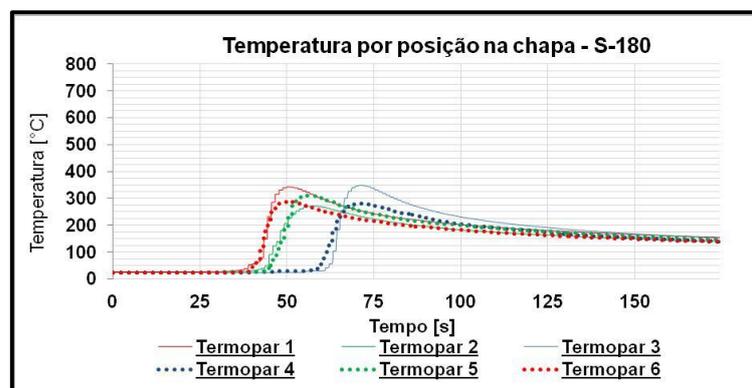


Junta de Topo:

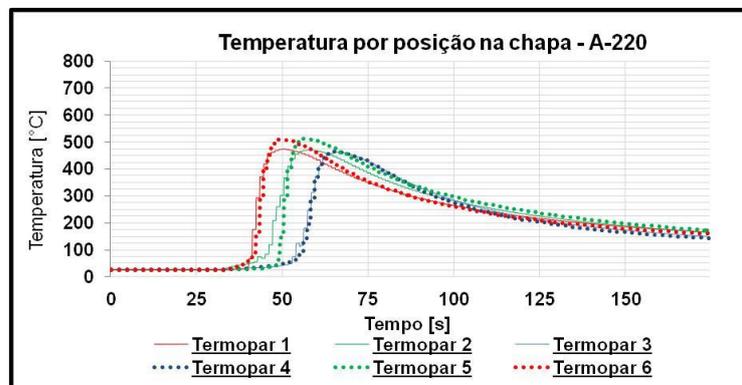
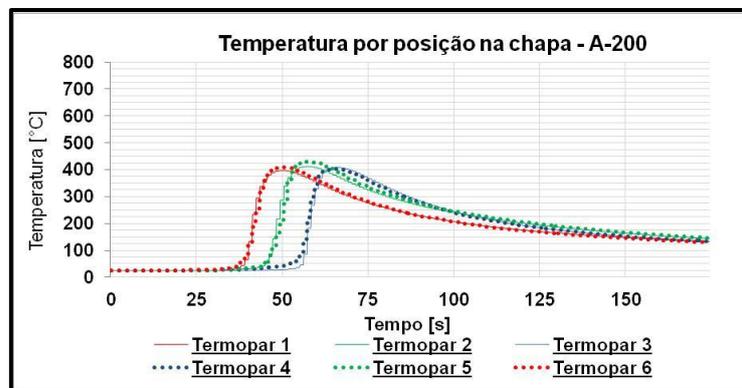
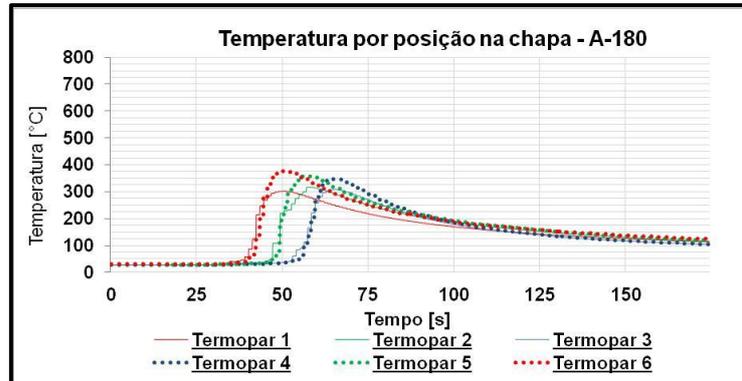




Junta Sobreposta:



Junta do tipo "T":



## ANEXO

### Anexo I – Fonte e Robô Industrial utilizados nos experimentos



### Anexo II – Sistema de aquisição de dados

