

ANALISE DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA MICROESTRUTURA, TENSÕES RESIDUAIS E DUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 L**Géssica da Costa Bispo** (gessicabispo163@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica.

João Paulo Calixto da Silva (joao.cs@fsjb.edu.br)

Professor do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ

RESUMO

Este trabalho propôs o estudo das tensões residuais geradas pelo processo de soldagem em diferentes energias, analisando também questões relacionadas à microestrutura e dureza do aço inoxidável AISI 304 L. Para isso, chapas de aço inoxidável 304L foram soldadas com diferentes energias de soldagem. Após os procedimentos necessários, as amostras foram levadas ao difratômetro de raios-x do Laboratório de Microanálise da UFES Vitória ES, para obter os dados necessários para análise das tensões residuais. Foi utilizado o método de múltipla exposição, com medições: $\Psi = 10^\circ$ a 100° , por ser mais sensível e obter uma variação maior do pico para uma deformação do retículo cristalino. Utilizou-se um feixe monocromático com comprimento de onda $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$, tensão de operação 30 V e corrente 10 A. As tensões residuais foram obtidas e o método de difração mostrou-se eficiente para isso. As tensões residuais obtidas apresentaram-se compressivas em todos os níveis de energia e localidades analisados das amostras.

PALAVRAS-CHAVE: Difração de raios-x, Tensões residuais, Energia de soldagem.**1 – INTRODUÇÃO**

Na busca por uma técnica de fabricação mais apurada e isenta de falhas, fatores como as tensões residuais oriundas do processo de soldagem tem sido alvo de pesquisas, uma vez que essas tensões podem se apresentar de forma não visível no metal, gerando prejuízos futuros, como levar o metal a formação de trincas e mudar a resposta à fadiga, a tendência à fratura frágil e a corrosão (Modenesi, 2012).

O aço inoxidável 304L possui uma vasta aplicação na indústria, atua na fabricação de válvulas, tubos, recipientes, equipamentos hospitalares e farmacêuticos, peças para a indústria química, petrolífera, têxtil, de laticínios, frigorífica, de tintas. No entanto, esse aço não está livre de sofrer com as consequências geradas pelas tensões residuais. Que por sua vez, consiste em tensões que existem sem a atuação de forças externas, elas são acumuladas no material devido a ocorrência de deformação plástica no material. Elas podem somar-se linearmente no regime elástico e causar a ruptura do componente (Aniball, 2012).

O conhecimento das tensões residuais em peças mecânicas pode evitar acidentes e desastres. Determinar o estado de tensões residuais possibilita vantagens na otimização de projetos e redução de custo. Entre os meios de se determinar as tensões residuais, existem os métodos analíticos ou numéricos e os experimentais, havendo maior precisão de resultados no último citado. (Aniball, 2012).

A energia de soldagem é um fator que (dependendo de parâmetros como intensidade, tensão e velocidade do arame) pode influenciar no comportamento das tensões residuais. (Oliveira, 2009); (Unnikrishnan, 2014). Assim, o seguinte estudo objetiva analisar a influência da energia de soldagem na microestrutura, tensões residuais e dureza do aço inoxidável AISI 304L, através da análise dos espectros gerados em ensaios de DRX.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA OU REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO PROCESSO DE SOLDAGEM

Quando um objeto é aquecido de maneira uniforme sem impor restrições às suas variações dimensionais, eles não apresentarão efeitos mecânicos significantes. Ou seja, não haverá tensões residuais ou distorções. No entanto, se a peça não estiver livre para expandir e contrair durante o ciclo térmico, com variações de temperatura sem uniformidade, poderá ocorrer o desenvolvimento de tensões residuais e distorções. (Modenesi, 2012).

Estruturas soldadas apresentam uma distribuição complexa de tensões residuais que podem ser caracterizadas por esforços de tração em duas ou mais dimensões. Essa distribuição de tensões pode dificultar a deformação plástica na região da solda, possibilitando a formação de trincas (Para materiais de baixa ductibilidade, submetidos a ambientes agressivos e/ou solicitações severas) (Modenesi, 2012).

Devido à alta relevância das tensões residuais na qualidade da solda, há diversos estudos que investigam as causas e consequências de tal ocorrência, levando em conta parâmetros como variações de aporte térmico, tipo de processo de soldagem, multipasse, entre outros. (Oliveira, George Luiz Gomes de, 2009); (Oliveira, George Luiz Gomes de, 2010); (Cofiño, Rachel Cristina 2010); (Carvalho, Chavier, 2008).

2.3. MÉTODO DO $\sin^2 \Psi$ OU MÚLTIPLA EXPOSIÇÃO

É a técnica mais empregada no cálculo de tensões residuais, várias medidas são feitas para diferentes inclinações Ψ , o espaço Inter planar ou posição do pico 2θ é dado por uma curva. (Camila, 2010).

Ainda segundo a autora, a técnica possui boa precisão, adequada para amostras com um grau de textura e o procedimento básico para determinação das tensões residuais pelo método do $\sin^2 \Psi$.

- Determinar a posição 2θ do pico de difração de um determinado conjunto de planos (h, k, l) nas várias orientações (inclinações) Ψ da amostra escolhida para a medida;
- Converter os valores de 2θ obtidos, nos correspondentes valores dos espaços interplanares;
- Plotar a deformação $\Delta d/d$ versus $\sin^2 \Psi$;
- Determinar a inclinação m da reta obtida;
- Utilizar a equação abaixo para obtenção da tensão.

$$\sigma_{\theta} = m.[E/(1+\nu)]$$

01

Onde:

m= Coeficiente angular da reta obtida;
 E= Módulo de elasticidade do material;
 ν = Número de Poisson;
 Ψ = Ângulo de orientação amostra.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. METAL DE BASE

Os corpos de prova para o experimento foram chapas de aço inoxidável 304L, com dimensões de aproximadamente 150x150 mm e espessura de 3mm, obtidas a partir de uma chapa de 300x300 mm.

3.2. MÉTODOS

As chapas foram soldadas sob diferentes condições, por meio do processo GMAW. O equipamento utilizado para o processo foi a máquina de solda MIG MB 250 LK, Merkle, Balmer.

Os parâmetros de soldagem seguem na tabela:

Tabela 03 – Parâmetros de soldagem

<i>Chapas</i>	<i>Energia (KJ/m)</i>	<i>Velocidade(m/min)</i>	<i>Voltagem(V)</i>
1	35	7,5	21,85
2	52	5	21,85
3	78	2,5	16,37
4	85	2,5	17,74

Foram utilizadas 4 chapas para o experimento, elas foram soldadas com passe único.

O processo de soldagem foi realizado no laboratório de mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz.

3.3. EXPERIMENTO: DIFRAÇÃO DE RAIOS – X

Após as soldagens, foram retiradas 2 amostras para cada chapa, uma na ZTA (Zona termicamente afetada) e uma no MS (Metal de solda) com área de 1 cm², havendo então um total de 8 amostras, sendo então lixadas até lixa grana 1000 e polidas.

Após os procedimentos necessários, as amostras foram levadas ao difratômetro de raios-x do Laboratório de Microanálise da UFES Vitória ES, para obter os dados necessários para análise das tensões residuais. Foi utilizado o método de múltipla exposição, com medições: $\Psi = 10^\circ$ a 100° , por ser mais sensível e obter uma variação maior do pico para uma deformação do retículo cristalino. Utilizou-se um feixe monocromático com comprimento de onda $\lambda=1,54184 \text{ \AA}$, tensão de operação 30 V e corrente 10 A.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. TENSÕES RESIDUAIS

Esse estudo apresenta análises, não citando valores numéricos devido a imprecisão de dados na calibração.

Para o processo de soldagem aplicado, houve a variação em parâmetros como velocidade do arame de soldagem para as amostras 1 e 2, enquanto para as amostras 3 e 4 houve variação voltagem.

Todas as amostras (exceto a 4), apresentaram um comportamento similar de tensões residuais nos respectivos MS e ZTA.

Diferente dos demais perfis, a amostra 4 (maior energia de soldagem associada), apresenta uma tendência de tensões residuais compressivas mais intensas no metal de solda e menos compressiva na ZTA. Mas com relação às outras amostras, o MS da amostra 4 apresentou o MS com tensões residuais menos compressivas, enquanto a ZTA foi a mais compressiva, entre as amostras.

Em todas as amostras estudadas, as tensões residuais apresentaram -se compressivas. Este fato pôde ser notado no experimento realizado por Oliveira, George Luíz Gomes de (2008). O trabalho cita que esse resultado pode ser explicado pelo efeito torniquete, em que durante o resfriamento da poça de fusão a circunferência do metal de solda contrai, para o caso que ele estudou, essa contração pode ter flexionado o tubo, comprimindo a parede externa e tracionando a parede interna.

O autor ainda menciona que o nível de tensões residuais do experimento se comportou de forma decrescente com o aumento da energia de soldagem e que as maiores energias de soldagem geraram os menores valores de tensão residual. Esse resultado, no entanto, não pôde ser identificado de forma gradual nesse experimento, pois a tendência observada para as tensões residuais foi de acréscimo para a ZTA das amostras 1, 2 e 3 e de decréscimo para o MS das mesmas amostras.

Também foi possível constatar visualmente durante o experimento que a qualidade do cordão de solda e a energia de soldagem são fatores inversamente proporcionais.

Segundo Rahul Unnikrishnana (2014), as tensões de tração são equilibradas pelas tensões de compressão, sendo então zero o estado geral de tensões. No experimento realizado (Utilizando o mesmo metal e técnica de difração de raios-x do presente estudo, além das variações nas energias de soldagem) pôde-se constatar que na maior entrada de calor, as tensões residuais foram trativas próximas à solda e o metal de base, enquanto para a menor entrada de calor, as tensões residuais foram compressivas. Contudo, este fato não pôde ser observado no presente estudo, sendo que todas as tensões observadas foram compressivas.

4.2. MICROESTRUTURA E MICRODUREZA

Rahul Unnikrishnana (2014), em seu estudo da influência da energia de soldagem na microestrutura, tensões residuais, e resistência a corrosão do aço inoxidável AISI 304 L, observou por meio do diagrama de Schaeffler que na mais baixa entrada de calor, onde a taxa de resfriamento foi maior, o teor de ferrita observado foi de 2 % e na maior entrada de calor, onde a taxa de resfriamento é mais lenta, o teor de ferrita foi de 4,5%.

No estudo, o número de ferritas e a dureza foram medidas. Como esperado, o número de ferritas aumentou com o aumento na entrada de calor, enquanto a dureza diminuiu, como consequência.

A energia de soldagem tem influência direta sobre a velocidade de resfriamento da solda. Segundo Dias (2009), para o caso dos aços inoxidáveis austeníticos, o aumento da energia de soldagem pode gerar maior tendência à formação de carbonetos de cromo, além de gerar uma maior deformação do material.

O autor ainda relata que especificamente para a soldagem do aço inoxidável AISI 304 com arame tubular, o diagrama de schaeffler prevê que o número de ferrita para esse aço é de 7%.

A respeito da análise dos perfis de microdureza, o autor conclui que os diferentes níveis de energia aplicados não influenciaram significativamente sobre as variações de microdureza. Contudo, algumas variações observadas podem ser explicadas pela heterogeneidade da microestrutura, devido às diferentes condições de resfriamento.

5 –CONSIDERAÇÕES FINAIS

As chapas foram soldadas com diferentes energias de soldagem, variando parâmetros de velocidade e voltagem. As amostras das chapas soldadas foram preparadas e submetidas ao ensaio de difração de raios-x e as tensões residuais no MS e ZTA analisadas.

Em função dos resultados e análises realizadas, este estudo conclui que:

- O ensaio de difração de raios-x se mostrou eficaz na análise de tensões residuais.
- As tensões residuais obtidas apresentaram-se compressivas em todos os níveis de energia e localidades analisados das amostras.
- Foi possível constatar que a variação da energia de soldagem por diferentes parâmetros (variação de voltagem e velocidade), influem sobre as tensões residuais.
- Conforme o estudo bibliográfico realizado, pôde-se perceber em relação à microestrutura do aço inoxidável austenítico 304L, um aumento no número de ferritas conforme se elevou o aporte de calor.
- Devido as divergências de alguns resultados com a literatura, faz-se necessário, posteriormente, uma continuidade desse estudo.

6 – REFERÊNCIAS

1. AKBARI, D.; SATTARI-FAR, I. Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. **International journal of pressure vessels and piping**, v. 86, n. 11, p. 769-776, 2009.
2. ASSIS, J. T. et al. X-ray analysis of residual stress distribution in weld region. **Adv X-ray Anal**, v. 45, p. 225-31, 2002.

3. CASTELLO, Xavier; GUROVA, T.; ESTEFEN, Segen. Simulação das Tensões Residuais de Chapas Soldadas na Construção Naval. In: **22º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro. 2008.**
4. COFIÑO, RACHEL CRISTINA. Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch. **FEI, São Bernardo do Campo, 2010.**
5. DA SILVA, CLÁUDIO MARIANO. PERFIL DE DUREZA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SOLDA E REGIÕES AFETADAS PELA SOLDA ALUMINOTÉRMICA DE TRILHOS EMPREGADOS POR UMA EMPRESA MINERADORA.
6. DE MELO, Raphael Henrique Falcão et al. Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7, n. 3, p. 192-204, 2012.
7. DIAS, Alexandre de Oliveira. Análise da influência dos parâmetros de pulsação na soldagem do aço inoxidável AISI 304 através do arame tubular AWS E316LT1-4. 2009.
8. OLIVEIRA, George Luiz Gomes de et al. Welding energy input evaluation on the final residual stresses in multipass welded joints. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 3, p. 218-224, 2010.
9. OLIVEIRA, George Luiz Gomes de; HÉLIO, C. M.; JESUALDO, P. F. Avaliação das tensões residuais em tubos de pequeno diâmetro soldados pelo processo TIG orbital. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 2, 2009.
10. MARTINS, Carlos Otávio Damas et al. Análise das tensões residuais em anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 através do método do furo cego. **Estudos tecnológicos em Engenharia. São Leopoldo, RS. Vol. 1, n. 2 (jul./dez. 2005), p. 39-47, 2005.**
11. MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG, 2012.**
12. NUNES, Everton Barbosa et al. Influence of the heat input on the microstructure and microhardness of weld overlay of duplex stainless steel. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 2, p. 114-122, 2012.
13. NUNES, Everton Barbosa et al. Study of restriction effects on microstructure, microhardness and toughness in welded joints of duplex stainless steel. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 156-164, 2011.
14. LIMA, Daniela Bianchi Ponce Leon de. Efeitos da energia de soldagem na microestrutura do aço inoxidável Superduplex Uns S32750. 2011.
15. LU, Jian (Ed.). **Handbook of measurement of residual stresses**. Fairmont Press, 1996.
16. ROCHA, Alexandre da Silva; NUNES, Rafael Menezes; HIRSCH, Thomas. Comparação entre difração de raios X e "método do furo cego" para medição de tensões residuais em barras cilíndricas. **Revista Matéria [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro, RJ. Vol. 14, n. 3 (2009), p.**
17. SILVA, Marcos Mesquita et al. Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura de revestimentos AISI 317L depositados em aços ASTM A516 Gr 60 para aplicação no setor de petróleo e gás. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 2, p. 54-60, 2010.
18. SIQUEIRA FILHO, Aníbal Veras de. Estudo comparativo das tensões residuais em juntas soldadas pelas técnicas de medição por coordenadas e difração de raios-x. 2012.

19. SOUZA, Mauro Carlos. Estudo Microestrutural de uma Junta Soldada do Aço Inoxidável Super Duplex SAF 2507 pelo Processo GTAW. **Cadernos UniFOA**, v. 9, n. 24, p. 37-44, 2014. **965-976**, 2009.
20. UNNIKRISHNAN, Rahul et al. Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments. **Materials Characterization**, v. 93, p. 10-23, 2014