


# Impacto nas Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais do Material ASTM A572 Grau 50 Soldado por Arco Submerso com Alívio de Tensões Térmico

Fernando Dias Vieira<sup>1</sup>, Kassim Shamil Fadhil Al-Rubaie<sup>2</sup>, Orlando Preti<sup>2</sup>, Ringo Ottmar Richter<sup>1</sup>, Sergio Delijaicov<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> WEG Equipamentos Elétricos, Departamento de Engenharia Industrial, Jaraguá do Sul, SC, Brasil.

<sup>2</sup> Centro Universitário Sociesc, Departamento de Mestrado e Pesquisa, Joinville, SC, Brasil.

<sup>3</sup> Centro Universitário FEI, Departamento de Mestrado e Pesquisa, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

**Como citar:** Vieira FD, Al-Rubaie KSF, Preti O, Richter RO, Delijaicov S. Impacto nas propriedades mecânicas e tensões residuais do material ASTM A572 Grau 50 soldado por arco submerso com alívio de tensões térmico. Soldagem & Inspeção. 2019;24:e2431. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.31>

**Resumo:** O aço ASTM A572 Grau 50 é utilizado na fabricação de conjuntos soldados para aerogeradores, por este motivo, a realização de alívio de tensões é de grande importância para correção dos impactos causados pelos processos de soldagem, bem como, o conhecimento das propriedades finais obtidas com a realização deste processo. O objetivo desse estudo é comparar as propriedades mecânicas e tensões residuais (método de furo cego) em amostras de aço ASTM A572 Grau 50, soldadas pelo processo de arco submerso, submetidas ao alívio de tensões na condição térmica (PWHT) e na condição como soldado (SST), seguindo os requisitos normativos da AWS D1.1-2015. Os resultados da condição PWHT referente a dureza, limite de escoamento, resistência a tração e tensões residuais são menores e os valores de alongamento e energia absorvida ao impacto são maiores do que a condição SST. Ambas as condições foram aprovadas no ensaio de dobramento lateral. Os resultados obtidos demonstram a importância do processo de alívio de tensões que minimiza os efeitos indesejados dos processos de soldagem aos componentes.

**Palavras-chave:** Aerogeradores; Alívio de tensões térmico; Propriedades mecânicas; Solda arco submerso.

## Influence in the Mechanical Properties and Residual Stresses of ASTM A572 Grade 50 Material Welded by Submerged Arc Welding with Post Weld Heat Treatment

**Abstract:** The ASTM A572 Grade 50 material is used in welded structural components in the manufacture of wind turbines. In this way, it is important to apply the stress relief process to correct the effects caused by the welding processes, and then assess the final properties obtained with this process. The objective of this article is to evaluate the mechanical properties of specimens of the ASTM A572 Grade 50 material welded by the submerged arc welding, comparing the thermal stress relief condition (PWHT) with the as welded condition (SST), following the normative requirements of AWS D1. 1-2015. Tensile testing, impact test, lateral bending, hardness and residual stresses measured by hole drilling method for the conditions tested. The results showed lower values of hardness, residual stress, yield strength, and ultimate tensile strength of the PWHT specimens. On the other hand, the values of elongation and impact energy absorbed of the PWHT specimens were higher than those of the SST specimens. Both conditions tested were approved in the lateral bending test. The results demonstrate the importance of the stress relief process, which reduces the unwanted effects of the welding processes, thereby delivering better quality of the components.

**Key-words:** Windgenerators; Post weld heat treatment; Mechanical properties; Submerged arc welding.

### 1. Introdução

As indústrias metal mecânicas e metalúrgicas incorporam todos os segmentos responsáveis pela transformação de metais nos produtos desejados, neste sentido, o aperfeiçoamento de processos de fabricação e introdução de novas tecnologias, permitem a redução de custos de processamento, a otimização de projetos, redução dos efeitos nocivos ao meio ambiente e aumento da competitividade das empresas. Entre os principais processos utilizados na indústria metal mecânica, os processos de soldagem apresentam uma série de vantagens, entre as principais, a integridade de uniões, variedade de processos aplicados a diferentes materiais e custo razoável, porém, possuem desvantagens como, mão-de-obra qualificada, controle durante a execução, fragilidade na zona termicamente afetada (ZTA) e introdução de tensões residuais [1].

Recebido: 21 Ago., 2019. Aceito: 29 Out., 2019

E-mails: fernandov@weg.net (FDV), kasrub@gmail.com (KSFA), preti@sociesc.com.br (OP), ringo@weg.net (ROR), sergiode@fei.edu.br (SD)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença [Creative Commons Attribution Non-Commercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

Em algumas aplicações de engenharia, estes fatores geram a necessidade de adição de processos para correção ou minimização dos efeitos metalúrgicos indesejados, principalmente relacionados à presença de tensões residuais. Devido à presença de tensões residuais, além de impactos na redução da vida útil em fadiga, quando o equilíbrio de forças de tensões residuais é afetado, como exemplo, na remoção de material por usinagem, o conjunto redistribui suas tensões residuais. Como resultado, podendo gerar distorções e possíveis problemas dimensionais de acordo com a precisão solicitada [2].

De acordo com Strohaecker [3] a contração térmica após a solda gera um complexo estado de tensões residuais na ordem do limite de escoamento da material base. Modenesi et al. [1] reforçam que as presenças de tensões residuais representam uma das principais causas potenciais para provocar falhas prematuras e distorções em peças, comprometendo o comportamento e até mesmo diminuindo a vida útil do componente, sendo fundamental o conhecimento das características e de medidas para a prevenção e controle.

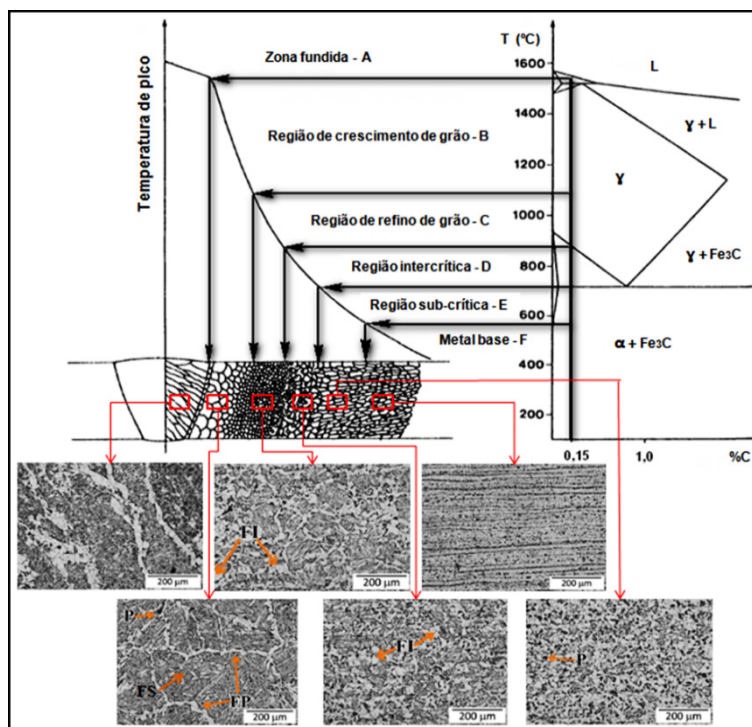
De acordo Smith [4] o processo de alívio de tensões térmico - PWHT (*Post Weld Heat Treatment*) possibilita a redução dos efeitos causados pela presença de tensões residuais em conjuntos soldados, possuem vasta aceitação no mercado, com características e parâmetros bem desenvolvidos e controlados em sua aplicação. Entretanto, também possuem características indesejadas como, elevado tempo de processamento, redução das propriedades mecânicas dos materiais e restrição dimensional para processamento de acordo com a capacidade de forno disponível.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é verificar quais são os impactos gerados no aço ASTM A572 Grau 50, soldado pelo processo de arco submerso, aliviado termicamente, comparando os resultados com a condição como soldada. Para isto, foram realizados ensaios de tração, dobramento lateral, microdureza Vickers, análise micro estrutural das juntas soldadas e medição de tensões residuais pelo método de furo cego.

## 2. Referencial Teórico

Entre os principais processos de soldagem, o processo de soldagem por fusão consiste na aplicação localizada de calor na região de união para a sua fusão e do metal de adição, realizando a união dos metais bases pela solidificação do metal fundido, destruindo as interfaces [1].

Segundo o Easterling [5] destaca que o aquecimento até o ponto de fusão e rápido resfriamento, com restrições da geometria da junta, resulta na alteração da microestrutura e propriedades originais do metal em uma região próxima à solda, este volume de metal, ou zona, é definido como ZTA. Segundo os Marques et al. [2] complementam que de acordo com o tipo de metal soldado, os efeitos do ciclo térmico são variados, sendo que na Figura 1 estão identificadas as regiões características para aços baixo carbono.



**Figura 1.** Microestrutura nas diferentes regiões da ZTA. Onde: FS = Bainita; FP = Ferrita de Contorno de Grão; P = Perlita; FI = Ferrita Poligonal Intragranular. Fonte: Adaptado de Easterling [5] e Diniz et al. [6].

Estes ciclos térmicos e alterações realizadas ao longo da região entre a solda e o metal de base, promovem variações dimensionais, alterações micro estruturais já citadas e outros efeitos indesejáveis, entre eles [1]: Tensões residuais de elevada magnitude; deterioração das propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade, resistência mecânica, etc.); formação de trincas e deterioração de propriedades físicas e químicas.

As alterações causadas pelo processo de soldagem podem ser evitadas de duas maneiras: A primeira é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem. A segunda é controlar a operação de soldagem e/ou incluir operações complementares de modo a minimizar, ou remover a degradação das propriedades da peça [2].

Tensões residuais podem ser criadas durante a fabricação ou vida útil dos materiais. Se não consideradas em projeto, as tensões residuais podem ser um fator importante para falha de um material, principalmente quando submetidos a cargas cíclicas ou em ambientes corrosivos, por outro lado, podem-se mostrar de forma benéfica quando compressivas na superfície, pois dificultam o início e a propagação de trincas [7]. Qualitativamente, pode-se estabelecer uma relação entre o nível de tensões compressivas sobre a superfície de um material, com o número de ciclos de vida em fadiga, mostrado na Figura 2 [3].

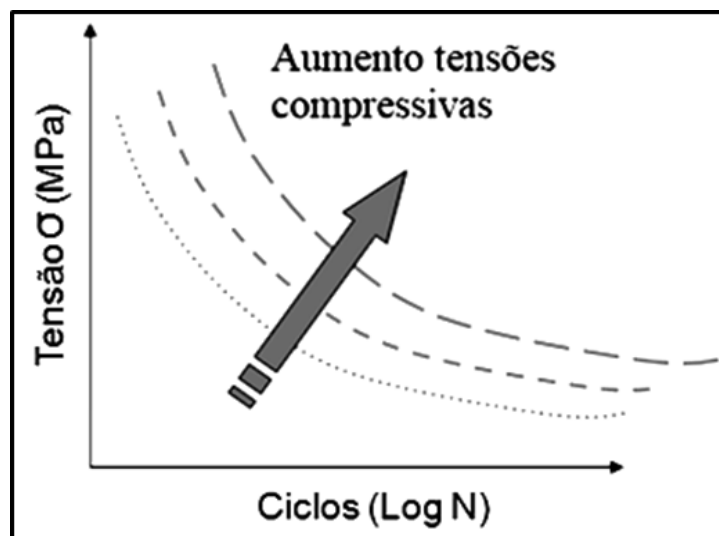


Figura 2. Aumento da vida em fadiga com aumento de tensões compressivas. Fonte: Adaptado de Strohaecker [3].

Para realização do alívio de tensões, o processo de maior aceitação é o processo de alívio de tensões térmico, para Smith [4] este processo consiste no aquecimento do aço a temperaturas abaixo da sua temperatura eutetóide com objetivo de realizar a relaxação de tensões internas no material, provenientes de processos anteriores, como solidificação, processos de soldagem ou conformação mecânica a frio.

A especificação normativa segundo AWS D1.1 [8], determina que para a realização do processo de alívio de tensões térmico, a temperatura inicial ( $T_i$ ) do forno para o alívio de tensões não deve estar superior a 315 °C ao introduzir a peça. Acima dos 315 °C, a taxa de aquecimento (TA) deve ficar na faixa de 55 a 220 °C/h. Atingindo a temperatura máxima entre 600 °C e 650 °C, deverá permanecer no tempo de patamar ( $T_p$ ), determinado conforme Tabela 1, considerando a maior espessura da peça. Neste período, não poderá haver variação maior do que 65 °C entre a maior e menor temperatura medida na peça. A taxa de resfriamento (TR) deverá ser controlada a uma taxa de no mínimo 55 °C/h e no máximo 260 °C/h até a temperatura atingir 315 °C, abaixo desta temperatura a peça poderá ser resfriada ao ar.

Tabela 1. Tempo de permanência na temperatura máxima (tempo de patamar).

ESPESSURA (E)	$\leq 6$ mm	$6 < E < 50$ mm	$\geq 50$ mm
TEMPO	15 min	15 min para cada 6 mm ou fração	2 h mais 15 min para cada adição de 25 mm ou fração acima de 50 mm

Fonte: Adaptado de American Welding Society [8].

### 3. Materiais e Métodos

Para definição dos corpos de prova e ensaios, foram seguidas as determinações da norma AWS D1.1, a fim de verificar se os resultados finais, tanto da condição aliviada termicamente, como da condição como soldado, atendem aos requisitos normativos para utilização em processos industriais.

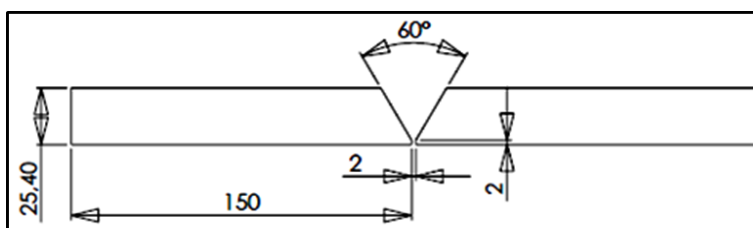
O aço ASTM A572 Grau 50 foi selecionado para esse estudo devido ser aplicado na fabricação de componentes estruturais de aerogeradores, caracterizado por ser um aço baixo carbono, com composição química e propriedades mecânicas mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química e propriedades mecânicas do aço ASTM A572 Grau 50.

FAIXA DE ESPESSURA (E)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	A (%)	CHARPY Tipo V
9,53 ≤ E ≤ 38,10	0,23	0,4	0,80~1,35	0,04	0,05	345	450	16	27 J a -20 °C

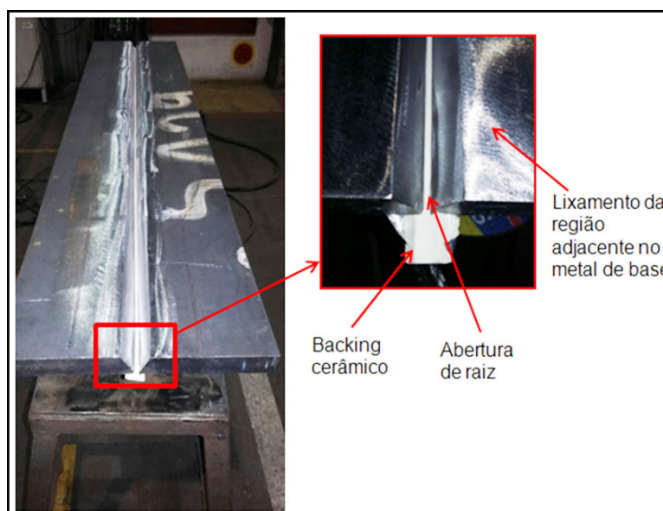
Onde: C = Carbono; Si = Silício; Mn = Manganês; P = Fósforo; S = Enxofre; LE = Limite de escoamento; LR = Limite de Resistência; A = Alongamento; Charpy Tipo V = Ensaio de impacto solicitado. Fonte: Adaptado de USIMINAS [9].

Para realizar o processo de soldagem, definiu-se a utilização do chanfro tipo “V”, conforme Figura 3, possibilitando a realização do passe de raiz no processo MIG/MAG e realizar todo preenchimento da junta com processo SAW sem remoção do mesmo, tornando o processo confiável e produtivo.



**Figura 3.** Representação do chanfro das amostras para soldagem (dimensões em mm).

As amostras foram montadas com a abertura de raiz especificada e utilizado *backing* cerâmico para a realização do passe de raiz, conforme mostra a Figura 4.



**Figura 4.** Amostra para soldagem e detalhe da abertura de raiz com *backing* cerâmico.

Foi realizado o passe de raiz com processo MIG/MAG, utilizando arame sólido  $\varnothing$  1,20 mm com mistura de gases V16 (Ar 90% + CO2 8% + O2 2%). Para preenchimento da junta com processo SAW, utilizou-se equipamento pórtico ESAB 1200<sup>a</sup> [10], com arame sólido EM 12K  $\varnothing$  3,97 mm e fluxo de proteção OK 10.71, detalhe da fabricação das amostras é mostrado na Figura 5. As condições PWHT e SST, foram soldadas com o mesmo tipo de travamento para não haver variações quanto à deformação e tensões residuais.

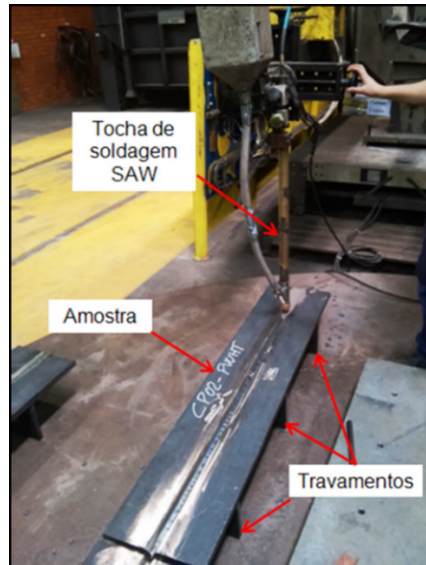


Figura 5. Realização do processo de soldagem em processo SAW.

Durante o processo de soldagem das amostras, houve acompanhamento de inspetor de soldagem N2, conforme previsto na norma AWS D1.1, a fim de garantir que todos os requisitos de controle de processamento fossem atendidos (controle de temperatura de interpasses, calibração de equipamentos, consumíveis utilizados, preparação das amostras, etc.).

Os principais parâmetros de soldagem utilizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Principais parâmetros de soldagem utilizados na fabricação das amostras.

PROCESSO	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO (cm/min)	TEMP. MÁX. DE INTERPASSE (°C)
GMAW	31,9	300	20,6	–
SAW	30-32,1	500-600	35-55	250

Após o processo de soldagem realizou-se o alívio de tensões térmico em um conjunto soldado, o controle de temperatura foi realizado por meio de termopares e registro da curva de tempo x temperatura, conforme gráfico gerado pelo sistema de controle do forno, visualizado na Figura 6.

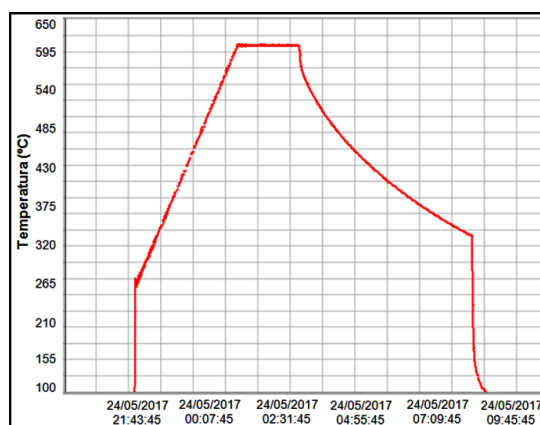
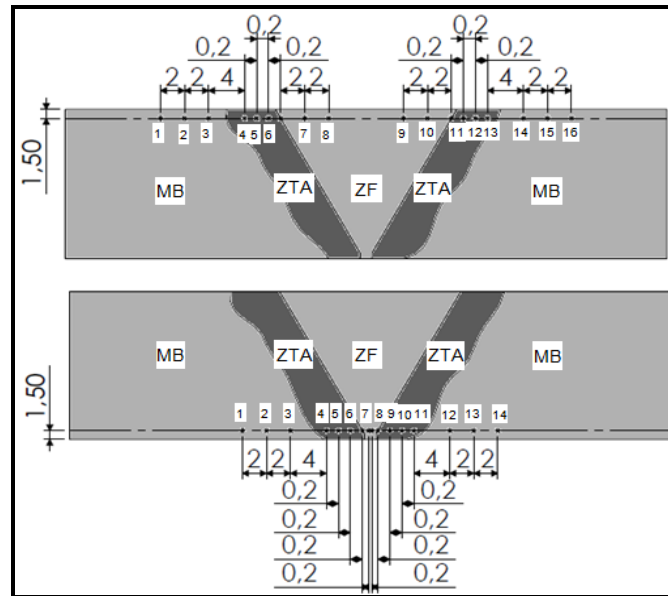


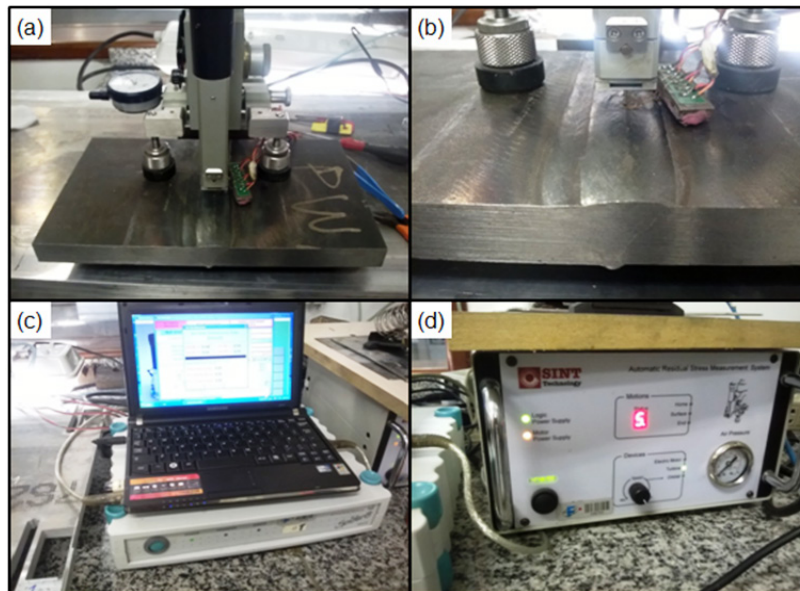
Figura 6. Gráfico de realização do processo PWHT na amostra soldada.

Para realização das medições de microdureza Vickers, utilizou-se durômetro de bancada Shimadzu HMV-G 21DT, com carga de 0,2 Kgf (HV 0,2), endentador piramidal de diamante com base quadrada e ângulo de interface de 136°. Determinado perfil de medição na seção transversal da solda, com 16 pontos na linha superior e 14 pontos na linha inferior, respeitando as distâncias especificadas conforme N-133 e detalhadas na Figura 7. Medições de dureza foram realizadas na região da zona fundida, ZTA e metal de base.



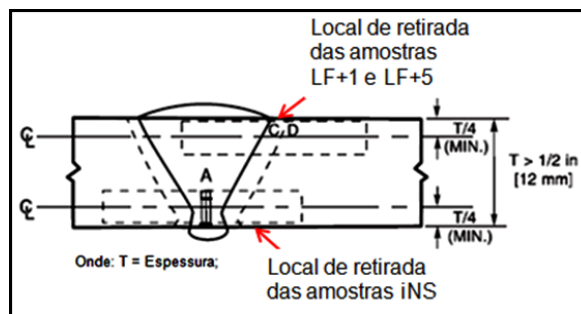
**Figura 7.** Esquema do perfil de dureza Vickers para chanfro soldado em “V”. Onde: MB = Metal de Base; ZTA = Zona Termicamente Afetada; ZF = Zona Fundida. Fonte: Petrobras [11].

Para obtenção das variações de deformações durante o ensaio de medição de tensões residuais pelo método de furo cego, as amostras foram instrumentadas com rosetas extensométricas (*strain gages*) especiais modelo PA-06-062RF-120-L, produzidas pela Excel Sensores, Figuras 8a e 8b. O sistema de aquisição de dados utilizado para o monitoramento das deformações durante o ensaio foi o Spider 8-30 da empresa HBM, Figura 8c. A conexão dos extensômetros de resistência elétrica com o sistema de aquisição de dados foi realizada através de cabeamento com três fios para configuração de  $\frac{1}{4}$  de ponte de Wheatstone, acoplada a um sistema automático de medições de tensões residuais marca Sint Technology, Figura 8d.



**Figura 8.** Equipamento de perfuração fixado sobre amostra (a), local de realização do furo (b), sistema de aquisição de dados (c) e equipamento de medições de tensões residuais (d).

Para fabricação das amostras para realização do ensaio de impacto Charpy, foram utilizadas as especificações de local de retirada e dimensional conforme AWS D1.1, conforme mostrado na Figura 9. As amostras foram resfriadas em álcool com adição de gelo seco e ensaiadas à temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a temperatura foi verificada com controlador de temperatura calibrado. Para todas as amostras, houve o tempo de espera de 5 minutos depois de submersas na solução para completa estabilidade da temperatura.



**Figura 9.** Local de retirada das amostras na seção transversal ao cordão de solda para ensaios de impacto Charpy. Onde: LF+1 = Linha de Fusão + 1 mm de deslocamento; LF+5 = Linha de Fusão + 5 mm de deslocamento. Fonte: Adaptado de American Welding Society [8].

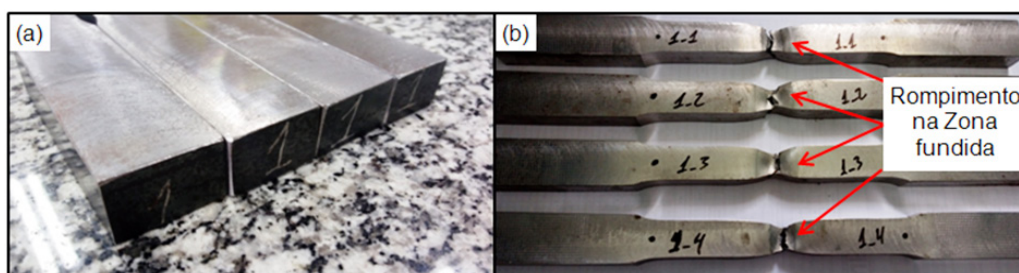
O ensaio de tração foi realizado em máquina universal de ensaios MTS Exceed E45 com software Panantec, capacidade de 30 ton e extensometria por vídeo, com objetivo de obter as propriedades de alongamento, limite de escoamento e resistência, a fim de verificar se todas as condições atendem ao limite mínimo especificado para o material base (ASTM A572 Grau 50).

Para realização do ensaio de dobramento lateral, as amostras foram apoiadas sobre dois roletes e aplicado força de forma a conformar as amostras em 180°. Utilizado cutelo com R = 25,4 mm e distância de apoio entre roletes igual a 73 mm.

#### 4. Resultados e Discussão

Para a condição SST, todas as amostras romperam na zona fundida, com valores das propriedades mecânicas mostradas na Tabela 4, superiores aos valores especificados na Tabela 2.

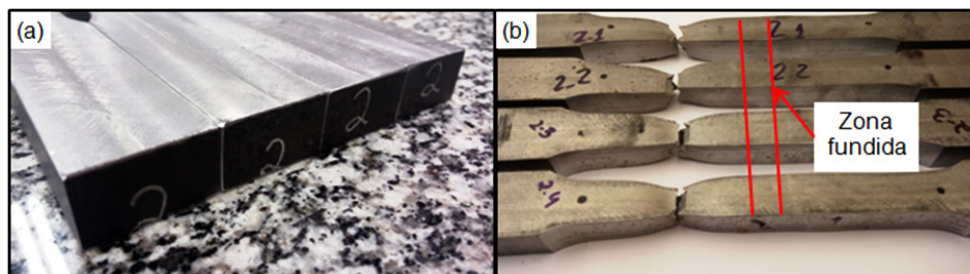
A Figura 10a, mostra a identificação das amostras preparadas para ensaio de tração e a Figura 10b as amostras rompidas.



**Figura 10.** (a) Identificação das amostras na condição SST preparadas para ensaio de tração e; (b) resultado com rompimento na zona fundida.

Para a condição PWHT, todas as amostras romperam fora da zona fundida, com valores das propriedades mecânicas mostradas na Tabela 4, superiores aos valores especificados na Tabela 2.

A Figura 11a, mostra a identificação das amostras preparadas para ensaio de tração e a Figura 11b as amostras rompidas.



**Figura 11.** (a) Identificação das amostras na condição PWHT preparadas para ensaio de tração e; (b) resultado com rompimento fora da zona fundida.

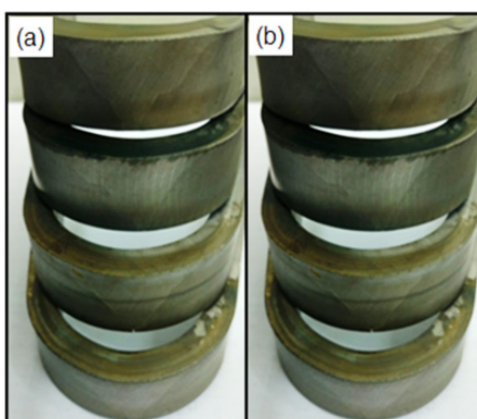
Os resultados obtidos no ensaio de tração para as condições SST e PWHT ficaram acima dos valores mínimos especificado pela norma ASTM A572 Grau 50. Para o limite de escoamento e o limite resistência a tração a condição SST apresentou valores superior em relação a condição PWHT, invertendo os valores para o alongamento.

**Tabela 4.** Resultados do ensaio de tração.

CONDIÇÃO	PROPRIEDADES MECÂNICAS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	MÉDIA	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL
SST	LR (MPa)	558,8	562	558,8	564,1	560,9	2,6
	LE (MPa)	394,8	391,4	400,3	406,9	398,4	6,8
	A (%)	21,3	20,7	21,6	21,8	21,4	0,5
PWHT	LR (MPa)	522	523	521,8	525,4	523,1	1,7
	LE (MPa)	354,6	362,5	365,2	354,8	359,3	5,4
	A (%)	26,2	26,3	26,5	27,3	26,6	0,5

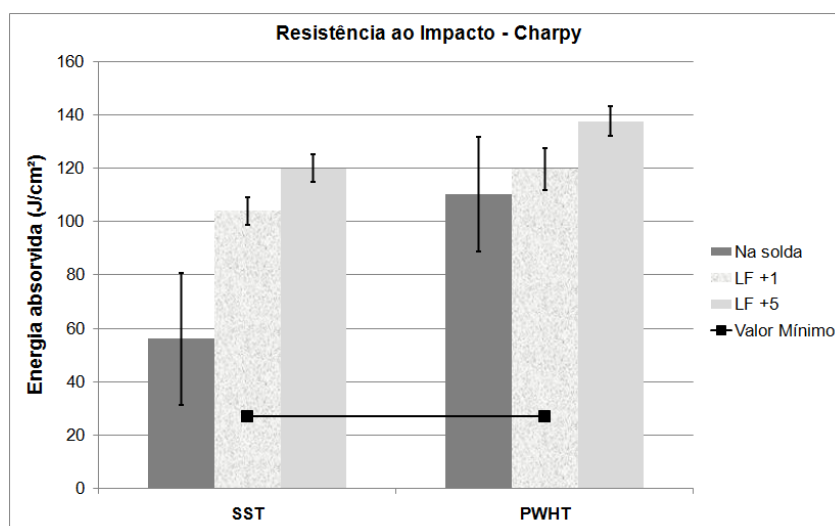
Onde: SST = Soldado Sem Tratamento; PWHT = *Post Weld Heat Treatment*; LR = Limite de Resistência; LE = Limite de Escoamento; A = Alongamento.

Para as condições SST e PWHT no ensaio de dobramento lateral, não houve rompimento e nem presença de trincas em nenhuma das amostras, sendo todas as amostras ensaiadas foram aprovadas, conforme mostra a Figura 12a e 12b.



**Figura 12.** Amostras após ensaio de dobramento. (a) amostras SST e; (b) amostras PWHT. Onde: SST = Soldado Sem Tratamento; PWHT = *Post Weld Heat Treatment*.

A Figura 13 mostra os valores do ensaio de impacto tipo Charpy, obtidos (colunas) nas amostras ensaiadas na condição SST e PWHT, nas regiões denominadas na solda, LF +1, LF +5 e dados especificados pela norma ASTM A572 Grau 50 (linha horizontal), sendo que todas as médias com os desvios padrão ficaram acima do valor mínimo que é de 27 J a  $-20^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 13.** Valores de ensaio de impacto Charpy, temperatura a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Onde: SST = Soldado Sem Tratamento; PWHT = *Post Weld Heat Treatment*. LF+1 = Linha de Fusão + 1 mm de deslocamento; LF+5 = Linha de Fusão + 5 mm de deslocamento.

A Tabela 5 mostra os valores médios com desvio padrão das medições de microdureza Vickers realizadas nas amostras na condição SST e PWHT obtidos de acordo com as regiões MB, ZTA e ZF.

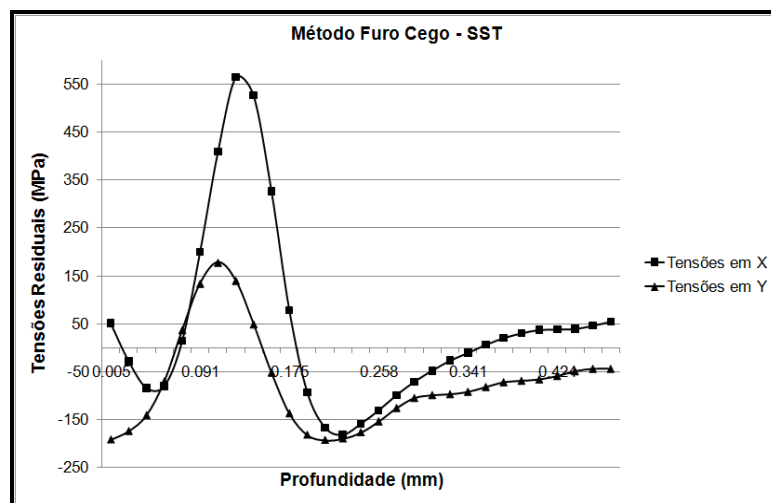


**Tabela 5.** Valores médios de microdureza Vickers (HV 0,2) na linha inferior e superior das amostras.

CONDIÇÃO		LOCAL DE MEDIÇÃO	MB	ZTA	ZF
SST	Média / Desvio Padrão Amostral	Linha inferior	197,5 ±10,45	231,7 ±18,96	219 ±11,31
		Linha Superior	185,8 ±4,6	242,0 ±7,9	223,5 ±15,4
PWHT	Média / Desvio Padrão Amostral	Linha inferior	187,5 ±5,17	213,5 ±15,80	200,5 ±16,26
		Linha Superior	180,8 ±4,1	237,5 ±16,5	210,5 ±9,8

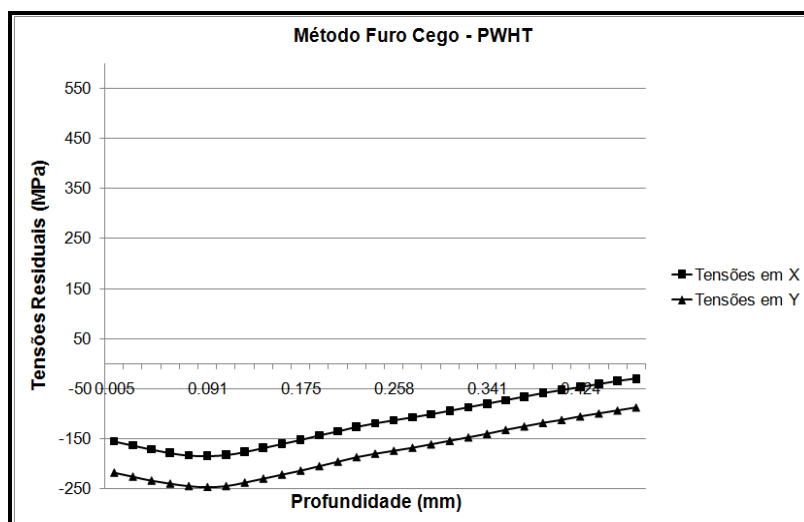
Onde: MB = Metal de Base; ZTA = Zona Termicamente Afetada; ZF = Zona Fundida; SST = Soldado Sem Tratamento; PWHT = *Post Weld Heat Treatment*.

A Figura 14, mostra a distribuição de tensões residuais na amostra da condição SST, com valor máximo próximo a 550 MPa entre 0,1 e 0,2 mm de profundidade na direção em X e tensão máxima de 160 MPa na direção Y, ambas tensões de tração. Importante observar a oscilação entre tensões trativas e compressivas ao longo da profundidade das medições realizadas, caracterizando a variação e distribuição de tensões geradas não-uniformes pelo processo de soldagem.



**Figura 14.** Tensões residuais no cordão de solda da amostra SST. Onde: SST = Soldado Sem Tratamento.

A Figura 15 mostra, para a amostra na condição PWHT, as tensões residuais compressivas junto à superfície, com valores de 160 e 250 MPa, sentido X e Y, respectivamente, na profundidade entre 0,1 a 0,2 mm. Houve redução significativa dos níveis de tensões residuais em relação à condição SST, ainda, pode-se verificar a distribuição homogênea ao longo da profundidade.



**Figura 15.** Tensões residuais no cordão de solda da amostra PWHT. Onde: PWHT = *Post Weld Heat Treatment*.

## 5. Conclusões

Com os resultados obtidos no desenvolvimento desse estudo, pode-se verificar as seguintes conclusões:

Os resultados obtidos no ensaio de tração aprovaram as condições SST e PWHT verificadas neste trabalho. Apesar do rompimento das amostras SST na solda, esta condição apresentou resultados de limite de resistência e escoamento acima do mínimo especificado pela norma ASTM A572 Grau 50.

No ensaio de microdureza Vickers, é possível observar que a condição PWHT apresentou resultados de 10 a 20% inferiores em relação à condição SST, reforçando que a redução no limite de resistência acompanhou a redução de dureza. O ensaio de dobramento aprovou a integridade das juntas soldadas em função da sua ductilidade, não apresentando nenhuma trinca ou defeitos de solda. Para qualificação de novo procedimento de soldagem, ambas condições estariam aprovadas de acordo com os critérios da AWS D1.1.

No ensaio de energia absorvida ao impacto Charpy, a condição PWHT apresentou resultados superiores demonstrando o benefício do processo de alívio de tensões térmico.

Conforme medições de tensões residuais realizadas pelo método de furo cego, é possível destacar a efetividade do processo de alívio, a partir da verificação dos níveis de tensões não-uniformes verificados na condição SST. Pode-se afirmar que o processo PWHT atingiu níveis satisfatórios de tensões residuais nas amostras. Além da redução dos níveis de tensões residuais em magnitude, a condição aliviada apresentou níveis de tensões compressivas junto à superfície, fator benéfico na utilização da peça. Ainda, a distribuição ao longo da profundidade medida encontra-se mais uniforme, sem variações bruscas, podendo impactar em maior estabilidade dimensional de componentes quando aplicado em condições industriais.

Com isto, pode-se concluir que ambas as condições atendem aos limites mínimos especificados na norma AWS D1.1, destacando os baixos níveis de tensões residuais obtidos na condição PWHT, demonstrando a efetividade do processo, contribuindo beneficentemente na utilização dos componentes soldados.

## Agradecimentos

Agradecimento à empresa WEG Equipamentos Elétricos por possibilitar e disponibilizar recursos para fabricação das amostras e desenvolvimento do trabalho junto à empresa e as instituições UNISOCIESC e FEI, na disponibilização dos laboratórios para realização dos ensaios e suporte acadêmico para o presente trabalho.

## Referências

- [1] Modenesi PJ, Marques PV, Santos DB. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- [2] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2005.
- [3] Strohaecker T. Tensões residuais em componentes mecânicos. In: Congresso de Inovação Tecnológica; 2014; Joinville. Joinville: CINTEC Fundição; 2014.
- [4] Smith JD. Heat treatment of steel. In: ASM International. Heat treater's guide. Materials Park: ASM; 1982.
- [5] Easterling K. Introduction to the physical metallurgy of welding. Great Britain: Butterworth-Heinemann; 1992.
- [6] Diniz JLC, Santos OR Fo, Jorge JCF, Marouco ES, Souza LFG. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. Soldagem e Inspeção. 2015;20(3):347-358. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2004.04>.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM E837-13a: standard test method for determining residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage method. West Conshohocken: ASTM International; 2013.
- [8] American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M:2015: structural welding code: steel. 23rd ed. Miami: AWS.
- [9] USIMINAS. Catálogo de materiais: chapas grossas. Belo Horizonte; 2017.
- [10] ESAB. Tratamento térmico de alívio de tensões na soldagem. Contagem; 2017 [acesso em 14 fev. 2017]. Disponível em: [http://www.esab.com.br/pt/education/blog/tratamento\\_termico\\_alivio\\_te\\_nsoes\\_soldagem](http://www.esab.com.br/pt/education/blog/tratamento_termico_alivio_te_nsoes_soldagem)
- [11] Petrobras. N-133: soldagem. Rio de Janeiro: Comissão de Normalização Técnica; 2015.