

Estudo experimental das deformações residuais oriundas do processo de soldagem

Experimental study of residual deformations derived from the welding process

Horácio Delgado Júnior^{1,2}

Alexandre Alvarenga Palmeira^{1,2}

Alexandre Fernandes Habibe^{1,2}

Roberto de Oliveira Magnago^{1,2}

Artigo
Original

Original
Paper

Palavras-chave

Estudo experimental

Deformações residuais

Processo de soldagem

Resumo

Neste trabalho, fez-se em estudo experimental das deformações residuais oriundas do processo de soldagem. Deste estudo conclui-se que as deformações permanentes máximas ocorrem no início do processo de soldagem. As deformações apresentaram-se heterogênea ao longo do comprimento da chapa. Os resultados aqui apresentados foram bastante coerentes e foram confirmados nos ensaios. O procedimento experimental apresentado neste trabalho não se mostrou eficiente, pois é difícil e pode apresentar problemas de precisão.

Abstract

In this work, we made an experimental study of residual strains arising from the welding process. This study concluded that the maximum permanent deformations occur early in the welding process. The deformations were presented heterogeneous along the length of the plate. The results presented here were quite consistent and were confirmed in tests. The experimental procedure presented in this paper was not efficient, it is difficult and may have accuracy problems.

Keywords

Experimental study

Residual deformations

Welding process

¹ UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda

² UERJ/FAT – Universidade Estadual do Rio de Janeiro / Faculdade de Tecnologia

1. Introdução

Podemos notar que existe sempre alguma deformação e tensão em toda peça soldada não importando o tipo do processo utilizado. Uma parte desta deformação será associada com tensões residuais, e outra com deformações permanentes oriundas do próprio processo de soldagem. Cada procedimento de soldagem apresenta um comportamento diferente quanto as tensão e deformações dependendo dos parâmetros do processo tais com: temperatura, intensidade da corrente elétrica, velocidade, vazão de gás, temperatura de pré-aquecimento, etc. Devido ao aquecimento localizado não-uniforme, tensões térmicas complexas e distorções ocorrem durante a soldagem. A temperatura associada ao tempo varia a intensidade das tensões residuais inerentes ao processo, pois em certos casos pode introduzir no conjunto um recozimento. Assim a tensão residual pode variar de valores próximos de zero até o limite de escoamento a temperatura ambiente. As tensões residuais elevadas podem causar trincas, instabilidades locais (flambagem) e a redução da resistência a fadiga. Contrariamente ao que se poderia pensar, é um dos problemas mais complexos da soldagem. Neste trabalho será apresentado um estudo experimental das deformações residuais oriundas do processo de soldagem.

2. Tensões térmicas residuais

As tensões residuais são esforços internos auto-equilibrantes, desta maneira elas atuam no corpo sem a necessidade de aplicação de esforços externos, tais como forças ou momentos.

Durante a soldagem, um aporte de calor intenso e localizado é transferido para o corpo a ser soldado. Este aporte de calor gera aquecimento não uniforme no corpo soldado dilatando umas regiões mais intensamente que outras. Essa maior dilatação de certas regiões do corpo é restringida por regiões mais frias do corpo que não tiveram a sua temperatura aumentada e, devido a essa restrição às tensões térmicas, surgem deformações de natureza plástica. Seguindo o princípio apresentado acima essas tensões térmicas se aliviam à medida que a parte do corpo mais intensamente aquecida atinge sua temperatura inicial. De fato isso ocorreria,

porém o mecanismo de plastificação juntamente com o grande decréscimo da tensão de escoamento devido ao aumento da temperatura exercem um papel fundamental neste processo, pois geram deformações de natureza plásticas não uniformemente distribuídas próximas ao cordão de solda dando origem as tensões residuais quando o corpo se resfria.

Vale ressaltar que as transformações de fase também são geradoras de tensões residuais, pois estas transformações são acompanhadas de mudanças de volume específico do material fazendo com que o material aquecido dentro da zona termicamente afetada se expanda sendo restrito pelo material mais frio isento de transformação de fase.

3. Deposição de solda em uma placa

Ao depositar um cordão de solda em um dos lados de uma chapa, obtém-se uma distorção conforme apresentado pela figura 1. A curvatura indica um encurtamento do metal base adjacente ao cordão. O cordão tende a encurtar-se mais que o metal base devido a diferença de temperatura, mas as deformações unitárias no cordão e na superfície adjacente do metal base devem ser as mesmas. Isto induz uma tensão residual de tração no cordão e uma flexão residual na chapa, isto é compressão nas fibras adjacentes. Para reduzir ao mínimo os esforços residuais e as distorções, o calor gerado ao soldar não deve ser excessivo.

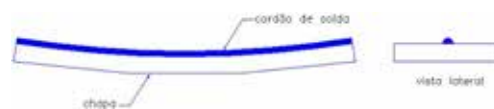


Fig. 1 – Distorção ocasionada pelo cordão de solda.

Por outro lado é desejável que se tenha um resfriamento lento com o objetivo de se reduzir ao mínimo a mudança na estrutura cristalina e na ductibilidade do aço. Consideram-se duas placas uma grossa e outra fina, sobre as quais se depositam cordões de soldas iguais. Posto que a quantidade de calor aplicada em ambas as placas é a mesma, o material adjacente ao cordão se esfriará muito mais rapidamente na placa grossa que na placa fina. Como pela superfície escapa apenas uma pequena parcela de calor (o ar é um mal condutor de calor em comparação com o aço), a temperatura

se dissipa mais rapidamente na chapa grossa que na chapa fina pois encontra um maior número de trajetos de escapar da solda na chapa grossa que na chapa fina conforme apresentado na figura 2. O resultado disto é um resfriamento rápido na chapa grossa, e neste caso, a zona soldada na chapa grossa será mais frágil que na chapa fina. Para reduzir ao mínimo o resfriamento rápido e a possibilidade subsequente de fragilidade na placa grossa, é conveniente que se aplique uma maior quantidade de calor na região soldada ou que se faça um pré-aquecimento antes da soldagem.

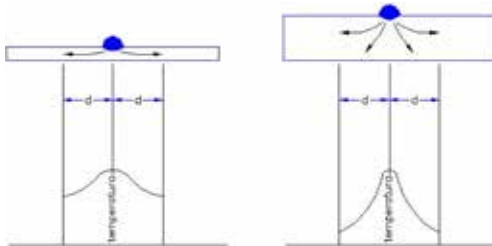


Fig. 2 – Efeito da espessura da placa na taxa de resfriamento.

Assim pode-se definir como chapa fina, para efeito de soldagem, aquela em que as linhas isotérmicas são exatamente as mesmas para qualquer plano paralelo às faces da chapa, ao longo da espessura. E, chapa grossa àquela em as linhas isotérmicas em planos paralelos às faces da chapa variam com a posição ao longo da espessura. Não existe um valor de espessura limítrofe entre chapa grossa e fina, pois depende também da temperatura. No entanto a norma DIN 8560 classifica as chapas de acordo com a espessura t , a partir de valores práticos: chapa fina - $t \leq 3,0$ mm e chapa grossa - $t \geq 6,0$ mm. As espessuras intermediárias são classificadas como chapa média.

3.1. Aspectos Metalúrgicos.

São três os fatores metalúrgicos interferem no processo de soldagem de arco metálico: a estrutura cristalina, a solubilidade do gás e a oxidação. Quando se aquece um aço a temperatura crítica de aproximadamente 815°C , tem-se uma estrutura cristalina quase uniforme que é denominada de austenita. Quando se esfria lentamente desde esta temperatura, a estrutura granular varia para um material dúctil chamado perlita. Já quando a taxa de

resfriamento torna-se muito alta, a austenita varia para um material quebradiço com pouca perlita, composto em sua maior parte por martensita. As temperaturas críticas e as velocidades de resfriamento são quem determinam se o aço será dúctil ou frágil depois da soldagem variando com sua composição química, particularmente com seu conteúdo de carbono. Para isso a composição química do metal depositado deve ser apropriada para cada material do metal base. Portanto um resfriamento lento dá como resultado usual um aço dúctil e um resfriamento rápido origina um aço duro e frágil.

Outra reação metalúrgica de grande importância na soldagem é a solubilidade do gás. O metal fundido, a alta temperatura, pode reter uma maior quantidade de gases em solução que a temperaturas mais baixas. Portanto, é importante proteger durante a soldagem o metal fundido para evitar que absorva certos gases presentes na atmosfera, e que estes, ao se desprender durante o esfriamento, podem ocasionar a formação soldas porosas (bolsas de gases), ou podem reter parte desses gases em solução ocasionando mudanças químicas e físicas no metal de solda. Assim, os materiais usados na soldagem – metal base e recobrimento do eletrodo – não devem conter elementos que possam produzir gases ao soldar, bem com aumentar a solubilidade dos gases no metal fundido.

As reações de oxidação podem durante a soldagem podem produzir óxidos gasosos ou sólidos. Tais reações são altamente indesejáveis pois os óxidos gasosos podem produzir bolsas ou porosidades, e os sólidos inclusões de escória, ou ainda tornar a solda quebradiça e sem resistência.

4. Influência das propriedades físicas

As propriedades físicas têm um papel fundamental na determinação adequada do campo de temperaturas, tensões e deformações durante o processo de soldagem de um corpo metálico. Existe uma grande dificuldade para aquisição das propriedades físicas dos metais, principalmente em elevadas temperaturas. A disponibilidade na literatura das referidas propriedades não é muito grande. Uma vez que a deformação é causada pelos efeitos do aquecimento e resfriamento e envolve dureza e escoamento, as propriedades físicas e mecânicas dos metais afetam o grau de deformação.

O conhecimento de valores aproximados do coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, módulo de elasticidade, e limite de escoamento do metal em uma soldagem ajudam a prever o grau de severidade das deformações.

4.1. Coeficiente de Expansão Térmica

O coeficiente de expansão térmica é uma medida da quantidade de expansão que sofre um metal quando é aquecido ou também, a quantidade que se contrai quando resfriado. Os metais com elevados coeficientes de expansão térmica se expandem e se retraem, evidentemente mais do que aqueles com coeficientes mais baixos, para uma certa taxa de aquecimento ou resfriamento.

4.2. Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica é a medida do grau de facilidade encontrado por um fluxo de calor através de um material. Os metais com condutibilidade térmica relativamente baixa (aços inoxidáveis e ligas à base de níquel) dissipam calor mais lentamente e com alta condutibilidade térmica (alumínio e cobre) dissipam calor rapidamente. A soldagem de metais com baixa condutibilidade resultam em acentuado gradiente de temperatura que aumenta o efeito de retração na solda e na placa. A figura 3 apresenta a condutividade térmica, calor específico, e coeficiente de dilatação linear variando em função da temperatura.

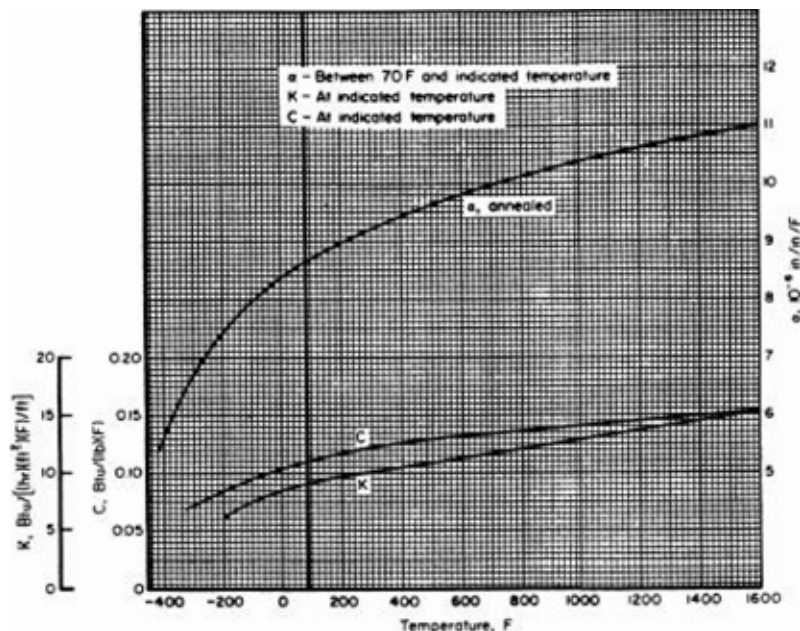


Fig 3. – Condutibilidade térmica, calor específico, coeficiente de dilatação linear em função da temperatura para o AISI 301 L. (Departament of Defense – E.U.A.)

4.3. Limite de Escoamento

O limite de escoamento de um metal de adição é um outro parâmetro que afeta o grau de deformação da solda. Quando um metal atinge o limite de escoamento, sofre deformação plástica permanente, mantendo-se assim uma nova forma. No processo de soldagem o metal-base e o cordão sofrem deformação plástica. Isto ocorre pois quando se aumenta a temperatura cai o limite de escoamento, daí o motivo do aparecimento da contração da região próxima a solda.

4.4. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade de um metal mede a tendência do metal apresentar tensão em presença de variação de deformação. Quanto maior o módulo de elasticidade maior será o acréscimo de tensão em presença de deformação. O aumento da temperatura faz com que decresça o módulo de elasticidade. Assim no processo de soldagem em elevadas temperaturas é necessária uma deformação maior que a temperatura ambiente para levar o material ao escoamento. A figura 4 apresenta a tensão de escoamento e o Limite de resistência variando com a temperatura e a figura 5 apresenta a variação do módulo de elasticidade com a temperatura.

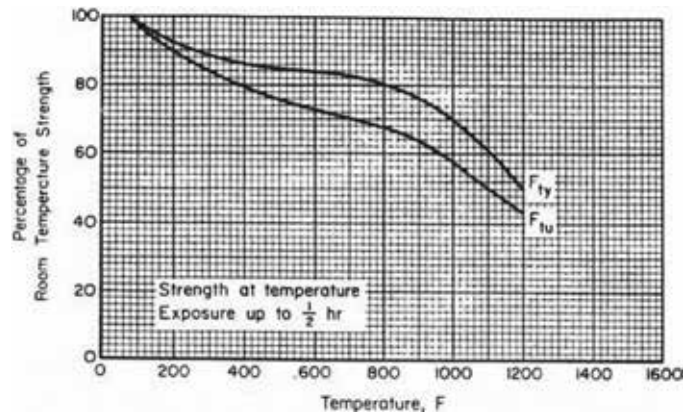


Fig 4. – Tensão de escoamento e limite de resistência em função da temperatura para o AISI 301L . (Department of Defense – E.U.A.)

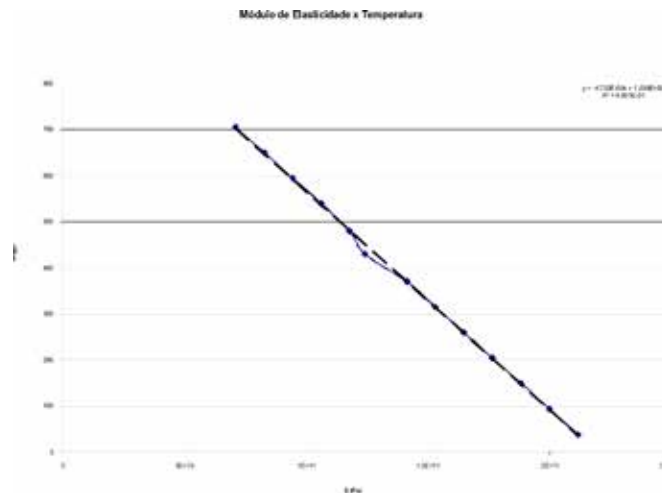


Fig 5. – Módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço estrutural.

5. Estudo experimental para determinação da deformação residual em chapa fina

Este estudo tem por objetivo obter o campo das deformações residuais em uma chapa fina soldada em um equipamento de solda MIG da marca Merkle e modelo PU250K, arco pulsado com transferência por spray, cujo mecanismo de controle de velocidade foi desenvolvido no programa de pós-graduação da escola de engenharia industrial metalúrgica da UFF de Volta Redonda. A figura 6 apresenta o referido equipamento.



Fig 6. – Equipamento de solda utilizado nos experimentos. Merkle de modelo PU250K.

5.1. Calibração da velocidade de soldagem

Para a calibração da velocidade de soldagem do equipamento, foram inicialmente testadas as frequências do motor que seriam possíveis de realizar uma solda de boa qualidade. Nesta etapa foram feitos diversos ensaios e chegou-se a conclusão que poderia se obter soldas de qualidade quando o equipamento operasse com frequência entre 5,0 Hz e 13,0 Hz. No entanto não é usual mensurar a frequência do motor para definir a velocidade de solda. Para tal, será apresentado um levantamento feito com o objetivo de relacionar a frequência do motor com a velocidade de soldagem do equipamento.

5.2. Determinação da relação entre a frequência do motor e a velocidade do carrinho

Para determinar a relação entre a velocidade do carrinho em cm/min e a frequência de operação do motor, foram realizadas trinta medidas de espaço percorrido e tempo. Foram feitas três medidas de tempo, em um espaço

fixo, para cada frequência. A frequência foi variada de 5,0 Hz até 50 Hz em intervalos de cinco em cinco hertz. Desta maneira foi determinada a função que relaciona a velocidade de soldagem (cm/min) com a frequência do motor do equipamento(Hz), conforme mostrado na figura 7.

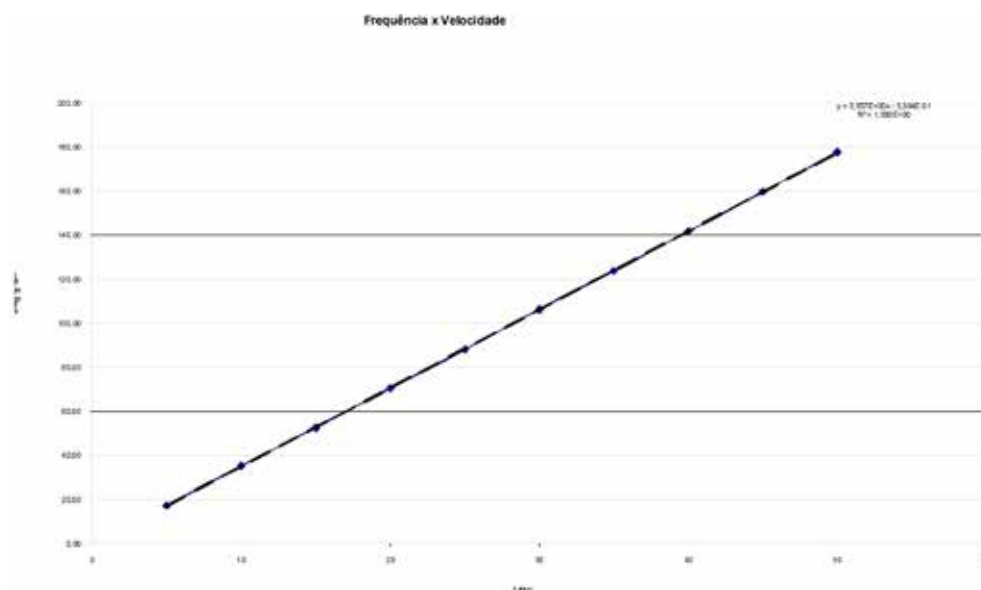


Fig 7. – Relação entre a velocidade do carrinho e a frequência do motor.

5.3. Metodologia.

Para realização dos ensaios experimentais foram usadas chapas finas (campos de temperatura supostos bidimensionais) de 3,0 mm de espessura por 60,0 mm de largura por 220,0 mm de comprimento. Nestas chapas foram criadas marcações em linhas perpendiculares feitas com o auxílio de riscador, paquímetro e esquadro. Portanto, tais marcações, por serem feitas manualmente não apresentaram uma constância de medidas, o que obrigou a se realizar duas leituras da chapa; uma antes e outra após a soldagem. A frequência de solda foi mantida constante em 10,0 Hz o que corresponde a aproximadamente 35,2 cm/min. A corrente elétrica foi iniciada com 110,0 A e ao final do ensaio o equipamento havia corrigido a mesma para 154,0 A. A tensão iniciou com 20,3 V e fora corrigida para 18,8 V. A vazão do gás foi mantida constante em 13,5 l/min durante a soldagem. A marcação do corpo de prova foi feita em espaços aproximadamente iguais num total de 90 pontos sendo três leituras para a coordenada x e três leituras para a coordenada y, antes da soldagem e depois, num total de 1080 leituras para cada

corpo de prova ensaiado. A figura 8 apresenta o desenho esquemático de marcação e a foto do corpo de prova ensaiado.

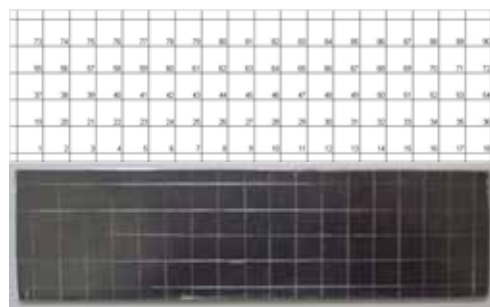


Fig 8. – Desenho esquemático indicando a locação dos pontos no corpo de prova e a foto do corpo de prova antes da soldagem.

As medidas foram realizadas com a utilização do analisador de perfis cuja precisão é de 1 μ m e neste caso as marcações feitas com o riscador se apresentara visivelmente mais grossa que a linha da tela do equipamento conforme mostrado na figura 9. Então, o critério utilizado para realização das medidas foi o enquadramento do centro da marcação feita no riscador com o risco da tela do analisador de perfis. Como valor de comparação foi atribuída a média aritmética das três leituras realizadas em cada um dos pontos do corpo de prova.



Fig. 9. – Analisador de perfis mostrando a marcação do corpo de prova na tela.

6. Resultados do primeiro ensaio para determinar as deformações residuais

Os resultados obtidos, mostrados nas figuras 10 e 11, no primeiro ensaio, são apresentados pelas isodeformações da parte simétrica do corpo de prova e o perfil nas proximidades do cordão, ambos da direção do eixo principal x. Revelam que de fato tanto o metal base quanto o cordão de solda apresentaram uma deformação de encurtamento com valores compreendidos entre zero e 2%, conforme esperado. Este grille foi marcado de 12,0 em 12,0 mm e os resultados das deformações são adimensionais. As deformações são calculadas pela seguinte formulação:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x}$$

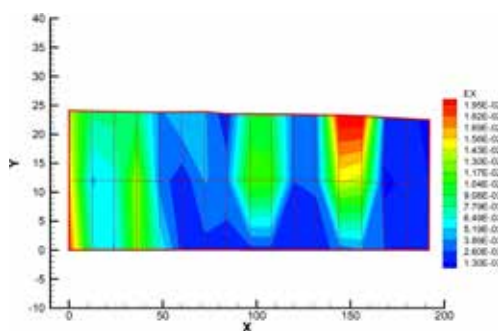


Fig. 10 – Gráfico das isodeformações na direção x da parte simétrica do corpo de prova.

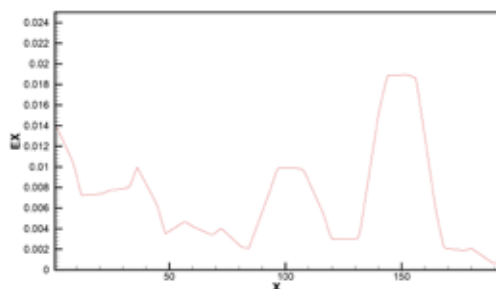


Fig. 11 – Perfil das deformações na direção x e nas proximidades do cordão de solda.

Os resultados mostrados neste capítulo apresentam coerência com a prática e revelam ainda que as deformações não são homogêneas e apresentam um valor máximo no início do processo de soldagem.

7. Resultados do segundo ensaio para determinar as deformações residuais

Este ensaio foi elaborado para reforçar os resultados obtidos no ensaio anterior, por isto, os parâmetros utilizados bem como os procedimentos de ensaio para a soldagem são idênticos ao do ensaio anterior, com exceção do grille que foi refinado em uma região de 44,0 mm na parte central do corpo de prova, compreendido entre 84,0 mm e 128,0 mm, para dar uma maior precisão dos resultados. Sendo este com medidas de 6,0 em 6,0 mm na direção y e de 4,0 em 4,0 mm na direção x.

As figuras 12 e 13 apresentam os resultados deste ensaio pelas isodeformações da parte simétrica do corpo de prova e o perfil nas proximidades do cordão e em duas seções transversais divididas igualmente entre o centro do cordão e a borda, ambos da direção do eixo principal x.

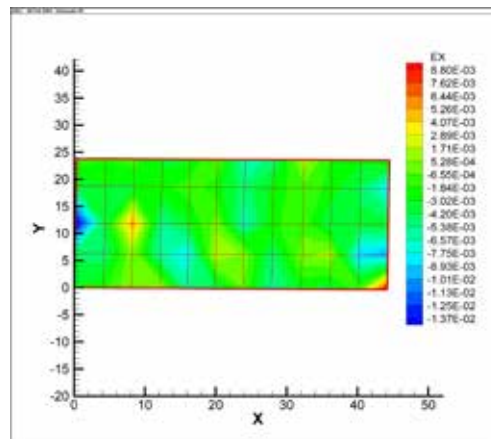


Fig. 12 – gráfico das isodeformações na direção x da parte simétrica do corpo de prova.

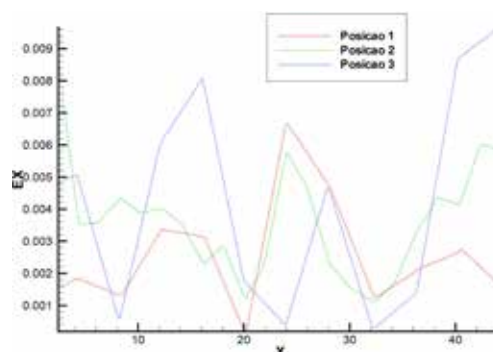


Fig. 13 – Perfis das deformações na direção x.

As figuras apresentadas mostram coerência com os resultados do capítulo anterior, pois apresentam uma certa constância de deformação ao longo da largura do corpo de prova e as deformações oscilando em torno de 0,5 %, com o máximo de 0,8 %. Aproximadamente iguais aos obtidos anteriormente com a malha menos refinada. Naquela região observa-se também que os valores das deformações residuais não são constantes ao longo do comprimento do corpo de prova. O mesmo ocorre com a quantidade de material depositado que varia ao longo da solda. Portanto observa-se

que ao variar a quantidade de material depositado varia a deformação residual. As seções realizadas nas distâncias 20 mm e 36 mm revelaram que de fato a menor quantidade de material depositada ocorria quando havia pico nas deformações (cota 36,0 mm). Na cota 20,0 mm observa-se que existe uma maior quantidade de material depositado que é correspondente a uma menor deformação. Com a figura 14 é possível visualizar melhor a variação da quantidade de material depositado ao longo do cordão de solda e na figura 15 temos o processo de soldagem executado.

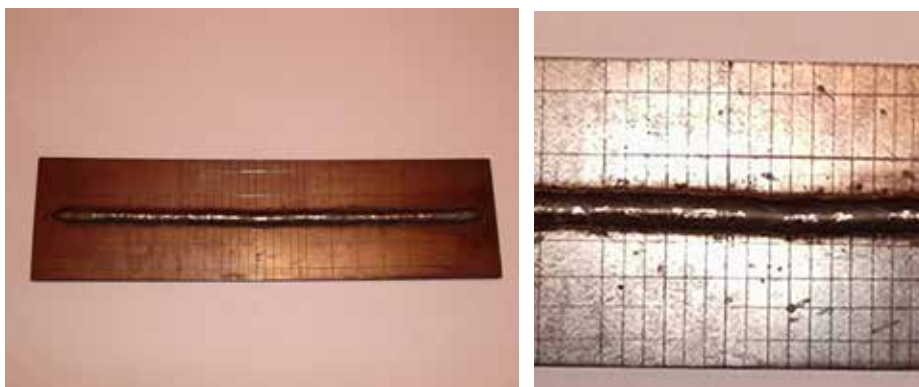


Fig 14 – Heterogeneidade da espessura de material depositado ao longo do cordão de solda.



Fig. 15 – O processo de soldagem.

8. Conclusões

Deste estudo conclui-se que:

- As deformações permanentes máximas ocorrem no início do processo de soldagem ($x = 150,0$ mm), isto se justifica pelo elevado gradiente térmico naquela região.
- As deformações apresentaram-se heterogênea ao longo do comprimento da chapa, assim como, a quantidade de material depositado varia também ao longo do comprimento, podendo haver ligação entre a quantidade de material depositado e as deformações permanentes. Para os casos

estudados observou-se que a menor quantidade de material depositado era correspondente aos picos de deformação.

- Depois de transposto a região do pico das deformações, início de solda, a deformação residual oscila em torno de 0,8%, sendo este valor bastante coerente e confirmado em ambos os ensaios.
- O procedimento experimental apresentado neste trabalho não se mostrou eficiente, pois é muito trabalhoso e pode apresentar problemas de precisão quando da manipulação natural dos resultados. No entanto para efeito qualitativo apresenta resultados razoáveis.

9. Referências Bibliográficas.

TALL, L., *Residual Stresses in Welded Plates – A Theoretical Study*, Welding J. 43, 1964.

Residual Stresses in Welded Construction and Their Effects, The Welding Institute, London 1977.

PHILLIPS, A.L., *Welding Handbook*, Macmillan & CO., London, 1980.

BRESLER, L.S., *Diseño de Estructuras de Acero*, Limusa-Wiley, México, 1973.

DEPARTMENT OF DEFENSE - E.U.A. MIL-HDBK-SE, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicles Structures*. Vol. 1 e 2, 1987.

JANG, G.B.; KIM, H.K.; KANG, S.S., The Effects of root Opening on Mechanical Properties, Deformation and Residual Stress of Weldment, Welding Journal E.U.A., March 2001.