

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

NATÁLIA MEDEIROS MAIA

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA SOLDAGEM DE AÇO
HY80 PELO PROCESSO GMAW-RE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2025**

NATÁLIA MEDEIROS MAIA

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA SOLDAGEM DE AÇO
HY80 PELO PROCESSO GMAW-RE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do Centro Federal
de Educação Tecnológica Celso Suckow
da Fonseca.

Orientador: Profa. Dra. Tatiane de Campos
Chuvas

**RIO DE JANEIRO
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R696 Rodrigues, Brunno Barroco Moura
Avaliação das tensões residuais geradas na soldagem de aço
HY80 pelo processo GMAW-RE / Natália Medeiros Maia – 2025.
46f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 44-46.

Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas.

1. Engenharia mecânica. 2. Solda e soldagem. 3. Tensões
residuais. 4. Metais – Fadiga. 5. Processo GMAW.

I. Chuvas, Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre incentivou a importância dos estudos e me proporcionou todo o suporte necessário. Em especial, aos meus pais, Regina e José Carlos, que sempre me apoiaram e são minha grande inspiração profissionalmente e na vida.

À minha professora orientadora Dr^a Tatiane Chuvas, por todo o conhecimento compartilhado, pela ajuda e paciência durante esse processo. Sua orientação não apenas me guiou academicamente, mas também me incentivou a sempre melhorar e evoluir.

À professora Dr^a Maria Cindra, por compartilhar seu vasto conhecimento e experiência e ao LAT/UFF por me receber tão prontamente e disponibilizar os recursos necessários para a realização do projeto.

Aos professores Dr Jorge Jorge e Dr Luiz Felipe Guimarães, por disponibilizar os recursos necessários e pela prontidão em ajudar nas etapas do projeto, pelo conhecimento transmitido e pelo estímulo para crescer e aperfeiçoar.

Aos professores Dr Matheus Campolina, por todo o impulso para aprimorar e avançar, por todo o apoio e por acreditar em mim mesmo quando nem eu mesma acreditava; e Dr Paulo Camara por ser um grande incentivador e motivador no âmbito acadêmico e pessoal.

Aos meus amigos, em especial da Equipe Mud Runner, e ao meu namorado, que foram minha âncora principalmente no início da faculdade. Vocês me proporcionaram o crescimento e as competências que me trouxeram até aqui, além de todo apoio emocional e motivação para superar os desafios e dificuldades.

RESUMO

MAIA, Natália. **Avaliação das Tensões Residuais Geradas na Soldagem de Aço HY80 pelo Processo GMAW-RE**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

A indústria *off-shore* envolve projetos de alta responsabilidade, e por isso busca continuamente por melhorar o desempenho de suas estruturas, seja escolhendo materiais com melhores propriedades ou realizando processos de manufatura mais refinados e controlados. Para esta aplicação, foi desenvolvida uma classe de material, chamada *High Yield Steel*, que possui alta resistência e alto limite de escoamento. Apesar de apresentarem melhores propriedades mecânicas, o comportamento desse material diante de processos de solitação térmica, como o processo de soldagem, deve ser estudado, por ser um aço baixa liga com suscetibilidade à trinca a frio. O processo de soldagem gera um gradiente térmico na estrutura, o que gera deformações plásticas e elásticas não uniformes e conseqüentemente, tensões residuais. As tensões residuais são tensões que permanecem no material após a retirada de carregamentos externos e ciclos térmicos, e podem atingir valores até o limite de escoamento, portanto, é de extrema importância que essas tensões sejam estudadas e controladas para evitar falhas prematuras. Para controlar os níveis de tensão residual gerados pelo processo de soldagem, é preciso realizar um tratamento térmico pós soldagem, dessa forma, as tensões são aliviadas sem modificar as propriedades mecânicas da junta soldada. Este trabalho tem como objetivo analisar as tensões residuais provocadas pelo processo de soldagem GMAW-RE em juntas de aço HY80, medidas pelo método de difração de raio-X. Os resultados mostraram que após a soldagem a região do metal de solda apresenta valores de tensões residuais trativas, mas de baixa magnitude, e que o tratamento térmico após soldagem aliviou as tensões em 88%.

Palavras-chave: Tensão Residual. Soldagem. GMAW-RE. Aço HY80. Difração de raio-X.

ABSTRACT

MAIA, Natália. **Residual Stress in Welded Joints of HY80 Steel**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

The offshore industry involves highly responsible projects and, as such, continuously seeks to improve the performance of its structures by either choosing materials with better properties or conducting more refined and controlled manufacturing processes. For this application, a class of material called high yield steel was developed, with high strength and a high yield limit. Despite having better mechanical properties, the behavior of this material under thermal loading processes, such as the welding process, must be studied because it is a low alloy steel with susceptibility to cold cracking. The welding process creates a thermal gradient in the structure, causing non-uniform plastic and elastic deformations and consequently, residual stresses. Residual stresses are tensions that remain in the material after removing external loads and thermal cycles and can reach values up to the yield limit. Therefore, it is of utmost importance that these stresses are studied and controlled to avoid premature failures. To maintain the levels of residual stress generated by the welding process, post-weld heat treatment must be carried out, so that the stresses are relieved without changing the mechanical properties of the welded joint. This work aims to analyze the residual stresses caused by the GMAW-RE welding process in HY80 steel joints, measured by the X-ray diffraction method. The results showed that after welding, the weld metal region presents tensile residual stress values, but of low magnitude, and that post-weld heat treatment relieved the stresses by 88%.

Key-words: Residual Stress; Welding; GMAW-RE; HY80 Steel; X-ray diffraction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de Soldagem GMAW. Fonte: MODENESI, 2000.	18
Figura 2 – Representação da analogia da barra aquecida. Fonte: ROCHA, 2009....	20
Figura 3 – Variação da tensão em função da temperatura na barra intermediária....	21
Figura 4 – Distribuição das tensões residuais: (C) Contração, (R) Resfriamento superficial mais intenso e (T) Transformação de fase. Fonte: HAUK, 1987.....	23
Figura 5 – Incidência e intensidade dos raios-X para um ângulo de varredura de 2θ.	27
Figura 6 – Princípios da medição por raio-X.	27
Figura 7 – Dimensões da amostra.	31
Figura 8 – Layout do processo.....	32
Figura 9 – Analisador de tensões XStress300.	33
Figura 10 – Esquema das janelas de medições das tensões residuais.	34
Figura 11 - Macrografia da junta soldada.	36
Figura 12 Tensão residual pós soldagem (a) no início e (b) no meio da junta.	37
Figura 13 - Tensão residual pós TTPS (a) no início e (b) no meio da junta.	39
Figura 14 - Perfil de tensões residuais (a) no início e (b) no meio da junta.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.....	26
Tabela 2 – Composição química do aço HY-80 (% de peso)	29
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados no projeto.....	32
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem de cada passe.....	34
Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a medição das tensões residuais.....	34
Tabela 6 – Aporte térmico de cada passe.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	American Welding Society
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CMT	Cold Metal Transfort
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GMAW-RE	Gas Metal Arc Welding Rotate Eletrode
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
MS	Metal de Solda
SA-GMAW	Spin Arc Gas Metal Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SW-NG-GMAW	Swing Arc Narrow Gap Gas Metal Arc Welding
TTPS	Tratamento Térmico Pós Soldagem
TR	Tensão Residual
ZTA	Zona Térmicamente Afetada
ZF	Zona Fundida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM	15
2.1.1 Processo de Soldagem GMAW	17
2.1.2 Soldagem GMAW com Eletrodo Rotativo	19
2.2 TENSÕES RESIDUAIS.....	19
2.2.1 Tensões Residuais no Processo de Soldagem.....	22
2.2.2 Efeitos das tensões residuais	23
2.2.3 Métodos de alívio de tensão residual.....	24
2.2.4 Medição de tensão residual	25
2.2.5 Tensometria por Difração de raio-X	26
2.3 AÇO HY-80	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 MATERIAL	31
3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	31
3.3 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	33
3.4 TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5 CONCLUSÕES	42
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico é um processo de fabricação que consiste na aplicação localizada de calor e é amplamente usada na união de materiais. A geração de ciclos térmicos envolvida no processo provoca grandes gradientes de temperatura, mudanças microestruturais e deformações plásticas (MODENESI *et al.*, 2000). O processo GMAW é comumente utilizado em aplicações industriais pela sua versatilidade, já que pode ser utilizado em todas as posições de soldagem, e sua alta produtividade, já que é um processo semiautomático, com alimentação da poça de fusão constante. Apesar dos pontos positivos, as dimensões do equipamento (tocha) limitam o acesso à raiz e a penetração completa nas paredes do chanfro, o que prejudica a qualidade da junta; dessa forma, a norma ASME IX, 2015, exige para este processo a utilização de um chanfro em V com 60° de abertura. Como uma forma de reduzir as limitações do processo, inovações e adaptações foram desenvolvidas, como o GMAW-RE, que consiste no método tradicional adicionando uma pequena rotação ao arame. Essa adaptação permite o acesso adequado à raiz e a fusão completa da solda nas paredes do chanfro, que por sua vez possui uma maior possibilidade de geometrias e dimensões, podendo ser utilizado até mesmo em chanfros retos, o que diminui o tempo de preparação da peça (SILVEIRA *et al.*, 2021).

Durante operações que envolvam deformações plásticas, como a aplicação de carga externa ou ciclos térmicos, são geradas tensões que permanecem no material após a remoção de tais estímulos externos. Essas tensões são chamadas de residuais (TR) e podem chegar até o limite de escoamento do material, tornando-as extremamente malélicas à estrutura e estritamente necessário o seu estudo e controle, já que podem gerar falhas prematuras. Podendo ser mensuradas por diferentes métodos, destrutivos e não-destrutivos, a difração de raios-X é uma técnica de medição de TR classificada como não-destrutiva, que consiste na medição do espaçamento interplanar dos planos cristalográficos. Como as tensões residuais são somadas às tensões de projeto, o seu controle é essencial para garantir um projeto confiável. Para as tensões geradas pelo processo de soldagem, na maioria das vezes se faz necessária a realização de um tratamento térmico pós soldagem, no qual o objetivo é aliviar as tensões residuais sem alterar as propriedades mecânicas da junta soldada.

Este trabalho teve como objetivo analisar as tensões residuais em uma junta soldada por GMAW-RE em aço HY80, utilizando o método de difração de raios-X. Através dessa análise, foi feito um perfil de tensões onde foi possível verificar a resultante das tensões após o processo de soldagem. Após a soldagem, a junta passou por um processo de alívio de tensões, através do tratamento térmico pós soldagem, no qual as tensões também foram medidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais tipos de procedimentos de soldagem, detalhando o que será utilizado neste projeto. Neste detalhamento será abordado a influência do processo no material e seus efeitos, entre eles a formação de tensões residuais, assunto que também será abordado neste capítulo.

Ao revisar os principais conceitos e a explicação dos efeitos do processo, este capítulo busca fornecer uma base de conhecimento para entender os fenômenos que serão observados no experimento realizado.

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

O processo de soldagem possui ampla aplicabilidade industrial, podendo ser utilizado como revestimento, para a recuperação de descontinuidades ou como um método de união. Nesta última aplicação, o processo é conceituado como uma operação que visa obter uma união produzida pelo aquecimento em uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e metal de adição (AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, 1994), assegurando entre as partes a continuidade do material e as propriedades mecânicas desejadas (WAINER *et al.*, 1992). O aquecimento local do material normalmente envolve o processo de fusão das partes a serem soldadas, onde a fonte de calor do processo de soldagem pode variar. Para os métodos convencionais de soldagem, o calor aplicado é gerado através do arco elétrico (FONSECA, 2016).

A quantidade de calor transferida à junta durante o processo de soldagem é chamada de aporte térmico, que é dado pela Equação 1 (ASME IX, 2015).

$$AT = \frac{(V * I) * 60}{v} \quad (1)$$

Onde:

AT : Aporte térmico [J/cm]

V : Tensão de soldagem [V]

I : Corrente de soldagem [A]

v : Velocidade de soldagem [cm/min]

O controle dos parâmetros do aporte térmico é extremamente importante nas características geométricas do cordão e na microestrutura da junta (WAINER *et al.*, 1992). Por exemplo, uma velocidade de soldagem muito baixa pode causar maiores distorções e gerar maiores tensões residuais, já uma velocidade muito alta pode gerar falta de penetração e os defeitos subsequentes a ela.

Quanto maior for o aporte térmico, maior é a quantidade de calor inserida na peça, conseqüentemente maior será a poça de fusão gerada, mais largo será o cordão de solda e maior será a área da junta afetada pelo calor (MODENESI *et al.*, 2000).

Esse calor transferido à peça gera diferentes efeitos na junta, que variam de acordo com a distância do cordão de solda. Cada região possui uma característica específica e é submetida a diferentes mudanças microestruturais. São elas:

- Metal Base (MB): é a região mais distante do cordão que não é afetada pelo ciclo térmico, mantendo a microestrutura e as propriedades mecânicas da estrutura de origem.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): é a região próxima ao cordão de solda que não é fundida, porém sofre mudanças em sua microestrutura e propriedades devido ao ciclo térmico. A ZTA, por sua vez, pode ser subdivida em regiões de transformação da microestrutura, onde quanto mais perto da ZF, mais grosseiro é o grão, e mais frágil é a região.
- Zona Fundida (ZF): é a região que sofre o processo de fusão, no qual o metal de base e o material de adição se diluem formando o Metal de Solda (MS), que normalmente possui propriedades mecânicas melhores que o MB.

O controle dos parâmetros de soldagem, bem como a escolha do método, o procedimento adotado e a qualidade da execução estão ligados à qualidade da junta gerada. Em soldas multipasses, a sobreposição de passes provoca uma recristalização dos grãos do passe anterior, conferindo melhores propriedades à microestrutura devido ao refinamento de grão (MYTHILI *et al.*, 2002).

Além disso, parâmetros como a taxa de resfriamento são relevantes de serem controlados. Uma alta taxa de resfriamento favorece a formação de estruturas martensíticas e uma conseqüente fragilização do material, enquanto uma taxa de resfriamento mais baixa resulta em grãos maiores, o que diminui a resistência do material, mas também confere uma contração térmica mais gradual e menores tensões residuais (JUNIOR, 1998).

Junior (2013), mostrou a influência do aporte térmico na microestrutura e propriedades mecânicas do metal de solda. A partir da variação do calor fornecido no processo, pode-se observar que o aumento do aporte térmico reduziu o limite de escoamento e a dureza do material estudado, assim como favoreceu a formação de estruturas bainíticas, enquanto aportes térmicos baixos predominaram a estrutura martensítica.

2.1.1 Processo de Soldagem GMAW

A soldagem a arco elétrico consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre o metal de base e o eletrodo, criando um arco elétrico que atua como o fluxo de eletricidade do processo. O eletrodo é o componente que conduz a corrente elétrica, podendo ser consumível (metal de adição), contínuo ou não. Este processo pode ainda conter um gás de proteção, cuja função é proteger o arco e a poça de fusão da contaminação atmosférica, podendo ser inerte ou ativo (KOU, 2003).

Existem diversos tipos de soldagem a arco elétrico, com distintas aplicações e particularidades. Os principais processos são: soldagem com eletrodo revestido (SMAW), soldagem a arco gás-tungstênio (GTAW/TIG), soldagem a arco gás-metal (GMAW) e soldagem a arco submerso (SAW) (ABNT NBR 13043, 2016), onde o GMAW é o mais amplamente utilizado devido sua alta produtividade e versatilidade.

O processo de GMAW – *Gas Metal Arc Welding* – caracteriza-se pela continuidade do arame e pelas altas densidades de correntes que podem ser utilizadas, o que garante uma alta taxa de deposição e penetração, além de produzir cordões limpos de excelente acabamento. A figura 1 apresenta o esquema desse processo.

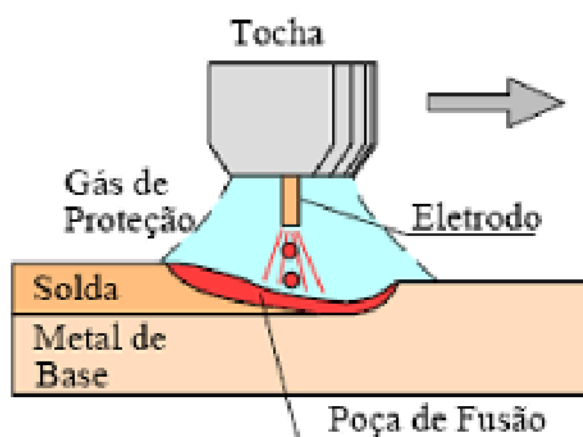


Figura 1 - Processo de Soldagem GMAW. Fonte: MODENESI, 2000.

O eletrodo (arame) é consumível e, como não possui revestimento, a proteção do arco e da poça de fusão se dá através de um gás de proteção, que pode ser inerte ou ativo. Esta proteção garante que os gases atmosféricos não contaminem a poça de fusão e gerem possíveis defeitos na junta (KOU, 2003), evitando, por exemplo a contaminação por hidrogênio, grande responsável pela trinca a frio.

Como a alimentação do arame é contínua, a produtividade do processo de soldagem GMAW é muito alta. A versatilidade também é uma característica positiva do processo, já que pode ser realizado em todas as posições, não exige muita habilidade do soldador, além de contar com uma proteção bem eficiente que evita diversos defeitos por si só.

Em contrapartida, o processo exige um equipamento de soldagem mais complexo e caro. Soldagens em campo são um empecilho, já que a corrente de ar desloca a linha de proteção do gás. Apesar de poder ser utilizado em qualquer posição de soldagem, o tamanho da tocha requer chanfros com certas geometrias e dimensões para garantir o acesso à raiz e a fusão adequada nas paredes (AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, 1994).

Para minimizar os efeitos destes problemas, foram propostas diversas inovações ao processo, como a transferência de metal frio (CMT), soldagem a arco metálico a gás com oscilação em chanfro estreito (SW-NG-GMAW) e soldagem a arco metálico a gás com rotação (SA-GMAW), mas todos continuam apresentando o mesmo problema de falta de fusão nas paredes (SILVEIRA *et al.*, 2021).

2.1.2 Soldagem GMAW com Eletrodo Rotativo

A constante busca pelo aumento da produtividade e qualidade dos processos alimenta o desenvolvimento de novas tecnologias. Neste contexto foi desenvolvido uma inovação no processo de soldagem GMAW, que consiste em aplicar uma pequena rotação ao eletrodo enquanto ele alimenta continuamente a poça de fusão. A força centrífuga gerada por essa rotação expande o arco elétrico até a parede do chanfro e acelera as gotículas metálicas radialmente, proporcionando uma fusão mais completa e uma penetração mais limpa, com menos porosidades. Para garantir a qualidade do processo, o diâmetro da rotação, sua velocidade e direção devem ser especificados de acordo com a aplicação (PRASAD *et al.*, 2018).

A maior penetração do processo promove uma redução na quantidade de passes do mesmo, gerando conseqüentemente um menor filete e, portanto, menos distorções e tensões residuais associadas na peça. A maior probabilidade de fusão nas paredes do chanfro, retira a limitação do tipo do chanfro do processo, economizando tempo do preparo do mesmo e aumentando a aplicação do processo, como mostra estudos de Costa *et al.* (2019).

Estudos realizados por Silveira *et al.* (2021), mostram as diferenças do processo de GMAW e GMAW-RE, onde o nível de diluição do processo rotativo se mostrou maior, o que pode ter influenciado na maior resistência da junta em teste realizados. Além disso, o processo rotativo apresentou também níveis de tensões residuais menores comparado ao processo convencional, isso pode ser resultado da menor quantidade de passes e, portanto, na menor exposição ao calor do processo.

2.2 TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais são tensões internas, em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a remoção de todas as cargas externas atuantes ou gradientes de temperatura. Elas são resultantes de solicitações cíclicas constantes, por falhas operacionais ou até durante a fase de fabricação (tratamentos mecânicos e térmicos), tais como usinagem, conformação mecânica e soldagem (MODENESI *et al.*, 2000; KOU, 2003; CARVALHO, 2004). A deformação plástica não uniforme é uma das principais causas do aparecimento das tensões residuais (CARMO, 2006), já que

quando essas deformações são restringidas, a energia do processo é acumulada, podendo atingir valores até o limite de escoamento.

As origens das tensões residuais são divididas em:

- Contração: são provenientes de deformações mecânicas, que causam o escoamento plástico próximo à superfície.
- Resfriamento Superficial: são resultantes da exposição à variação de temperatura não uniforme.
- Transformação de Fase: provenientes da transformação de fase da austenita, que acarreta o aumento de volume não homogêneo da microestrutura (ROCHA, 2009).

As tensões residuais de origem mecânica provêm de processos de deformação mecânica, que causam o escoamento plástico próximo à superfície. As de origem metalúrgica surgem da transformação de fase da austenita, que acarreta o aumento de volume da microestrutura. Já as de origem térmica são induzidas através da exposição à variação de temperatura não uniforme, que pode ser ilustrado através da analogia da barra aquecida.

A analogia da barra aquecida consiste em: inicialmente, considera-se um dispositivo de 3 barras engastadas entre suportes fixos (Figura 2a); esse mecanismo garante que as barras estejam rigidamente unidas.

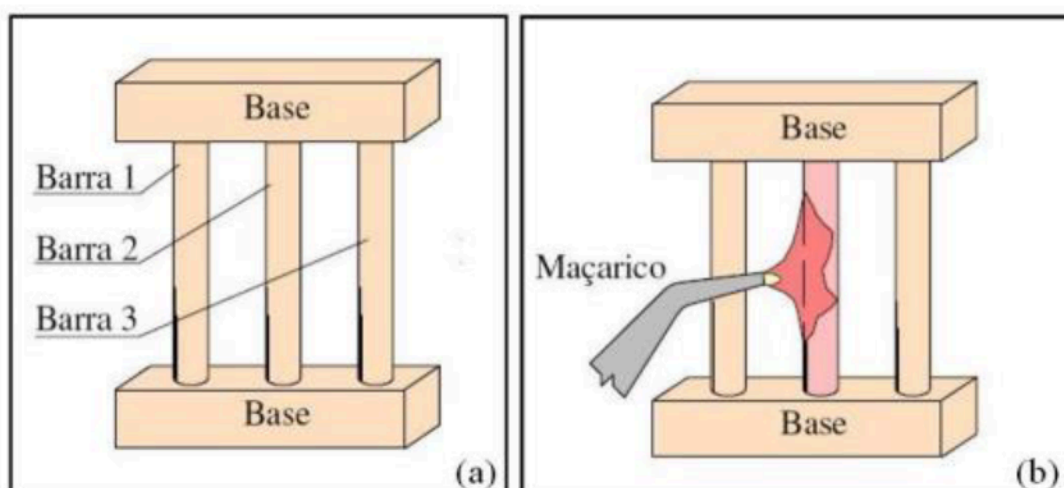


Figura 2 – Representação da analogia da barra aquecida. Fonte: ROCHA, 2009.

Apenas a barra intermediária é aquecida (Figura 2b). Durante o aquecimento, a barra intermediária acumula energia até atingir o limite de escoamento (Figura 3, ponto 1), onde as tensões atuantes são de magnitude compressivas, já que ela tenta

se expandir, mas a estrutura restringe a dilatação. Ao atingir o limite de escoamento, a barra intermediária escoar passa do regime elástico para o regime plástico. A partir do escoamento, a dilatação passa a ser absorvida pela deformação, logo é possível observar a tensão da barra intermediária reduzindo até começar o resfriamento (F ponto 2). Durante o resfriamento, a barra intermediária tende a se contrair, e mais uma vez a estrutura confere resistência a esse movimento, dessa vez de magnitude trativa. Dessa forma, os valores de tensões, antes compressivos, vão aumentando até trocar de sinal e atingir o limite de escoamento a tração (Figura 3, ponto 3). Mais uma vez a contração térmica é absorvida pela deformação plástica, enquanto a tensão aumenta acompanhando o limite de escoamento até atingir o equilíbrio térmico (Figura ponto 4). No final do experimento, as três barras ficam submetidas ao efeito de tensões residuais, que na barra intermediária se apresenta de forma trativa e na estrutura de forma compressiva.

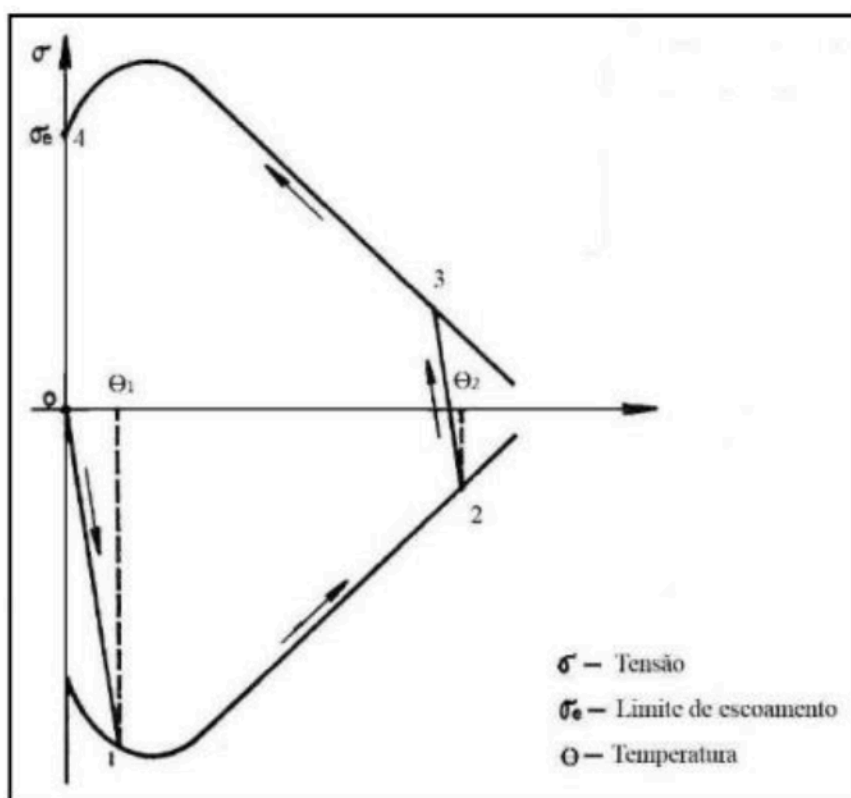


Figura 3 – Variação da tensão em função da temperatura na barra intermediária.
 Fonte: ROCHA, 2009.

2.2.1 Tensões Residuais no Processo de Soldagem

Como apresentado no item 1.1, o processo de soldagem envolve a geração de um alto gradiente de temperatura no material, que gera zonas onde ocorrem mudanças de fases, mudanças microestruturais e regiões tensionadas. A ZTA é uma região afetada pelo ciclo térmico que possui um gradiente térmico interno, tanto transversal, onde a temperatura diminui conforme o distanciamento do cordão de solda; quando longitudinal, onde, dependendo do chanfro utilizado, se apresentará na espessura do material. Pelas características citadas, a ZTA representa uma área de alta fragilidade, que deve ser estudada para garantir a qualidade da estrutura (MODENESI & MARQUES, 2009).

A distribuição não homogênea de calor nas redondezas da área soldada (ZTA) gera escoamentos parciais localizados que geram tensões residuais ao longo do ciclo térmico (HAUK, 1987). Além da não uniformidade do aumento da temperatura ao longo do processo, o resfriamento também se dá de forma desigual, gerando regiões extremamente tensionadas.

O gradiente de temperatura gera uma expansão não homogênea do material, com zonas de restrição à dilatação (metal de base fora da ZTA) e uma consequente combinação de tensões internas, de natureza trativa e compressiva. A mesma não homogeneidade ocorre em peças de paredes mais espessas, onde o gradiente de temperatura se dá ao longo da própria espessura durante o resfriamento, que se dá de forma mais intensa na superfície da peça e do cordão. A temperatura também pode afetar a microestrutura do material, onde a mudança na estrutura cristalina pode provocar um aumento de volume dos grãos das zonas fundida e termicamente afetada, gerando uma combinação não homogênea de forças internas. A Figura 4 representa esquematicamente a variação das tensões residuais diante desses 3 processos.

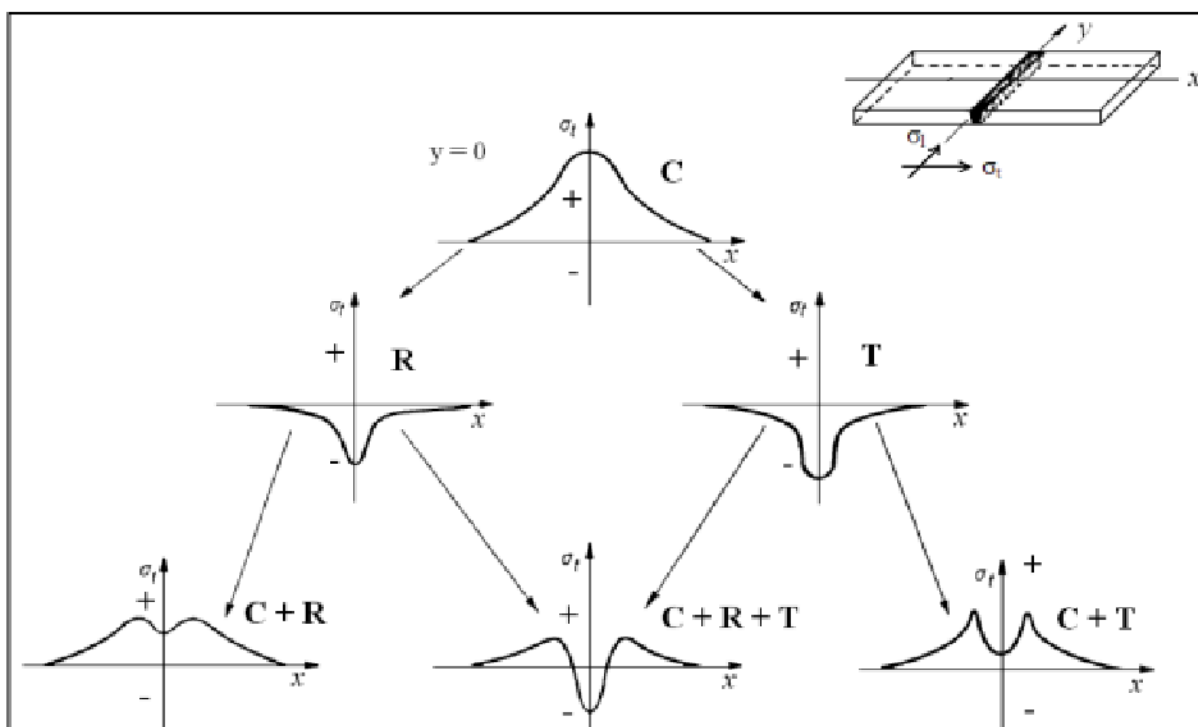


Figura 4 – Distribuição das tensões residuais: (C) Contração, (R) Resfriamento superficial mais intenso e (T) Transformação de fase. Fonte: HAUK, 1987.

Estudos feitos por Dias *et al.* (2016) e Chuvas (2015), mostram a tendência das tensões residuais do processo de soldagem. O metal de base tende a ter tensões compressivas; na ZTA há uma variação de sinais entre as medições longitudinais, que apresentam tensões trativas, e transversais, que apresentam tensões compressivas; já no metal de solda, as tensões tendem a ser trativas. Esses comportamentos e a magnitudes das tensões podem variar de acordo com o procedimento de soldagem utilizado, o aporte térmico, o resfriamento e com a microestrutura do material.

2.2.2 Efeitos das tensões residuais

As tensões residuais se desenvolvem de forma invisível nas peças e componentes, mas podem ser muito prejudiciais a vida em serviço dos mesmos. Assim, o estudo da origem e magnitude das tensões residuais geradas nos diversos processo de fabricação tem grande importância no contexto industrial, já que as tensões residuais se somam às tensões de serviço. Dessa forma, as tensões residuais podem ser responsáveis por gerar falhas prematuras que ocorrem a partir de níveis de tensões aplicadas relativamente baixos. Em juntas soldadas, a deformação plástica à altas temperaturas torna a junta mais propícia a uma fratura frágil devido a essa

combinação de tensões. Além disso, juntas soldadas possuem irregularidades geométricas e metalúrgicas, que podem atuar como pontos de concentração de tensão e acentuar o efeito das tensões resultantes, potencializando a nucleação e propagação de trincas, principalmente quando as tensões residuais são trativas.

Contudo, as tensões residuais podem se apresentar de forma benéfica para uma estrutura. Este fenômeno é possível quando as tensões de origem compressiva são induzidas nos componentes, aumentada a resistência mecânica das peças, principalmente sua vida de fadiga, por inibir, principalmente, a nucleação e propagação de trincas.

2.2.3 Métodos de alívio de tensão residual

Devido a sua importância e influência no comportamento de uma estrutura, deve-se sempre tentar controlar e minimizar as tensões residuais. Para isso existem métodos de alívio de tensões residuais, que podem ser classificados em métodos mecânicos e térmicos. Os métodos mecânicos são realizados por sobrecarga e vibração, enquanto os métodos térmicos são realizados em fornos ou de forma localizada.

O método mecânico por sobrecarga consiste na aplicação gradativa de um carregamento suficiente que transforme as deformações elásticas em plásticas, e dessa forma promova o alívio das tensões residuais da estrutura. A aplicação deste método requer um controle muito preciso para não causar uma ruptura frágil na estrutura, já que as tensões residuais se somam às tensões aplicadas. Este método é utilizado para aliviar as tensões em vaso de pressão, pressurizando o em um teste hidrostático (SILVA, 2005).

O método mecânico por vibração, por sua vez, consiste na geração de vibrações de ressonância na estrutura a partir de um dispositivo vibrador. A frequência aplicada aumenta gradativamente até a estrutura entrar em ressonância por um período mínimo de dois ciclos, dessa forma as tensões residuais são dissipadas (ROCHA, 2009).

O método térmico de alívio de tensões consiste na aplicação de calor na estrutura de tal forma que o seu limite de escoamento reduza a valores inferiores à tensão residual, o que favorece a ocorrência de deformações plásticas, e o

consequente alívio das tensões residuais. Quando o método é aplicado em fornos, o aquecimento é uniforme, e o controle dos parâmetros é facilitado. Em casos de estruturas muito grandes ou em projetos de campo, nos quais não há a possibilidade de utilizar um forno, o aquecimento é dito como localizado. Neste caso o cuidado no controle do gradiente térmico deve ser redobrado para não gerar um novo estado de tensão (ROCHA, 2009).

Para o processo de soldagem, é comum se realizar um tratamento térmico pós soldagem, que tem como objetivo aliviar as tensões residuais sem alterar as propriedades da junta soldada. O tratamento consiste em elevar a temperatura da junta até uma temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase, e mantê-la constante por um determinado período de tempo, chamado encharque (MODENESI & MARQUES, 2009)

2.2.4 Medição de tensão residual

Existem diferentes formas de avaliar quantitativamente as tensões residuais. Esses métodos podem ser classificados em semi destrutivos, destrutivos e não destrutivos. As duas primeiras classificações impõem a subutilização da amostra, provocando alívio de tensões, que é medida, por sua vez, a partir da deformação provocada pelo alívio, que é medida normalmente por um *strain gage* combinada com métodos matemáticos (SOUSA, 2012).

Os métodos não destrutivos avaliam parâmetros físicos e cristalográficos para medir as tensões, considerando não somente as componentes macroscópicas da tensão, mas também as micro e sub-microscópicas, além de não provocar nenhum dano durante a medição (SOUSA, 2012). Entre os principais métodos não destrutivos pode-se destacar: a difração de raio-X, a difração de nêutrons, método ultrassônico e método magnético. A Tabela 1 compara alguns métodos não destrutivos de medição de tensões residuais considerando parâmetros relevantes na hora de se realizar uma medição.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.

	Difração de Raio-X	Difração de Neutrons	Ultrassom	Magnético
Profundidade de inspeção	1 a 50 μm	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm
Tipo de tensões analisadas	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica sub- microscópica	Macroscópica Microscópica sub- microscópica
Parâmetros medidos	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrasônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Sensibilidade à deformação ao encruamento	Alta	Média	Alta	Alta
Problemas para casos de grãos grandes	Sim	Não	Sim	Sim

Fonte: SOUSA, 2012 modificado.

2.2.5 Tensometria por Difração de raio-X

O método de medição de tensão residual mais utilizado e que foi utilizado neste projeto é o método de difração por raio-X, que consiste na incidência de feixes de raio-X que serão parcialmente difratados a um determinado ângulo, que determinará o espaçamento interplanar dos planos cristalográficos das amostras analisadas através da intensidade máxima de raios difratados em um determinado ângulo de varredura, como ilustra a figura 5 (SOUSA, 2012).

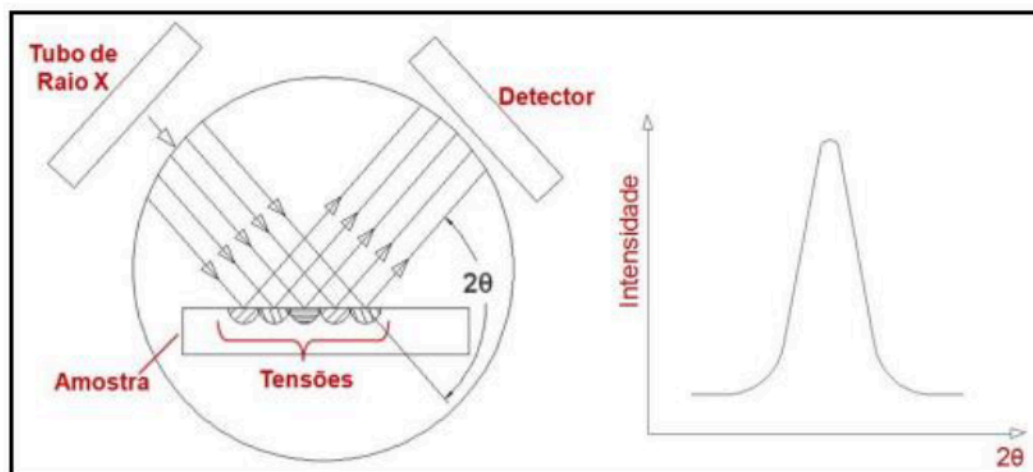


Figura 5 – Incidência e intensidade dos raios-X para um ângulo de varredura de 2θ .
Fonte: SOUSA, 2012.

Em um estado inicial de não deformação, o material metálico possui uma distância interplanar de d_0 . Considerando um feixe com comprimento de onda de λ , que incide sobre o material com um ângulo θ , se a lei de Bragg for satisfeita (Equação 2), este feixe será difratado sob o mesmo ângulo θ .

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (2)$$

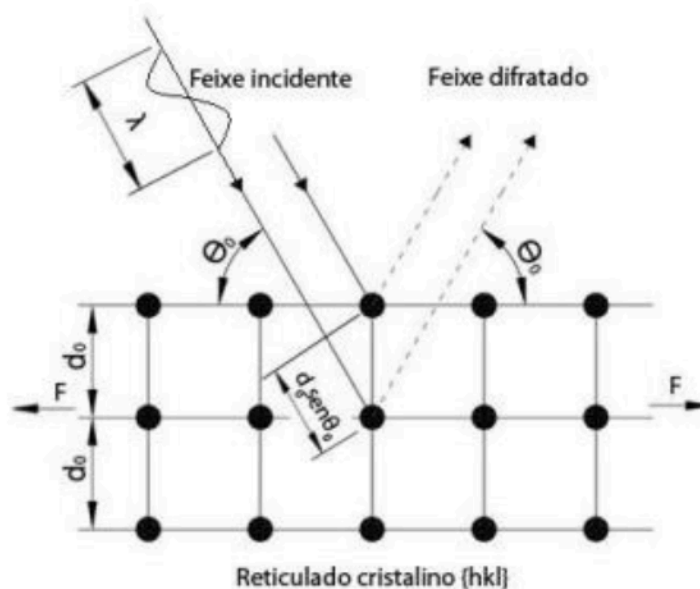


Figura 6 – Princípios da medição por raio-X.
Fonte: CHUVAS, 2015.

O método, portanto, consiste na medição de deformação no cristal do agregado policristalino (SOUSA, 2012), logo, para viabilizar a medição dos valores de tensão da amostra, deve-se utilizar relações constitutivas, como a Lei de Hooke.

Sendo:

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (3)$$

e

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (4)$$

A Lei de Hooke prevê que:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

Onde:

ε : Deformação [mm]

σ : Tensão [N/m²]

E : Módulo de elasticidade [MPa]

Fazendo a diferenciação da Lei de Bragg (Equação 2) obtêm-se a relação entre deformação e ângulo de difração.

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \cot \theta * \Delta \theta \quad (6)$$

O estado real de tensões deve ser expresso em coordenadas polares, logo a Equação 6 pode ser expressa por:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = \frac{(d_{\varphi, \psi} - d_0)}{d_0} = \cot \theta * (\theta_{\varphi, \psi} - \theta) \quad (7)$$

A partir de manipulações matemáticas chega-se à equação que é utilizada na medição de tensões residuais:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1 + \mu)} * \cot \theta_0 * \frac{(\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{(\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)} \quad (8)$$

2.3 AÇO HY-80

Dentre os aços temperados e revenidos há uma classificação denominada “*High Yield Steels*” (HY), que possuem elevado limite de escoamento (550Mpa), alta resistência e alta dureza. Esses aços foram desenvolvidos a partir de demandas militares durante a Segunda Guerra Mundial, empregados em aplicações marítimas e submarinas (JUNIOR, 2013). A norma militar MIL-STD-1626K especifica a composição dessa família de aços, assim como as aplicações adequadas e o controle em processos como a soldagem.

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço HY-80, em percentual de peso, onde é possível observar a baixa concentração de carbono, que confere uma estrutura martensítica de boa qualidade. Apesar de ser um aço de baixa liga, o HY-80 possui alta concentração de níquel, que garante tenacidade ao material.

Tabela 2 – Composição química do aço HY-80 (% de peso)

C	Mn	P	S	Si	Ni
0,12-0,18	0,10-0,40	0,015	0,008	0,15-0,38	2,00-3,25
Cr	Mo	V	Ti	Cu	
1,00-1,80	0,20-0,60	0,02	0,03	0,25	

Fonte: MIL-STD-1626K

Apesar de possuírem excelentes propriedades mecânicas e bom desempenho em serviço, o custo de fabricação desses materiais é muito alto, principalmente devido a soldagem, já que são elementos de baixa liga, condição que contribui para a ocorrência de trinca a frio (GORNÍ, 2001).

A soldabilidade de um material é dada principalmente pelo fator de suscetibilidade da ZTA de formar trincas a frio, que está relacionada tanto à composição química do material quanto a forma que ele foi soldado (JUNIOR, 2013). Para o aço HY-80 alguns cuidados extras devem ser tomados durante o processo de soldagem, além do controle da temperatura de pré-aquecimento, temperatura

interpasse e tratamento térmico, a escolha do consumível também é uma variável importante.

Neste caso, os consumíveis para a soldagem dos aços HY-80 devem ser de baixo hidrogênio e, diferente do convencional, as propriedades do metal de solda não podem ser tão superiores à do metal de base já que essa diferença provou-se induzir o aparecimento de trincas. Dessa forma, o ideal é selecionar consumíveis que forneçam metais de solda com razão do limite de escoamento e do limite de resistência mecânica seja menor que 0,9, para diminuir o risco de instabilidade plástica durante o processo (JUNIOR, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizada uma chapa de aço HY-80 com aproximadamente 140 x 210 mm e 25,4 mm de espessura. A amostra foi fresada para garantir bom acabamento superficial, sendo realizado um chanfro com 8 mm de largura e 10 mm de profundidade para a confecção da junta. A Figura 7 mostra em detalhes as dimensões da amostra.

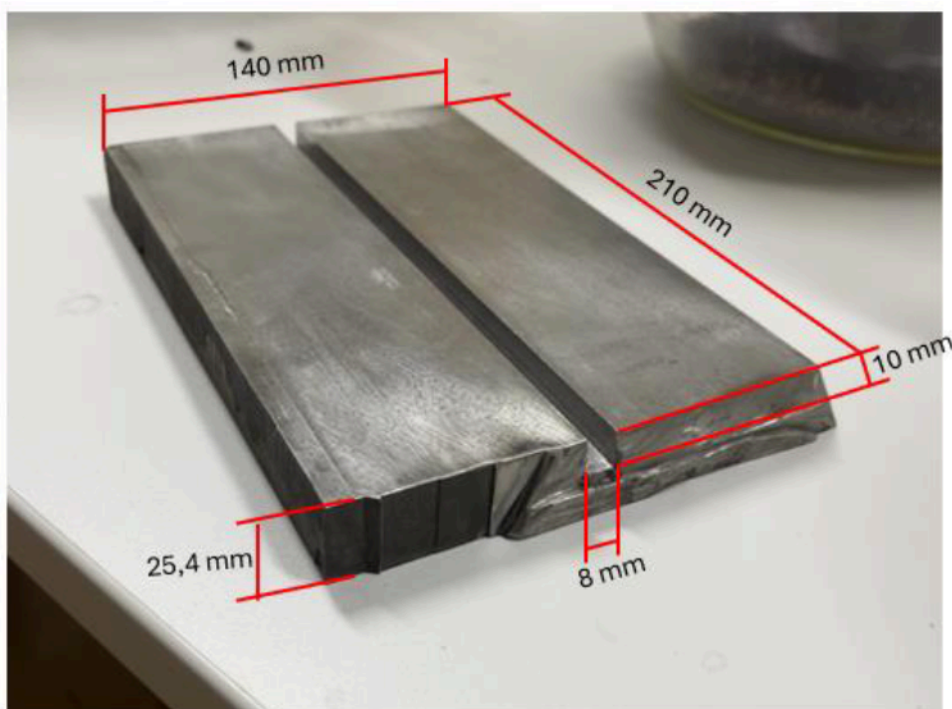


Figura 7 – Dimensões da amostra.
Fonte: Autoral.

3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

A soldagem pelo processo GMAW- RE foi realizada no Laboratório de Soldagem (LASOL) do CEFET/RJ com o equipamento de soldagem *Miller*® 350P em modo sinérgico, com uma frequência de rotação de 1500 RPM aplicada no arame. A mangueira do equipamento foi conectada a um carro trator, que impôs uma velocidade constante ao processo. O layout utilizado para a soldagem é apresentado na Figura 8. Os parâmetros de soldagem estão descritos na Tabela 3.

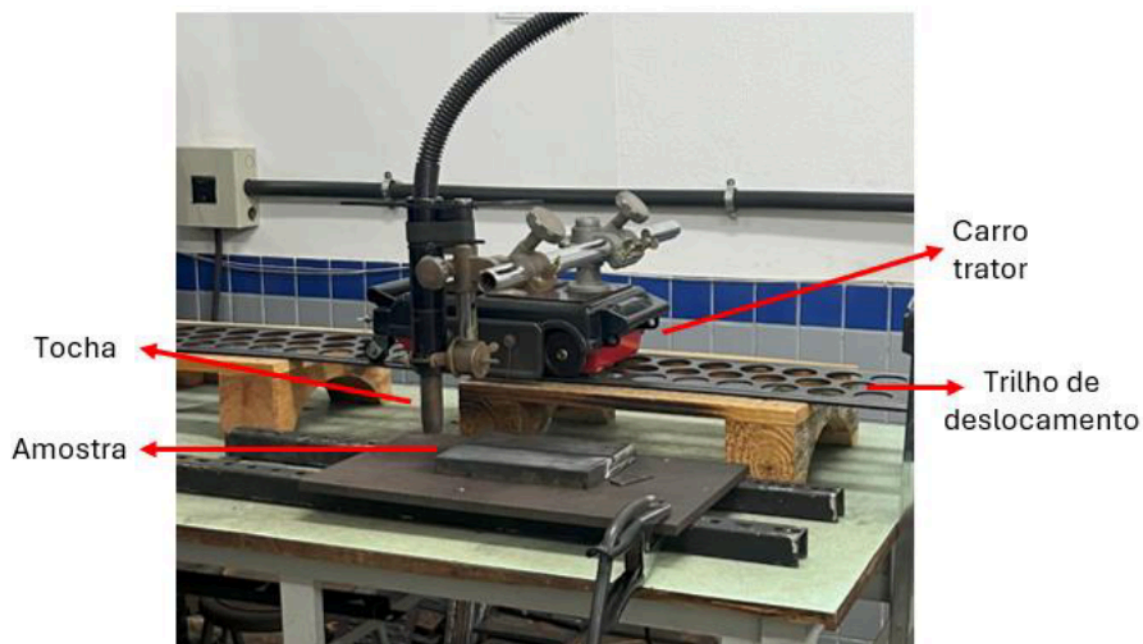


Figura 8 – Layout do processo.
Fonte: Autoral.

Tabela 3 – Configurações do Equipamento de Soldagem.

Arame:	MC-110 AWS A5.28 E110C-K4 H4
Diâmetro do arame (mm):	1,1 (metal cored)
Gás de proteção:	20% CO2 (AWS A5.32 M21-ArC-20)
Vazão do gás (l/min):	20
Distância da tocha da peça (mm):	20
Diâmetro rotação (mm):	3
Comprimento do arco:	35
Largura do arco:	25

Fonte: Autoral.

A peça foi submetida a um pré-aquecimento de 100°C. A temperatura foi medida através de um termopar de contato. Para preencher o chanfro por completo, foram necessários 2 passes, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 4. Entre cada passe foi realizada a limpeza do cordão com uma escova de aço, para evitar a inclusão de impurezas.

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem de cada passe.

	Passe 1	Passe 2
Frequência (RPM)	1500	1500
V_{alim} (in/min)	450	450
V	29,2	28,9
A	258,6	253,6
Tempo (s)	42	40
Comprimento (mm)	195	195
V_{soldagem} (cm/min)	27,9	29,3

Fonte: Autoral.

3.3 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Com o intuito de avaliar quantitativamente as tensões residuais do processo de soldagem, realizou-se a medição pelo método de difração de raios-X pela técnica $\text{sen}^2\psi$ no Laboratório de Análise de Tensões (LAT), na Universidade Federal Fluminense. O equipamento utilizado foi o analisador de tensões *XStress3000* (Figura 9), fabricado pela *Stresstech*®, conforme os parâmetros demonstrados na Tabela 5. Todas as medições foram feitas em 2 direções ao cordão de solda: transversal e longitudinal.

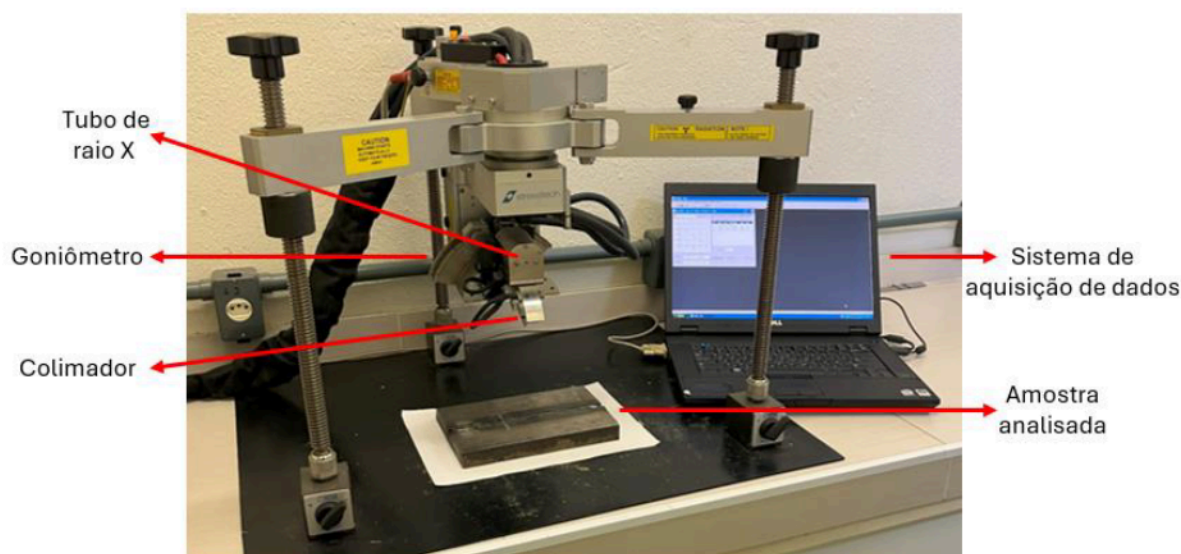


Figura 9 – Analisador de tensões XStress3000.
Fonte: Autoral.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados para a medição das tensões residuais.

Ângulos ψ	0°; 20,7°; 30°; 37,7°; 45°
Tempo de exposição	5 s
Corrente	6,7 mA
Tensão	30 kV

Fonte: Autoral.

Para garantir um resultado de qualidade e baixo erro, as janelas de medição (isoladas com fita isolante) foram limpas por polimento eletrolítico a 30 V. Foram feitas medições no centro do cordão da solda, na ZTA (à esquerda e à direita do cordão) e no metal de base. As medidas do cordão e da ZTA foram realizadas no meio e no início da amostra, próximo à abertura do arco, como apresenta a Figura 10.

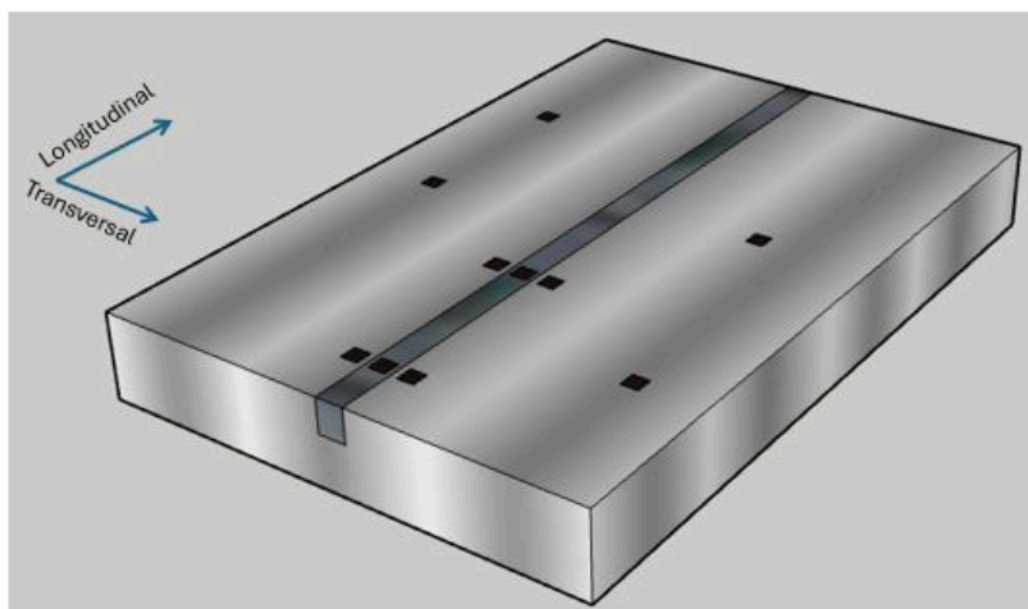


Figura 10 – Esquema das janelas de medições das tensões residuais.

Fonte: Autoral.

Após a realização do tratamento térmico pós soldagem foi realizada uma nova medição de tensões, utilizando o mesmo método e os mesmos parâmetros.

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM

Após a medição das tensões residuais do processo de soldagem, foi realizado um tratamento térmico pós soldagem na amostra, com o objetivo de aliviar as tensões residuais da soldagem. O processo foi realizado no Laboratório de Soldagem (LASOL) do CEFET/RJ.

A amostra foi inserida no forno quando a temperatura estava a 600°C. Ao abrir o equipamento, houve uma desestabilização natural da temperatura, que caiu para 570°C e demorou 6:30 min para se estabilizar novamente em 600°C. A partir da estabilização, o tempo de encharque da amostra foi de 1 hora. Após o tratamento térmico, a amostra foi resfriada ao ar, em temperatura ambiente (28°C). Os parâmetros do tratamento térmico são especificados pela norma MIL-STD-1626K.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aporte térmico do processo de soldagem foi calculado a partir da Equação 1. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6 e mostraram um valor menor do que estudos realizados com o processo convencional de GMAW e parâmetros semelhantes de soldagem (JUNIOR, 2013). É esperado que um aporte térmico mais baixo resulte em uma ZTA menor, crescimento de grão controlado e menores valores de tensões residuais. A Figura 11 mostra a macrografia da junta, onde é possível observar a pequena extensão da ZTA, por volta de 2mm e a ausência de defeitos, evidenciando a qualidade do procedimento de soldagem aplicado. A partir das medições realizadas, a Figura 12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6 – Aporte térmico de cada passe.

1° passe	1,62 kJ/mm
2° passe	1,50 kJ/mm

Fonte: Autoral.

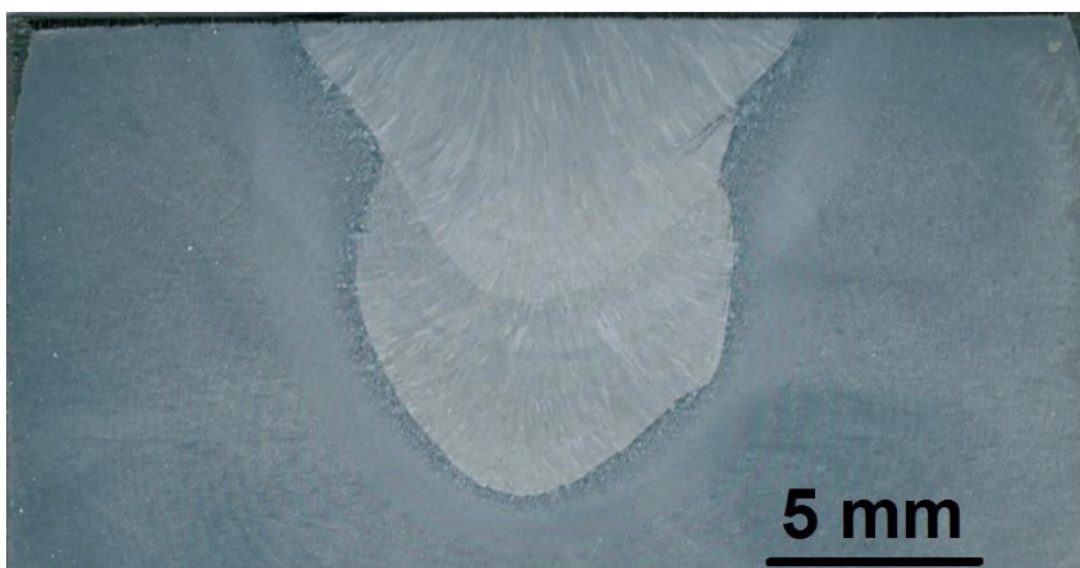
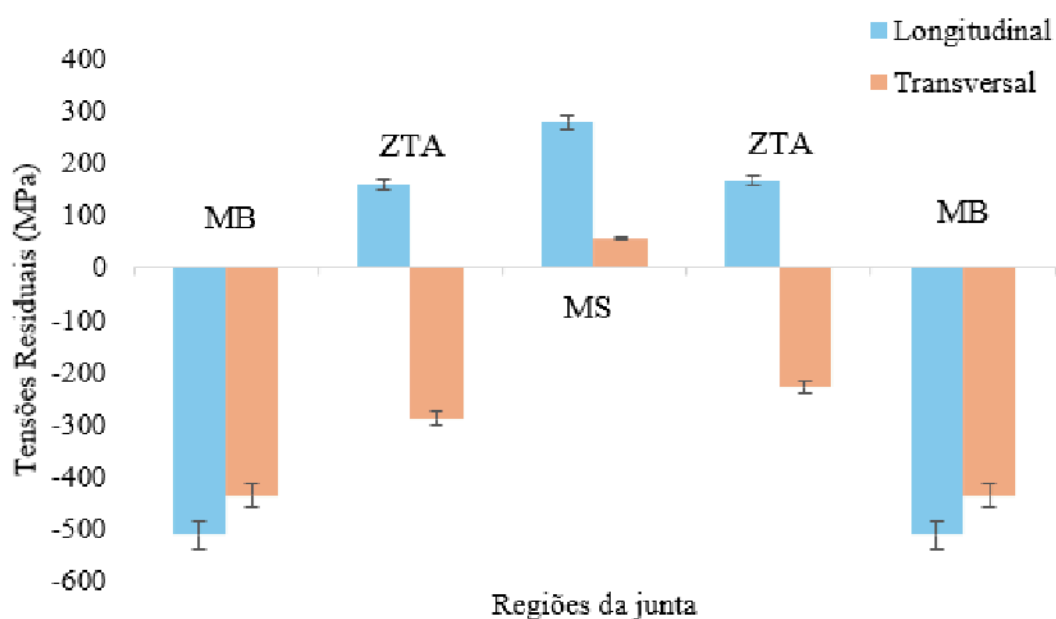
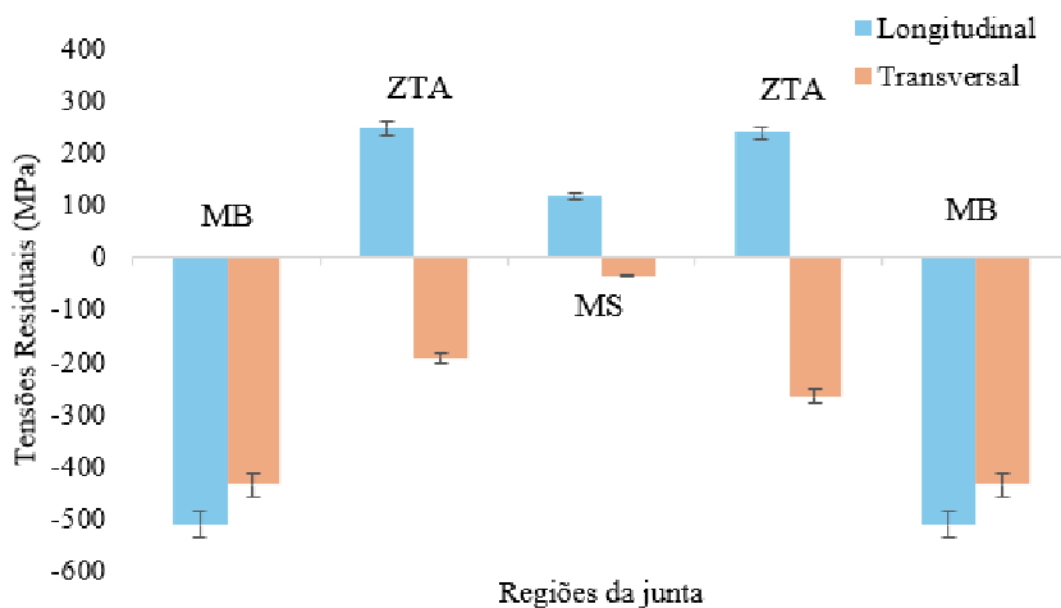


Figura 11 - Macrografia da junta soldada.

Fonte: Autoral.



(a)



(b)

Figura 12 Tensão residual pós soldagem (a) no início e (b) no meio da junta.
Fonte: Autoral.

Nota-se que o comportamento do MB é o mesmo nas duas direções de medição, onde as tensões se apresentam de forma compressiva. Tal comportamento segue estudos prévios realizados por Dias *et al.* (2016) e Chuvas (2015). Essas tensões podem ser resultantes de processo de conformação mecânica, pertinentes a

fabricação de chapas e do fato dessa região conferir resistência à dilatação das zonas afetadas pelo calor.

Ao analisar as zonas termicamente afetadas (ZTA), observa-se um comportamento contrário entre as direções de medição. Na longitudinal as tensões residuais apresentaram origem trativa. A direção longitudinal é a direção do avanço da tocha de soldagem e, conseqüentemente, do fluxo de calor. Assim, espera-se que os efeitos térmicos (dilatação e contração) sejam mais evidentes nessa direção quando comparados a direção transversal, tendendo a resultar em valores de tensão residual trativos. Mesmo assim, pode-se verificar a magnitude dos valores de TR medidos, cerca de 250 MPa, são baixos quando comparados aos valores de limite de escoamento do material (550 MPa). Esses resultados podem estar relacionados ao aporte térmico.

Por outro lado, ao analisar a direção transversal, os valores de tensão residual foram compressivos na ZTA, comportamento que também segue estudos realizados por Dias *et al.* (2016), ou seja, nesta direção o fluxo de troca térmica não foi o suficiente para alterar o estado de tensões, mas causou alívio das mesmas, quando comparado as magnitudes do metal de base.

Com relação ao metal de solda, por ser uma região onde o material funde e sofre solidificação rápida, o perfil do chanfro acaba sendo um fator preponderante no gradiente interno de tensões nesta região. Aliado a esse fato está a formação microestrutural e o gradiente de resfriamento heterogêneo ao longo da espessura. Complementarmente, foram utilizados dois passes, o que resulta em ciclos térmicos mais complexos.

O mesmo processo de medição foi realizado após o tratamento térmico pós soldagem (TTPS), onde os resultados são expostos na Figura 13.

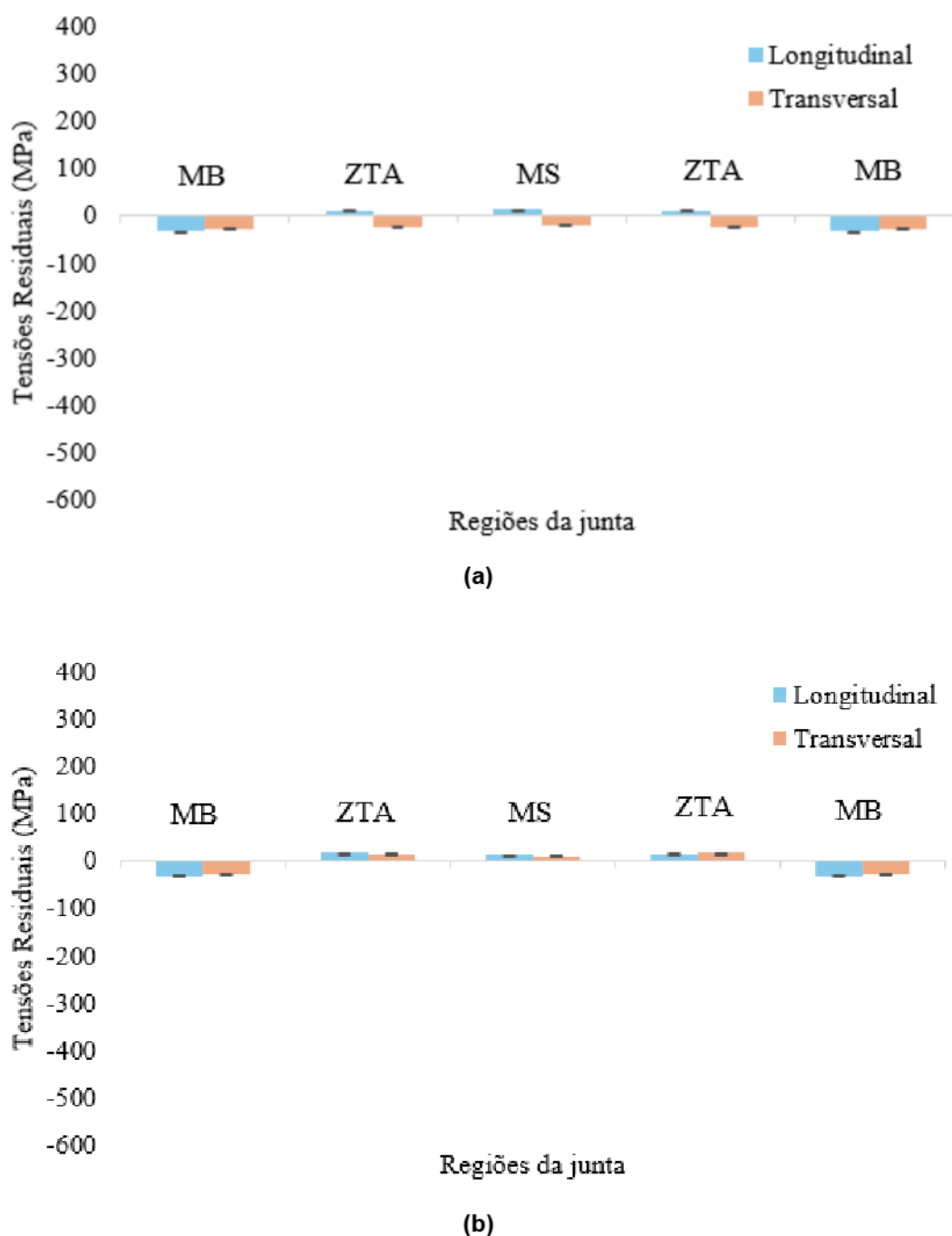


Figura 13 - Tensão residual pós TTPS (a) no início e (b) no meio da junta.
Fonte: Autoral.

Como esperado, a realização do TTPS resultou em um alívio de tensões residuais, que se deu na ordem de 88% em média. O método de difração de raio-X apresenta uma incerteza de, aproximadamente, 15 MPa, logo os valores encontrados

são vistos como satisfatórios, evidenciando a eficiência do processo do TTPS em juntas soldadas no que se refere aos níveis de tensões residuais. Ressalta-se ainda que o alívio de tensões foi em todas as regiões da amostra, incluindo as tensões residuais compressivas presentes na chapa antes da soldagem, tensões essas geradas nos processos de fabricação realizados anteriormente.

Complementarmente, a partir das medições transversais foi realizado o perfil na seção transversal ao cordão de solda, como é demonstrado na Figura 14.

A partir da Figura 14 é possível acompanhar a variação das tensões residuais ao longo da junta soldada, onde pode ser observado o padrão de curva tanto no início quanto no meio da região da junta, caracterizando uma homogeneidade no fluxo térmico do processo. Além disso, os valores das tensões residuais no metal de solda têm uma tendência trativa, que pode ser resultante de uma contração de resfriamento maior.

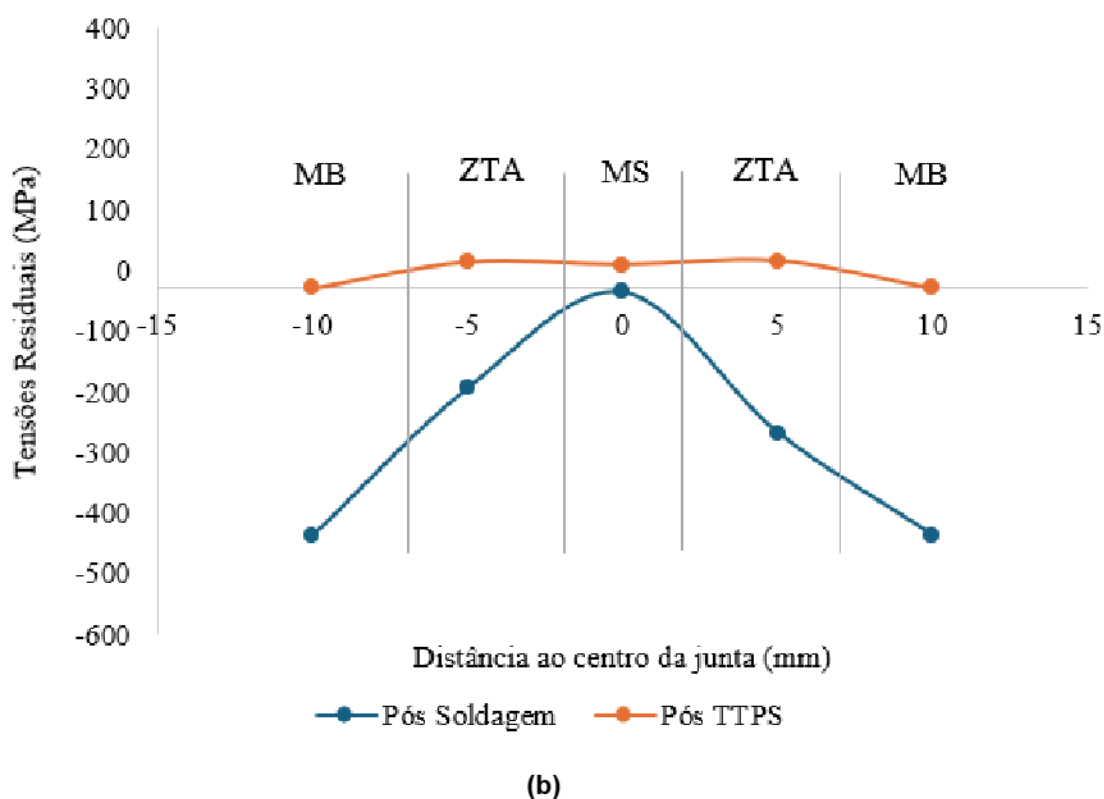
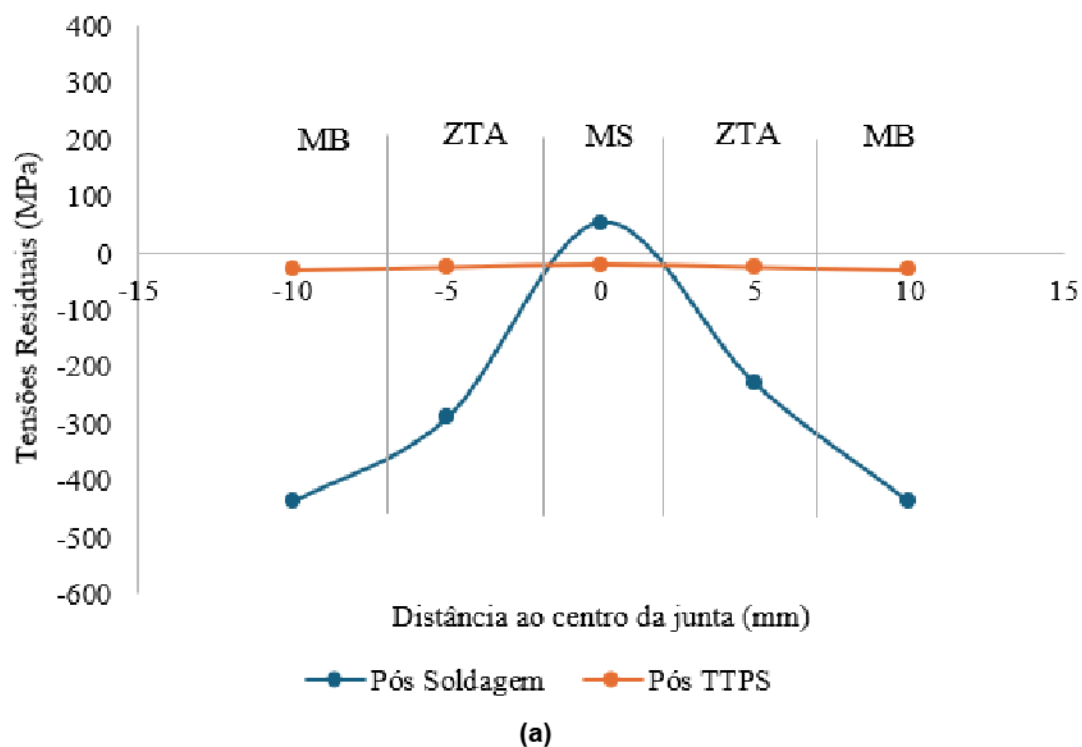


Figura 14 - Perfil de tensões residuais (a) no início e (b) no meio da junta.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve por objetivo avaliar as tensões residuais provenientes do processo de soldagem GMAW-RE, permitiu as seguintes conclusões.

A macrografia demonstrou a fusão completa das paredes do chanfro, o que confirma a adequação do processo GMAW-RE em chanfros retos, garantindo inclusive o acesso adequado à raiz.

As tensões residuais na ZTA tiveram caráter trativo na direção longitudinal após soldagem, mas com valores relativamente baixo. Já na direção transversal, as tensões continuaram compressivas.

O perfil de tensões na direção transversal, indica que a contração de resfriamento foi significativa, resultando em pontos trativos no cordão de solda.

O tratamento térmico pós soldagem aliviou as tensões na ordem de 88%, em média, conforme esperado, incluindo as tensões compressivas do metal de base.

A macrografia não indica defeitos aparentes que, aliado ao valor de aporte térmico e perfis de tensões residuais, é resultando da boa qualidade do processo GMAW-RE.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Avaliar as propriedades mecânicas da junta solda.
2. Realizar novas soldagem, com o mesmo processo, alterando a geometria de chanfro para verificar a influência no resultado de tensões residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, Welding Handbook – **Fundamental of Welding**, vol. 1, 7a ed., 373 p., 1994.

ASME IX: Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX – **Welding and Brazing Qualifications**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2024.

CARMO, D.C.; BITTENCOURT, M. S. Q; FILHO, J. C. P. **Análise de tensões por ultra-som em barra de aço sob flexão**. In: Congresso Anual da ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro.

CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência a fadiga da liga de alumínio 7050-T7451**. 230p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2004.

CHUVAS, T.C. **Influência do tratamento térmico no comportamento mecânico e nas tensões residuais de juntas soldadas de aços Cr-Mo**. Tese (Doutorado). Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola De Engenharia Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2015.

COSTA, J.F.M.; SILVA FILHO, W.A.; SILVEIRA, G.M.S.; ALMEIDA, F.A.C.; LOBATO, M.M.; CHUVAS, T.C.; *et al.* Comportamento de juntas soldadas de aço C-Mn obtidas pelo processo GMAW-RE com eletrodo rotativo. **Soldagem & Inspeção**, 24: e2411, 2019.

DIAS, J. D; CHUVAS, T. C; FONSECA, M. P. C. Evaluation of Residual Stress and Mechanical Properties of IF Steel Welded Joints by Laser and Plasma Processes. **Materials Research**, 19(3): 721-727, 2016.

GONÇALVES, M. P. **Estudo do Efeito do Pré e Pós-Aquecimento na Junta Soldada do Aço SAR 80T pelo Processo de Soldagem por Arco Submerso**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Rio de Janeiro, 2018.

GORNI, A. A. **Desenvolvimento de Aços Alternativos aos Materiais Temperados e Revenidos com Limite de Resistência entre 600 e 800 MPa**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

HAUK, V. **Residual Stress in Science and Technology**. Ed. E. Macherauch. 1987.

HERNÁNDEZ, V. B; BALTAZAR, E. L; HERNÁNDEZ, F. A. Surface Residual Stress Analysis in GMAW and LBW of Dissimilar TRIP-DP Steels Joint: An Experimental Approach. **Metals**, 12, 880, 2022.

FONSECA, L.N. **Caracterização Macro e Microestrutural e Comportamento Mecânico de Juntas de Aço USI-SAR-80T Soldadas pelo Processo GMAW com Auxílio de Processos Vibracionais**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-

Graduação em Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2016.

JUNIOR, A. S. L. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas de Aço HY-80**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2013.

JUNIOR, A. S. L.; COSTA, H. R. M.; SOUZA, L. F. G.; JORGE, J. C. F. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e GMAW. **Soldagem & Inspeção**, 19 (3), 2014.

JUNIOR, R. C. S. F. **Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Trincas a Frio em Juntas Soldadas de Aço ARBL**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1998.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons. 2003.

DEPARTMENT OF DEFENSE. MIL-STD-1626K: **Welding and Brazing Procedure and Performance Qualification**. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2023.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Universidade Federal de Minas Gerais - 3ª ed. 2009.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B.; **Introdução aos processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2000.

MYTHILI, R; PAUL, T; SAROJA, S; VIJAYALAKSHMI, M; RAGHUNATHAN, V. S.; Microstructural modification due to reheating in multipass manual metal arc welds of 9Cr–1Mo steel. **Journal of Nuclear Materials** 312 (2003) 199–206, 2002.

PRASAD, V; BABU, M; AJAY, P.A. Review on rotating arc welding process. **Materials Today: Proceedings**, 5 3551–3555, 2018.

ROCHA, R.S. **Avaliação do alívio mecânico de tensões residuais devido a sobrecarga provocada por teste hidrostático**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

SILVEIRA, G.M.S; JORGE, J.C.F; SOUZA, L. F. G. Microstructural characterization and mechanical properties of high-strength steel weld metals obtained by GMAW process with rotating electrode (GMAW-RE). **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 43:221, 2021.

SILVA, B. M; **Alívio de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Caixa Espiral de Turbina Hidráulica**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2005.

SOUSA, D.A. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, 2012.

WAINER, E; BRANDI, S.D; MELO. **Influência dos Parâmetros de Soldagem no Comportamento Microestrutural e nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Aços ARBL**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF). 6., 2011, Caxias do Sul.

WAINER, E; BRANDI, S.D; MELLO, F.D. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 6. ed. Editora Blucher - 6° ed. 2008.