

Análise de Distorções na Soldagem de Juntas em “X” e “V” em Modelos Reduzidos em Escala de Anéis Segmentados Utilizando o Monitoramento Contínuo com Sensores a Laser

Jonathas Henrique Pereira^{1,2}, Alexandre Queiroz Bracarense²

¹ DELP Engenharia Mecânica, Vespasiano, MG, Brasil.

² Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Recebido: 26 Out., 2015

Aceito: 21 Jan., 2016

E-mails: jonathasrol@yahoo.com.br
(JHP), bracarense@ufmg.br (AQB)

Resumo: Distorções em componentes soldados são alterações permanente de forma e dimensões resultantes das deformações plásticas que ocorrem devido as tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. Em função dos elevados custos para corrigir essas distorções de soldagem, existe grande interesse das indústrias em prever, monitorar e controlar estas distorções. Este trabalho compara as distorções ocorridas durante a soldagem de modelos de anel segmentado em escala reduzida com dois tipos de juntas (“X” e “V”) utilizando a metodologia de monitoramento contínuo da evolução das distorções de soldagem com sensores a laser. Para o monitoramento contínuo são utilizados sensores a laser que são apoiados sobre a peça e os feixes foram projetados em um anteparo translúcido colocado em frente ao mesmo. Com a progressão da distorção durante a soldagem os feixes luminosos se movimentam pelo anteparo proporcionalmente a deformações ocorridas na peça. Os deslocamentos dos pontos luminosos refletidos no anteparo são filmados pelo lado oposto do anteparo. A discretização da filmagem permite analisar as deformações ao longo do processo soldagem e determinar a evolução das distorções em função do tempo. Foi confirmado que as soldagens realizadas em juntas em “X” apresentam menores valores de distorções que as juntas em “V”. Os resultados demonstram que para os corpos de prova utilizados neste experimento pelo menos 60% da distorção ocorreu após a extinção do arco. Pelos testes experimentais foi possível afirmar que a técnica de monitoramento com sensores a laser é viável para utilizar na indústria e laboratórios de soldagem, porém faz-se necessário otimizar o processamento dos dados obtidos pela filmagem, permitindo um monitoramento instantâneo. A informação sobre a evolução das distorções durante a soldagem será útil para definir e monitorar de forma mais eficiente o melhor método de controle das distorções. Além disso, poderá auxiliar na calibração experimental de modelos numérico-computacional, ou até mesmo, para realimentar a trajetória de um robô identificando deformações para realizar correções na sequência de soldagem garantindo também menores distorções.

Palavras-chave: Distorções de soldagem; Monitoramento; Controle dimensional.

Analysis of Distortion in Welding Joints in “X” and “V” Reduced-scale Models of Segmented Rings Using Continuous Monitoring With Laser Sensors

Abstract: Distortion in welded components is a permanent change of shape and dimensions from plastic deformations that occur due to thermal stresses developed during the welding process. Due to the high costs to correct the welding distortion, there is great interest from industries to predict, monitor and control these distortions. This paper compares the distortions occurring during welding models of segmented ring scaled with two types of joints (“X” and “V”) using the method of monitoring progress of welding distortion with the laser sensors. For continuous monitoring are used laser sensors that are supported on the piece and the beams were projected on a translucent screen placed in front of the same. With the progression of distortion during welding light beams move around the screen in proportion to deformation occurred in the part. The displacements of points of light reflected on the screen are filmed from the opposite side of the bulkhead. The discretization of the film allows to analyze deformations along the welding process and determine the evolution of the distortion in function of time. It was confirmed that the welds performed joints in “X” exhibit distortion values smaller than the joints in “V”. The results demonstrate that for the samples used in this experiment at least 60% of the distortion occurred after arc extinction. By experimental testing was possible to say that the technique of laser sensors monitoring is viable for use in industry and laboratories of welding, although it is necessary to optimize the



data processing obtained by filming, allowing the instantaneous monitoring. The information on the evolution of distortion during welding will be useful to define and monitor more efficiently the best method of control. In addition, it may assist in experimental calibration numerical and computational models, or even to feed back the trajectory of a robot identifying deformations to perform corrections in the welding sequence ensuring also minor distortions.

Key-words: Welding distortion; Monitoring; Dimensional control.

1. Introdução

Distorções em componentes soldados são deformações permanentes de forma e dimensões resultantes das deformações plásticas que ocorrem devido as tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem e representam quantitativamente o afastamento da superfície real em relação à superfície idealizada durante a etapa de construção do componente soldado [1].

Para corrigir essas distorções é necessário prever peças com maiores dimensões, prolongadas operações de desempenho a quente com aplicação de cargas nas regiões deformadas e ainda aumentar o tempo de execução de outros processos de fabricação mais onerosos como a usinagem, para atender as tolerâncias dimensionais e geométricas das especificações de projetos. Em um cenário atual de estagnação da economia brasileira, é ainda mais clara a necessidade de redução das indústrias de bens de capital nos elevados custos com mão de obra, consumíveis e matéria prima gastos nas correções das distorções de soldagem, para ampliar margens de lucro, reduzir prazo e custo final para o cliente, garantido maior competitividade no mercado atual.

Para minimizar os efeitos das distorções de soldagem existem diferentes métodos e técnicas convencionais descritos na literatura técnico-científica como Kennedy [2], Okumura e Taniguchi [3], AWS Welding Handbook [4], entre outros, que são praticados nos setores produtivos para controlar estas distorções entre os quais pode-se destacar: utilização de dispositivos de fixação para travar as peças; aplicação de pré-deformações opostas ao sentido das distorções para restrição e equilíbrio das deformações; montagem componentes idênticos de forma geminada de tal forma que a soldagem possa ser balanceada em torno do eixo neutro; definição de sequências ótimas de soldagem que possibilitem a distribuição homogênea de calor sobre a peça; aplicação de pré e pós-aquecimento na soldagem; etc.

Além dos métodos convencionais de controle das distorções de soldagem existem também estudos sobre novos métodos de controle. Miranda e Bracarense [5], por exemplo, verificou a evolução da distorção angular em chapas de pequenas espessuras de aço baixo carbono utilizando refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono. A análise dos resultados mostrou que é possível utilizar o resfriamento da poça de fusão para redução da distorção angular. Com o crescimento dos métodos de simulação computacional de manufatura existem também diferentes trabalhos na literatura científica como Araújo [6], Locatelli [7], etc., que visam a previsão mais eficiente e eficaz das tensões residuais e distorções de soldagem através da análise pelo método de elementos finitos.

O Grupo DELP, empresa referência no Brasil do mercado de bens de capital, especializada em caldeiraria pesada, e que tem como principal processo de fabricação a soldagem, sente de forma acentuada os custos com as correções das distorções de soldagem, em função das fabricações de grande porte serem mais afetadas pelas distorções, visto o grande volume de solda depositado nessas estruturas. Atualmente, um dos projetos em execução pelo Grupo DELP é a fabricação de estruturas soldadas para componentes de turbinas hidroelétricas como tampas, rotores, flanges, rodas, anéis, como apresentado na Figura 1. Essas peças em sua maioria apresentam geometrias cilíndricas de grandes dimensões que são construídas basicamente a partir de anéis fabricados por soldagem de vários segmentos de chapas cortadas pelo processo de oxicorte, conforme apresentado nas Figuras 1a e 1b). Os impactos das distorções de soldagem no processo produtivo são nitidamente visualizados nas Figuras 1c e 1d).

Apesar dos vários métodos utilizados para prever e controlar as distorções de soldagem observa-se que o monitoramento das distorções de soldagem realizado nas indústrias e até mesmos na maioria dos testes de soldagem realizados em laboratórios, acontecem basicamente por medições antes e após a soldagem. Este método de monitoramento não permite acompanhar a de forma contínua a evolução das distorções ao longo do processo de soldagem. Sendo assim, a eficácia do método de controle adotado para previsão e redução das distorções de soldagem será conhecida somente após finalizado o processo de solda. Miranda e Bracarense [5] e Rogana [8],

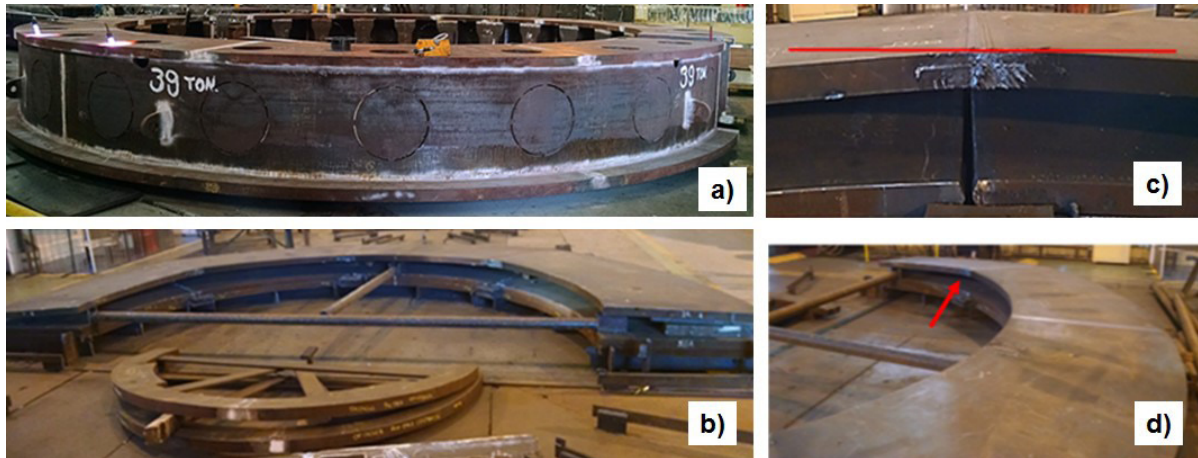


Figura 1. Estruturas soldadas e anéis segmentados em processo de fabricação.

conseguiram em seus trabalhos monitorar o processo de evolução das distorções durante a soldagem de um cordão sobre pequenas chapas de aço engastadas, utilizando apenas uma fonte de laser fixa na extremidade livre da chapa e projetando o feixe luminoso em um anteparo milimetrado. Com a deformação da chapa durante a soldagem o feixe luminoso desloca-se sobre o papel milimetrado permitindo assim acompanhamento contínuo das distorções.

Pereira e Bracarense [9], comprovou a eficiência da metodologia de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para chapas de maiores espessuras com juntas de penetração total. Um eficiente monitoramento contínuo das distorções de soldagem durante o processo permite a tomada de decisões, tais como alterar a sequência de soldagem, aumentar o número de restrições da peça sem interromper o processo de soldagem, entre outras.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar as distorções ocorridas durante a soldagem de dois modelos de anel segmentado em escala reduzida utilizando a metodologia de monitoramento contínuo da evolução das distorções de soldagem com sensores a laser. Para verificação experimental foram realizadas a soldagem e o monitoramento das distorções de três anéis segmentados em escala reduzida com geometria da junta em “X” e três anéis segmentados em escala reduzida com geometria da junta em “V” com características semelhantes aos que estão sendo fabricados pelo Grupo DELP.

2. Materiais e Métodos

A definição dimensional do modelo reduzido do anel segmentado foi realizada levando em consideração espessura de chapas comerciais disponíveis no mercado, dimensões máximas da mesa de trabalho e a manutenção das proporções dimensionais do modelo real. Baseado nestas condições de contorno o modelo reduzido dos corpos de prova (CP) do anel segmentado, apresenta uma redução de 9,5 vezes, sendo ainda necessário reduzir pela metade o ângulo do segmento para que o corpo-de-prova não extrapolasse o tamanho da mesa. Portanto, os corpos de prova utilizados neste experimento foram dois tipos de anel segmentado com ângulo de $90^\circ \pm 2^\circ$, raio externo de 550 ± 4 mm, raio interno de 400 ± 4 mm, espessura de $16 \pm 0,3$ mm e peso de aproximadamente 15 kg, sendo o primeiro tipo fabricado com geometria da junta em “X” (CX11, CX12 e CX13) e o segundo com geometria da junta em “V” (CV12, CV13 e CV14) conforme apresentado na Figura 2. Os corpos de prova foram fabricados pelos processos de corte a plasma e usinagem dos chanfros a partir de chapas de aço de baixo carbono ASTM A572 GR.50.

Para a execução das soldagens dos seis corpos de prova foi utilizado um conjunto do robô antropomórfico com 6 graus de liberdade modelo SK 6 e uma fonte Moto Arc 450 ambos da marca MOTOMAN. Os parâmetros de soldagem deste experimento foram baseados num procedimento de soldagem (EPS) qualificado pelo Grupo DELP para o projeto em questão. Foi utilizado o processo GMAW com arame sólido ER70S-6, diâmetro 1,2 mm, mistura de gás com 75% Argônio e 25% CO_2 . Os parâmetros de soldagem para cada passe de solda que compõe as duas juntas conforme ilustrado na Figura 2, estão apresentados na Tabela 1.

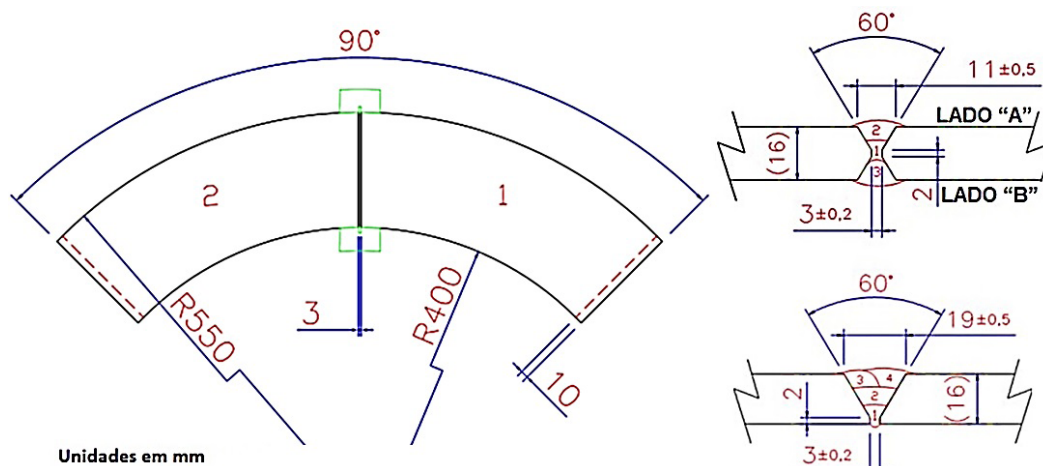


Figura 2. Modelos em escala reduzida dos corpos de prova dos anéis segmentado.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem.

PARÂMETROS	JUNTA X			JUNTA V				
	INCERTEZA	1º PASSO RAIZ	2º PASSO ACABAMENTO	3º PASSO ACABAMENTO	1º PASSO RAIZ	2º PASSO REFORÇO	3º PASSO ACABAMENTO	4º PASSO ACABAMENTO
TENSÃO	± 0,5 V	22.1	24.2	24.2	22.1	24.2	24.2	24.2
CORRENTE	± 3 A	235	280	280	235	280	280	280
STICK OUT (mm)	± 0,1 mm	13	13	13	17	13	13	13
VELOCIDADE DE SOLDAGEM	± 0,3 mm/s	5	3.7	3	5	3	3.7	3.7
VAZÃO DE GÁS	± 0,5 l/min	18	18	18	18	18	18	18
AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO	± 0,3 mm	4	-	-	4	-	-	-
FREQUENCIA DE OSCILAÇÃO (Hz)	-	2	-	-	2	-	-	-
TEMPERATURA ENTRE PASSES	± 10 °C	170	300	300	170	300	300	300
APORTE TÉRMICO (kJ/mm)	-	0.93	1.65	2.03	0.93	2.03	1.65	1.65

1 - PARA SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ UTILIZAR ANTEPARO CERÂMICO (BACK).

2 - TÉCNICA DE SOLDAGEM EMPURRANDO.

O sistema de monitoramento das distorções de soldagem utilizando sensores a laser (SMCDS), consiste no monitoramento indireto do ângulo de distorção da peça através da movimentação de pontos refletidos num anteparo translúcido pelos feixes luminosos dos sensores a laser apoiados sobre a superfície da peça. Com a progressão das distorções durante a soldagem, os pontos refletidos movimentam-se pelo anteparo proporcionalmente as deformações ocorridas na peça, sendo filmados pelo lado oposto ao anteparo translúcido. A discretização dessa filmagem geram frames com imagens do plano do anteparo contendo o posicionamento dos pontos em função do tempo. Utilizando a regressão linear desses pontos é possível calcular o ângulo de inclinação que representa a distorção angular ocorrida na peça durante a soldagem e elaborar gráficos que representam o comportamento das distorções em qualquer instante do processo.

Para garantir que o movimento desses pontos pelo anteparo seja proporcional as deformações ocorridas na peça, foi realizada a montagem de uma mesa de trabalho com pontos de apoio planos e o anteparo translúcido precisamente perpendiculares entre si. O conjunto mesa e anteparo foi sincronizado com o sistema de coordenada cartesiana do manipulador robótico, permitindo que espaço cartesiano tridimensional do sistema seja conhecido

com exatidão. O sistema de monitoramento contínuo de distorções de soldagem com sensores lasers, apresentado na Figura 3 é composto por: (a) mesa de trabalho rígida com niveladores, (b) anteparo translúcido com niveladores, (c) robô, (d) sistema de alimentação elétrica para lasers, (e) sensores laser com suporte para fixação, (f) proteções térmicas para os lasers e sistema de alimentação elétrica, (g) equipamento de filmagem digital 13 megapixels e (i) proteções negras para auxiliar a filmagem.

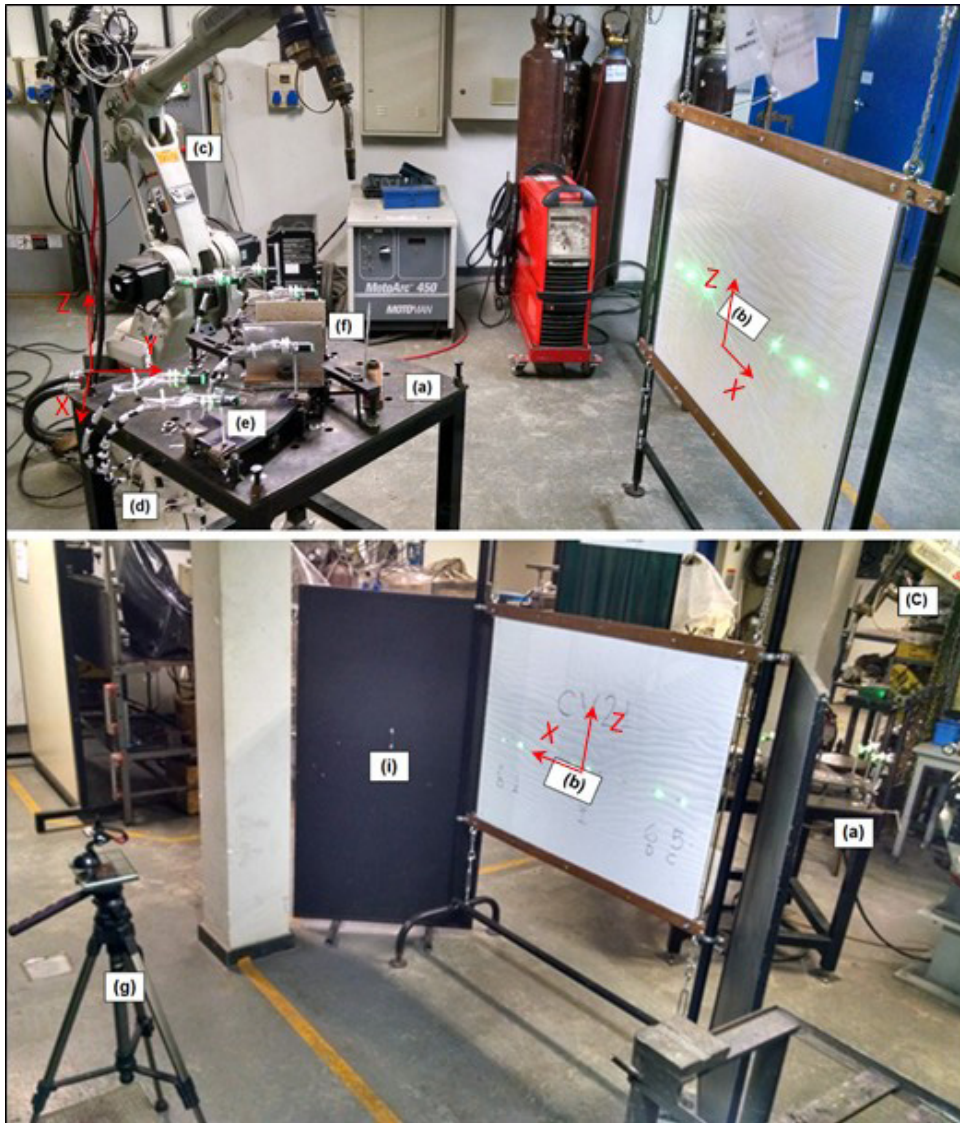


Figura 3. Sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser.

O anteparo é composto por um suporte de estrutura tubular, um painel com transparentes, um papel branco milimetrado e esticadores que ligam o painel de vidro a estrutura tubular. No papel branco foi impresso em ambos os lados uma malha quadriculada de 10×10 mm e os pontos de referência para ajuste da mesa de trabalho com o painel e alinhamento dos feixes luminosos emitidos pelos sensores a laser apoiados sobre o corpo de prova.

O alinhamento e perpendicularidade da mesa de trabalho com o painel do anteparo foi realizado utilizando pêndulos (linha com peso na ponta) e trena. Para verificar a perpendicularidade do painel com a mesa trabalho, foi utilizado o inclinômetro digital e a configuração de um triângulo retângulo entre as peças (Figura 4).

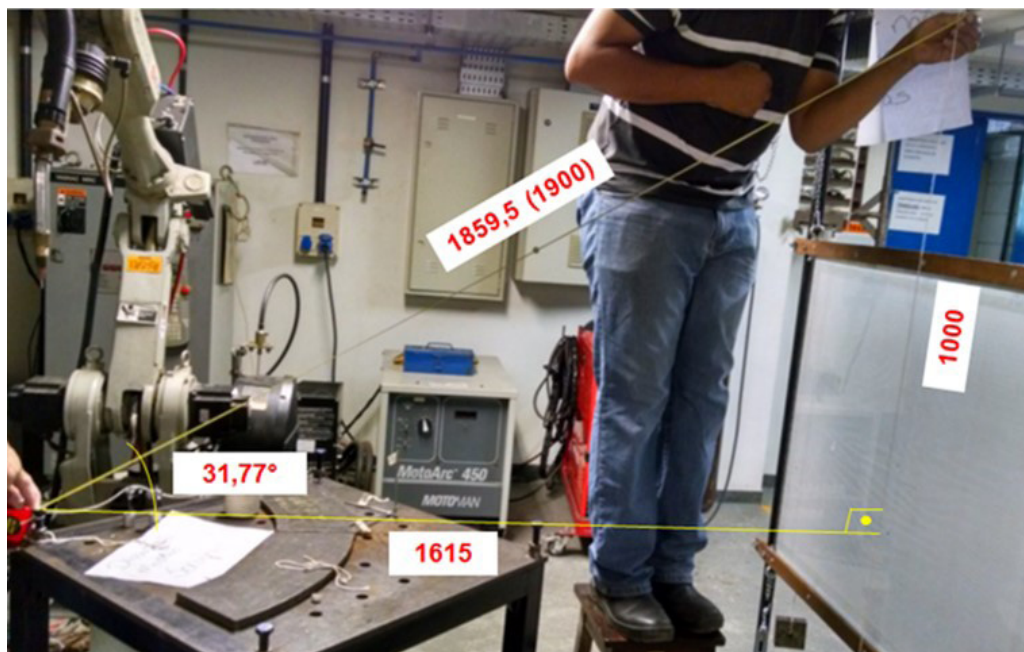


Figura 4. O alinhamento entre os pontos de referência da mesa de trabalho e do painel.

Assim os erros de montagem da mesa e do anteparo são: Planicidade da mesa de trabalho 0,5 mm; Posicionamento da mesa em relação ao anteparo $\pm 0,5$ mm; Perpendicularidade do anteparo em relação a mesa $\pm 0,3^\circ$. Todo o rigor utilizado na montagem da mesa de trabalho e anteparo de reflexão visou eliminar as variações dimensionais que podem interferir na avaliação e conclusões sobre a eficiência do monitoramento das distorções de soldagem utilizando sensores lasers.

A peça é posicionada sobre a mesa trabalho, observando o pleno apoio sobre os batentes de nivelamento e encosto para garantir o posicionamento das juntas sempre no mesmo local. Para garantir a repetibilidade do posicionamento dos sensores a laser é realizado uma marcação sobre a superfície do corpo-de-prova utilizando o braço robótico com uma ferramenta de ponta para traçagem. Quatro sensores a lasers foram posicionados em cada lado do corpo-de-prova nos locais demarcados e os feixes luminosos foram alinhados com pontos de referência existente no anteparo, conforme apresentado nos desenhos esquemáticos das Figuras 5 e 6.

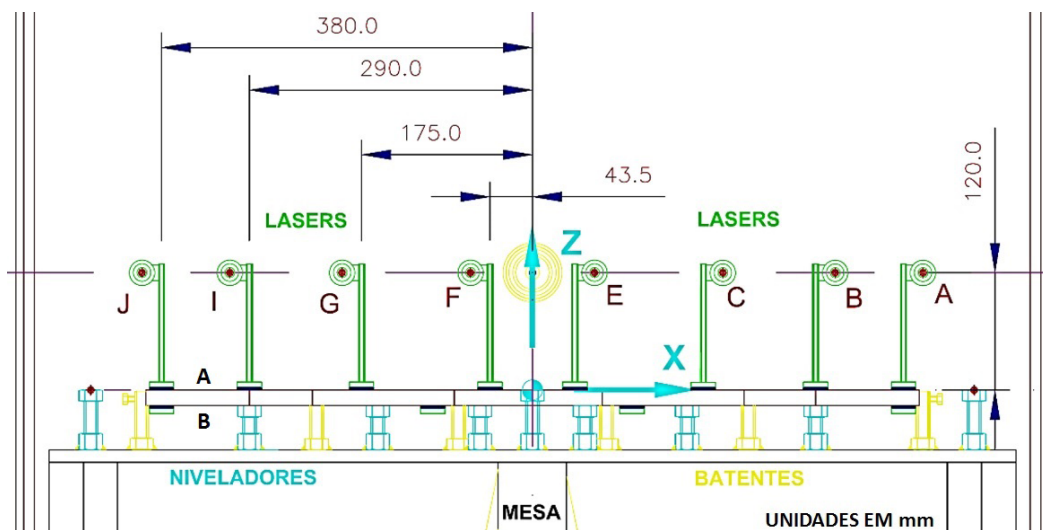


Figura 5. Representação esquemática da vista frontal do posicionamento dos sensores a laser sobre a peça.

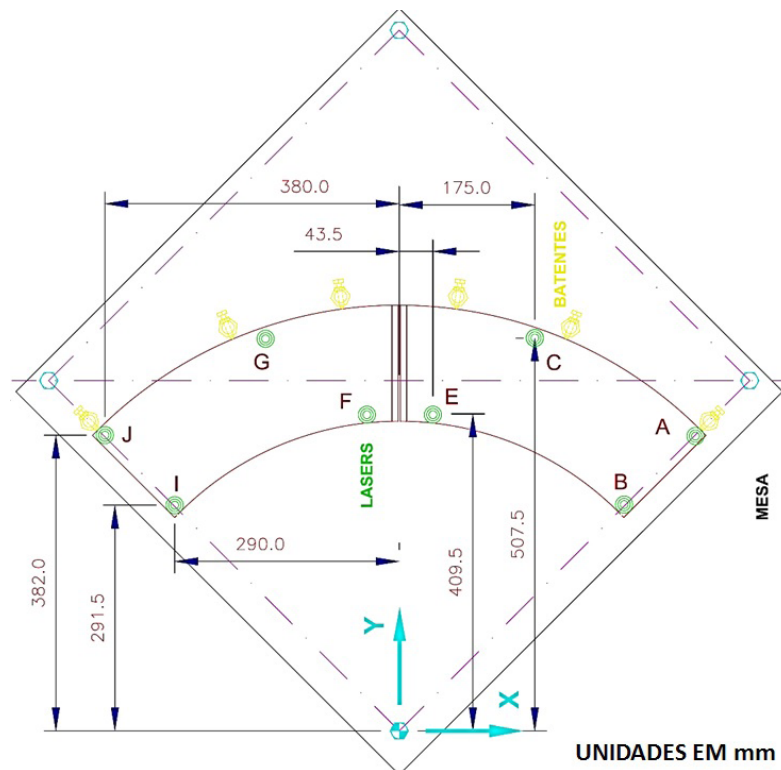


Figura 6. Representação esquemática da vista superior do posicionamento dos sensores a laser sobre a peça.

Conforme pode ser observado na Figura 6, quatro sensores (A, B, I, J) foram posicionados nas extremidades do corpo de prova, dois sensores (E, F) foram posicionados o mais próximo possível da junta sem que a temperatura da região interferisse no funcionamento dos sensores e dois sensores (C, G) foram posicionados em pontos intermediários aos demais sensores. A distribuição dos sensores conforme descrito acima visa aumentar a precisão da medição, pois serão considerados quatro pontos para cada lado do corpo de prova para o cálculo da distorção angular.

Apesar do corpo de prova utilizado neste experimento apresentar uma geometria de um segmento de anel, a projeção dos pontos refletidos no painel representara a distorção real do corpo de prova, conforme demonstrado por Pereira e Bracarense [9], que comparou as medições realizadas com instrumentos de medição convencionais e as medições com o sistema de monitoramento contínuo com sensores a laser.

Após alinhamento dos lasers, posicionou os anteparos de proteção e o equipamento de filmagem. A soldagem é realizada sem nenhuma restrição sobre o corpo de prova, sendo iniciada logo após iniciada filmagem e prosseguindo durante período de resfriamento até a peça atingir uma temperatura abaixo de 110° .

Os programas de soldagem executados foram configurados com os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 1. As sequências de soldagem foram configuradas conforme apresentado na Figura 2, sempre no sentido do raio interno para o raio externo do anel segmentado. Foi configurado ainda nos programas de soldagem os intervalos de tempo, que garantiram uma temperatura de $300^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{C}$ entre passes.

Para os corpos de prova com junta em "X", a sequência de soldagem foi realizada com dois passes de solda do lado "A" (face superior). Vira-se a peça, posiciona novamente os sensores a laser, dividindo a distorção proveniente da soldagem do lado "A" de forma equidistante para o lado esquerdo e direito do corpo de prova. Verifica a temperatura de interpasso e realiza o terceiro passe de solda do lado "B" (face inferior).

Os vídeos foram discretizados e os *frame* correspondentes aos instantes de 0, 5, 10, 15, 20 e/ou 30 minutos foram analisados com o auxílio de um software do tipo CAD. Cada *frame* foi exportado para o ambiente do software sempre mantendo o ponto de origem no canto inferior esquerdo da imagem. A imagem teve seu tamanho ajustado

pela ferramenta de escala do software, até que as distâncias entre os pontos de referências no painel atingissem as medidas reais. Utilizando as ferramentas de precisão do software, foram realizadas as medições do ponto de origem da imagem até o centro de cada ponto (Figura 7). A diferença entre os valores de posicionamento dos pontos em cada *frame* corresponde aos valores de deslocamentos de cada ponto em função do tempo.

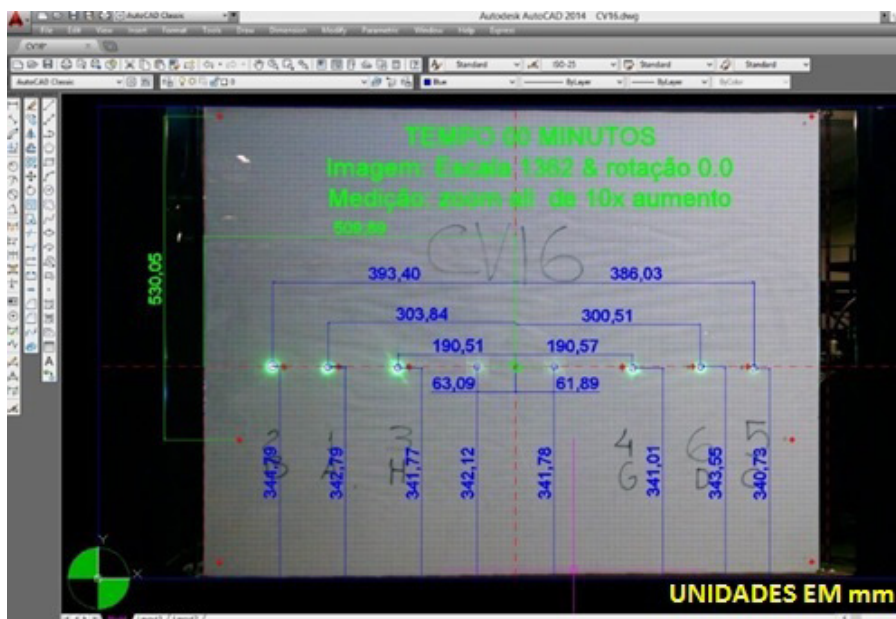


Figura 7. Medição dos pontos refletidos utilizando software tipo CAD para o *frame* inicial.

O ângulo de distorção medido pelo sistema utilizando sensores a laser é igual ao ângulo de inclinação das duas retas obtidas em cada *frame* através da regressão linear dos 4 pontos monitorados em cada lado corpo-de-prova. O processamento do cálculo de regressão linear e dos gráficos foram realizados com o auxílio do software Excel.

A distorção angular que ocorre na peça 2 (lado esquerdo) do corpo-de-prova foi denominada $-\theta_{x/2}$ e a distorção angular que ocorre na peça 1 (lado direito) foi denominado $+\theta_{x/2}$, conforme representado esquematicamente na Figura 8. O valor total da distorção angular será a soma dos módulos dos valores das distorções angulares encontrado em cada lado do corpo-de-prova conforme apresentado na Equação 1.

$$\theta_x = |-\theta_x / 2| + |+\theta_x / 2| \tag{1}$$

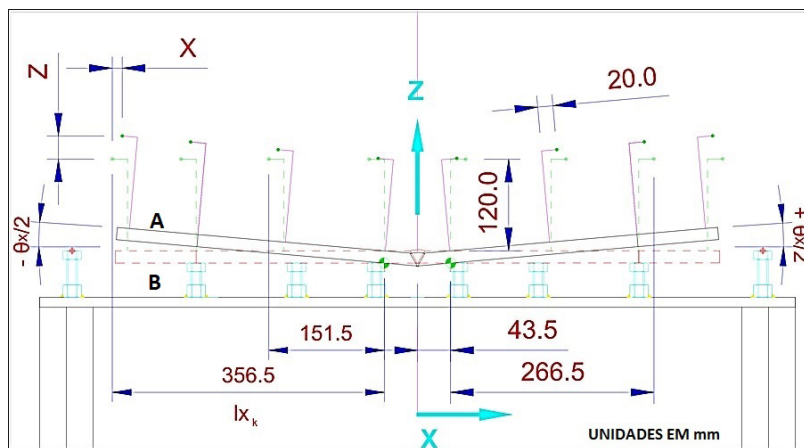


Figura 8. Representação esquemática das distorções de soldagem do corpo-de-prova.

3. Resultados e Discussão

Os programas de soldagem executados foram configurados com os parâmetros apresentados na Tabela 1 e sequência de soldagem no sentido do raio interno para o raio externo dos corpos de prova. Foi configurado ainda no programa de soldagem, intervalos de tempo que garantiram uma temperatura de $300^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{C}$ entre passes.

Para os corpos de prova com junta em “V” o tempo total de soldagem foi de 8,8 minutos sendo que o monitoramento das distorções prosseguiu durante o resfriamento até o instante de 30 minutos. Para os corpos de prova com junta em “X” o tempo total de soldagem foi de 2,1 minutos para soldagem da junta do lado “A” e de 0,9 minutos para soldagem da junta do lado “B”, sendo que o monitoramento das distorções prosseguiu durante o resfriamento até o instante 20 minutos. A Figura 9 apresenta os corpos de prova após soldagem.

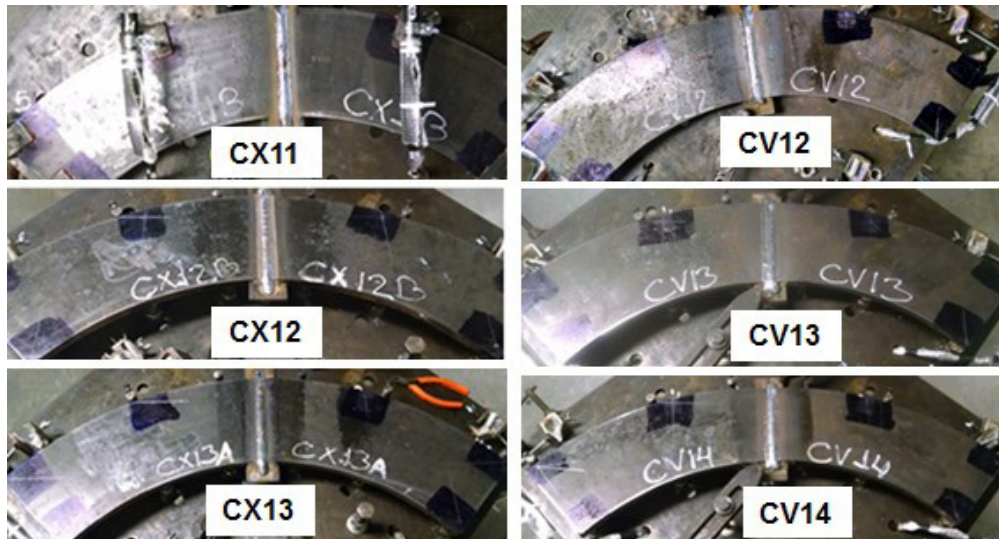


Figura 9. Soldagem dos corpos de prova.

Para verificar a integridade das juntas soldadas foi realizado ensaio metalográfico de macrografia retirando duas amostras a 20 mm do início e final do cordão de solda dos corpos de prova CX13 e CV13. As amostras foram cortadas, lixadas (lixas 80 a 1200) e atacadas com Nital 5%. As fotografias foram feitas com uma câmera digital de 13 megapixel sobre um suporte fixo para garantir a mesma posição na aquisição imagem. Conforme pode ser observado na Figura 10, as juntas soldadas não apresentaram descontinuidades, portanto, as soldagens foram consideradas satisfatórias.

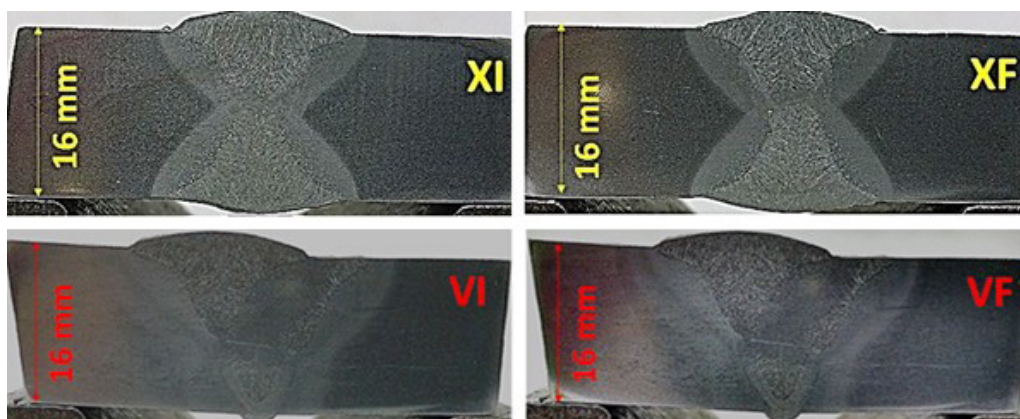


Figura 10. Macrografias da secção transversal do cordão de solda.

Conforme descrito anteriormente, o monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para o corpo-de-prova de um anel segmentado apresenta basicamente em quatro etapas: aquisição de dados pela filmagem dos pontos luminosos em movimento pelo anteparo; identificação dos valores de deslocamento de cada ponto pelo plano do anteparo em diferentes intervalos de tempo de tempo; cálculos de regressão linear para determinar o valor da distorção angular e apresentação do valores das distorções de soldagem em função do tempo.

Na primeira etapa do monitoramento contínuo das distorções de soldagem foram identificados os valores de deslocamento de cada ponto refletido no painel do anteparo pelos sensores a laser. Esta identificação foi realizada nas imagens geradas pela discretização do vídeo, utilizando os frames correspondente aos intervalos de 0, 5, 10, 15, 20 e/ou 30 minutos com auxílio do software Auto CAD conforme descrito na metodologia. Como exemplo, a Figura 11 permite visualizar em três dimensões, o deslocamento dos pontos refletidos no painel do anteparo em função do tempo para o corpo de prova CV12.

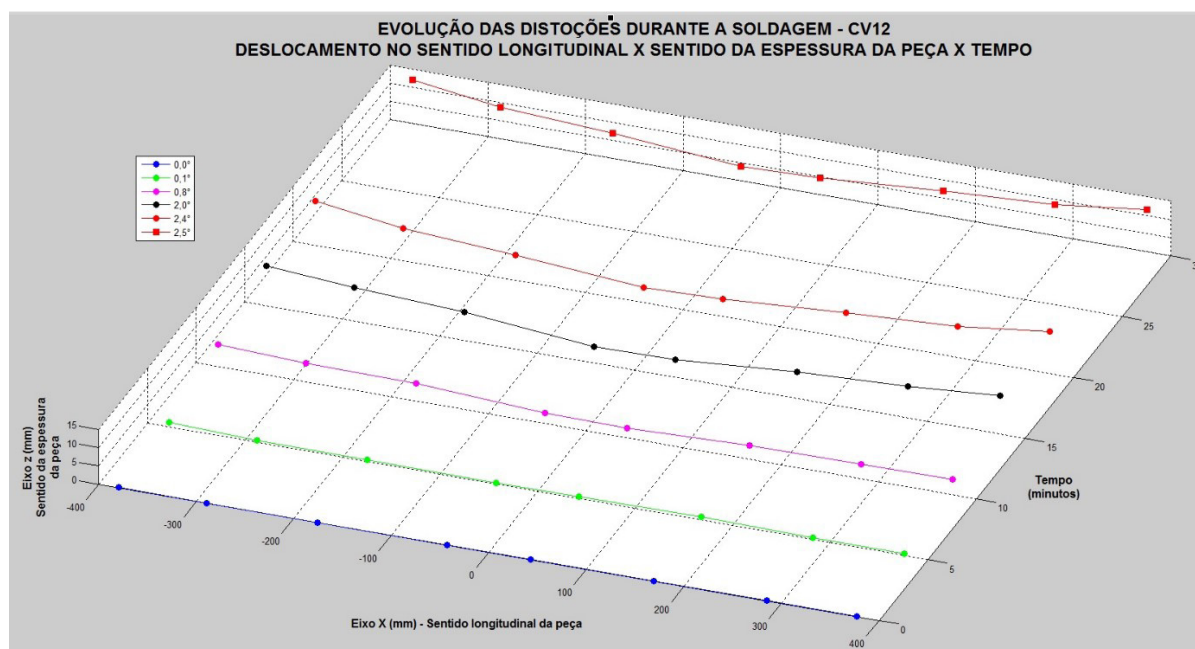


Figura 11. Representação em três dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CV12.

Conhecendo a localização de cada ponto refletido no painel, é possível determinar as retas que melhor se ajustam a estes conjuntos de pontos através da regressão linear. A inclinação de cada reta obtida pela regressão linear corresponde a distorção angular do corpo de prova, sendo a distorção total dada pela soma do módulo dos valores de distorção angular encontrado em cada lado do corpo de prova conforme descrito pela Equação 1. Os cálculos de regressão linear foram processados com o auxílio do software Excel. Como exemplo, o gráfico da Figura 12 apresenta as retas e os coeficientes de regressão linear para cada intervalo de tempo para o corpo de prova CV12. Cada reta possui um conjunto de quatro pontos que corresponde a quantidade de sensores a laser posicionados em cada lado do corpo de prova.

Com os valores de distorções angulares para diferentes intervalos de tempo, foi possível elaborar os gráficos de distorção em função do tempo que serão apresentados abaixo. Os marcadores com formatos quadrados com ligações contínuas entre os pontos representam a distorção total (θ_x) e os marcadores com formatos circulares e triangulares com ligações tracejadas entre os pontos representam as distorções do lado direito ($+\theta_x/2$) e esquerdo ($-\theta_x/2$), respectivamente, de cada corpo de prova.

Os gráficos da Figura 13 apresentam a evolução das distorções de soldagem em função do tempo para os corpos de prova com geometria de junta em “X”. As linhas verticais tracejadas nos tempos de 2,1 e 0,9 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda para o lado “A” e lado “B” respectivamente. Conforme

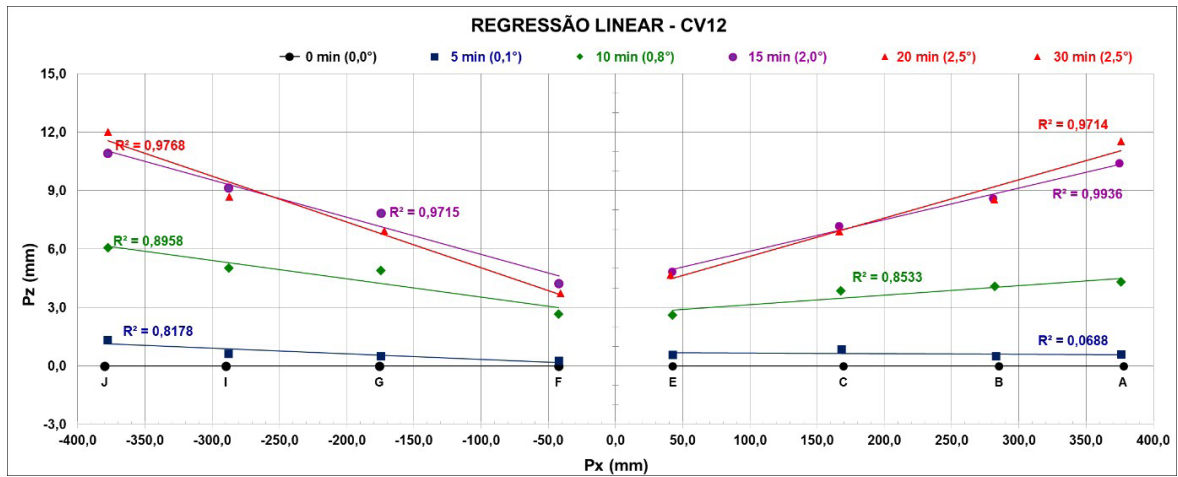


Figura 12. Representação das retas da regressão linear.

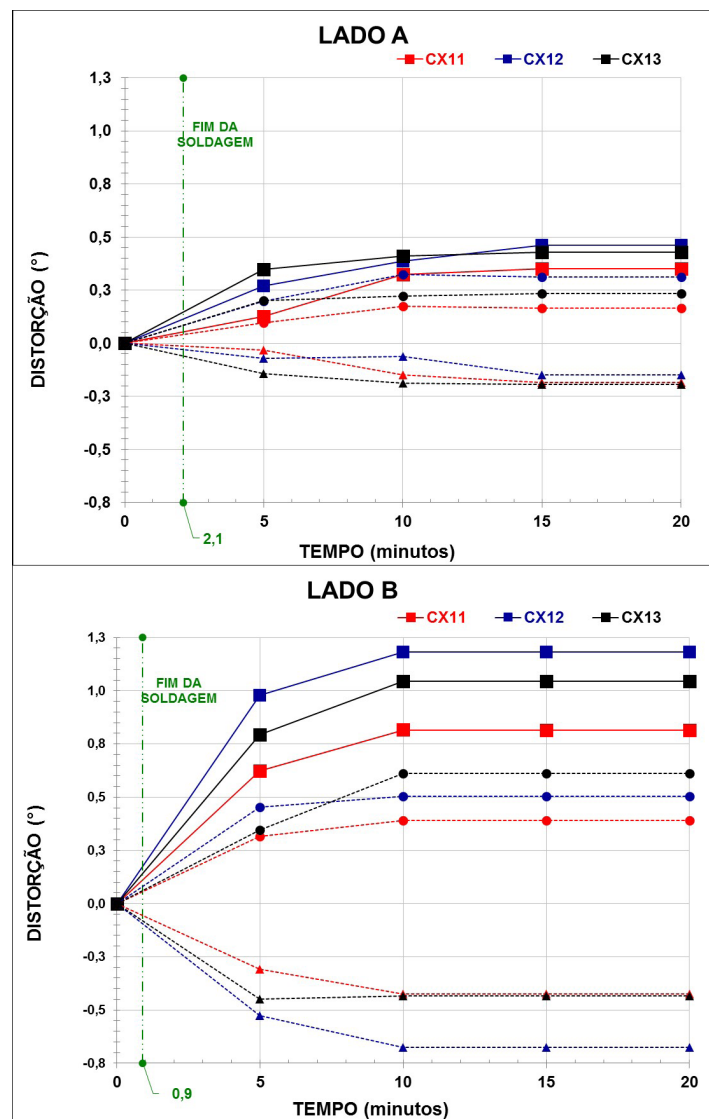


Figura 13. Evolução das distorções de soldagem em função do tempo para os CP com junta em “X”.

pode ser observado, os valores de distorção total entre os corpos de prova, oscilaram entre 0,3° e 0,4° para as soldagens do lado “A”, essas pequenas variações confirmam a correta preparação e montagem dos corpos de prova assim com repetibilidade dos testes experimentais.

Para as soldagens do lado “B” os valores de distorção total entre os corpos de prova oscilaram de 0,8° a 1,2°, apresentaram uma maior diferença (0,4°), que pode ser explicada pela diferença de temperatura apresentada no início da soldagem do terceiro passo de solda, em função do tempo gasto para virar a peça e montar novamente os sensores a laser.

Os gráficos da Figura 14 apresentam os valores médios das evoluções das distorções de soldagem em função do tempo entre os três corpos de prova com geometria de junta em “X”. As barras de erros apresentam os valores de desvio padrão para cada ponto. Analisando a evolução média das distorções durante o processo de soldagem, observa-se que a distorção para soldagem do lado “A” ocorreu de forma constante a uma taxa de aproximadamente de 0,2° para cada 5 minutos. Para a soldagem do lado “B”, 80% do valor da distorção ocorreu nos primeiros 5 minutos da soldagem.

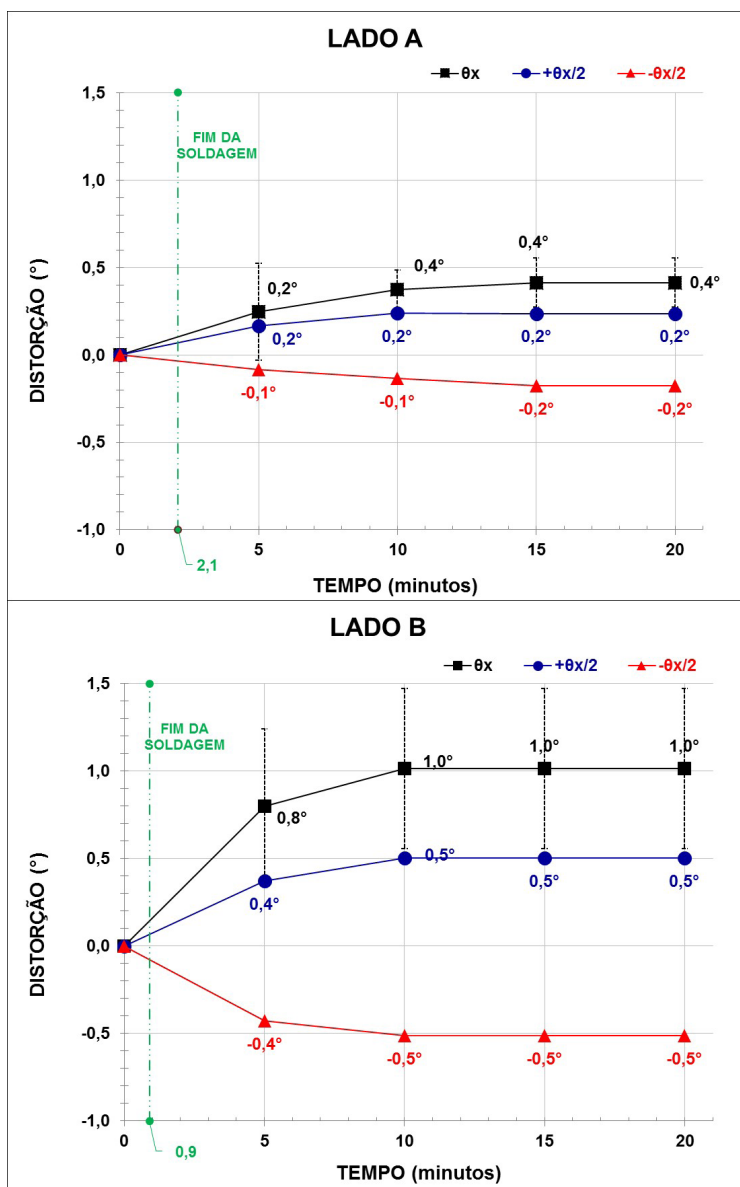


Figura 14. Evoluções médias das distorções de soldagem para os CP com junta em “X”.

É possível verificar também que mais de 70% da distorção angular total ocorreu após a extinção do arco para ambos os lados. Este resultado está coerente com a afirmação de Modenesi et al. [10] que cita as deformações de soldagem ocorreram devido as deformações plásticas localizadas, que ocorre no final do processo de soldagem. Pode-se afirmar ainda que após o tempo de 10 minutos houve completa estabilização das distorções de soldagem. Conforme apresentado na Tabela 1, na soldagem do chanfro do lado “A” foram utilizados dois passes de solda que apresentam menores aportes térmico que o passe de solda utilizado para soldar o lado “B”. Os maiores valores de distorção para o lado “B”, permite observar claramente a grande influência dos parâmetros de soldagem e da quantidade de passes de solda sobre a distorção angular.

A distorção média final para os corpos de prova com junta em “X”, é obtida pela diferença entre a distorção média ocorrida no lado “B” e a distorção média ocorrida no lado “A”, pois estas duas distorções apresentam sentidos opostos quando a peça é virada para soldagem em ambos os lados. Considerando os valores médios apresentados nos gráficos da Figura 14, o valor médio de distorção final para o corpo de prova com junta em “X” é de 0,5°.

O gráfico da Figura 15 apresenta as evoluções das distorções de soldagem em função do tempo para os corpos de prova com geometria de junta em “V”. A linha vertical tracejada no tempo 8,8 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda. Os marcadores com formatos quadrados representam a distorção total (θ_x) e os marcadores com formatos circulares e triangulares representam as distorções do lado direito ($+\theta_x/2$) e esquerdo ($-\theta_x/2$), respectivamente, de cada corpo de prova.

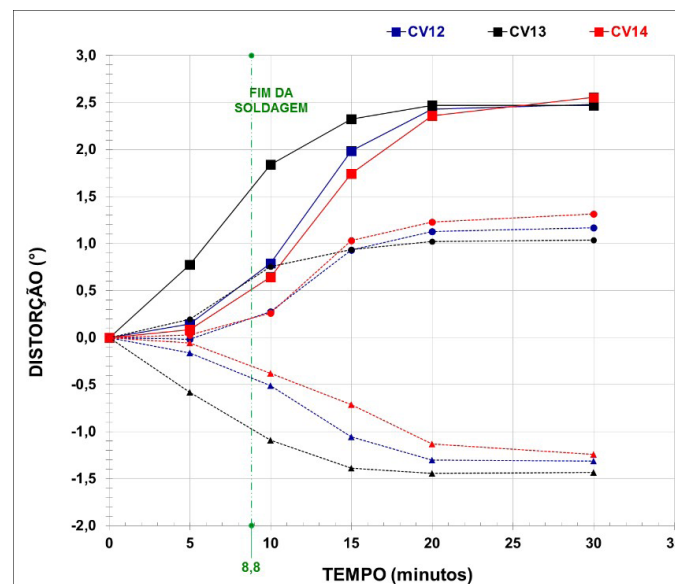


Figura 15. Evolução das distorções de soldagem em função do tempo para os CP com junta em “V”.

Conforme pode ser observado, existe uma maior dispersão nos valores de distorção entre as peças no início do processo que tendem a diminuir durante o resfriamento. Os valores de distorção total para os corpos de prova oscilaram entre 2,4° e 2,6°, essa pequena variação confirma a correta preparação e montagem dos corpos de prova assim com repetibilidade dos testes experimentais.

O gráfico da Figura 16 apresenta os valores médios das evoluções das distorções de soldagem em função do tempo entre os três corpos de prova com geometria de junta em “V”. As barras de erros apresentam os valores de desvio padrão para cada ponto. Analisando a evolução média das distorções durante o processo de soldagem, observa-se que as retas entre os intervalos de tempo de 5 e 15 minutos apresentam maior inclinação, neste intervalo de tempo o valor distorção angular total aumentou em 1,7° (de 0,3° a 2,0°) o que representa 67% da distorção média total. É possível verificar também que mais de 60% da distorção angular total ocorreu após a extinção do arco. Após 12 minutos finalizada a soldagem a distorção praticamente estabilizou-se, havendo apenas 4% de alteração no valor de distorção total nos dez minutos finais de resfriamento dos corpos de prova.

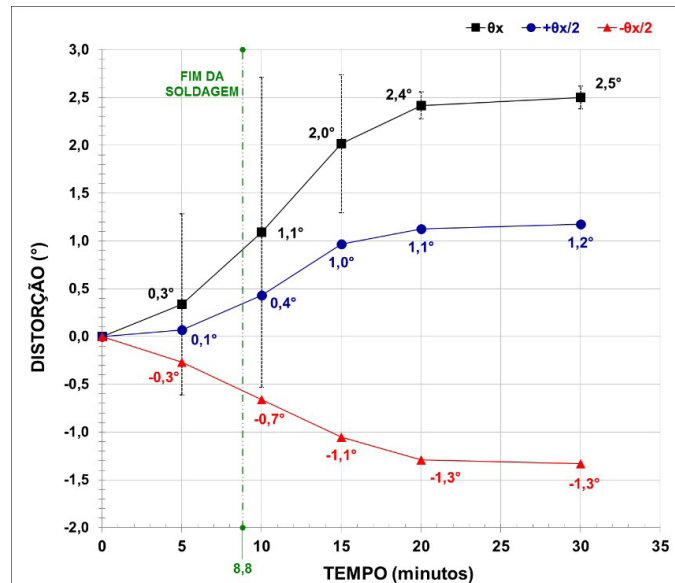


Figura 16. Evoluções médias das distorções de soldagem para os CP com junta em “V”.

O gráfico da Figura 17 resume os resultados das distorções totais de soldagem em função do tempo para os corpos de prova com junta em “V” e “X”. As barras de erros para cada ponto do gráfico apresentam os erros máximos para um intervalo de confiança de 95% considerando uma distribuição de t Student [11]. Este gráfico permite verificar de forma clara a influência do tipo de chanfro, nos valores de distorção de uma peça. Comparando o valor de distorção média para os dois tipos de corpo de prova, observa-se que as juntas que apresentaram maior volume de solda também apresentam maiores valores de distorções. Estes resultados confirmam a influência do tipo junta e quantidade de passes de solda nos valores de distorção angular de soldagem conforme descrito por Okumura e Taniguchi [3].

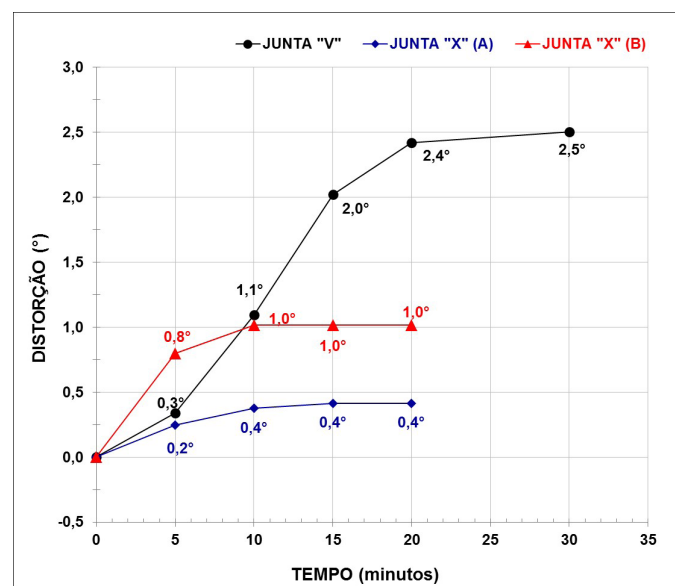


Figura 17. Comparação entre os valores de evolução média das distorções de soldagem para os dois tipos de CP.

4. Conclusões

Foi confirmado que as soldagens realizadas nas juntas em “X” apresentam menores valores de distorções que as soldagens realizadas nas juntas em “V”. Essa diferença pode ser explicada pelo menor volume de solda da junta simétrica com chanfro em “X”, e principalmente pela soldagem que é realizada nos dois lados do corpo de prova garantido a similaridade na quantidade de material depositado entre as faces superior e inferior da chapa que afeta grandemente a distorção angular conforme descrito por Okumura e Taniguchi [3].

Pelos testes experimentais é possível afirmar para os corpos de provas utilizados nestes experimentos que pelo menos de 60% da distorção de soldagem ocorre após a extinção do arco durante o resfriamento peça, e que abaixo da temperatura de 110 °C praticamente não houveram variações significativas nos valores de distorção.

Pelos testes experimentais é possível também afirmar que a técnica de monitoramento das distorções com sensores a laser é viável para utilizar na indústria e laboratórios de soldagem, porém faz-se necessário otimizar o processamento dos dados obtidos pela filmagem, permitindo um monitoramento instantâneo durante o processo de soldagem.

Esta técnica de monitoramento permite criar um bando de dados sobre a evolução das distorções durante o processo de soldagem. Esta informação será útil para definir e monitorar de forma mais eficiente o melhor método de controle das distorções, reduzindo os custos de fabricação de estruturas soldadas.

Além disso, a informação de forma contínua das distorções de soldagem poderá também auxiliar na calibração experimental de modelos numérico-computacional, ou até mesmo, para realimentar a trajetória de um robô identificando deformações para realizar correções na sequência de soldagem garantindo também menores distorções.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo DELP pela doação dos corpos-de-prova e ao Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação pelo apoio na execução dos testes experimentais.

Referências

- [1] Amante DM. Imperfeições de fabricação na construção naval e offshore [monografia]. Rio de Janeiro: Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2006.
- [2] Kennedy GA. Welding technology. Indianapolis: The Bobbs-Merrill; 1979. Welding heat effects; p. 96-111. cap. 4.
- [3] Okumura T, Taniguchi C. Engenharia de soldagem e aplicações. São Paulo: LTC; 1982. 461 p.
- [4] American Welding Society – AWS. Welding Handbook: welding science and technology. Miami: American Welding Society; 2001. Residual stress and distortion; p. 358-397. vol. 1.
- [5] Miranda LH, Bracarense AQ. Redução das distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço de baixo carbono com a utilização da refrigeração forçada da poça de fusão. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. 2007;4(2):17-20. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00402004>.
- [6] Araújo DB. Estudo de distorções em soldagem com técnicas numéricas e de otimização [tese de doutorado]. Uberlândia: Escola de Engenharia Mecânica, Universidade federal de Uberlândia; 2012.
- [7] Locatelli FR. Modelagem do campo de temperaturas e distorções de uma junta do tipo T soldada pelo processo GMWA [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2014.
- [8] Rogana WG, Bracarense AQ. Projeto de um simulador dinâmico de carregamento para minimização de distorções e tensões térmicas e residuais geradas em cordões de solda. In: Anais do 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; 1999; Águas de Lindóia, SP. Rio de Janeiro: ABCM; 1999.
- [9] Pereira JH, Bracarense AQ. Monitoramento contínuo das distorções ocorridas na soldagem GMAW robotizado de um modelo em escala reduzida de anel segmentado utilizando sensores a laser. In: Anais do 41º Congresso Nacional de Soldagem; 2015; Salvador, BA. Moema: ABS; 2015.
- [10] Modenesi PJ, Marques PV, Santos DB. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG; 2012 [acesso em 22 maio 2014]. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>.
- [11] Tavares M. Estatísticas aplicada à Administração Pública. Florianópolis: Sistema Universidade Aberta do Brasil; 2011. 202 p.