

ANÁLISE DA DISTORÇÃO EM CHAPAS DE AÇO AISI 304 SOLDADAS ATRAVÉS DO PROCESSO TIG

Ariel Abeling, aa001345@fahor.com.br¹

Marco Henrique Lang, ml001403@fahor.com.br¹

Richard Thomas Lermen, lermenrichardt@fahor.com.br¹

¹ Faculdade Horizontina – FAHOR, Av. Dos Ipês, 565, CEP 98920-000, Horizontina, RS, Brasil

Resumo: O presente artigo tem como objetivo mostrar o resultados de distorções geradas durante o processo de soldagem em aço inox austenítico de forma experimental. Os testes foram realizados com processo de solda TIG, com polaridade direta (eletrodo negativo), utilizou-se gás argônio, eletrodos de Tungstênio (WTh2%), em chapas de aço inox austenítico AISI 304 (C: 0,08%; Cr:18-20%; Ni: 8-11%; Mn: 2% máx; Si:1% máx.), e para ter um avanço contínuo, utilizou-se uma mesa de avanço automático da FAHOR. Foram utilizados quatro parâmetros: espessura da chapa, velocidade de solda, tensão e quantidade de pontos na peça; em um total de 81 corpos de provas. A análise nessas peças através de diferença de cota antes e depois da solda mostra semelhanças no perfil em que os corpos de prova sofreram após o processo.

Palavras-chave: Soldagem TIG; Aço Inoxidável; Distorção.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico corresponde cerca de 60-70% da produção de aços inoxidáveis do planeta. Esses aços são considerados os melhores tanto em relação da sua resistência a corrosão como em suas propriedades mecânicas. Usado na produção de equipamentos para indústria química e petroquímica e também para indústria alimentícia e farmacêutica.

A soldagem é um dos processos mais utilizados em qualquer ramo de atividade industrial. Cada empresa que utiliza o processo de soldagem, está sempre melhorando o processo para diminuir custos, e acabam encontrando problemas e soluções. Os problemas identificados na soldagem de aços inoxidáveis, nem sempre estão relacionados com os aspectos metalúrgicos do material-base. Na grande maioria das vezes estes problemas estão ligados a técnicas, processos, consumíveis errados, máquinas precárias, enfim, pode ter várias razões.

Medenesi *et al.* (2001) diz que os aços inoxidáveis tem propriedades físicas e mecânicas (coeficiente de expansão térmica e resistência mecânica elevados e difusidade térmica baixa) o que favorecem uma maior tendência a distorção na soldagem do que de aços comuns.

A distorção é uma alteração de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento de material que ocorre em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A distorção final de um componente soldado é sempre oposta e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem (Modenesi, 2001).

Essas distorções são muito importantes conhecer para tentar ameniza-las ao máximo durante o processo da soldagem. Tanto para prever as tensões provocadas, assim como acabamento das peças depois da solda, se for o caso.

Após os testes realizados, identificou-se o perfil no sentido transversal e longitudinal em relação ao cordão de solda, onde em alguns casos obteve-se a solda completa ou parcial, em outros não a solda não ocorreu, somente passando o calor na chapa ou cortando os corpos de prova. Essas situações eram previstas nos casos extremos, pois como foram utilizados três espessuras de chapas, poderia ocorrer esses casos onde a corrente mais alta, a menor velocidade e chapa de menor espessura, cortaria a peça, como o caso contrário, onde a menor corrente, velocidade alta e chapa de maior espessura, não ocorreria a soldagem nas peças.

Diante dessas características obteve-se o tema do presente trabalho, para buscar informações das distorções nas chapas para futura análise, para que dessa forma conseguir aprofundar o tema e chegar em soluções para diminuir ao máximo essas distorções.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Parâmetros fixos e variáveis de Soldagem

Há muitas variáveis influentes na soldagem, a utilização dessas variáveis são denominadas parâmetros de solda. As variáveis consideradas para este artigo são o eletrodo, o gás inerte, a distância do eletrodo da chapa, a velocidade soldagem e amperagem, no qual serão explicadas sua funcionalidade e qual os parâmetros utilizado nos testes.

O eletrodo de tungstênio tem bom desempenho na aplicação na soldagem TIG pois possui seu ponto de fusão elevado, com 3392 °C e de ebulição em 5906 °C, além de ter ótimas características em emissividade eletrônica. O eletrodo utilizado foi o WTh-2 de diâmetro 3/16" pois esse eletrodo é utilizado para soldas na fábrica. Esse eletrodo segue a classificação AWS, conforme mostra a tabela abaixo:

Tabela 1. Características do eletrodo de tungstênio.

Classificação AWS	Tungstênio %	Tório %	Outros %	Cor de identificação
EWTh-2	97,5	1,7 a 2,2	0,5	Vermelho

O gás é responsável pela proteção da área de soldagem, impedindo oxidação e porosidade no cordão. Encontra muito uso como constituinte de uma atmosfera inerte para soldar metais com arco elétrico (descarga elétrica), como, por exemplo, e peças de aço inoxidável, também em alumínio e titânio, além de fabricação de metais como titânio, zircônio e urânio.

Segundo a ABS as principais vantagens do uso de Ar são respectivamente:

- ação mais macia do arco;
- penetração reduzida;
- menos custo e maior disponibilidade;
- menos taxa de vasão para uma boa proteção;
- facilita o início do arco.

A ABS também cita que a menor penetração favorece na soldagem manual de chapas finas o que também é vantajoso para soldar na vertical ou sobre cabeça.

A distância do eletrodo em relação ao material a ser soldado influencia na largura do cordão, quanto mais afastado o cordão ganha mais região de metal base aquecida. Já a velocidade da soldagem influencia na penetração de solda. Se for utilizada uma velocidade muito alta com uma amperagem muito baixa não ocorrerá solda, pois em função da velocidade ser alta não deixa com que o material crie a poça de fusão, e com os parâmetros contrários, velocidade baixa com uma amperagem muito alta, provavelmente o material irá fundir mas não irá soldar, cortando a peça.

A corrente está diretamente ligada com a quantidade de calor emitido para a peça, quanto mais alta mais rápida será a formação da poça de fusão.

2.2. Distorção

Na soldagem a arco elétrico, o aquecimento é localizado e a temperatura não é distribuída uniformemente e alterações estruturais e metalúrgicas ocorrem ao longo da junta durante o processo. O metal de solda e a zona afetada pelo calor adjacente ao cordão de solda estão a temperatura acima da temperatura do metal de base, não afetado pelo calor. Quando a poça solidifica e contrai, provoca tensões que podem gerar distorções quando a estrutura está livre ou tensões residuais quando a estrutura é restringida por algum elemento de fixação (AWS, 1987).

Durante o aquecimento e resfriamento no ciclo de soldagem, deformações térmicas ocorrem no metal de solda e no metal de base em regiões próximas à solda. As deformações produzidas durante o aquecimento são acompanhadas por compressão plástica. As tensões resultantes dessas deformações combinam e reagem para a produção de forças internas que causam flexão, flambagem e rotação. Estes deslocamentos são chamados de distorção (Masubuchi, 1980).

A variação da temperatura influencia diretamente e proporcionalmente no aumento das dimensões do material, onde a variação do comprimento (ΔL) é igual ao comprimento inicial (L_0) multiplicando pelo coeficiente de dilatação térmica linear do material (α) multiplicando pela variação da temperatura (ΔT). Se, Modenesi *et al.* (2001), a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder expandir e contrair livremente durante o ciclo térmico, distorções e tensões residuais poderão surgir.

A distorção na soldagem resulta da expansão e contração do metal de solda e de base durante o ciclo térmico (aquecimento e resfriamento) do processo de soldagem. Durante o aquecimento e resfriamento, vários fatores influenciam as contrações do metal e causam a distorção, bem como alteram as propriedades físicas e mecânicas com o aporte de calor aplicado. Estas alterações afetam inclusive o fluxo e a uniformidade da distribuição de calor, sendo esta última a causa mais importante para a deformação durante a soldagem (FBTS, 2001).

Existem algumas técnicas para reduzir as deformações durante a soldagem sendo elas: a pré-deformação e pré-aquecimento da peça, a sequência de cordões de soldagem e o travamento das peças com dispositivos de fixação.

3. MÉTODOS E TÉCNICAS

Primeiramente selecionou-se os materiais e equipamentos necessários para a realização do trabalho, sendo eles:

- Matéria-prima: aço inox austenítico AISI 304 (C: 0,08%; Cr:18-20%; Ni: 8-11%; Mn: 2% máx; Si:1% máx.) sendo que as dimensões de cada chapa são de 150 mm de comprimento, 50 mm de largura e espessuras variadas de 1,0; 1,5; e 2,0 mm;
- Ferramentas: Soldador TIG, com eletrodo de Tungstênio (WTh2%) diâmetro 3/16", bocal de diâmetro 6 mm, gás Argônio.
- Instrumentos de coleta de dados: Câmera fotográfica, Software SolidWorks, Microsoft Excel;
- Outros: Bancada, Mesa de avanço automático com inversor de frequência, Fixador para as chapas, Paquímetro.

Logo após foram definidos os parâmetros fixos para os testes, no qual a distância entre o eletrodo e o corpo de prova manteve-se a mesma de 2 mm em todos os testes e a vazão do gás argônio manteve-se em 15 l/min. Os parâmetros variados foram escolhidos considerando que são pontos críticos no momento da soldagem, onde esses parâmetros são a espessura do material, velocidade de solda, corrente, e a quantidade de pontos na preparação do material, que estão listados no quadro abaixo:

Quadro 1. Relação de parâmetros fixos e variáveis.

Parâmetros Variáveis		Parâmetros Fixos	
Espessura do material	1,0 ; 1,5 ; 2,0 (mm)	Distância entre eletrodo e material	2 (mm)
Velocidade de solda	8,0 ; 11,0 ; 14,0 (mm/s)		
Corrente	80 ; 100 ; 120 (Amperes)	Vazão do gás	15 (litros/min)
Quantidade de pontos	2 ; 3 ; 4 (unidade)		

Definido os parâmetros variáveis, constou que seriam necessários 81 corpos de provas, definidos como CPs, para ter no mínimo uma peça com cada parâmetro. Depois de requisitar os CPs que foram feitos com corte a laser, em um total de 60 peças de cada espessura, já pensando em uma folga de 3 CPs a mais para os testes iniciais, já que para o experimento foram necessários 27 CPs para cada espessura.

Em seguida foram ponteadas os CPs conforme a quantidade de pontos de cada, com o quadro abaixo pode se ter uma visualização melhor:

Quadro 2. Relação de quantidade de CPs e número de pontos em função das espessuras.

Espessura CPs	Quantidade	Nº de pontos
1,0mm	9	2
	9	3
	9	4
1,5mm	9	2
	9	3
	9	4
2,0,mm	9	2
	9	3
	9	4

Após os CPs ponteados, preparou-se a bancada para realizar a primeira parte das medições, as quais foram demarcadas pontos nas arestas superiores da chapa, com uma distancia de 5mm entre eles. Para facilitar determinou-se que seriam em 3 vistas os pontos demarcados, sendo que na vista que sobra seria utilizada para a fixação. Para isso, a Vista A – perpendicular ao cordão de solda lado esquerdo; vista B – paralela ao cordão de solda; vista C – perpendicular ao cordão de solda lado direito. Os CPs ficaram suspensos e fixados em um ponto, onde o mesmo é marcado para que depois da solda seja fixado na mesma posição. A ideia é de ter uma medida da aresta superior do CP antes da solda e outra medida depois da solda, assim poderá utilizar a Equação (1) para ter a variação de altura (ΔY). Abaixo, na Fig. 1, se encontra o esquema de fixação.

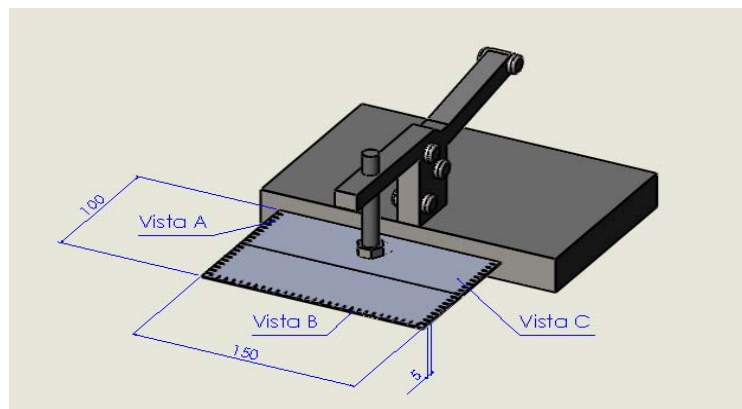


Figura 1. Posicionamento das CPs e suas vistas.

$$\Delta Y_{ponto} = Y_{ponto\ final} - Y_{ponto\ inicial} \quad \text{Equação (1)}$$

Cada CP foi nomeado em ordem numérica de 1 à 81 para identificar e ter a ordem por qual CP começar, tanto as medições, como a soldagem. A medição foi feita a partir de fotos das 3 vistas de cada CP, em um total de 243 fotos da posição inicial. Como as peças foram fixadas em apenas um ponto, manteve-se a camera na mesma posição para que as fotos permanecessem do mesmo tamanho, facilitando e assim o registro dos dados, pois cada peça tem 73 pontos de medição.

Posteriormente foram soldados todos os CPs sem nenhuma fixação com a mesa de avanço automático e deixados para resfriamento natural em uma outra bancada. Essa soldagem foi feita em um só sentido, da vista A para a vista C, seguindo a ordem de cada peça. Após resfriados foram levados para a bancada de fotografias para a nova coleta de dados.

Em posse dos CPs e das fotos, que são um total de 486 fotos, foram criadas tabelas no software Excel 2013, com as 3 vistas separadas, e uma dessas tabelas tem as posições dos pontos iniciais, a segunda com as posições dos pontos finais, e uma terceira com a variação dos pontos utilizando a Eq (1). Para o preenchimento das tabelas, utilizou-se o software Solidworks, onde foi adicionada as fotos e deixadas em escala, conforme a Fig. 2, separou-se os pontos a cada 5mm, e por referência do ponto com a parte inferior na base mediu-se a distancia inicial, e depois a distancia final, em um total de 11826 medidas.

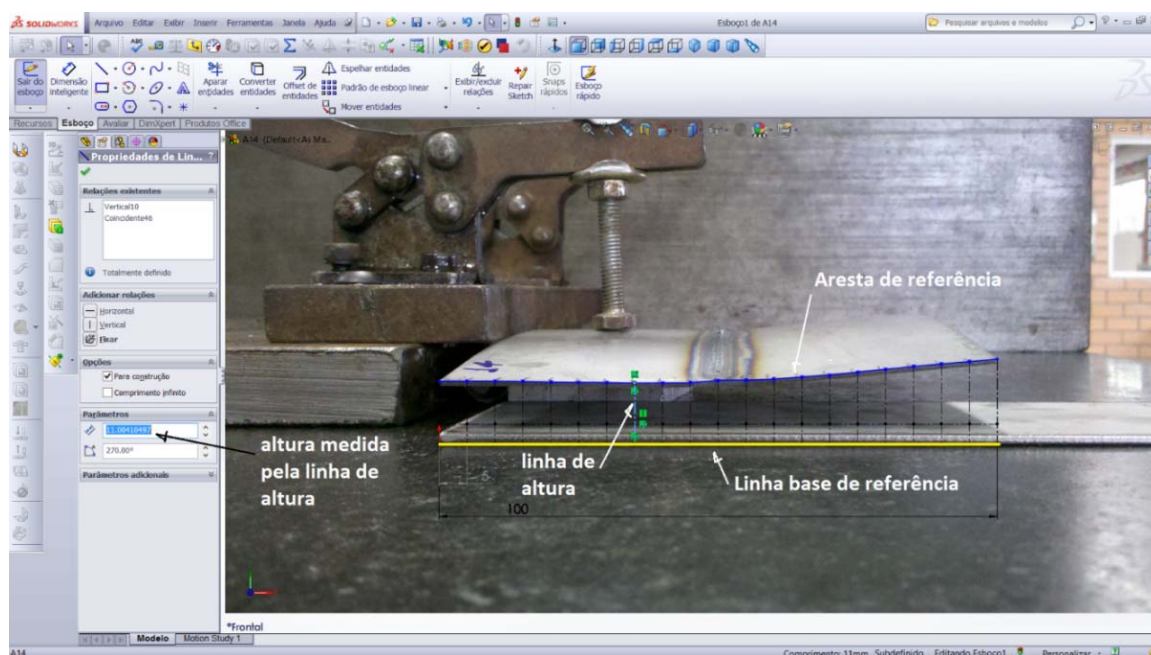


Figura 2. Fotos no software SolidWorks para retirar as medidas. Vista A.

Depois de digitar todas as medidas, a tabela da variação foi preenchida automaticamente por utilizar fórmulas no software Excel. A partir desses dados foi possível ter a criação dos gráficos pretendidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente notou-se três resultados, peças soldadas sem falhas, peças soldadas com falhas, e peças sem solda.

Nos CPs soldadas sem falhas, é onde se obteve a solda completa nos dois lados da chapa. Já em peças soldadas com falhas, obteve-se uma solda parcial, somente de um lado, ou soldou completamente, mas em algum ponto chegou a cortar a chapa. Já nas peças que não se obteve solda, foi em peças que não obteve-se a fusão do material, ou cortou a peça ao invés de soldar.

De qualquer forma, em todos os casos se obteve a distorção nas chapas, só não foi medido em dois casos em chapas de espessura 1,0mm em que ao invés de fundir o material, a solda cortou, CPs 12 e 21. Mesmo assim, a ideia inicial era utilizar a corrente de solda maior possível para ver as distorções nas chapas, e esses CPs que não fundiram, foi pelo motivo de velocidade muito alta para aquela tensão e na espessura do material.

Esses parâmetros foram escolhidos em cima da chapa de 1,0mm de espessura, caso a corrente fosse maior, as chapas cortariam com certeza, portanto, já estava previsto algumas situações sem solda, mas teríamos o mesmo calor tanto em chapas mais finas como para as chapas com maior espessura, nesse caso a diferença é de 1mm.

Além disso foram duas as formas como as distorções angulares apareceram em um mesmo CP: perfil parabólico com concavidade para cima ou para baixo no sentido transversal; e perfil parabólico com concavidade para cima ou para baixo no sentido longitudinal.

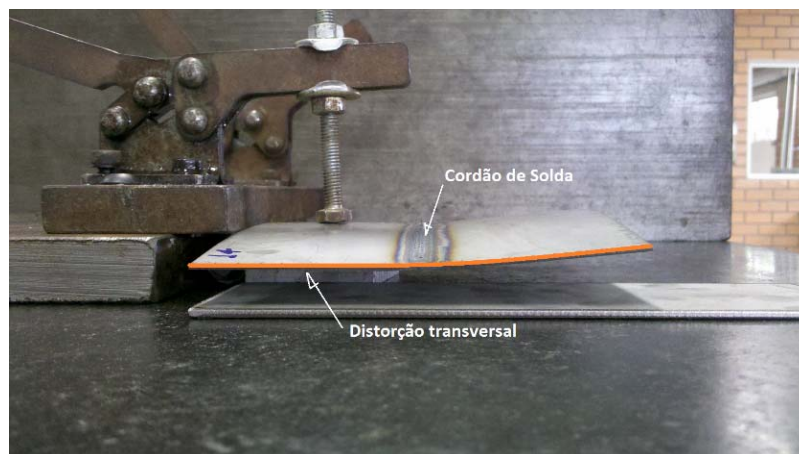


Figura 3. Distorção transversal perfil parabólico com concavidade para cima

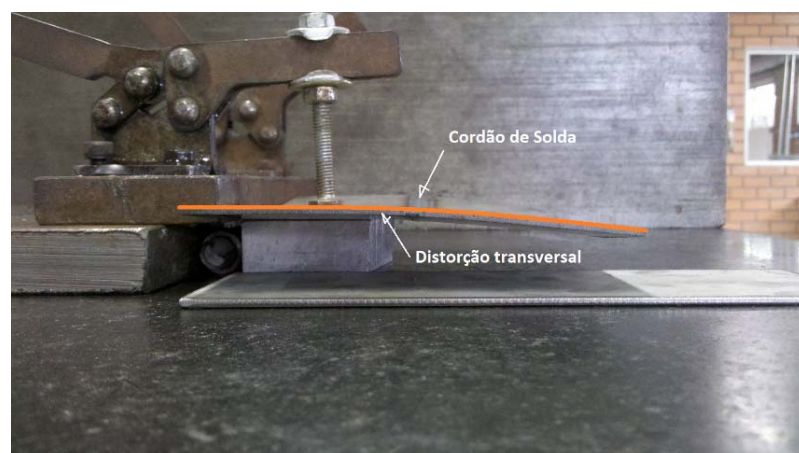


Figura 4. Distorção transversal perfil parabólico com concavidade para baixo

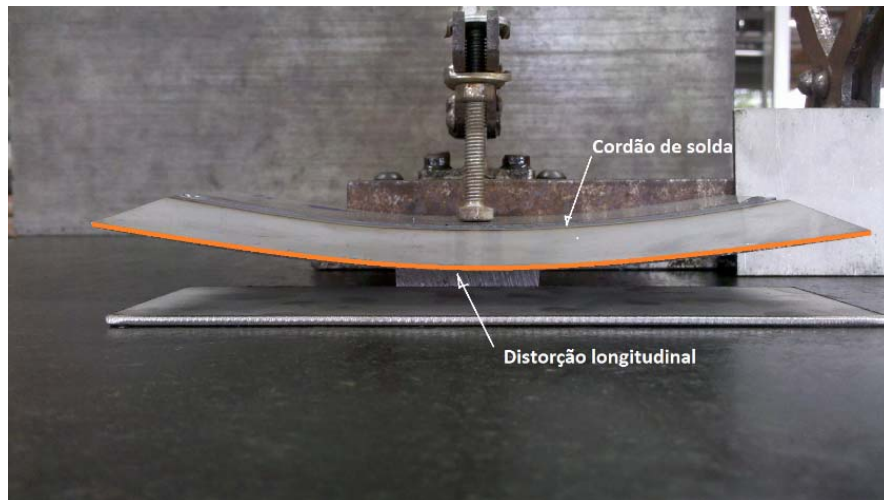


Figura 5. Distorção longitudinal perfil parabólico com concavidade para cima

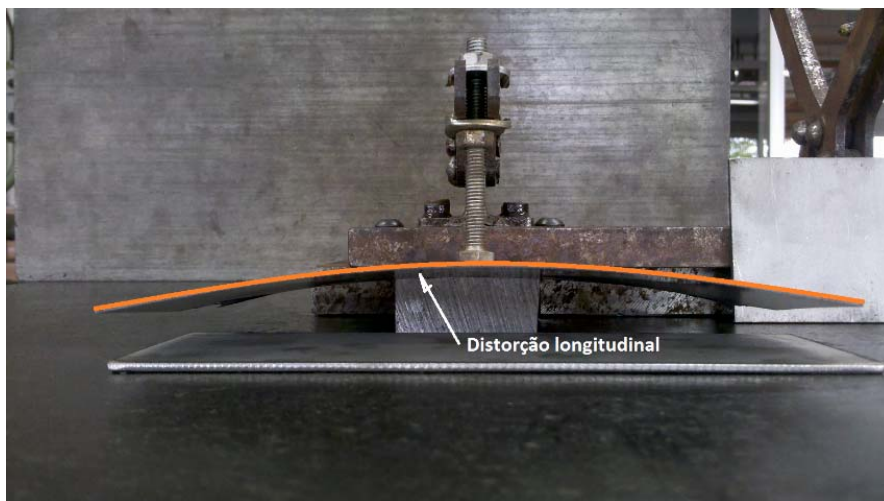


Figura 6. Distorção longitudinal perfil parabólico com concavidade para baixo

4.1. Em relação a espessura do material

Para tentar entender o motivo das concavidades ser voltadas para baixo ou para cima, foi usando um gráfico de linhas pegando a diferença de altura conforme a Equação (1). A primeira forma de visualizar, está abaixo, Fig. 7, onde se tem as três vistas de todas as chapas, mostrando essa diferença de altura.

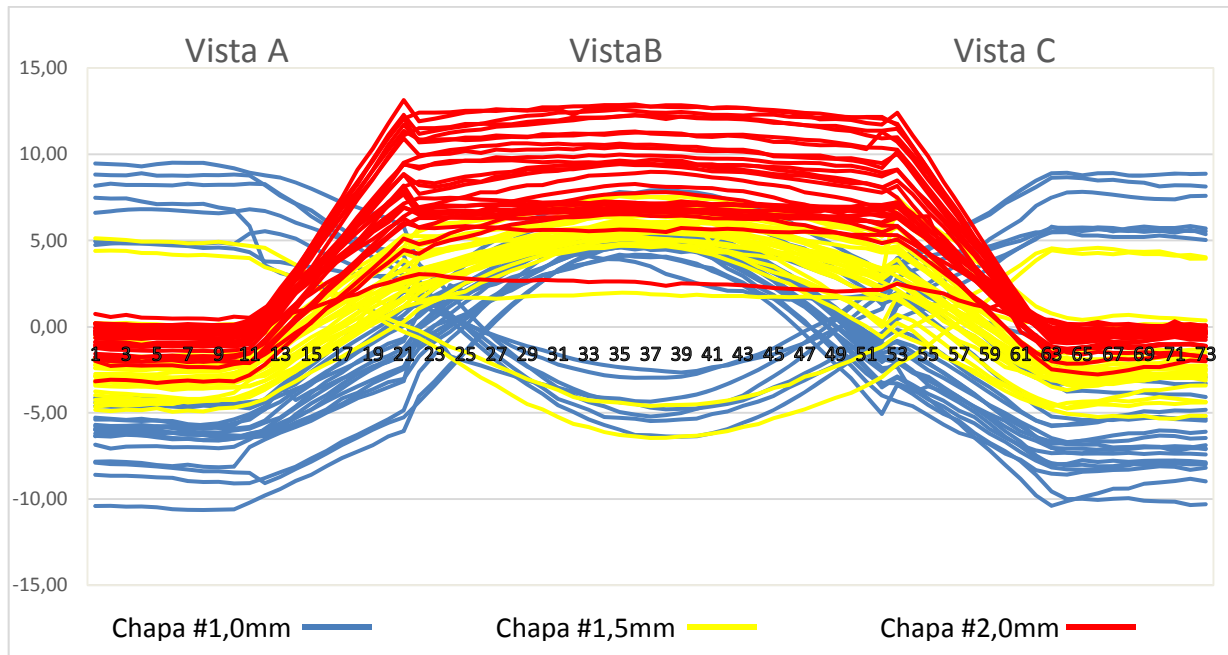


Figura 7. Comparação geral de todos CPs e todas respectivas vistas.

O gráfico mostra a diferença de altura que ocorreu pela distorção, e para melhor a visualização separamos por cores mostrando as três espessuras de chapas, sendo o azul chapas de 1,0mm, amarelo 1,5mm, e vermelho 2,0mm. Percebe-se que as chapas de 1,0 e 1,5 mm, principalmente na vista B, mostra bem o formato parábola, tanto com a concavidade para cima como com a concavidade para baixo.

Os poucos CPs que ficaram com a concavidade da parábola voltada para cima, ocorreu a soldagem, mesmo que com algumas falhas. Já os CPs de 2,0mm tiveram uma diferença alta nas vistas A e C, isso provavelmente ocorreu por não ter uma distorção longitudinal maior, evidenciando que a espessura da chapa assim como a corrente utilizada tem uma influência direta na distorção.

4.2. Em relação a velocidade de solda

Para identificar se o sentido da concavidade pode ser outro tipo de parâmetro dos quais foram determinados, separamos alguns gráficos em função da velocidade de solda e da espessura, e mostrando somente os gráficos que contem a parábola com concavidade para cima conforme Fig 8, 9, 10 e 11.

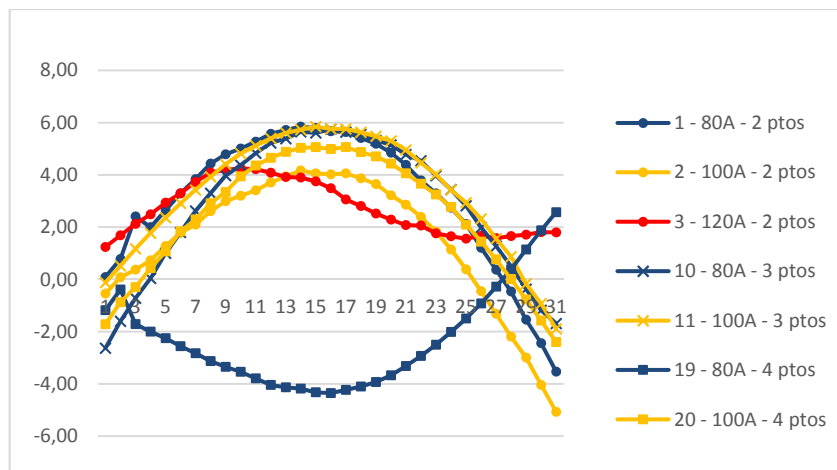


Figura 8. VISTA B - VELOCIDADE 8 mm/s - Chapa #1,0 mm

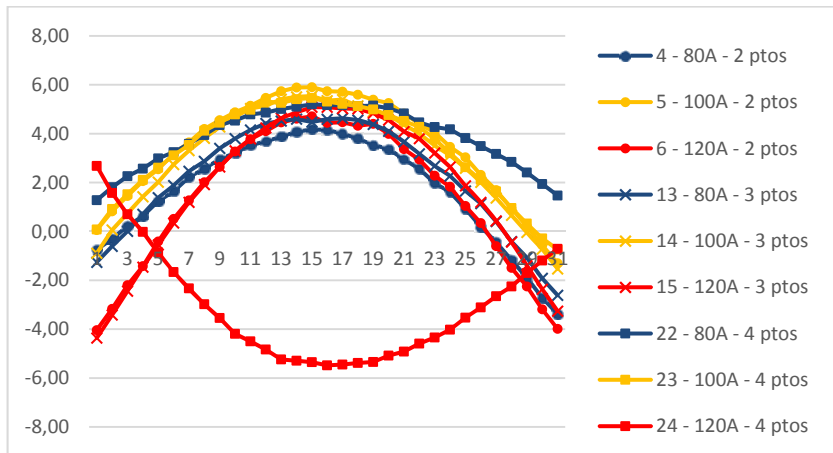


Figura 9. VISTA B - VELOCIDADE 11 mm/s - Chapa #1,0 mm

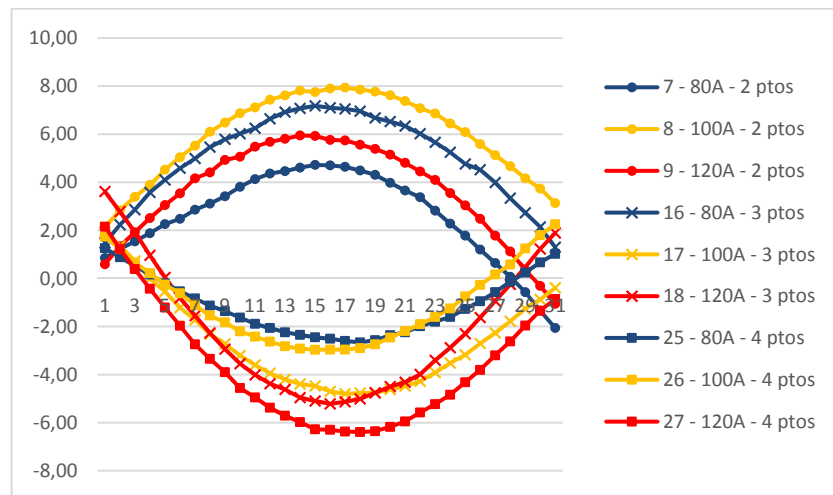


Figura 10. VISTA B - VELOCIDADE 14 mm/s - Chapa #1,0 mm

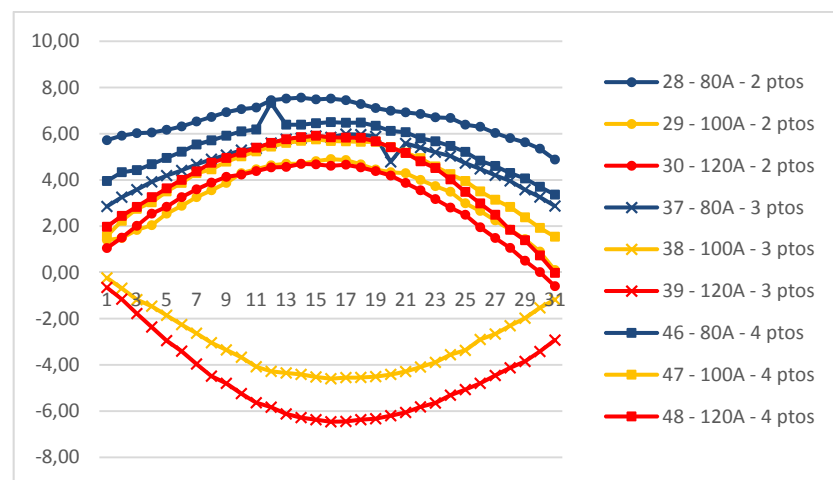


Figura 11. VISTA B - VELOCIDADE 8 mm/s - Chapa #1,5 mm



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



Olhando os gráficos, percebe-se que a velocidade de solda não teve uma influência direta, por ocorrer nas três velocidades utilizadas na soldagem, assim como a quantidade de pontos, que ocorreu com 3 e 4 pontos, e também na corrente, que ocorreu em todas as três. Mas como já visto anteriormente, aconteceu com CPs onde ocorreram a solda, e como ocorreu mais em chapas de 1,0 mm, menos em chapas de 1,5mm, e nenhuma em 2,0 mm, podemos ter uma previsão de que o sentido da concavidade é diretamente influenciada pelo perfil da soldagem, que depende da espessura, velocidade e corrente da solda.

5. CONCLUSÃO

Os resultados foram satisfatórios, mesmo que tenham ocorrido algumas situações como não soldagem ou corte nos CPs, mas já estavam previstas, e o que queríamos identificar era o perfil da distorção e a diferença de altura para ter uma ideia dessa distorção.

De posse em todas as informações obtidas no experimento, futuramente é possível aprofundar esse trabalho das distorções separando bem as espessuras, definir qual é o mínimo e máximo de corrente utilizada pela velocidade de corte, ou qual é a menor corrente com a menor velocidade ou a maior corrente com a maior velocidade.

Para achar o que influência no sentido da concavidade da parábola, deve se analisar a solda com metalografias, para ver os formatos gerados.

Sobre esse formato parabólico, as chapas de 2,0 mm por terem uma diferença muito pequena entre o ponto máximo superior e o ponto máximo inferior na vista B, influenciaram diretamente nas vistas A e C, tendo as maiores variações, mas somente em uma das chapas dos CPs. Já nas chapas de 1,0 e 1,5 mm essa diferença foi menor, pelo motivo de que a vista B teve um formato parabólico mais visível.

Provavelmente se nas chapas de 2,0 mm, ao aumentar a corrente e conseguir a soldagem ideal, essa diferença na distorção diminuirá.

A proposta inicial do trabalho era achar meios para diminuir a distorção, e para tal tivemos que primeiramente analisar essas distorções, que começamos com esse trabalho, o próximo passo é aprofundar esse estudo e depois que termos uma análise mais aprofundada poderemos prever e criar soluções para a diminuição dessas tensões que geram as distorções.

6. AGRADECIMENTOS

A faculdade de Horizontina FAHOR pela estrutura e máquina para testes disponibilizada, a TECNICONFIAL Indústria e Comércio LTDA pelas chapas de corpo de prova fornecidas e principalmente ao professor orientador Richard Thomas Lermen, que se interessou pela ideia e compartilhou de sua experiência com soldagem e nos indicou algumas situações para melhorar esse trabalho.

7. REFERÊNCIAS

MODENESI, Paulo J.. 2001 “Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis”. São Paulo, SENAI-SP. 100 p.; il. (Coleção Tecnologia da Soldagem Vol. 1).

MODENESI, Paulo. J.. 2001 “Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico”. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

MESSIAS JOSÉ DE CARVALHO, janeiro 1999. “Orientações Práticas de Soldagem em Aço Inox” ACESITA.

SOARES, Hélio C. G.. 2006 “Estudo De Seqüências De Soldagem Para Redução E Eliminação De Distorções”. Belo Horizonte.

AWS, 1987. “Welding Handbook; Welding technology”. Miami: American Welding Society, 8º ed.V.1.

MIRANDA, Leonardo H. 2006 “Efeito Da Refrigeração Forçada Da Poça De Fusão Nas Distorções Angulares Em Cordões De Solda Sobre Chapa De Aço Carbono”. Belo Horizonte.

Masubuchi K., Analysis of Welded Structures. Residual Stress, Distortion, and their Consequences. First Edition, New York, Pergamon Press Ltd., 1980.

MACHADO, I.G. 1996 “Soldagem & Técnicas Conexas: Processos”. Porto Alegre, editado pelo autor. 477p.: il.

ZEEMANN, A.; DE ALMEIDA, D.M.; DOMINGUES, G.; DA COSTA, U.P. A soldagem GTWA (ou TIG). Publicação de ABS - Associação Brasileira de Soldagem. **Disponível em:**

<http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/A%20soldagem%20GTAW%20%28ou%20TIG%29.pdf>

8. RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.



ANALYSIS OF DISTORTION ON STAINLESS STEEL AISI 304 BY THE TIG WELDING PROCESS

Ariel Abeling, aa001345@fahor.com.br¹

Marco Henrique Lang, ml001403@fahor.com.br¹

Richard Thomas Lermen, lermenrichardt@fahor.com.br¹

¹ Horizontina College – FAHOR, Av. Dos Ipês, 565, CEP 98920-000, Horizontina, RS, Brazil

Abstract: *This article aim to show the results of distortions generated during the welding process of austenitic stainless steel experimentally. The tests were performed with TIG welding process, with straight polarity (negative electrode), we used argon gas, tungsten electrodes (WTh2%), in austenitic stainless steel AISI 304 (C: 0,08%; Cr:18-20%; Ni: 8-11%; Mn: 2% máx; Si:1% máx.), and to have a continious speed, we used a longitudinal feeds table of FAHOR. Four parameters were used: plate thickness, welding speed, voltage, and number of points on the test samples; in a total of 81 test samples. The analysis in this parts throught height difference before and after welding process shows similarities in the profile where the tests samples suffered after the process.*

Keywords: *TIG welding process; Stainless steel; Distortion.*