

GABRIEL LOPES CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA ALÍVIO
DE TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2023

GABRIEL LOPES CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA ALÍVIO
DE TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Pr. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Uberlândia
2023

GABRIEL LOPES CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO USO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA ALÍVIO
DE TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
graduado em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Prof. Douglas Bezerra de Araújo

Eng. Ricardo Martins Silva

Uberlândia, 03 de fevereiro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e à Petrobras pelo financiamento do presente projeto e também pelo acompanhamento dos interlocutores técnicos. Registramos também nossos agradecimentos ao CNPq e Fapemig por recursos utilizados no projeto. Gostaríamos de agradecer ao MSc. Ricardo Martins Silva pelo extenso trabalho em tensões residuais na soldagem e colaboração imprescindível ao trabalho. Gostaríamos de agradecer à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica e a toda Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) pelo trabalho em organizar todo o curso de Engenharia Mecânica ao longo dos anos.

CAMPOS, G. L. **Avaliação do uso de vibração mecânica para alívio de tensões residuais na soldagem**. 2023. 50 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

As tensões residuais geradas durante o processo de soldagem provocam distorções que são foco de atenção da indústria. Esse problema é uma causa direta do ciclo térmico causado por uma intensa e localizada fonte de calor para a fusão do material, que ocasiona expansões e contrações não homogêneas entre o cordão de solda e o material de base. Ter o conhecimento desses efeitos provocados pelos ciclos térmicos garante vantagem no seu desenvolvimento e execução. As tensões residuais na superfície e subsuperfície de componentes mecânicos, durante sua manufatura e em serviço, podem afetar o desempenho e representar um importante potencial aos seus desvios de forma e dimensão. Nesse trabalho é desenvolvida avaliação do uso de vibração mecânica para alívio de tensões residuais na soldagem de chapas de aço ASTM A131 EH36, utilizando MIG/MAG com transferência metálica por Spray e o método do furo cego (*Hole-drilling*) - MFC. A partir dos valores de deformações obtidos, foram calculadas as tensões residuais na direção longitudinal e transversais para cada distância do centro da junta. Notou-se que para a frequência escolhida para este estudo (63 Hz) houve um alívio acentuado na posição mais distante do centro da junta soldada em discordância com o ponto mais próximo do centro da junta, o que mostra um alto gradiente entre os três pontos medidos.

Palavras-chave: *Aço ASTM A131 EH; Furo cego; Tensões residuais; Soldagem.*

CAMPOS, G. L. **Evaluation of the use of mechanical vibration for the relief of residual stresses in the welding.** 2023. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

The residual tensions generated during the emotion process cause distortions that are the focus of industry attention. This problem is a direct cause of thermal cycling caused by an intense and localized heat source for melting the material, which causes unobserved expansions and contractions between the weld bead and the base material. Having knowledge of these effects caused by thermal cycles guarantees an advantage in its development and execution. Residual stresses on the surface and subsurface of mechanical components, during manufacture and in service, can affect performance and represent an important potential for their shape and dimension deviations. In this work, the evaluation of the use of mechanical vibration for residual stress relief in the transition of ASTM A131 EH36 steel plates is developed, using MIG/MAG with metallic spray transfer and the blind hole method (Hole-drilling) - MFC. From the strain values obtained, the residual stresses were continuous in the longitudinal and transverse directions for each distance from the center of the joint. From the strain values obtained, residual stresses were calculated in the longitudinal and transversal directions for each distance from the center of the joint. It was noted that for the frequency chosen for this study (63 Hz) there was an accentuated relief in the most distant position from the center of the welded joint in disagreement with the point closest to the center of the joint, which shows a high gradient between the three points measured.

Keywords: *ASTM A131 EH steel; Hole-drilling; Residual stresses; Welding.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contração transversal em uma junta de topo (AWS, 1987).....	18
Figura 2. Contração longitudinal em uma junta de topo (AWS, 1987).....	18
Figura 3. Distorção rotacional em uma junta de topo utilizando processo SMAW (AWS, 1987).....	19
Figura 4. Distorsão em uma junta de topo utilizando processo SAW (AWS, 1987).....	19
Figura 5. Distorsão angular (AWS, 1987).....	20
Figura 6. Flexão longitudinal em uma solda de filete de uma viga de perfil T (AWS, 1987).....	20
Figura 7. Representação das mudanças de temperatura e tensão durante o processo de soldagem de placas de aço. a) Processo de soldagem; b) Distribuição das tensões longitudinais; c) Distribuição de temperaturas na placa (AMANTE, 2006).....	21
Figura 8. Representação esquemática das variações de temperatura e tensão durante o processo de soldagem (ASM, 1993).....	22
Figura 9. Superposição das TR dos tipos I, II, e III (WHITHERS; BHADESHIA, 2001).....	24
Figura 10. Esquema da seção transversal de um furo submetido a um estado de tensões trativo: (a) sem a presença de um furo cego e (b) após a usinagem do furo cego (SCHAJER, 2013).	28
Figura 11. Método do furo para medição de tensões residuais (ANDERSEN, 2000).....	28
Figura 12. Deposição do cordão sobre a linha neutra como método de prevenção á distorção (adaptado TWI, 1988).....	29
Figura 13. Fluxograma de atividades.....	32
Figura 14. Projeto do sistema de travamento na versão final.	33
Figura 15. Equipamentos do aparato experimental (a. Fonte de soldagem DigiPLUS A7 DCU (IMC Soldagem, 2020), b. Robô FANUC Arcmate 100 iB (RobotWorx, 2020), Sistema de aquisição de dados SAP IV-Ti (“IMC Soldagem”, 2020), c. Sistema de aquisição de dados SAP IV-Ti (“IMC Soldagem”, 2020), d. Equipamento de medição de tensões residuais por furo cego MTS3000 – Restan, da empresa SINT Technology (SINT Technology s.r.l., 2019)).....	35
Figura 16. Desenho esquemático das posições das tensões residuais por MFC.	35
Figura 17. Mapa de dureza, em gráfico tipo mapa de calor (à esquerda), macrografia (ao centro) e perfil de dureza (à direita).....	36
Figura 18. a. Detalhe da roseta a direita, b. Montagem da roseta na junta solda, a esquerda.....	36
Figura 19. Esquema da bancada experimental utilizada para o alívio de tensões por vibração.....	37
Figura 20. Arranjo eixo do excitador alinhado com o eixo da junta soldada.....	37
Figura 21. Chapa com ângulos medidos de deformação angular.....	38
Figura 22. Imagem do sistema de escaneamento, mostrando um comparativo entre as etapas antes e depois de soldar para o Aço A131 EH36 na condição TATV63Hz-A2.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais técnicas de medição das tensões residuais (adaptado de AMOROS, 2008).	26
Tabela 2. Tabela com os valores de distorções angulares nas diferentes etapas para o Aço A131 EH36 (Condições com valores com desvio padrão igual a zero não tiveram repetibilidade).....	38
Tabela 3. Valor líquido das distorções em diferentes condições de alívio de tensões para os Aços A131 EH36.	38
Tabela 4. Tensões residuais transversais e longitudinais para o aço A131 EH36.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS

MFC	Método do Furo Cego
SB	<i>SwitchBack</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
TR	Tensão residual
TAT	Tratamento de Alívio de Tensões
TATV	Tratamento de Alívio de Tensões por Vibração
TT	Tecimento trapezoidal
VMR	Vibração Mecânica Ressonante
VSR	<i>Vibration Stress Relief</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 EFEITOS MECANICOS DO CICLO TÉRMICO	16
2.2 DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS.....	17
2.3 Tensões residuais em juntas soldadas	21
2.4 Efeito das tensões residuais.....	25
2.5 Técnicas para medição de tensão residual	26
2.6. Tratamento de alívio de tensões residuais (TAT)	29
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Medição de tensões residuais	35
3.2. Tratamento de alívio de tensões residuais	36
4. Resultados.....	38
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS.....	42
ANEXO A.....	47
ANEXO B.....	48
ANEXO C	49

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os processos de soldagem possuem uma ampla aplicação na indústria de bens de capital. Com a globalização e a entrada de empresas estrangeiras no país, as indústrias nacionais se vêem cada vez mais pressionadas a buscar soluções para aumentar sua competitividade e reduzir seus custos, seja através da redução de custos de matéria prima e logística, assim como no aumento da sua eficiência nos processos de fabricação (MIRANDA, 2015).

O aumento da produtividade nos processos de soldagem, contudo, podem maximizar efeitos indesejáveis como deformações, tensões residuais e alterações microestruturais no material devido ao aporte excessivo de calor na peça. Deformações ou distorções em soldagem são ocasionadas por deformação plástica não uniforme do material em função do aquecimento de uma região localizada da peça durante o processo de soldagem, resultando em variações geométricas e dimensionais (MIRANDA, 2015).

Neste contexto, já é bem estabelecido na literatura que tensões residuais trativas possuem efeito deletério à vida em fadiga assim como reduzem a resistência à corrosão sob tensão dos materiais. Por outro lado, tensões compressivas podem ser benéficas à vida do componente, por apresentarem uma barreira natural à propagação de trincas. Existem diversos métodos para alívio de tensões residuais. Tais métodos visam reduzir a magnitude dessas tensões evitando assim a falha inesperada do material, ainda no regime elástico. As técnicas mais utilizadas para alívio são os tratamentos térmicos e a técnica do alívio de tensões por vibração - TATV (AOKI *et al.*, 2007).

Esse estudo se debruça sob o processo de alívio de tensões residuais por vibração mecânica, conhecido como VSR (*Vibration Stress Relief*), segundo Sun *et al.* (2004), tem seu uso por apresentar resultados satisfatórios em suas aplicações como a redução de custo, redução do tempo de processo mantendo um percentual de melhoria satisfatória quando confrontado com os métodos tradicionais por tratamento térmico. Para Chuvas (2012), esta tecnologia se destaca por ser um método que possui um custo consideravelmente inferior em relação aos tratamentos térmicos e, também, por ser eficiente em materiais com estruturas heterogêneas.

Esse processo pode ser usado para aliviar tensões causadas por usinagem, fresagem, retífica, punctionamento, mandrilhamento, estampagem, furação, aplainamento, corte, forjamento e soldagem. É particularmente útil para estruturas muito

grandes, onde o alívio de tensões por tratamento térmico teria um custo muito elevado ou seria impossível de realizar, e para peças de precisão industriais a fim de eliminar distorções do metal que poderiam impedir a manutenção de tolerâncias ajustadas (DREYFUS GLOBAL TRADE, 2018).

Por fim, para Lu (1996), os principais parâmetros que devem ser levados na escolha da técnica de medição, os principais parâmetros são: A natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões residuais, geometria do componente e o custo final da medição.

Neste trabalho objetivou-se em analisar as tensões residuais em chapas antes e após TATV mecânica. de chapas de aço ASTM A131 EH36.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar sua compreensão e apoio as conclusões. Inicialmente são apresentados conceitos sobre o mecanismo de desenvolvimento das distorções geométricas e tensões residuais em juntas soldadas originárias em etapas de soldagem. Apresenta-se também conceitos e estudos utilizados para o planejamento deste trabalho, importantes para o entendimento e compreensão da metodologia, resultados e conclusões deste estudo.

2.1 EFEITOS MECANICOS DO CICLO TÉRMICO

Quando uma estrutura recebe calor uniformemente e não existirem restrições às suas variações dimensionais, não se observam efeitos mecânicos importantes, mas se o calor fornecido à estrutura não for uniforme ou se existirem restrições à contração/expansão da estrutura durante o ciclo térmico, tensões residuais e distorções podem ser desenvolvidas (AMANTE, 2006).

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). Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de sua temperatura. Sendo essa variação expressa por:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad (1)$$

Onde ΔL é a variação de comprimento, L_0 é o comprimento inicial e α é o coeficiente de dilatação térmica linear do material. Se 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 (MODENESI, 2001).

2.2 DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS

Tensões residuais ocorrem nas estruturas metálicas durante as etapas de fabricação, incluindo fundição, laminação, dobra, corte térmico, forjamento, usinagem e retificação (MARQUES *et al.*, 2009, KWOFIE 2009 e ROSSINI *et al.*, 2012). Os tratamentos térmicos também influenciam as tensões residuais e a aplicação localizada de calor na soldagem gera tensões térmicas complexas em partes da peça. Uma das principais causas da sua origem são as deformações plásticas não uniformes, causadas por efeitos mecânicos ou térmicos (MARQUES *et al.*, 2009). Desta forma, as tensões residuais podem ser classificadas em dois grupos de acordo com os mecanismos que as produziu (ASM HANDBOOK, 1993):

- a) Tensões produzidas por inadequação estrutural;
- b) Tensões produzidas por uma distribuição desigual de forças não elásticas, incluindo as deformações plásticas e térmicas.

De acordo com Masubuchi, 1980, três fundamentais alterações dimensionais que ocorrem durante a soldagem causam distorções geométricas em juntas soldadas: contração transversal (perpendicular ao cordão de solda), contração longitudinal (paralelo ao eixo cordão de solda) e distorção angular (rotação das partes em torno do cordão depositado). Essas distorções podem ser definidas por alguns autores (VERHAEGHE, 1999; ANDERSON, 2003; KOU, 2003; DENG; MURAKAWA, 2008; WANG *et al.*, 2008) como sendo a expansão não uniforme e a contração do cordão de solda e do metal de base adjacente durante o ciclo de aquecimento e resfriamento do processo de soldagem.

Segundo Araújo (2012), as distorções são resumidas em seis tipos básicos:

- **Contração Transversal:** As distorções transversais são provenientes da contração perpendicular à direção de soldagem e é responsável por produzir alta tensão residual e propagação de trincas no caso de juntas muito restringidas conforme Fig. 1. A tendência é de que haja redução da largura das chapas devido a essa contração (SERRATI, 2019) As distorções transversais podem ser reduzidas fazendo o ponteamento de solda nas extremidades e no centro do comprimento a ser soldado. Além disso, segundo Bracarense *et al.* (2005), o grau de restrição da junta e número de passes de solda também são fatores que influenciam na magnitude dessa contração.

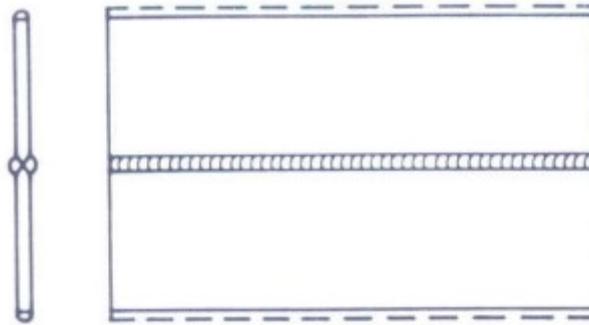


Figura 1. Contração transversal em uma junta de topo (AWS, 1987).

- **Contração Longitudinal:** A contração longitudinal como apresentado na Fig. 2, ocorre ao longo do cordão de solda e pode-se dizer que ela tende a ser menor que a contração transversal, pois o próprio metal de base funciona como agente restritivo à distorção. Segundo a AWS, 2001, a contração longitudinal que ocorre em juntas de topo é proporcional ao comprimento do cordão de solda e inversamente proporcional à espessura do metal de base. Logo, a principal causa é a presença de excesso de material depositado durante a soldagem. O resfriamento do cordão de solda (parte mais quente) contrai e “puxa” (tensiona) o metal base, de forma que no início e no final do cordão de solda a distorção é maior, porque nessas regiões não há material adjacente (SERRATI, 2019).

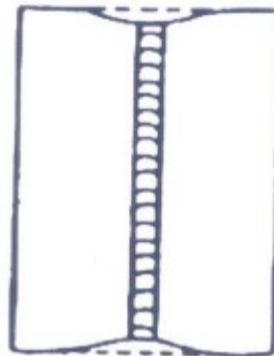


Figura 2. Contração longitudinal em uma junta de topo (AWS, 1987)

- **Distorção Rotacional:** Masubuchi (1980), classifica a distorção rotacional como uma distorção angular no plano da junta causada por expansões térmicas, ilustrada na Fig. 3. Esta distorção é caracterizada pelo aumento ou diminuição da abertura de raiz, aproximando ou afastamento as partes. Em processos de soldagem onde a velocidade de deslocamento do arco é baixa (eletrodo revestido, por exemplo), porções da junta não soldada tende a fechar. Já para processos de soldagem com altas velocidades de soldagem (arco

submerso, MIG/MAG), as partes não soldadas tendem a se afastar. Além disso, quando aços de baixo carbono são utilizados e são soldados com eletrodos revestidos processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) e uma baixa velocidade de soldagem a porção não soldada da junta à frente da poça de fusão tende-se a fechar. Agora, quando utilizamos o processo a arco submerso SAW (*Submerged Arc Welding*), a porção à frente da poça de fusão tende-se a abrir, pois sua velocidade de soldagem é alta, como apresentado na Fig. 4. Isto significa que as restrições feitas por soldas de ponteamto deverão ter dimensão adequada para resistir às tensões causadas pela distorção rotacional.

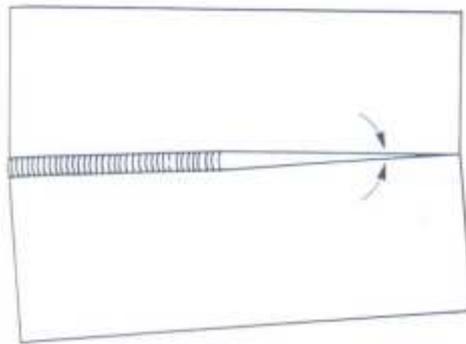


Figura 3. Distorção rotacional em uma junta de topo utilizando processo SMAW (AWS, 1987)

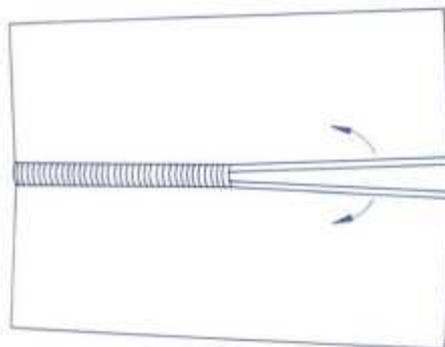


Figura 4. Distorção em uma junta de topo utilizando processo SAW (AWS, 1987)

- **Distorção Angular:** A distorção angular apresentada na Fig. 5 é gerada pelas diferenças de temperatura entre as faces superior e inferior do cordão, que provocam variações nos valores da magnitude de contração no sentido da espessura da chapa (AWS, 1991; RADAJ, 1992). Em chapas mais espessas a distorção angular é pequena, pois o próprio metal de base funcionará como restrição. Em soldas de topo, este tipo de distorção é muito freqüente devido à contração transversal não ser uniforme na direção da espessura.

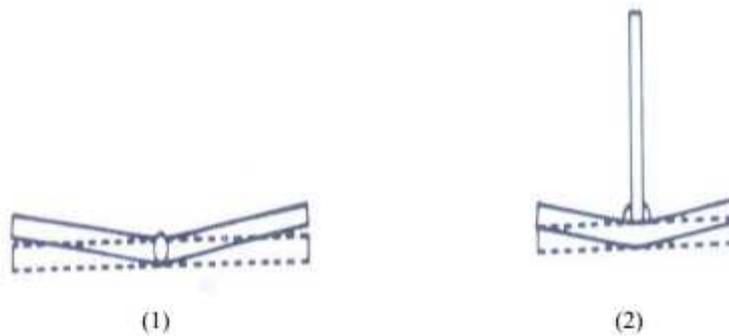


Figura 5. Distorção angular (AWS, 1987)

- **Flambagem:** Segundo Deo e Michaleris (2007), caso as tensões longitudinais compressivas (afastadas da margem do cordão de solda) assumam valores acima da tensão de resistência crítica à flambagem da junta, a mesma irá se deformar. Este modo de distorção é crítico sobretudo para metais de base de espessura inferiores a 6 mm segundo Radaj (1992), sendo o modo mais instável de distorção, apresentando grandes valores de deslocamento característico das partes e difícil recuperação mecânica das peças submetidas a esse modo de distorção.

- **Flexão longitudinal:** A contração longitudinal do metal de solda induz momentos de flexão, resultando em distorção longitudinal da estrutura, quando a linha de solda não coincide com o eixo ou linha neutra da estrutura, como apresentado na Fig. 6. Este tipo de distorção ocorre principalmente quando são fabricadas vigas de formato I ou T, por causa de desalinhamento entre centro de massa do cordão de solda e a linha neutra da seção da junta, as forças longitudinais de contração (responsáveis pela contração longitudinal) geram um momento fletor que pode ultrapassar a resistência a flexão longitudinal da junta através do momento resultante desta força de contração, deformando conforme se mostra na figura abaixo.

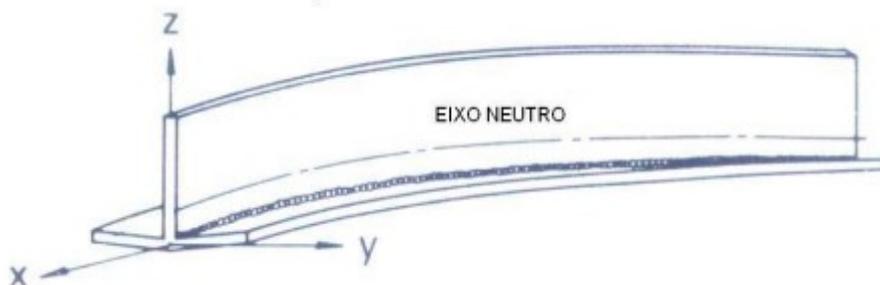


Figura 6. Flexão longitudinal em uma solda de filete de uma viga de perfil T (AWS, 1987)

Estes tipos de distorções são muito comuns na fabricação utilizando o processo de soldagem, porém existem alguns fatores que contribuem para o aparecimento e aumento do nível destas distorções. O próximo Item descreve alguns dos fatores que mais influenciam nas distorções

2.3 Tensões residuais em juntas soldadas

Tensões residuais ou tensões internas são tensões que permanecem em um corpo após os carregamentos externos serem removidos (RADAJ, 2003; SORENSEN, 1999 e RIBEIRO, 2006). No caso da soldagem, as tensões residuais ocorrem principalmente em consequência do aquecimento não uniforme da peça, sendo, portanto, tensões de origem térmica. As tensões residuais também podem ter uma contribuição de fatores externos, como por exemplo, devido ao alinhamento não uniforme da junta (DENG *et al.*, 2014; ASM, 1993; AMANTE, 2006). Dessa forma, conforme Radaj (2003), as tensões residuais e as distorções que ela provoca prejudicam a eficiência do processo e caracterizam diminuição da qualidade do produto final.

A Fig. 7 ilustra a formação de tensões residuais longitudinais durante o processo de soldagem de placas de aço.

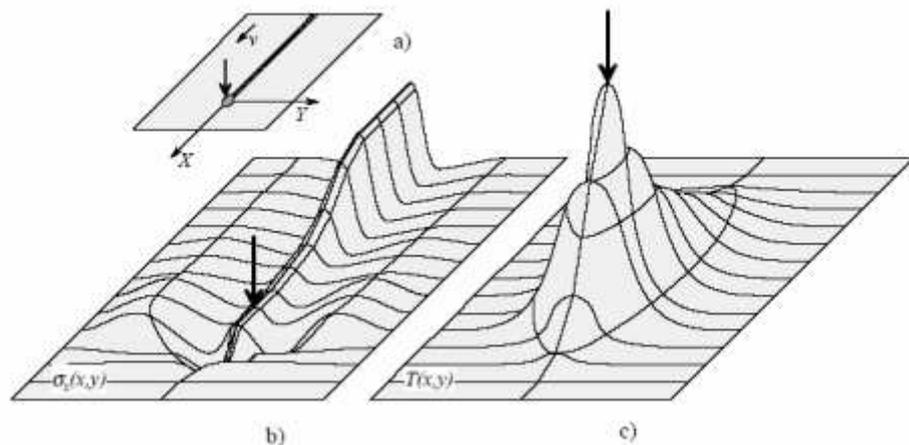


Figura 7. Representação das mudanças de temperatura e tensão durante o processo de soldagem de placas de aço. a) Processo de soldagem; b) Distribuição das tensões longitudinais; c) Distribuição de temperaturas na placa (AMANTE, 2006)

Ao longo da operação, tensões térmicas transientes são produzidas na solda e em sua vizinhança, acompanhadas de contração e deformação devido à solidificação da zona fundida e resfriamento. A Fig. 8 esquematiza esse fenômeno em diferentes seções da peça

durante o processo de soldagem.

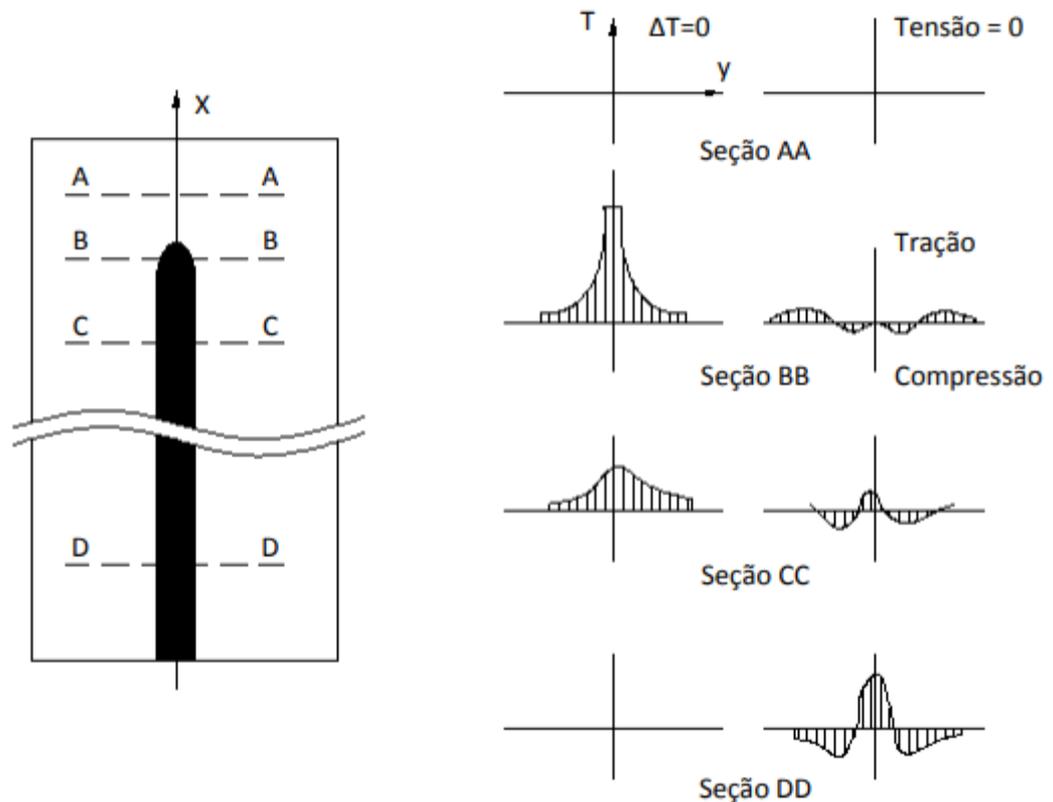


Figura 8. Representação esquemática das variações de temperatura e tensão durante o processo de soldagem (ASM, 1993)

Na seção AA da Fig. 8 o gradiente de temperatura em razão da soldagem é quase nulo. Contudo, na seção BB que cruza a zona fundida, o material é submetido a elevados gradientes de temperatura devido à proximidade do arco elétrico. Ao se afastar da fonte de calor, com o resfriamento e solidificação da poça de fusão, na seção CC os gradientes de temperatura se tornam menores e na seção DD que está muito afastada da fonte estes se tornam praticamente nulos novamente. Os gráficos de tensão apresentados representam os valores de tensão σ_x ao longo do eixo Y (MIRANDA, 2015).

Na seção AA, os valores de tensão são próximos de zero. A distribuição de tensões na seção BB é complexa, e sobre a poça de fusão considera-se o seu valor como nulo em função do metal fundido não suportar solicitações de tração e cisalhamento. Ao se afastar da fonte de calor, as tensões se tornam compressivas na região vizinha à poça de fusão devido à expansão do metal ser restringida pelo metal base. Por causa das altas temperaturas nesta área, o limite de escoamento do material é reduzido de forma que as tensões ficam limitadas a este em função da temperatura. As tensões em regiões mais afastadas se tornam trativas para balancear com as tensões compressivas próximas a solda. Com o resfriamento da solda e do metal base, tensões

de tração surgem na região da solda e nas regiões adjacentes (seção CC), e à medida que se afasta destas regiões, as tensões se tornam compressivas.

Ao se afastar ainda mais (seção DD), a temperatura se aproxima da temperatura ambiente e a magnitude das tensões de tração e compressão se tornam maiores (ASM, 1993).

Dessa forma, segundo Amante (2006), como as tensões residuais são esforços internos auto-equilibrados, e observadas sem nenhum carregamento externo, as forças e momentos atuantes devido a essas tensões em uma determinada seção da estrutura devem ser nulos, como nas Eq. (1) e (2):

$$\int_A \vec{\sigma} d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

$$\int_A dM = 0 \quad (2)$$

Além disso, a distribuição residual $\sigma_x(y)$ ao longo do eixo transversal da solda pode ser aproximada empiricamente pela Eq. (3):

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{d} \right) \right] e^{-\left[\left(\frac{1}{2} \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right) \right]} \quad (3)$$

em que σ_m é a tensão máxima na região da solda e d é a largura da zona de tensão da tensão residual.

Apesar da importância tecnológica, em muitos casos, a presença de tensões residuais não é claramente avaliada. Isso acontece devido às dificuldades conceituais, informações metalúrgicas insuficientes, ausências de um conveniente balizamento dos parâmetros durante os processos de fabricação e limitações nas técnicas para sua medição. Além disso, dificuldades advêm de diferentes fenômenos mecânico-metalúrgicos, alguns deles não claramente entendidos, que isolados ou conjuntamente podem ocorrer na sua formação (AMANTE, 2006).

Por fim, comumente, as tensões residuais são classificadas em três tipos, sendo eles: (MACHERAUCH E KLOOS, 1987, WITHERS; BHADSHIA, 2001).

- **Macroscópica ou Tipo I:** são tensões que se estendem sobre grandes porções volumétricas quando comparadas com o tamanho de grão do material, quase homogêneas em escala (p.e.: tensões que se apliquem aos limites de uma amostra).

- **Microscópica ou Tipo II:** São tensões quase uniformes e se expandem em um ou alguns grãos, no interior de uma fase ou entorno de um precipitado. Espera-se a sua existência em materiais monofásicos devido à anisotropia do comportamento de cada grão. Podem ser observadas em porções menores do material, como os contornos de grão (KANDIL *et al.*, 2001).

- **Submicroscópica ou Tipo III:** Tensões sub-microscópicas são de escalas interatômicas, estando em equilíbrio só ao longo de regiões muito reduzidas de um grão; se houver uma ruptura do equilíbrio deste tipo de tensão não será detectável nenhuma variação macroscópica de dimensão.

A Figura 9 representa a combinação dessas tensões, resultando na tensão residual total da peça.

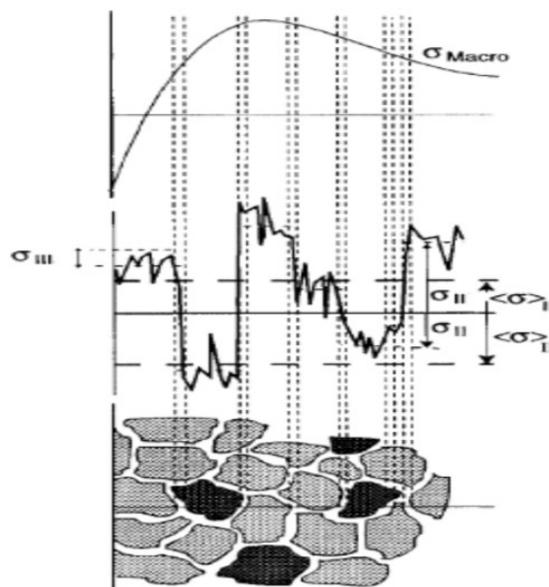


Figura 9. Superposição das TR dos tipos I, II, e III (WHITHERS; BHADESHIA, 2001)

Praticamente, todas as operações de manufatura contribuem para o aparecimento de tensões residuais (AMOROS, 2008):

- Contração no resfriamento devido a regiões diferentemente aquecidas nos processos de tratamento superficiais, como têmperas ou carbonetação;
- Regiões plastificadas durante a operação de soldagem;
- Resfriamento após um processo de fundição para solidificação do material;
- Contração de moldes utilizados em injeção de diversos materiais podendo resultar em fissuras a quente;

- Processo de “shot peening” ou jateamento de esferas contra a superfície dos materiais;
- Processos de conformação mecânica como laminação, dobramento, extrusão, etc; Estas tensões residuais que aparecem nos materiais são ainda mais complexas durante o processo de soldagem, onde existe um aquecimento local e móvel, causando defeitos ou problemas indesejáveis às estruturas soldadas. Desta forma, muitos estudos são feitos para estudar as tensões residuais que aparecem durante o processo de soldagem.

2.4 Efeito das tensões residuais

As tensões residuais de tração são indesejáveis uma vez que contribuem e/ou aceleram as falhas, tais como fissuras em corrosão sob tensão, fadiga e falha por distorção e alteração da estabilidade dimensional (SHANKAR 1982, WALKER 1995, AOKI 2007, XU 2007, KWOFIE 2009), além de afetar de forma diferente o desempenho de uma junta soldada, de acordo com sua natureza, tensão trativa ou compressiva (SILVA, 2018).

Para Masubuchi (1980), após grandes pesquisas experimentais e metalúrgicas com finalidade de investigar trincas em soldas, concluiu-se que estas trincas se dão por um dos ou ambos fatores: O material é frágil e/ou estão há a presença de tensões de alta magnitude (transientes ou permanentes).

Segundo Welding Handbook (1998) e pesquisadoras como Crisi e Mendonça (2006), os principais efeitos das tensões residuais em peças soldadas:

- a) As tensões residuais são adicionadas à carga que a solda tenha sido concebida para suportar, o que pode levar ao colapso do material.
- b) Redução da resistência à corrosão sob tensão. Regiões submetidas a tensões de tração elástica podem sofrer corrosão localizada em ambientes agressivos.
- c) Risco de trincas. Todos os mecanismos de trincamento são afetados pelo estresse residuais e distorção causada pelo aquecimento localizado.

As tensões residuais e distorções permanecem após a soldagem e, por vezes, causam trincas e desencontro de juntas. Altas tensões residuais de tração em áreas próximas à solda podem causar falhas prematuras de estruturas soldadas. A distorção e tensões residuais de compressão no metal base podem reduzir a força de deformação de um elemento estrutural sujeito à carga compressiva. Corrigir a distorção é onerosa, em alguns casos, impossível (ASM HANDBOOK, 1993).

2.5 Técnicas para medição de tensão residual

Segundo Ribeiro (2006), a maioria das técnicas de análise experimental de tensões é baseada na medição das deformações provocadas por cargas externas. Entretanto, as tensões residuais existentes num material ou estrutura são internas e autoequilibrantes. Na medição por métodos mecânicos provoca-se uma perturbação ao estado de equilíbrio inicial e estabelece-se um novo estado de equilíbrio.

Estes métodos são denominados por técnicas de relaxação de tensões residuais. Algumas destas técnicas podem provocar a inutilização do componente ou estrutura enquanto noutras a alteração pode ser tão pequena que não provoca a sua inutilização. Existem também técnicas que permitem a sua medição a partir da variação de características físicas alteradas pelas tensões residuais. Por isso, as técnicas de medição de tensões residuais podem ser classificadas em três tipos: técnicas destrutivas, semi destrutivas e não destrutivas.

Na Tab. 1 se encontra um resumo das principais técnicas de medição das tensões residuais.

Tabela 1. Principais técnicas de medição das tensões residuais (adaptado de AMOROS, 2008).

Descrição	Furo cego	Seccionamento	Deflexão	Raios-X	Difração de Nêutrons	Ultrassom	Magnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Microscópica; Microscópica	Microscópica; Microscópica	Macroscópica; Microscópica; Submicroscópica	Macroscópica; Microscópica; Submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deflexão	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Variação da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude do ruído Barkhausen Ou Permeabilidade magnética
Área de análise mínima	0,5 mm ²	100 mm ²	1000 mm ² ; 100 mm ² Strain gages	0,5 mm ²	4 mm ²	0,1 mm ² alta frequência e 30 mm ² no método convencional	1 mm ² Brarkhausen e 100 mm ² com permeabilidade magnética
Mínima profundidade e de análise	20 μm	1 a 2 mm	20 μm	Dezenas de micrômetros	1 mm	15 a 300 μm	100 μm
Incerteza típica	+/- 20MPa	+/-10 MPa	+/-30 MPa	+/-20 MPa	+/-30 MPa	+/- 10 a +/- 20 MPa	+/- 10 a +/- 20Mpa
Tempo de preparação	2h	5 a 200h	8h	8h	1 semana	20 minutos	10 minutos
Tempo de medição	40 min	40 min	30 min	20 min	2h	Poucos minutos	Instantâneo
Custo do equipamento \$	10 a 50000	15000	1000	100.000 a 200.000	Centenas de milhões	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000

Basicamente, segundo Suterio (2005), uma técnica de medição é escolhida de acordo com a natureza da parte a ser analisada e do tipo de medição a ser realizada. Estes

parâmetros incluem o seguinte:

- Natureza do material: estrutura cristalográfica, textura, composição química e fase;
- O tipo de tensões residuais (macro tensão e micro tensão);
- O gradiente de tensões residuais na parte analisada (gradiente através da espessura ou da superfície);
- A geometria e a região da parte analisada (profundidade, dimensão e forma da superfície);
- Onde a medida é realizada (em campo ou em laboratório);
- O tipo de intervenção (destrutiva ou não destrutiva);
- O tempo (razão de medição), e a extensão da intervenção;
- A incerteza e a repetitividade do método;
- O custo da medição e dos equipamentos necessários.

2.5.1 Medição de tensões por furo-cego

Uma técnica comum e que foi proposta (MATHAR, 1934) para medição de tensões residuais em materiais isotrópicos e homogêneos (RENDLER; VIGNESS, 1966), é o MFC. As pesquisas sobre o MFC foram evoluindo e ramificando-se por diferentes caminhos.

A ASTM E 837-95 (ASTM, 1995) descreve esse método como sendo uma técnica de medição de tensões residuais pelo relaxamento de tensões e com o uso de sensores “*straingauge*”. Esta técnica consiste em fixar os sensores à superfície da peça e executar o furo próximo a estes, e medir a tensão aliviada pelas deformações resultantes. As tensões medidas são então relacionadas às tensões principais aliviadas por um conjunto de equações. A técnica é considerada semi-destrutiva, pois produz furos com pequenas profundidades e diâmetros. Segundo (BEGHINI *et al.*, 2011), os furos produzidos têm profundidades que variam entre 1,0 a 1,5mm e diâmetros de 1,8 a 2,0mm. Portanto, na impossibilidade de execução de um furo passante, um furo cego pode ser utilizado, conforme o esquema da Fig. 10.

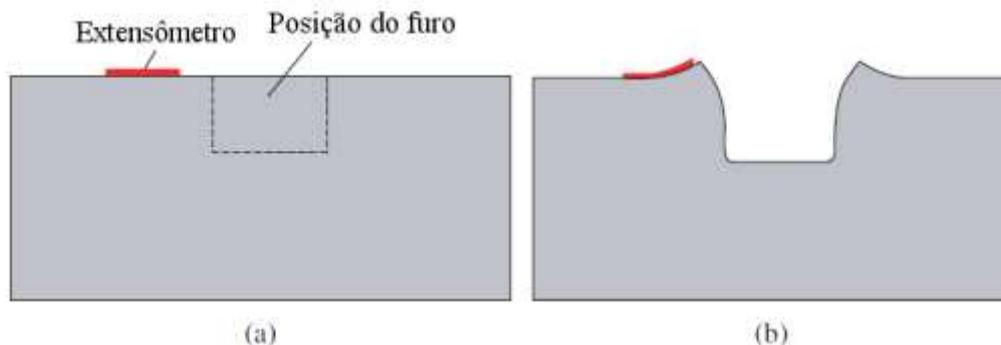


Figura 10. Esquema da seção transversal de um furo submetido a um estado de tensões trativo: (a) sem a presença de um furo cego e (b) após a usinagem do furo cego (SCHAJER, 2013).

Ainda segundo a norma, a aplicação da técnica se restringe a medição de tensões residuais no plano e indica a tensão residual (TR) próxima as bordas do furo realizado para medição. Além disso, o método se aplica para os casos nos quais o material apresenta comportamento linear elástico. Ainda segundo a norma, é possível um escoamento local devido à concentração de tensão ao redor do furo, por isso, a norma afirma que resultados satisfatórios podem ser obtidos quando a TR não exceder em torno de 80 % da tensão de escoamento do material, para materiais “espessos” e 50 % da tensão de escoamento para materiais “finos”.

A Figura 11 representa esta técnica para uma configuração típica dos sensores em roseta com ângulos de 0° , 45° e 90° , em que G1, G2 e G3 representam os sensores, R_a é o raio do furo, R_m é o raio médio de posicionamento dos sensores, α é o ângulo formado entre o sensor 1 com a tensão máxima σ_{max} e β o ângulo entre a tensão máxima σ_{max} com o relaxamento radial.

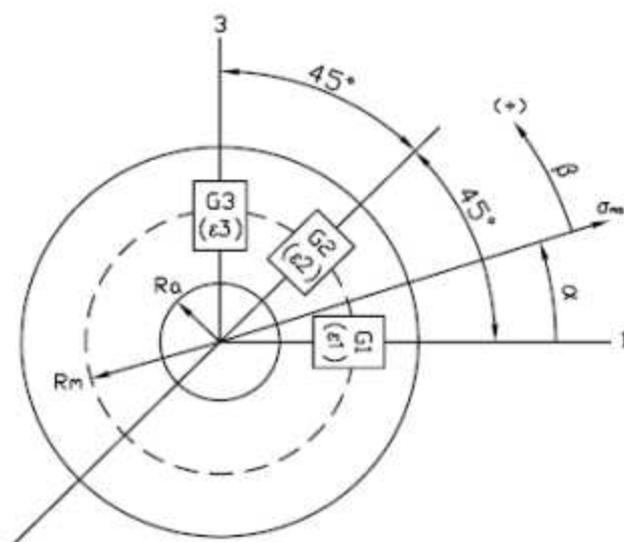


Figura 11. Método do furo para medição de tensões residuais (ANDERSEN, 2000)

2.6. Tratamento de alívio de tensões residuais (TAT)

As distorções em juntas soldadas reduzem a precisão de montagem entre partes, agregam custos com retrabalhos, afetam a resistência e a aparência visual do produto final. Por ser fenômeno intrínseco ao processo de soldagem, cabem aos engenheiros e projetistas desenvolverem alternativas e soluções de forma que essas sejam evitadas preferencialmente em etapas de projeto da junta, mas podendo eliminá-las durante a soldagem ou através de métodos corretivos pós soldagem (PORTA NETO, 2017).

Segundo o mesmo autor, entre as medidas relativas ao projeto da junta, depositar mínima quantidade de metal de adição, impactando em menores forças de contração, projetar chanfros simétricos (chanfro em X, K, duplo U), deslocar a tocha do ponto de maior restrição em direção ao ponto de menor restrição, posicionamento das soldas próximas à linha neutra da seção ou em posições simétricas são medidas possíveis e de baixo impacto econômico (Fig. 12). Definir a sequência adequada de passes pode trazer benefícios através do fornecimento balanceado de energia e forças de contração.



Figura 12. Deposição do cordão sobre a linha neutra como método de prevenção à distorção (adaptado TWI, 1988)

2.6.1. Alívio de tensões residuais por vibração

O alívio de tensões por Vibração Mecânica Ressonante (VMR) se apresenta como uma alternativa ao envelhecimento natural ou ao alívio das tensões térmicas para reduzir as tensões residuais em estruturas (DAWSON; MOFFAT, 1980), além de não gerar os mesmos problemas que o tratamento térmico para alívio de tensões (WALKER *et al.* 1995, LUH e HWANG 1998).

Essa técnica é recente e estudada há pouco mais de 20 anos, e foi desenvolvida para ser aplicada para estruturas de médio e pequeno porte, embora neste último caso seja requerida uma montagem específica, tendo em vista as dimensões envolvidas. Além disso, esse método se apresenta como uma excelente alternativa aos tradicionais métodos de alívio de tensões

residuais como os tratamentos térmicos (que podem gerar oxidação da superfície aquecida e mudança das propriedades do material) e a métodos que introduzam tensões residuais de natureza compressiva como shot peening (AOKI *et al.*, 2007; YANG, 2009). Isto se deve ao seu baixo custo energético, alta eficiência e rapidez de processo (GAO *et al.*, 2017).

O processo é simples e consiste em induzir um ou mais estados vibratórios, ressonante ou sub-ressonante, numa estrutura de metal usando excitadores de elevada força (SHANKAR, 1982). Estes excitadores geralmente consistem de pesos excêntricos acoplados a um motor de velocidade variável e seus equipamentos de alimentação e controle associados (CRISI e MENDONÇA 2006, RAO *et al.* 2006, KWOFIE 2009, MARTINS *et al.* 2012).

Os vibradores utilizados geralmente trabalham numa faixa de frequência de 0 a 100 Hz (SHANKAR, 1982; JURCIUS *et al.*, 2010), e estão conectados à estrutura suportada por blocos de borracha e isolada do chão ou de estruturas rígidas, ficando livre para vibrar (CRISI; MENDONÇA, 2006, LINDQVIST; HOLMGREN 2007; RAO, 2014), aliviando assim (em alguns casos) em até 90 % das tensões residuais presentes no material. O VSR pode afetar a vida em fadiga do material, dependendo da amplitude aplicada na vibração. Altas amplitudes reduzem a vida em fadiga do material, enquanto baixas amplitudes praticamente não afetam a mesma (GAO *et al.*, 2017).

O tratamento de vibração é breve, geralmente abaixo de 30 minutos. A vibração também pode ser feita por meio de um shaker (DAWSON; MOFFAT 1980, BRAGA, 2011, CHUVAS 2012) conectado a um amplificador de potência, que recebe informações de um gerador de sinais incorporado ao analisador de sinais (CHUVAS, 2012).

Essa vibração não altera as propriedades mecânicas ou cristalográficas do material e, além disso, não há reaparecimento das tensões (CHUVAS *et al.*, 2010). As tensões residuais sofrem combinação com as tensões dinâmicas geradas pela vibração mecânica. Esta combinação pode exceder o limite de escoamento do material sendo assim responsável por tornar mais randômicas as direções principais da rede cristalina (JIA-SIANG *et al.*, 2015; RAO *et al.*, 2007).

Shankar (1982), relata que as vibrações podem ser transmitidas para a peça de dois modos: nas estruturas suficientemente grandes o vibrador pode ser fixado diretamente na peça. A outra forma, para peças pequenas, faz uso de uma mesa especial onde o vibrador e as peças são fixadas, neste caso, ao combinar uma pequena peça de trabalho com a mesa, as frequências naturais de toda a combinação podem ser diminuídas e vibradas com sucesso.

As três abordagens de TATV são:

- **sub-ressonante:** ocorre quando o equipamento utilizado não permite adotar

frequência igual à de ressonância, somente frequência inferior

- **ressonante:** As vibrações mais eficientes são as de ressonância, porque nesta frequência a tensão é melhor distribuída, se comparada com a frequência sub-ressonante. Vibrações de baixa frequência transportam energia de alta amplitude e são muito eficientes na diminuição significativa do pico de tensões residuais em partes metálicas e soldadas (CLAXTON, 1998; CRISI; MENDONÇA 2006; WEN HE, 2006; SUN, 2004).

- **sub-harmônica:** A vibração sub-harmônica é realizada quando não existem as condições necessárias para ambos os alívios de tensão por VMR ou VMSR. Isto acontece geralmente porque a resposta de ressonância do material está fora do alcance dos equipamentos (BAQAR *et al.*, 2014).

O denominador comum entre os processos de alívio por vibração é o isolamento da peça a ser tratada do ambiente em que se encontra e submetê-la a uma força cíclica, cujo efeito é monitorado em tempo real (CLAXTON, 1998).

Além disso, para Aoki *et al.* (2007), ambas as vibrações ressonante e não ressonante podem aliviar as tensões residuais em estruturas soldadas através da criação de deformações plásticas em torno da área de solda. Para a vibração não ressonante, a redução das tensões depende fortemente da amplitude de vibração e para a vibração ressonante, a frequência de vibração é a chave para aliviar as tensões.

Para o caso do alívio de tensões residuais geradas por processos de soldagem, por vibração, o processo pode variar dependendo das características do material. Alguns materiais são mais bem aliviados quando a vibração ocorre durante a soldagem, enquanto outros após a mesma (AOKI *et al.*, 2007).

Uma análise realizada por Munsiri *et al.* (2001) comparou o efeito do alívio de tensões residuais por tratamento térmico e por vibração mecânica, em amostras soldadas, na vida em fadiga do componente. Foi possível observar que as amostras aliviadas por tratamento térmico sofreram uma redução de 43 % da vida em fadiga enquanto as aliviadas por vibração um aumento de 17 % e 30 %.

Além o excelente alívio de tensões residuais, manutenção das propriedades mecânicas do material e curto tempo de tratamento estão a flexibilidade, o VSR, para alguns casos, não exige a paralização do equipamento a ser tratado e o baixo custo se comparado ao tradicional tratamento térmico. O método chega a apresentar custos inferiores a 90 % quando comparado ao tratamento térmico com utilização de apenas 1 % e tempo inferior a 30 minutos (CHUVAS, 2012; RAO *et al.*, 2007).

3. METODOLOGIA

Este trabalho buscou desenvolver-se de forma simples e objetiva, cujos detalhes são apresentados no decorrer desse capítulo. Como dito anteriormente, o objetivo principal desse estudo é o desenvolvimento de um método de avaliar tensões residuais na soldagem de chapas grossas do aço ASTM A131 EH, para isso, adotou-se o seguinte sequenciamento de atividades do fluxograma abaixo:

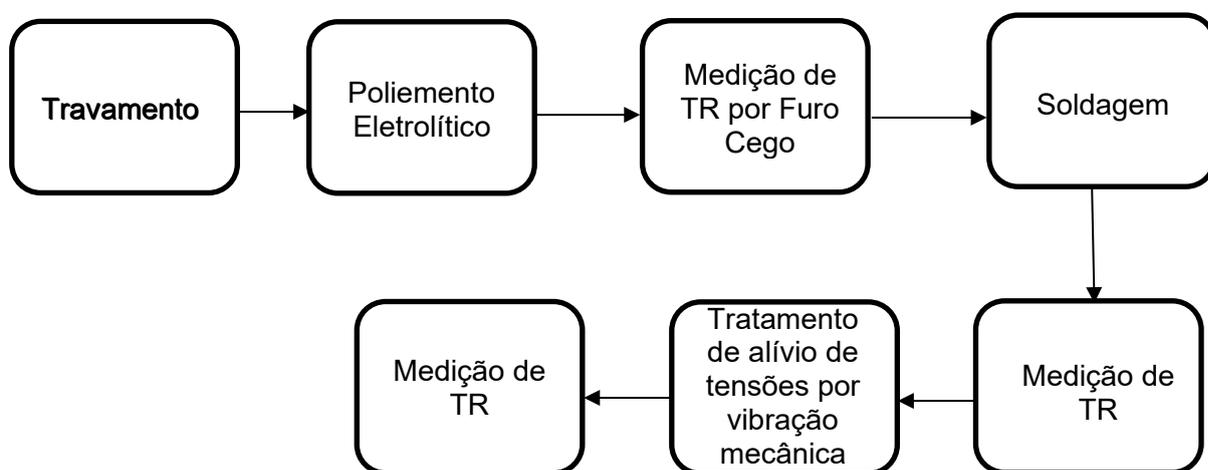


Figura 13. Fluxograma de atividades.

Visando a minimização das distorções e,consequentemente,menor alívio de tensões devido a este fenômeno, foi dimensionado um sistema de travamento, de forma que este sofresse o mínimo de alterações durante os processos de soldagem e alívio de tensões avaliados neste estudo.

O sistema de travamento para que não apresentasse deformações durante a sua montagem, foi montado como mostrado na Fig. 14.

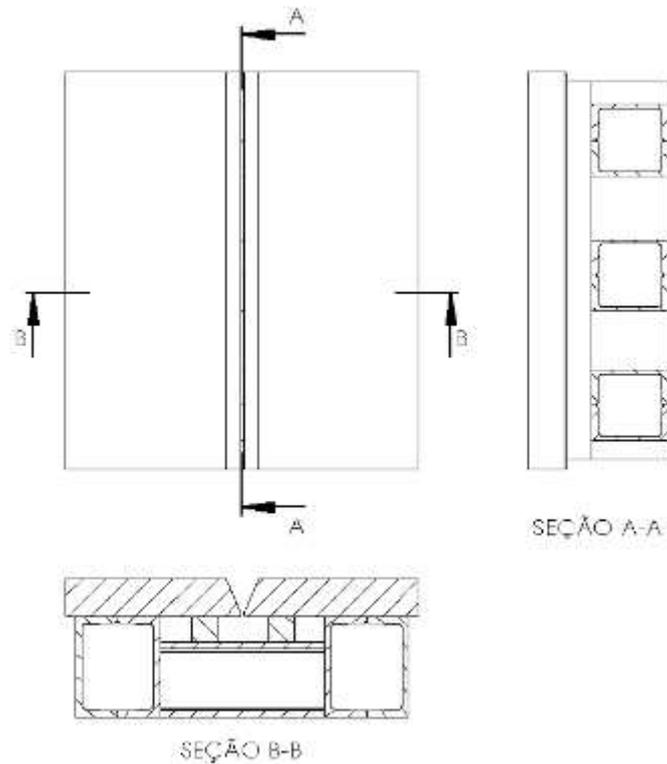


Figura 14. Projeto do sistema de travamento na versão final.

Para a realização, comparação e análise dos resultados a serem obtidos foram definidas as seguintes premissas:

- Processo de soldagem MAG com transferência metálica goticular (*Spray*);
- Metal de adição (conforme ANEXO A) ASTM A131 EH36 (400mm x 350mm x 1.1/2in) –ER80S-G (Ø1,2mm).
- Gás de proteção Ar + 8CO₂;
- Peça travada (com restrição) antes, durante e após soldagem;
- Peça travada (com restrição) durante o processo de alívio de tensões;
- Medição de tensão residual com a peça travada (anterior e posterior ao processo de soldagem), após o processo de alívio de tensões e após remoção da peça soldada do suporte;
- Escaneamento 3D da peça antes de soldar, após soldagem e posterior ao processo de alívio de tensões.

Diante disso, foi necessário o desenvolvimento de um aparato experimental (Fig. 15) para a parte de soldagem, medição de TR e realização de ensaios mecânicos. Este se consiste nos seguintes equipamentos:

- Soldagem:
 - Fonte de soldagem (DigiPLUS A7 DCU – IMC/LABSOLDA)

mostrado na Figura 16a, para dados técnicos do equipamento, ver ANEXO B;

- Tocha de soldagem Binzel MB 501D (500 A com mistura gasosa);
- Sistema de movimentação da tocha, X-Y-Z, robô FANUC Arcmate 100

iB, Figura 15b;

- Alimentador do arame de soldagem, ver curva de calibração em ANEXO

C;

- Cilindro do gás de proteção (Ar + 8 % CO₂).

○ Sistema que aquisição de sinais para Tempo, Corrente, Tensão, Velocidade de Alimentação do Arame, Vazão de Gás e Temperatura. Modelo SAP4TI – IMC Soldagem, Figura 15c;

- Medição de tensões residuais
 - MTS3000 – Restan, da empresa SINT Technology, mostrado na Figura 15d.
- Sistema de escaneamento:
 - 3D AMETEK Handyscan 307;
- Máquina de Alívio de Tensões por Vibração Mecânica:
 - Formula 62, modelo C.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15. Equipamentos do aparato experimental (a. Fonte de soldagem DigiPLUS A7 DCUDU (IMC Soldagem, 2020), b. Robô FANUC Arcmate 100 iB (RobotWorx, 2020), Sistema de aquisição de dados SAP IV-Ti (“IMC Soldagem”, 2020), c. Sistema de aquisição de dados SAP IV-Ti (“IMC Soldagem”, 2020), d. Equipamento de medição de tensões residuais por furo cego MTS3000 – Restan, da empresa SINT Technology (SINT Technology s.r.l., 2019))

Por fim, é importante salientar que foi necessário fazer polimento eletrolítico nas peças ensaiadas para eliminar tensões residuais preexistentes para que as mesmas não mascarem os resultados de medição (i.e, medir só as tensões originadas pela soldagem). Por exemplo, Prevey (1986) e Fitzpatrick *et al.* (2005), recomendam utilizar o polimento eletrolítico para retirar a camada com tensões residuais devido aos processos prévios de fabricação. A própria norma ASTM (2012) na seção 8.5 recomenda retirar no mínimo 0,25 mm, no caso das superfícies tratadas com jato de areia ou esmerilhadas.

3.1. Medição de tensões residuais

Para acompanhar a evolução das TR, foi necessário realizar medições de forma simétrica (Fig. 16), antes de soldar, depois de soldar e após o método de alívio de tensões, com o tempo de avanço em rampa polinomial (como mostrado na Fig. 17). Dessa forma, os ensaios foram realizados com 30 *steps* (paradas para leitura dos dados após perfuração – avanço). Além disso, como dito anteriormente, o MFC é semi-destrutivo, impossibilitando a medição de TR no mesmo ponto mais de uma vez. Nessas medições foram considerados o diâmetro da broca de 2 mm, profundidade do ensaio de 1 mm e velocidade de avanço de 0,15 mm/min.

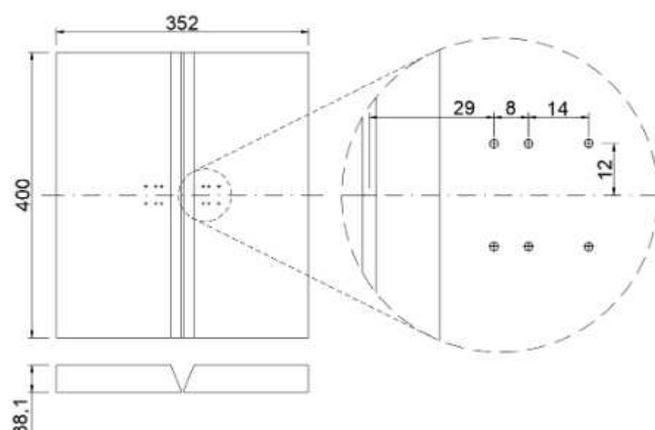


Figura 16. Desenho esquemático das posições das tensões residuais por MFC.

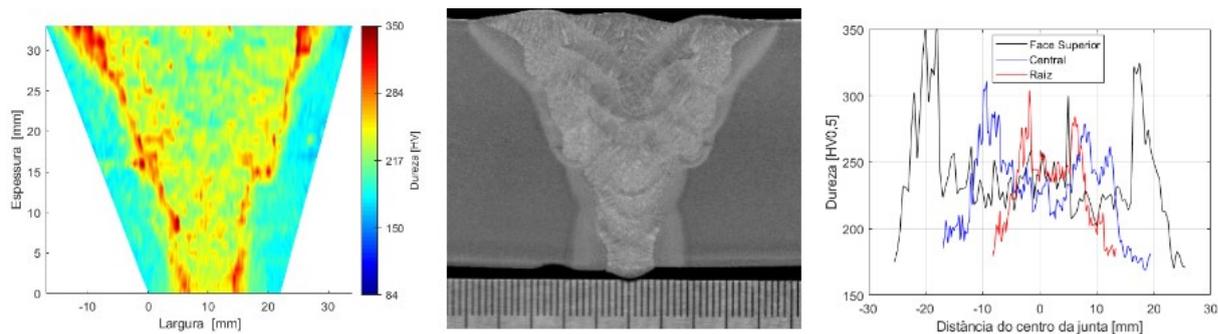


Figura 17. Mapa de dureza, em gráfico tipo mapa de calor (à esquerda), macrografia (ao centro) e perfil de dureza (à direita).

O MFC entrega os valores de tensões máximas e mínimas, bem como o ângulo entre elas, usando como referência a posição do *straingauge* “a”, com isso, é possível, mediante decomposição, as tensões nas direções longitudinais e transversais. A direção de referenciadas medições *straingauge* “a” coincidiu com a direção longitudinal das chapas ensaiadas, Fig. 18.

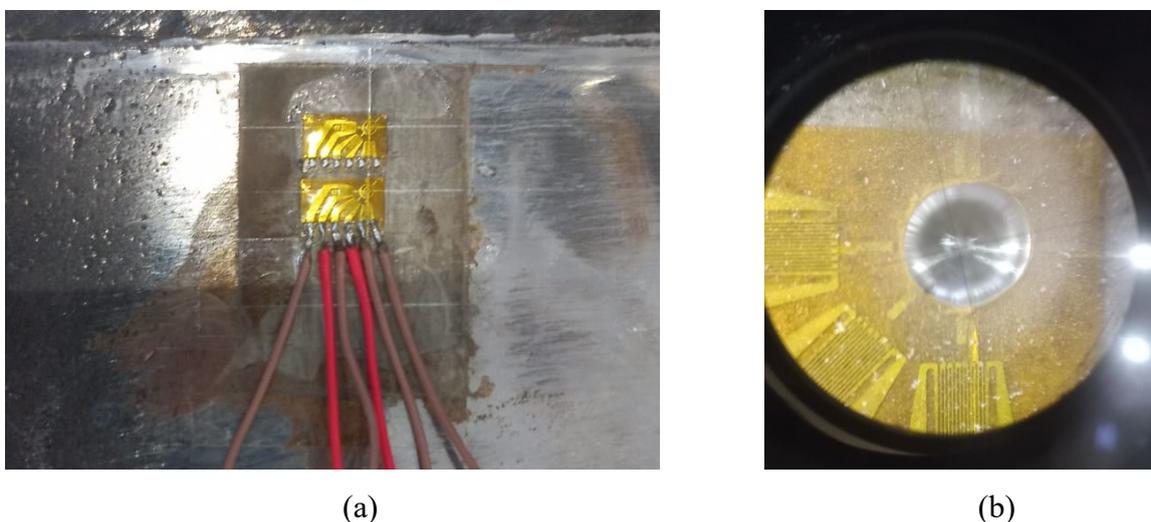


Figura 18. a. Detalhe da roseta a direita, b. Montagem da roseta na junta solda, a esquerda.

3.2. Tratamento de alívio de tensões residuais

3.2.1. Tratamento de Alívio de Tensões Residuais por Vibração Mecânica

Para realizar o alívio de tensões vibracional das peças ensaiadas, faz-se necessário um isolamento vibracional adequado das chapas em relação a bancada, como alternativa para minimizar a massa a ser excitada e, assim, adquirir a frequência adequada ao método de alívio de tensões. A Fig. 19 mostra, esquematicamente, o arranjo geral da bancada experimental utilizada:

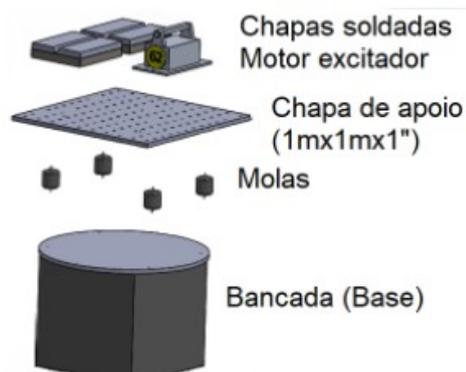


Figura 19. Esquema da bancada experimental utilizada para o alívio de tensões por vibração

Os tratamentos de alívio de tensões por vibração mecânica foram realizados de forma que a posição do eixo do excitador ficasse alinhado com o eixo da junta soldada e que a posição de leitura da amplitude de vibração (acelerômetro), fosse da posição padrão do fabricante, inicialmente junto a base do motor, para fixação junto a chapa a ser tratada, como mostrado na Fig. 20.



Figura 20. Arranjo eixo do excitador alinhado com o eixo da junta soldada

4. Resultados

4.1. Deformação

Os dados de deformação foram adquiridos via comparação de imagens pelo escaneamento nas diferentes etapas do procedimento - antes de soldar, depois de soldar e após TAT. Na Tab. 2 é possível visualizar um compilado de medições do aço estudado, onde β_1 e β_2 são ângulos medidos em cada chapa da junta soldada e a soma deles é a deformação total, como mostrado na Fig. 21.

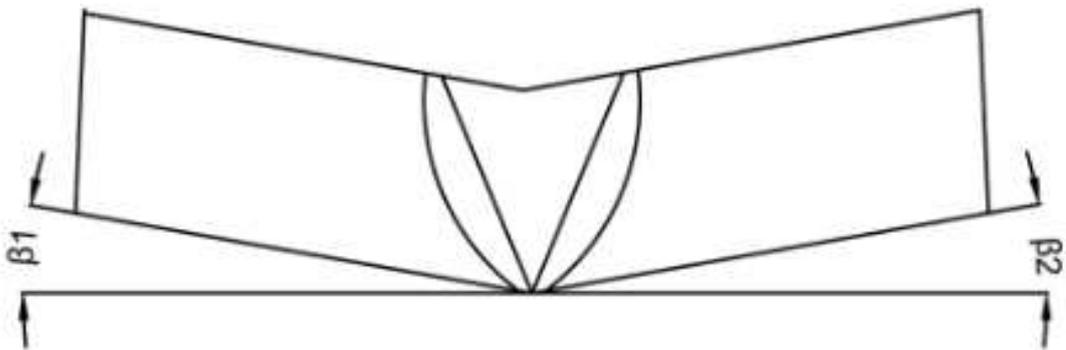


Figura 21. Chapa com ângulos medidos de deformação angular

Tabela 2. Tabela com os valores de distorções angulares nas diferentes etapas para o Aço A131 EH36 (Condições com valores com desvio padrão igual a zero não tiveram repetibilidade)

Material/Etapa		Distorção total (β_1 e β_2)
A131 EH36	Antes de soldar	1,16 ± 0,00
	Depois de soldar	2,92 ± 0,00
	Depois de tratamento de alívio de tensão	2,92 ± 0,00

A Tabela 3 mostra os valores líquidos das distorções, realizando uma diferença entre cada uma das etapas, conforme aplicável.

Tabela 3. Valor líquido das distorções em diferentes condições de alívio de tensões para os Aços A131 EH36

Material/Etapa	Depois de soldar – Antes de soldar	Depois de TAT – Depois de soldar	Depois de TAT – Antes de soldar
TATV63Hz-A2	1,84	0,00	1,84

Neste contexto, é perceptível a presença maior variação da distorção na etapa de

soldagem. É perceptível que o TAT teve uma influência pequena na diminuição da distorção angular. Por causa disso, acredita-se que no momento da soldagem, o aquecimento do sistema de travamento juntamente às chapas soldadas, faz com o perfil selecionado se tornasse menos resistente, o que possibilitou nas deformações mostradas neste.

Na Fig. 22, observa-se o resultado da simulação que mostra a diferença de deslocamento entre chapas antes e após a soldagem, corroborando para esta teoria.

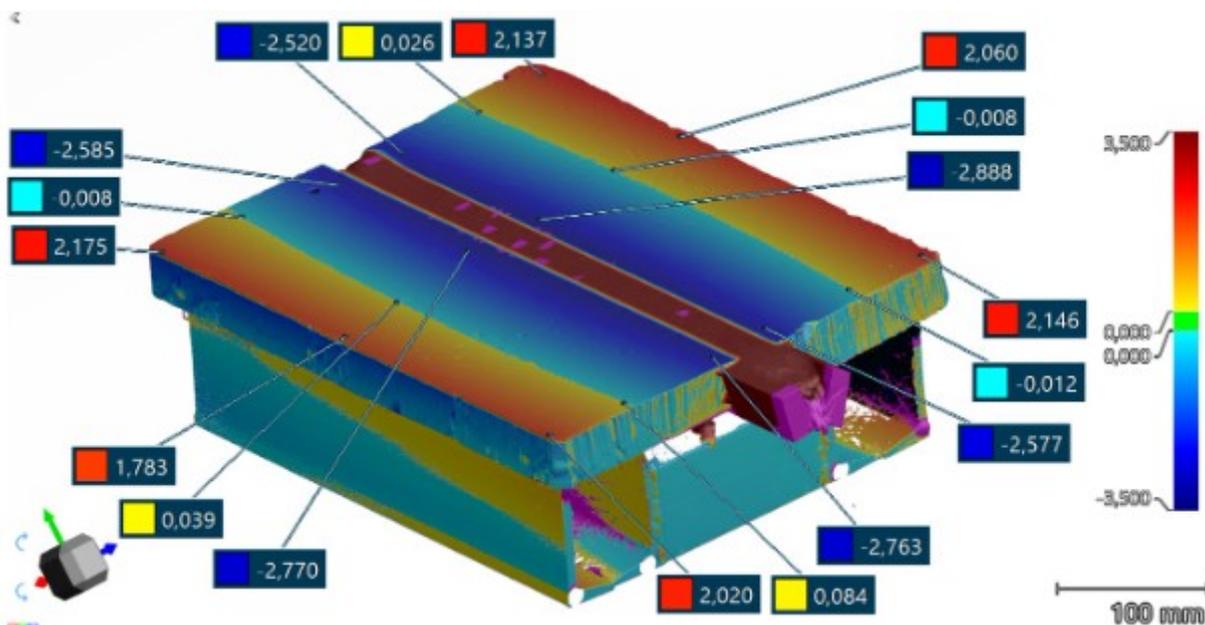


Figura 22. Imagem do sistema de escaneamento, mostrando um comparativo entre as etapas antes e depois de soldar para o Aço A131 EH36 na condição TATV63Hz-A2

4.2. Tensões residuais

Os valores das tensões residuais transversais e longitudinais, agrupadas de acordo com a etapa do procedimento de soldagem, são mostrados na Tab. 7 e 8.

Tabela 4. Tensões residuais transversais e longitudinais para o aço A131 EH36

Distância do centro da junta [mm]	Tensão residual longitudinal [Mpa]	Tensão residual transversal [Mpa]
Antes de soldar		
23	272,0 ± 87,8	209,1 ± 114,7
37	256,0 ± 130,4	166,9 ± 116,9
51	256,0 ± 99,1	215,9 ± 101,5
Depois de soldar		
29	391,6 ± 122,4	364,1 ± 103,7
37	396,2 ± 46,7	408,9 ± 41,0

51	$266,7 \pm 106,3$	$315,6 \pm 52,6$
TATV63Hz		
29	$325,9 \pm 32,5$	$368,3 \pm 27,8$
37	$364,9 \pm 15,1$	$375,6 \pm 12,3$
51	$56,9 \pm 33,0$	$50,1 \pm 30,4$

Na condição estabelecida por este estudo de 63Hz, foi perceptível uma grande diminuição da TR, aproximadamente 80 %, na posição mais distante do centro da junta (51mm), este mesmo comportamento não foi observado nas demais posições.

Via de regra, o alívio de TR por vibração mecânica na frequência de 63Hz teve um alívio acentuado na posição mais distante do centro da junta soldada em discordância com o ponto mais próximo do centro da junta, o que mostra um alto gradiente entre os três pontos medidos.

5. CONCLUSÃO

Dessa forma, foi possível constatar que o procedimento e práticas adotadas ao longo da pesquisa se mostram eficazes mediante aos ensaios não destrutivos realizados. O sistema de travamento, explicitado na Fig. 15 corroborou para limitar as restrições da junta, muito embora tenha apresentado alguma deformação. Possivelmente, o sistema de travamento enrijeceu a movimentação relativa das chapas, vindo a dificultar maiores amplitudes de vibração na região da junta soldada, fato que pode ter coibido resultados mais promissores nos tratamentos vibracionais.

Por fim, o processo TATV tem por vantagem ser ecologicamente correto, visto que não gera nenhum tipo de agressão ambiental, tem custo reduzido quando comprado com o tratamento térmico por manta ou forno elétricos, permite um controle simultâneo de peças produzidas, sendo possível observar a ocorrência de uma soldagem deficiente ou fragilizada, é versátil já que pode ser feito em até uma hora dependendo do peso da peça, evita a perda de propriedades físicas pelo tratamento térmico e permite a medição indireta dos resultados de redução de TR.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se;

- Melhorar a disposição da chapa, i.e trabalho de Jurcius e colaboradores (2010);
- Posicionar o vibrador em cima da chapa;
- Aumentar o tempo de duração do alívio de tensão por vibração;
- Tentar o mesmo processo com outros materiais.

REFERÊNCIAS

AMANTE, D. Do A. M. Imperfeições de fabricação na construção naval e offshore. Projeto de Fim de Curso (Graduação em Engenharia Naval), Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ANDERSEN, L. F., 2000. “Residual Stresses and Deformation in Steel Structures”. PhD Thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering of Technical University on Denmark KGS Lyngby. 206p.

ANDERSON, T. Distortion in Aluminum Welded Structures. Welding Journal , v. 82 (2), p. 28-30. 2003.

AOKI S., NISHIMURA T., HIRORI T., HIRAI S, “reduction method for residual stress of welded joints using harmonic vibrational load”. Nuclear Engineering and Design, Volume 237, pp 206-212, 2007.

ARAÚJO, D. B. De. Estudos de distorções em soldagem com uso de técnicas numéricas e de otimização. 262 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia – Doutorado em Engenharia Mecânica.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Miami [EUA]. Welding Handbook; Welding Technology. 8° ed. [s.n.]: V.1, 638p., 1991.

AMOROS, R. T. Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar .2008. Dissertação de mestrado - Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba.

ASM HANDBOOK. Welding, Brazing and Soldering: Residuals Stresses and Distortion. ASM International. v 6, 1993.

_____. Welding Handbook; Welding tecnologia. Miami: American Welding Society, 8° ed. V.1, 1987.

American Society for Testing and Materials. ASTM E2860-12: standard test method for residual stress measurement by X-Ray diffraction for bearing steels. West Conshohocken: ASTM; 2012

_____. 1995. “Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain-gauge method”. ASTM, E837-95

BAQAR, S. A. R.; JAIN, Y. R.; KHANNA, P. Vibratory Stress Relief Techniques: A

Review of Present Trends and Future Prospects. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v 4, n. 11, p. 141-144, Nov. 2014.

BEGHINI, M. *et al.* Experimental Verification of the Hole Drilling Plasticity Effect Correction. *Materials Science Forum*, v. 681, p. 151–158, mar. 2011.

BRAGA, E. M. A. Vibração como elemento de alívio de tensões residuais em cordões de solda. In: WORKSHOP DE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA, 1, 2011. Tucuruí. Anais do I Workshop de Vibrações e Acústica da Região Norte. Belém, PA: UFPA. GCAM. ITEC, 2011.

CHUVAS, T. C. Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Niterói, 2012.

CLAXTON, R. Vibratory Stress Relief – An Authoritative Overview. *Material Australia*. Melbourne, jan/feb 1998. Disponível em: . Acesso em 20 jun. 2016.

CRISI, G. S.; MENDONÇA, D. P. Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods. *Vibratory Stress Relief Online Library*, Philadelphia, 2006. Disponível em: . Acesso em 28 abril 2016.

DAWSON, R.; MOFFAT, D. G. Vibratory Stress Relief: A Fundamental Study of Its Effectiveness. *Journal of Engineering Materials and Technology*. v. 102, n. 2, p. 169-176, Apr. 1980. Disponível em: . Acesso em 21 jul. 2016.

DENG, D.; MURAKAWA, H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Computational Materials Science* , v. 43, p. 353-365. 2008

DEO, M. V.; MICHALERIS P.. Mitigation of Welding Induced Buckling Distortion Using Transient Thermal Tensioning. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol 8(1), p 49-54, December 2013

GAO H.Y., ZHANG Y.D., WU Q., SONG J., “Experimental investigation of fatigue life of Ti-6Al-4V treated by vibratory stress relief”. *Metals*, Volume 7, Issue 5, 158, 2017.

FITZPATRICK, M. E.; FRY, A. T.; HOLDWAY, P.; KANDIL, F. A.; SHACKLETON, J, SUOMINEN L. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. *Measurement Good Practice Guide*. 2005;52(2):31-36.

IDC. Residual stresses in weld joints. Disponível em: <<http://www.idc->

online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Residual_stresses_in_weld_joints.pdf f>. Acesso em: 26 nov. 2022.

JIA-SIANG, HSIEH C., LAI H., KUO C., WU P. T., WU W., “The relationships between residual stress relaxation and texture development in AZ31 Mg alloys via the vibratory stress relief technique”. *Materials Characterization*, Volume 99, pp 248-253, 2015.

JURCIUS A., VALIULIS A. V., CERNASEJUS O., KURZYDLOWSKI K. J., JASKIEWIEZ A., LECH-GREGA M., “Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and mechanical properties of structural joints”. *Journal of Vibroengineering* ., Volume 12 Issue 1, p133-141, 2010.

KANDIL et al. “A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection”, pp 45, 2001.

KOU, S. *Welding Metallurgy* (2° ed.). Wiley-Interscience. 2003.

KWOFIE, S. Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief. *Materials Science and Engineering A*, v. 516, n. 1-2, p. 154–161, Mar. 2009.

LINDQVIST, S.; HOLMGREN, J. *Alternative Methods for Heat Stress Relief*. 2007. 84 f. Thesis (Master) - Luleå University of Technology. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Division of Manufacturing Systems Engineering. Luleå .2007.

LUH, G. C.; HWANG, R. M. Evaluating the Effectiveness of Vibratory Stress Relief by a Modified Hole-Drilling Method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 14, p. 815 – 823, 1998.

MARTINS, C. A. P. et al. Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes. *UNISANTA - Science and Technology*, v. 1, n. 2, p. 69 - 75, 2012.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem, Fundamentos e Tecnologia*. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 363 p. ISBN: 9788570417480

MIRANDA, A. C. M. de. *SIMULAÇÃO Numérica das Deformações e Tensões Residuais na fabricação de um Componente Soldado*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2015.

MUNSI A. S. M., WADDELL A. J., WALKER C. A., “The Influence of Vibratory Treatment on the Fatigue Life of Welds: A Comparison with Thermal Stress Relief”, *Volume 37, Issue 4*, pp 141–149, November 2001

VERHAEGHE, G. Predictive Formulae for Weld Distortion - A critical review. *Review*

TWI. 1999.

MACHERAUCH, E; KLOOS KH, “Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stresses”. Residual Stresses in Science and Technology, DGM Inform. Verlag, 1987.

MASUBUCHI, K.. Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequences. Londres, Pergamon Press 1980. Vol 33.

MATHAR, J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation around Drilled Holes. ASME, v. 56, p. 249–254, 1934.

MIRANDA, A. C. M. de. SIMULAÇÃO Numérica das Deformações e Tensões Residuais na fabricação de um Componente Soldado. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2015.

PREVEY, P. X-ray diffraction residual stress techniques. Metals Park: American Society for Metals; 1986. p. 192-380. (Metal Handbook, 10).

PORTA NETO, D. G. L. Avaliação das distorções angulares em juntas de filete. Dissertação (Mestre em Engenharia), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RADAJ, D.. Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Springer Berlin Heidelberg, 1992. ROSSINI, N.S. et al. Methods of measuring residuals stresses in components. Materials and Design, v. 35, p. 572–588, 2012.

RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. 4 ed. 6 rev. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. 424 p.

RAO D., WANG D., CHEN L., NI C., “The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamics stress”, International Journal of Fatigue, Volume 29, pp 192-196, 2007.

RENDLER, N. J.; VIGNESS, I. Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses. Experimental Mechanics, v. 6, n. 12, p. 577–586, dez. 1966.

RIBEIRO, J.; MONTEIRO, J.; VAZ, M., LOPES, H.; PILOTO, P. Measurement of Residual Stress with Optical Techniques. Blackwell Publishing , p. 1-8. 2008.

SERRATI, D. S. M. Análise Térmica via Elementos Finitos de Soldagem Multipasses. 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

SEIFI, R.; SALIMI-MAJD, D. Effects of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method. *Mechanics of Materials*, v. 53, p. 72–79, out. 2012.

SHANKAR, S. Vibratory stress relief of mild steel weldments. 1982. 129 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) Faculty of the Oregon Graduate Center, 1982

SORENSEN, M. B. Simulation of Welding Distortion in Ship Section. Industrial PhD thesis, University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. Denmark. 1999

SUN, M.C., Y.H., WANG, R.K.. The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel. *Materials letters*, v. 58, p. 299–303, 2004.

SUTERIO, R. Medições de Tensões Residuais por Indentação Associada à Holografia Eletrônica. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2005.

TWI, The Welding Institute. Job Knowledge for Welders, Part 34. The Welding Institute, Cambridge, UK, 1988.

WALKER, C. A.; WADDELL, A. J.; JOHNSTON, D. J. Vibratory stress relief – an investigation of the underlying processes. *The Vibratory Stress Relief Library*, Glasgow, Aug. 1995.

WANG, R.; RASHED, S.; SERIZAWA, H.; MURAKAWA, H.; ZHANG, J. Numerical and Experimental Investigations on Welding Deformation. *Transactions of JWRI*, v. 37 n. 1, p. 79-90. 2008

WEN HE, CHENG X. Y., SHEN R. J., “Research on High-Frequency Vibratory Stress Relief for Small Assembly”. 1st IEEE International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. Residual stress - Part 1 - Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, v. 17, p. 355-365. 2001.

YANG Y. P., “Understanding of vibration stress relief with computation modeling”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 18, Issue 7, pp 856-862, 2008.

XU, J.; CHEN, L.; NI, C. Effect of vibratory weld conditioning on the residuals stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 84, p. 298–303, 2007.

ANEXO A



BÖHLER NiCu 1-IG

Solid wire, low-alloyed, weather resistant

Classifications

EN ISO 14341-A	EN ISO 14341-B	AWS A5.28	AWS A5.28M
G 42 4 M21 Z3Ni1Cu	G 49A 4U M21 ZSN2Cu	ER80S-G	ER55S-G
G 42 4 C1 Z3Ni1Cu	G 49A 4U C1 ZSN2Cu		

Characteristics and typical fields of application

NiCu-alloyed copper coated GMAW wire, for welding of weather-resistant constructional steels, standard constructional steels and special constructional steels.

NiCu 1-IG wire features good weld ability in the short arc mode at low voltage and in the spray arc process with high voltage. The mechanical properties of the weld deposit, the freedom of porosity and the bead appearance depend on the type of shielding gas used and on the other welding parameters.

The copper content in the welding wire leads to increased resistance to atmospheric corrosion in the weld deposit.

Base materials

Weather-resistant constructional steels, special grade constructional steels

S235JRG2Cu, S235J2G4Cu, S235J0Cu, S235JRW, S355J0Cu, S355J2G3Cu, S355J0W, 235J2W-S355J2W, S355K2W

ASTM A 588 Gr. A, B, C, K; A 618 Gr. II; 709 Gr. C

Typical analysis of solid wire (wt.-%)

	C	Si	Mn	Ni	Cu
wt.-%	0.1	0.5	1.1	0.9	0.4

Mechanical properties of all-weld metal

Condition	Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength R_m	Elongation A ($L_0=5d_0$)	Impact work ISO-V KV J	
	MPa	MPa	%	+20 °C	-40 °C
u	500 (≥ 420)	580 (500 – 670)	26 (≥ 20)	130	≥ 47
s	460	540	27	130	

u untreated, as welded – shielding gas Ar + 15 – 25 % CO₂ or 100 % CO₂

s stress relieved, 600 °C/2h – shielding gas Ar + 15 – 25 % CO₂ or 100 % CO₂

Operating data

	Polarity:	Shielding gases:	ø (mm)
	DC (+)	Argon + 15 – 25 % CO ₂	0.8
		100 % CO ₂	1.0
			1.2

Approvals

DB (42.132.69), CE

ANEXO B

Características	200	350	450	600	800
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440	220/380/440	220/380/440	220/380/440	220/380/440
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V				
Corrente a 100 % de fator de carga	160A	220 A	280 A	350 A	500 A
Potência nominal	6KVA	8 kVA	10 kVA	12 kVA	16 kVA
Faixa de corrente	5- 300 A	5- 400 A	5- 450 A	5- 600 A	10 - 800 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	18/10/9A	21/12/11A	26/15/13A	32/18/16 A	42/25/21 A
Ripple de corrente	8A	8A	8A	10 A	20 A
Fator de Potência	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92

ANEXO C

