

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

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES RESULTANTES DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG EM
CHAPAS FINAS DE HARDOX 450

por

Diego Sartori

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 2017

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES RESULTANTES DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG EM
CHAPAS FINAS DE HARDOX 450

por

Diego Sartori

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

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Cíntia C. Petry Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de julho de 2017.

*It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate,
I am the captain of my soul.*
(William Ernest Henley)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai João Luiz e a minha mãe Enir, pelo amor incondicional e por sempre se orgulharem de mim durante essa longa trajetória.

Agradeço a minha namorada Izabelly, por todo amor, esforço, compreensão e força dada na conclusão deste curso, sem ela nada disto seria possível.

Também agradeço aos meus amigos, que torceram e estiveram presentes durante os anos com o companheirismo de sempre. Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, em especial o grupo PROENG-CDT, o qual tive a honra de participar por vários anos. Agradeço também ao colega Diogenes Roncatto pela realização dos cortes das chapas utilizadas neste trabalho.

Agradeço aos colegas da Maxiforja, em especial o engenheiro Eduardo Uhmman, pelas necessárias folgas dadas para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro, por toda ajuda, atenção e paciência disponibilizadas na orientação do meu trabalho de conclusão de curso e a Prof. Cíntia Mazzaferro pelos conselhos dados.

Também agradeço a SSAB Brasil, por disponibilizar o material em estudo, contribuindo para a formação de mais um engenheiro e para o crescimento da pesquisa acadêmica.

SARTORI, D. **Análise das distorções resultantes do processo de soldagem MAG em chapas finas de HARDOX 450**. 2017. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O uso de chapas finas na fabricação de componentes e equipamentos mecânicos vem crescendo devido à busca de soluções econômicas e eficazes em diversas áreas. O desenvolvimento de aços mais resistentes e com ótimas propriedades mecânicas possibilita a redução de peso de estruturas, economia de combustível aliada a estruturas mais resistentes. O processo de soldagem MIG/MAG é uma das formas de união de materiais metálicos mais utilizadas. Devido à sua importância e disseminação na indústria, uma análise das distorções resultantes deste processo foi realizada no presente trabalho. A partir de chapas de 1 mm de espessura de HARDOX 450, juntas de topo foram realizadas com o auxílio de um robô mantendo-se constante a energia de soldagem. Soldas com três velocidades diferentes foram feitas e seus perfis de distorção devidamente traçados e medidos. A partir disto, chegou-se aos resultados que mostram uma redução na distorção com o aumento da velocidade de soldagem.

PALAVRAS-CHAVE: Distorções, MIG/MAG, chapas finas, HARDOX.

SARTORI, D. **Analys of MAG welding distortion of HARDOX 450 steel thin-plates**. 2017. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The use of thin plates in the manufacture of components and mechanical equipment has been growing due to the search of economical and effective solutions in several areas. The development of sturdier steels with excellent mechanical properties enables structural weight reduction, fuel economy combined with more resistant structures. The MIG/MAG welding process is one of the most widely forms of metal joining. Due to its importance and dissemination in industry, an analysis of the distortions resulting from this process was carried out in the present work. Using 1 mm thick HARDOX 450 plates, butt joints were made with the assistance of a robot, keeping the welding energy constant. Welds with three different speeds and their distortion profiles were properly plotted and measured. From this it was found in the results that there is a reduction in the distortion with higher welding speed.

KEYWORDS: Distortion, MIG/MAG, thin plates, HARDOX.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1 Processo MIG/MAG	1
3.2 Tensões residuais.....	1
3.3 Distorções.....	2
3.4 Força no cordão de solda	4
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	4
4.1 Material.....	4
4.2 Parâmetros de soldagem	4
4.3 Preparação das amostras	5
4.4 Sequência de soldagem.....	6
4.5 Aquisição de Temperatura	6
4.6 Aquisição de Corrente e Tensão.....	6
4.7 Perfis de Distorção.....	6
5. RESULTADOS.....	7
5.1 Junta Soldada	7
5.2 Distorções.....	7
5.3 Velocidade de Soldagem	8
5.4 Temperaturas	8
5.5 Cálculo da força no cordão de solda	10
5.6 Área da seção transversal do reforço do cordão de solda.....	10
6. CONCLUSÕES	11
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é, atualmente, um dos processos de união de peças metálicas mais utilizadas. Com base na fusão de materiais, a soldagem ao arco elétrico com proteção por gás e eletrodo consumível, popularmente conhecida como MIG/MAG, aplica uma grande energia através de um arco elétrico formado entre o eletrodo consumível e a peça. Devido às características térmicas desse processo, alguns efeitos são gerados, como: tensões residuais, alterações na resistência do material e distorções.

Desde sua criação, em 1974, o HARDOX é amplamente utilizado na fabricação de componentes mais leves e resistentes para diversas áreas. Aliada a combinação de dureza e tenacidade, à resistência ao desgaste é a principal característica desse aço. As aplicações usuais na indústria mineradora são em caçambas de escavação, carrocerias de caminhões e calhas transportadoras. Em forjarias, devido a sua elevada resistência mecânica, chapas de HARDOX são utilizadas no ajuste do fechamento de matrizes e insertos em função das regravações realizadas nas ferramentas.

Em razão do crescente emprego de chapas finas na fabricação de componentes e equipamentos mecânicos mais eficientes e econômicos, as distorções resultantes dos processos de soldagem vêm sendo estudadas por pesquisadores e engenheiros a fim de controlar e reduzir os efeitos indesejados que afetam a montagem de estruturas, as tolerâncias dimensionais e a qualidade final das peças.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo obter juntas de topo, com chanfro reto, isentas de defeitos superficiais, visíveis ao olho nu, na soldagem de chapas de aço HARDOX 450 com 1 mm de espessura e avaliar o efeito da energia de soldagem nas distorções resultantes do processo MAG.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo MIG/MAG

Este processo de soldagem é baseado na formação de um arco elétrico entre a peça a ser soldada e um eletrodo metálico nu consumível, continuamente alimentado. A poça de fusão formada é protegida por um gás, ou uma mistura de gases de caráter inerte ou oxidante (ativo). De acordo com Marques, 2011, no Brasil o processo é chamado de *Metal Inert Gas* (MIG) quando a proteção é inerte ou rica em gases inertes e a denominação *Metal Active Gas* (MAG) diz respeito ao processo em que o gás usado é oxidante ou contém gases oxidantes.

Dentre as vantagens do processo, destacam-se a facilidade de operação, a alta capacidade de robotização e a baixa quantidade de hidrogênio depositado com o metal de solda. Machado, 1996, explica que, quando adequadamente ajustado, é possível soldar em todas as posições, com ótima estabilidade de arco e pouca escória. Além disto, em alguns casos, permite-se que os passes sejam realizados sem limpeza prévia.

3.2 Tensões residuais

As mudanças de temperatura e tensões que ocorrem durante a soldagem são representadas na Figura 3.1.

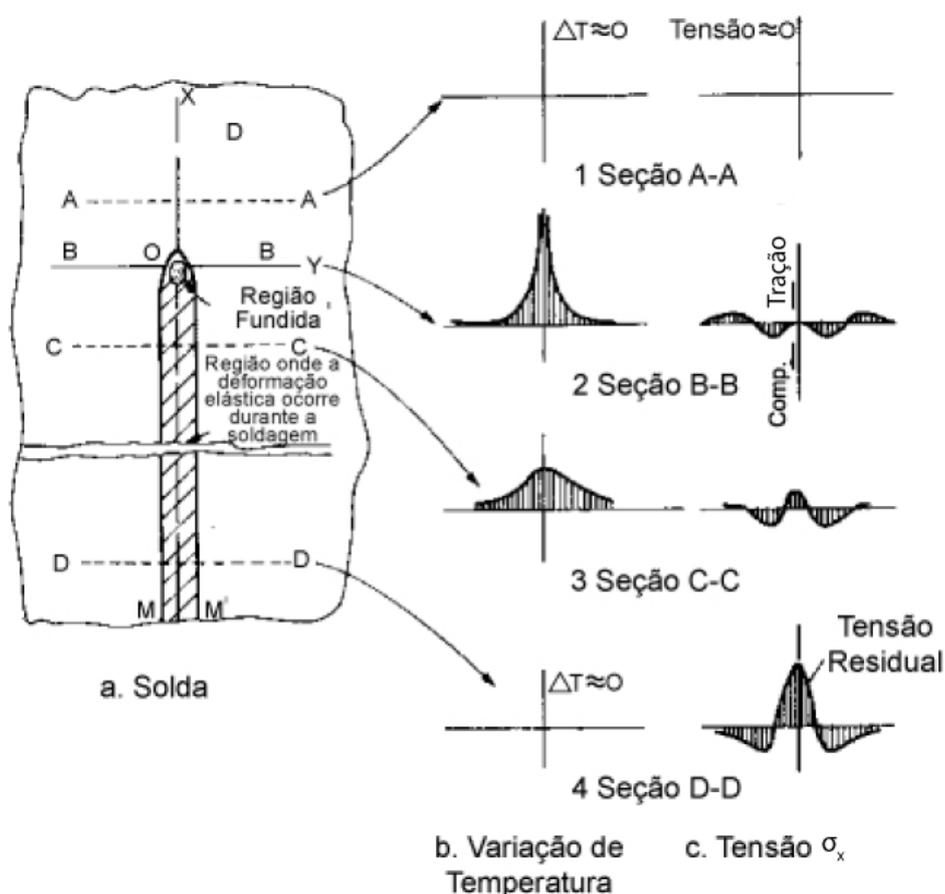


Figura 3.1 – Perfil de tensões residuais (Masubuchi, 1980).

Masubuchi, 1980, explica que na seção A-A, as tensões e a variação térmica devido a solda são insignificantes. Na região do metal fundido, compreendido pela seção B-B, as tensões abaixo do arco elétrico são próximas de zero pelo fato do metal líquido não suportar carga. Nas regiões próximas ao arco, as tensões são compressivas pois a expansão dessa área é contida pelo metal base mais frio. Como as temperaturas são altas e a resistência do material é baixa, as tensões resultantes são da ordem da resistência ao escoamento, chegando a um máximo com o aumento da distância da solda ou com a diminuição da temperatura. A fim de atingir o equilíbrio, as tensões nas áreas mais afastadas são trativas.

Uma vez que o metal de solda e as regiões próximas ao cordão resfriaram, elas se contraem e tensões trativas surgem, como mostrado na seção C-C. Afastando-se do cordão de solda, as tensões são compressivas e novamente se tornam trativas. A seção D-D mostra a distribuição final das tensões residuais. As tensões trativas concentram-se próximas ao cordão de solda e passam a ser compressivas com o aumento da distância (Masubuchi, 1980).

3.3 Distorções

Pode-se afirmar que “as distorções de peças soldadas são desvios permanentes de forma e/ou dimensões resultantes das deformações plásticas que ocorrem devido às tensões transientes desenvolvidas durante a soldagem” (Marques et al., 2011). Segundo Masubuchi, 1980, durante o ciclo térmico do processo de soldagem, complexas deformações ocorrem nas regiões próximas ao metal base e no metal de solda.

Existem três formas fundamentais de distorção: (a) contração transversal perpendicular ao cordão de solda, (b) contração longitudinal paralelo ao cordão de solda e (c) distorção angular. Além dos tipos referidos, há uma subclassificação dada, devido à sua aparência, dividida em seis categorias, de acordo com Masubuchi, 1980, sendo elas:

- 1) **Contração transversal:** Contração perpendicular ao cordão de solda.
- 2) **Distorção transversal:** Uma mudança angular próxima ao cordão de solda é causada devido a distribuições térmicas não uniformes na espessura da peça.
- 3) **Distorção rotacional:** Distorção angular no plano da chapa devido à expansão térmica.
- 4) **Contração longitudinal:** Contração paralela ao cordão de solda.
- 5) **Distorção longitudinal por flexão:** Distorção em um plano através do cordão de solda e perpendicular à chapa.
- 6) **Distorção por empenamento:** Tensões compressivas térmicas causam instabilidade quando as chapas são finas.

A última categoria, distorção por empenamento, é a de maior relevância para o presente trabalho, visto que foi o modo observado neste estudo.

Wang et al., 2013, separa a distorção por empenamento em dois tipos: (A) sela e (B) torção, como mostra a Figura 3.2.

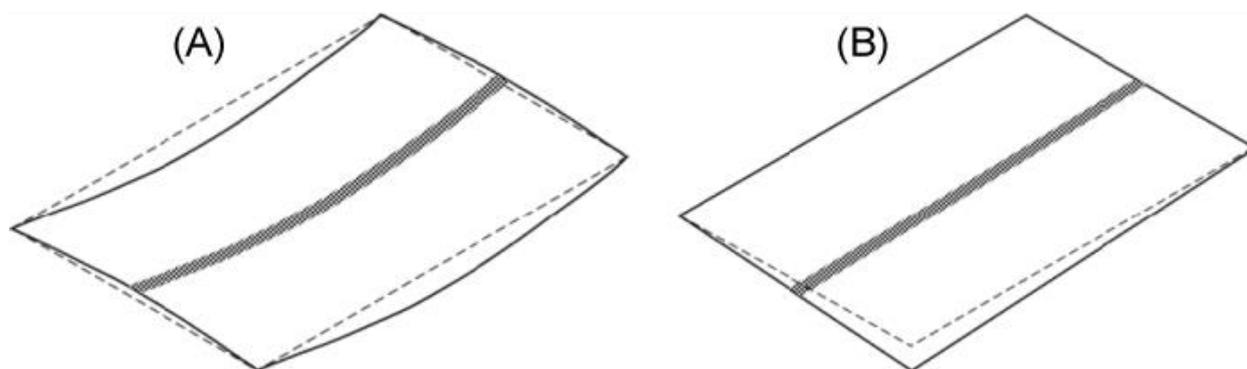


Figura 3.2 - Tipos de distorção por empenamento: (A) modo de sela e (B) modo de torção.

Segundo Ueda et al., 1995, a deformação específica inerente (*inherent strain*) é considerada a causa das tensões residuais e distorções em soldas e depende principalmente do tipo de junta soldada, propriedades dos materiais, espessura das chapas e energia de soldagem empregada. As deformações que ocorrem durante o ciclo térmico podem ser divididas de acordo com a eq. 3.1:

$$\varepsilon^{total} = \varepsilon^{elástica} + \varepsilon^{térmica} + \varepsilon^{plástica} + \varepsilon^{fluência} + \varepsilon^{fase} \quad (3.1)$$

A deformação total pode ser redefinida como a soma da deformação elástica e deformação específica inerente.

Wang et al., 2016, afirma que a distribuição da deformação específica inerente é difícil de ser diretamente aplicada para prever tensões residuais e distorções na soldagem. Desse modo, foi proposta a deformação inerente (*inherent deformation*), que se baseia no pressuposto de que uma junta soldada tem uma quantidade de deformação em cada seção transversal normal ao cordão de solda.

A complexidade do estado final de tensões e deformações numa solda é significativa e ditada por suas propriedades mecânicas, sua qualidade e outros fatores, como por exemplo:

material, espessura das peças, grau de rigidez da estrutura, dimensões, posição, geometria e quantidades das soldas (Marques et al, 2011).

3.4 Força no cordão de solda

“De acordo com o entendimento comum em mecânica da soldagem, a contração longitudinal e o empenamento são produzidos pela contração longitudinal inerente, mais especificamente a força de contração longitudinal inerente. Essa força tem uma natureza trativa e atua em uma pequena área. Após o término da solda, e enquanto o cordão de solda resfria, a força no cordão de solda se desenvolve. Tensões compressivas são geradas para atingir o equilíbrio com essa força” (Wang et al., 2013).

Baseado em medições experimentais, White et al., 1980, introduziu o conceito desta força. Após novos estudos, Wang et al., 2013, propôs a eq. 3.2 para o cálculo da força no cordão de solda:

$$F_{tendon} = 0,335 \frac{\alpha \cdot E}{\rho c} \eta Q \quad (3.2)$$

onde, α é o coeficiente de expansão linear, E o módulo de Young, ρ a densidade, c o calor específico do material, η o rendimento térmico do processo e Q a energia de soldagem.

A partir dos valores de F_{tendon} , segundo Wang et al., 2013, é possível obter a magnitude da força no cordão de solda e prever o empenamento em chapas para soldas feitas por simples deposição sobre chapa.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo, foram utilizadas 18 chapas de HARDOX 450 cortadas em uma máquina de corte à jato d'água, de propriedade do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF). Cada chapa possui dimensões de 300 mm x 100 mm x 1 mm de espessura. A escolha do processo de corte deveu-se a um melhor acabamento e à conservação da microestrutura da interface cortada, pois não ocorre o superaquecimento provocado pelos processos de corte térmicos.

4.1 Material

Utilizado em uma variada gama de componentes e estruturas, como por exemplo carrocerias de caminhão, equipamentos de escavação e chapas de sacrifício devido as suas propriedades mecânicas, o HARDOX 450 foi escolhido como material do presente estudo. O mesmo possui composição química conforme a Tabela 4.1, dureza entre 425 e 475 HV, resistência à tração entre 1400 e 1600 MPa e resistência ao escoamento de 1250 MPa (SSAB, 2017).

Tabela 4.1 - Composição química do Hardox 450 (SSAB, 2017)

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,18	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,04	0,003

4.2 Parâmetros de soldagem

Para a determinação dos envelopes de soldagem, foram realizados pré-testes de soldagem em um robô YASKAWA/MOTOMAN, modelo MA1400/DX100, com arame tubular ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro e gás de proteção Ar + 2% O₂. Soldas com deposição sobre

chapa foram realizadas com velocidades de 12, 15 e 20 mm/s, mantendo similares energias de soldagem entre elas.

Através da equação da energia de soldagem dada por eq. 4.1:

$$E_N = \eta \frac{U \cdot I}{v} \quad (4.1)$$

onde E_N é a energia de soldagem (J/mm), U é a tensão de soldagem em (V), I é a corrente de soldagem (A), v a velocidade de soldagem (mm/s) e η é o rendimento térmico do processo MAG, foram selecionados os parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem e nomenclatura utilizada no presente estudo.

Parâmetros	MAG_12	MAG_15	MAG_20
Velocidade de soldagem	12 mm/s	15 mm/s	20 mm/s
Tensão	16,0 V	18,0 V	21,4 V
Corrente	90 A	95 A	110 A
Alimentação do arame	4,2 m/min	4,8 m/min	5,1 m/min
Energia de soldagem	102 J/mm	96,9 J/mm	100,05 J/mm

4.3 Preparação das amostras

Para a realização do presente estudo, utilizou-se chapas de HARDOX 450, sendo elas ponteadas em pares utilizando o mesmo metal de adição depositado nas soldas formando nove amostras. As mesmas foram divididas em três grupos, de acordo com as velocidades de soldagem realizadas, com três chapas cada. Os perfis foram traçados, em folhas brancas à caneta, para a medição das distorções no perímetro das chapas seguindo a identificação da Figura 4.1.

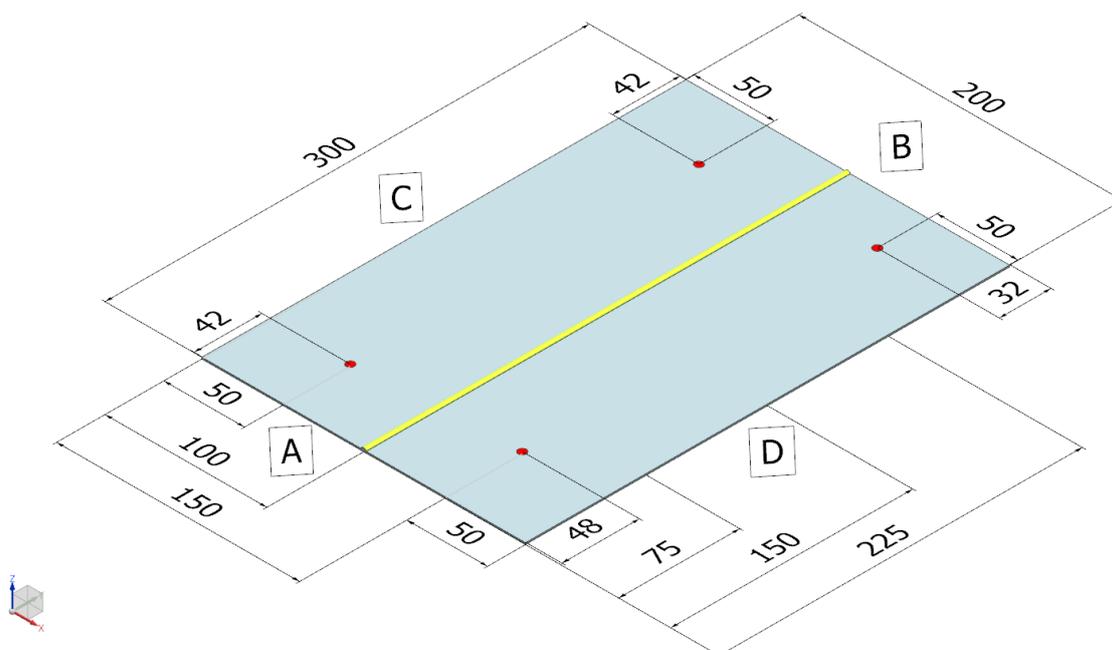


Figura 4.1 – Identificação dos lados das chapas, posição das restrições e pontos para posteriores medições das distorções.

4.4 Sequência de soldagem

Os cordões de solda foram realizados à topo com chanfro reto conforme os parâmetros e materiais mencionados anteriormente. A fim de aproximar o estudo de uma condição real, os corpos de prova foram fixados por grampos de fixação posicionados de acordo com a Figura 4.1. A programação da solda foi realizada nos controles do robô. Ao final do processo, as restrições foram rapidamente retiradas para que as chapas se deformassem livremente.

4.5 Aquisição de Temperatura

Durante o processo de soldagem, as temperaturas foram adquiridas através de dois termopares tipo K sem revestimento, em cada amostra, posicionados a 4 mm do cordão de solda e na linha média das chapas. Os mesmos foram fixados manualmente através de solda por descarga capacitiva e protegidos por duas pequenas chapas de aço. Realizou-se a aquisição dos dados através de uma placa da *National Instruments* em conjunto com o *software Labview* com uma taxa de amostragem de 10 Hz.

4.6 Aquisição de Corrente e Tensão

Através de um sistema portátil de monitoração de processos de soldagem da IMC, foi realizada a aquisição dos dados referentes a corrente e tensão empregados no processo. Os mesmos foram exportados e analisados no *software Microsoft Excel*.

4.7 Perfis de Distorção

Ao final do processo, os perfis resultantes dos quatro lados das chapas foram traçados seguindo o mesmo procedimento anteriormente citado. Através de um *software* de edição de imagens foram realizados três pontos de medição, sendo eles:

- **ponto um:** 50 mm;
- **ponto dois:** 100 mm;
- **ponto três:** 150 mm;

para os lados A e B, transversais ao cordão de solda, com largura total de 200 mm. A respeito dos lados C e D, longitudinais ao cordão de solda, foram utilizadas as seguintes medições:

- **ponto um:** 75 mm;
- **ponto dois:** 150 mm;
- **ponto três:** 225 mm;

com comprimento total de 300 mm. A partir da Figura 4.2, a representação do perfil do corpo de prova não soldado é visualizado pela linha vermelha, enquanto a linha azul traça o perfil da distorção resultante após a soldagem.

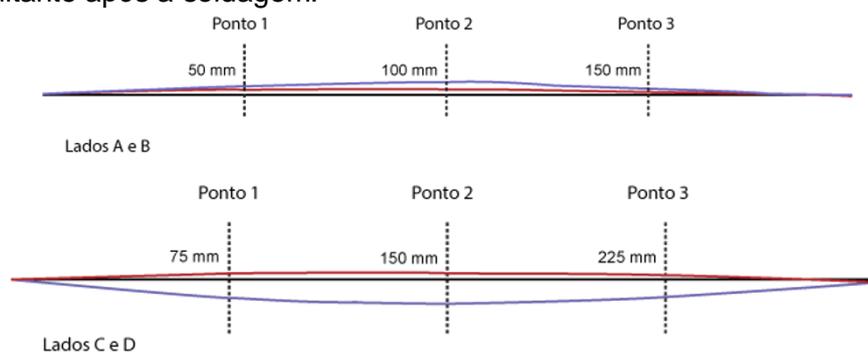


Figura 4.2– Exemplos de perfis traçados e seus respectivos pontos de medição.

5. RESULTADOS

5.1 Junta Soldada

Através da Figura 5.1, pode-se observar que a escolha dos parâmetros de soldagem, para uma velocidade de soldagem de 12 mm/s, resultou em uma junta de topo íntegra com penetração completa. O mesmo comportamento foi encontrado em amostras com velocidades de 15 e 20 mm/s.

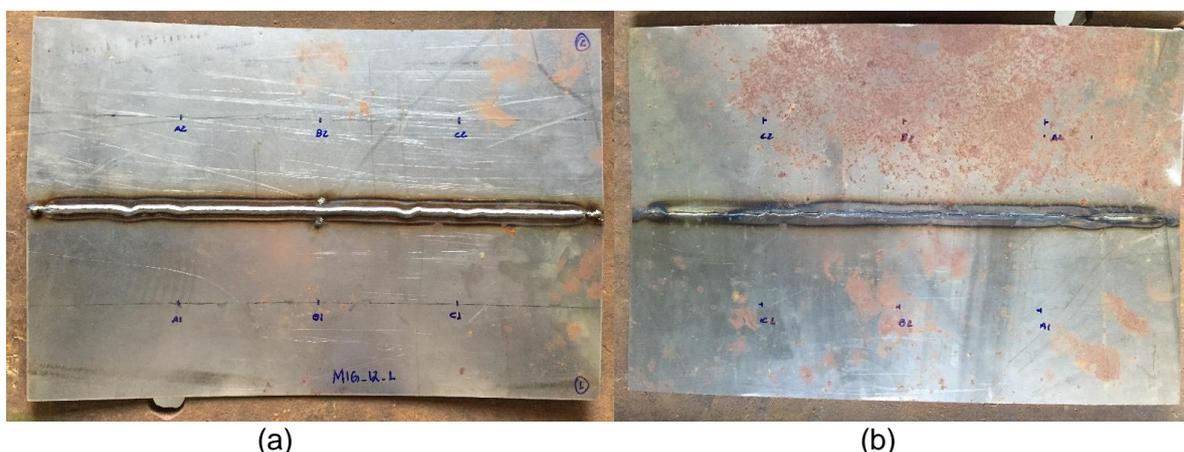


Figura 5.1 – Aspecto do cordão de solda de uma amostra MAG_12: (a) vista superior; (b) vista inferior.

5.2 Distorções

Os perfis traçados, conforme Figura 4.2, serviram de base para a medição das distorções resultantes do processo. As folhas contendo os perfis foram escaneadas e através do *software Adobe Illustrator* as medições foram realizadas. Devido ao fato das chapas terem sido restringidas verticalmente durante o processo de soldagem, partiu-se do pressuposto que as mesmas se mantiveram planas. Desse modo, as distorções presentes antes do processo de soldagem não foram consideradas. Sendo assim, a Tabela 5.1 mostra os valores médios encontrados, entre as amostras, nos pontos de medição um, dois e três, nos dois sentidos das chapas (transversal e longitudinal).

Tabela 5.1 - Valores médios das distorções em mm.

	MAG_12			MAG_15			MAG_20		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
A	1,291	2,978	1,447	1,940	3,541	1,632	1,876	3,576	1,918
B	1,699	4,101	1,622	1,774	4,409	1,988	2,505	5,074	2,535
C	-5,959	-8,733	-7,089	-4,519	-7,059	-5,087	-4,411	-6,060	-4,991
D	-6,044	-8,589	-6,340	-6,675	-8,803	-6,047	-5,300	-7,029	-4,840

É possível observar que as maiores distorções ocorrem no ponto dois em ambos os sentidos, transversal (A e B) e longitudinal (C e D), das chapas. Um importante aspecto a salientar, é o fato das distorções não serem simétricas entre os lados A-B e C-D. Isso ocorre devido a fatores como: o posicionamento assimétrico das restrições, que acarretam mudanças no campo de tensões residuais; o desalinhamento vertical das chapas, causador de variações geométricas no cordão de solda e o ciclo térmico do processo.

A diferença entre os valores encontrados nos lados A e B, representando respectivamente o começo e o fim do cordão de solda, são de:

- 38% para as amostras MAG_12;

- 25% para as amostras MAG_15;
- 42% para as amostras MAG_20.

Esse comportamento é explicado pelo ciclo térmico do processo. O calor gerado pela fonte é dissipado por condução para o restante da peça conforme ela se movimenta, dessa forma a temperatura da chapa é maior no lado B, devido a um maior acúmulo de energia. O aspecto acima citado é salientado por Long et al, 2009, sob a concepção de geração de maiores deformações longitudinais e transversais.

5.3 Velocidade de Soldagem

Segundo Long et al., 2009, a velocidade de soldagem e a espessura das chapas têm uma influência considerável nas distorções de soldagem e nas tensões residuais. Utilizando o lado C como referência, de acordo com a Figura 5.2, pode-se observar as seguintes reduções: **(a)** redução de 19% na distorção entre as velocidades de 12 e 15 mm/s, **(b)** 14% entre 15 e 20 mm/s e **(c)** 31% entre 12 e 20 mm/s.

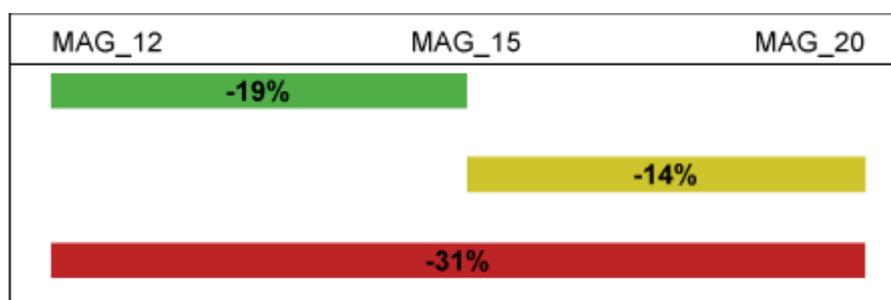


Figura 5.2 – Variação da distorção entre as velocidades de soldagem.

5.4 Temperaturas

As temperaturas adquiridas no processo de soldagem pelos termopares são mostradas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 respectivamente representando as amostras com velocidades de 12, 15 e 20 mm/s. Observa-se que, de acordo com as variações de velocidade, os picos de temperatura diminuem com o aumento da velocidade de soldagem, pois as linhas isotermais se tornam mais estreitas e uma região mais estreita junto ao cordão de solda é aquecida às temperaturas mais elevadas. As variações apresentadas entre as amostras ocorrem devido ao processo de solda por descarga capacitiva ter sido realizado manualmente. Tal fato acarreta variações no posicionamento dos termopares e junções ineficazes, aumentando a possibilidade de surgimento de ruídos no sistema.

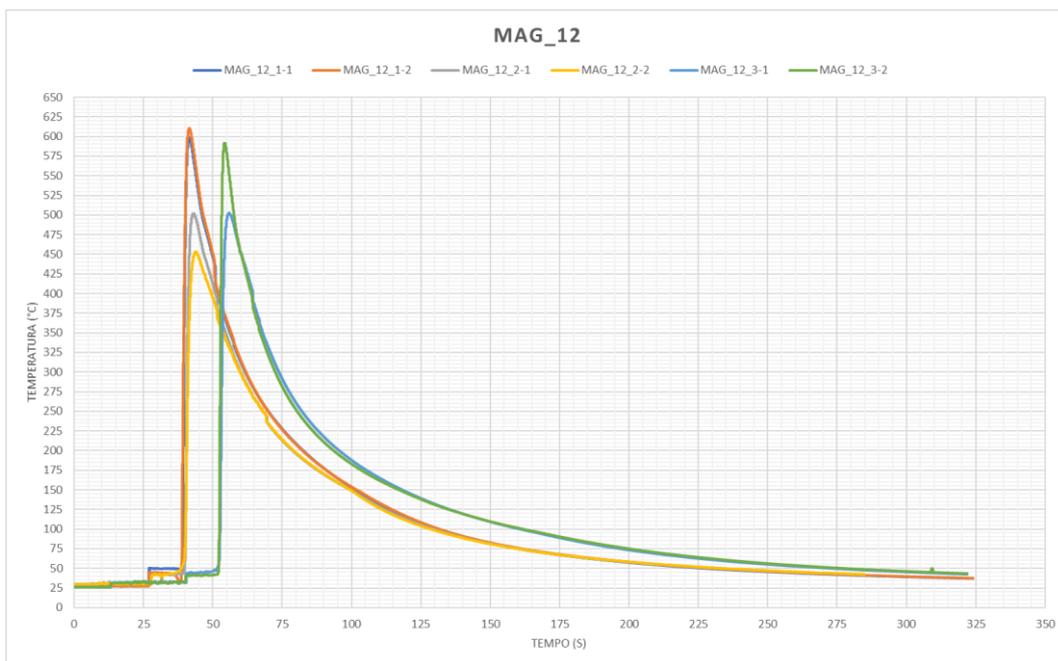


Figura 5.3 - Ciclo térmico das amostras MAG_12.

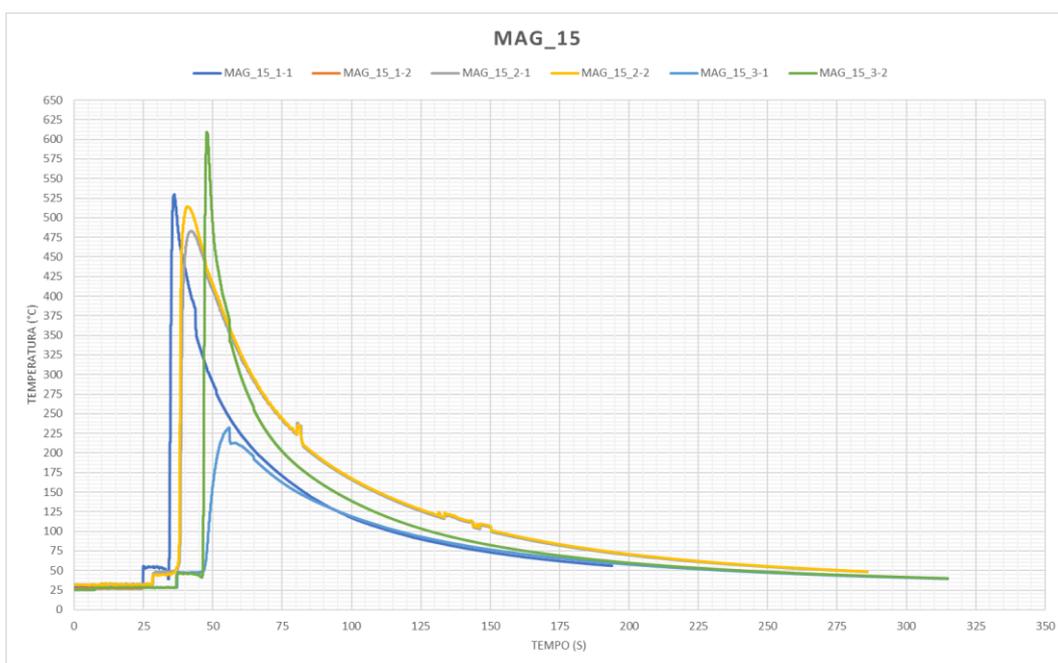


Figura 5.4 – Ciclo térmico das amostras MAG_15.

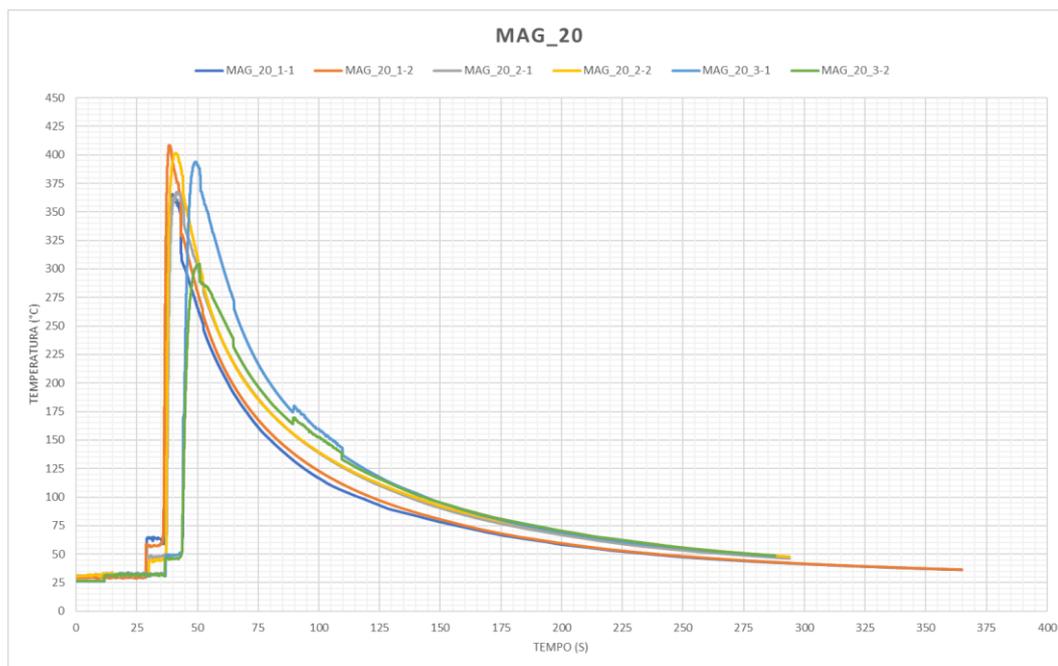


Figura 5.5 – Ciclo térmico das amostras MAG_20.

5.5 Cálculo da força no cordão de solda

O conceito da força no cordão de solda foi apresentado por White et al. em 1980. Os autores sustentam que nesta definição as contrações longitudinais e a distorção por empenamento são resultantes dessa força. Utilizando a fórmula empírica proposta por Wang et al., 2013, eq (3.1), apresentada anteriormente, utilizando as propriedades mecânicas de aços de baixo carbono, à temperatura ambiente, dada por:

$$F_{tendon} = 0,335 \frac{\alpha \cdot E}{\rho c} \eta Q \quad (3.1)$$

onde, α é o coeficiente de expansão linear, $\alpha = 1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, E o módulo de Young, $E = 210 \text{ GPa}$, ρ a densidade, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, c o calor específico do material, $c = 4,6 \times 10^2 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, η o rendimento térmico do processo, $\eta = 0,85$ e Q a energia de soldagem. A partir da resolução da equação com valores das propriedades descritas acima, obtemos as seguintes forças no cordão de solda para os parâmetros realizados:

- 24,00 KN, para MAG_12;
- 22,80 KN, para MAG_15;
- 23,54 KN, para MAG_20.

Percebe-se, com os dados apresentados, que a força é praticamente constante devido à energia de soldagem aplicada. A variação nas forças pode ser considerada desprezível considerando os erros de aproximação do modelo teórico e dos valores utilizados.

5.6 Área da seção transversal do reforço do cordão de solda

Para estimar a geometria final do reforço do cordão de solda e avaliar sua influência, foram realizadas três medições da largura e seis medições da altura em pontos distintos das amostras soldadas. São apresentadas na Tabela 5.2 as médias dos valores encontrados entre as amostras.

Tabela 5.2 - Valores médios de altura e largura do reforço dos cordões de solda, para cada condição de soldagem empregada.

	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)
MAG_12	1,18	3,21
MAG_15	1,03	3,58
MAG_20	0,81	4,17

Com os valores encontrados, a seção transversal do reforço foi modelada. A Figura 5.6 mostra uma sobreposição dos modelos e suas respectivas áreas transversais. Observa-se uma variação de 11% entre a maior e a menor área transversal calculada, o que pode ser considerada desprezível devido a simplificação realizada.

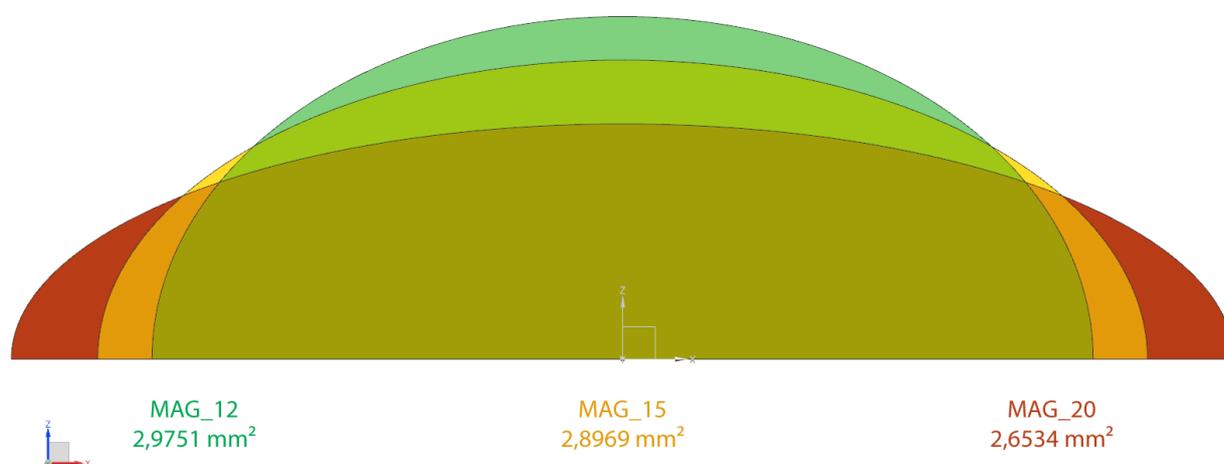


Figura 5.6 – Áreas transversais médias dos reforços dos cordões de solda.

Segundo Deng, 2013, o modo final de deformação em uma solda por deposição sobre chapa é uma combinação da distorção angular e da distribuição da força de contração longitudinal (*tendon force*). Como a área do cordão de solda acima da linha neutra é maior do que abaixo dela, a força de contração é maior. Portanto, um momento é gerado, o que faz a chapa dobrar.

A partir disto, é possível explicar o comportamento das distorções resultantes nas soldas realizadas, apesar dos valores das forças no cordão de solda serem muito próximos.

6. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos e com base nas discussões realizadas é possível concluir que:

- Os parâmetros de soldagem escolhidos foram eficazes para a realização de soldas de topo visualmente íntegras em chapas de 1 mm de espessura.
- O aumento da velocidade de soldagem implica em uma redução na distorção resultante.
- Apesar da energia de soldagem e da força no cordão de solda manterem-se similares, a variação na distorção pode ser explicada pelo estreitamento das linhas isotermais devido ao aumento da velocidade. Conseqüentemente, o campo de tensões residuais se modifica, alterando assim a distorção resultante.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho realizado, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realizar uma simulação numérica com as propriedades do material a fim de comparar os resultados experimentais com o modelo numérico;
- Estudar o processo variando outros parâmetros de soldagem;
- Realizar a medição das tensões residuais;
- Realizar uma análise metalográfica da microestrutura final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Deng, D., Zhou, Y., Bi, T., Liu, X.; **“Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO₂ gas arc welding in thin-plate bead-on joints”**, Materials and Design, Volume 52, Pages 720-729, 2013.

Long, H., Gery, D., Carlier, A., Maropoulos, P.G.; **“Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates”**, Materials & Design, Volume 30, Issue 10, Pages 4126-4135, 2009.

Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q.; **“Soldagem: fundamentos e tecnologia”**, Editora UFMG, 3ª edição, 2011.

Masubuchi, K.; **“Analysis of welded structures”**, Pergamon Press, 1st edition, 1980.

SSAB; **“Data sheet 1022uk Hardox 450 CR Sheet 2017-04-19”**, <http://www.ssab.com>. Acessado em 06/07/2017.

Ueda, Y., Murakawa, H., Nakacho, K., Ma, N.X.; **“Establishment of computational welding mechanics”**, Transactions of JWRI, Volume 24, No 2, Pages 73-86, 1995.

Wang, J., Yin, X., Murakawa, H.; **“Experimental and computational analysis of residual buckling distortion of bead-on-plate welded joint”**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Issue 8, Pages 1447-1458, 2013.

Wang, J., Yuan, H., Ma, N., Murakawa, H.; **“Recent research on welding distortion prediction in thin plate fabrication by means of elastic FE computation”**, Marine Structures, Volume 47, Pages 42-59, 2016.

White, J.D. Leggart, R.H., Dwight, J.B.; **“Welding shrinkage prediction”**, Welding and Metal Fabrication, Volume 11, Pages 587-596, 1980.