

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Influência do Tipo de Eletrodo nas Tensões
Residuais e na Qualidade Superficial de Juntas
Soldadas de Aço A36**

Arthur Queiroz Koatz de Gurvitz

Rio de Janeiro

Junho de 2016

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Influência do Tipo de Eletrodo nas Tensões
Residuais e na Qualidade Superficial de Juntas
Soldadas de Aço A36**

Arthur Queiroz Koatz de Gurvitz

Projeto Final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz Henrique Gurvitz e Maria Cristina Queiroz, pelo apoio e amor incondicional, que sempre me fizeram seguir em frente.

Aos meus avôs, Pedro e Cláudio, por serem exemplos de vida. E as minhas avós, Leize e Regina, por todo carinho e apoio por toda minha vida.

Aos meus irmãos, Isadora e Pedro Henrique, pelos conselhos e risadas, que sempre vinham nas horas de mais necessidade.

Ao meu padrasto, Edson, por todo apoio e conselhos dados.

À minha namorada, Juliana, pelo amor e incentivo em todos os momentos.

À minha orientadora, Tatiane Chuvas, pelo auxílio durante todo este trabalho e conhecimento adquirido.

RESUMO

O processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW) é ainda, nos dias atuais, o processo de fabricação mais utilizado na indústria, devido ao baixo custo do equipamento, além de apresentar grande versatilidade de eletrodos, possibilitando ampla aplicação. No entanto, tensões residuais, geradas nos processos de fabricação como a soldagem, podem ser prejudiciais à vida em serviço do componente soldado, pois as mesmas podem se somar as tensões de serviço e causar uma falha prematura. Dessa forma, o conhecimento sobre a influência dos parâmetros de soldagem na natureza e magnitude das tensões residuais se torna fundamental para evitar falhas e melhorar a vida em serviço. Neste trabalho foi analisado a influência do tipo de eletrodo na natureza das tensões residuais superficiais, medidas por difração de raios-X, pelo método $\text{sen}^2\Psi$, geradas de um aço ASTM A36, extensivamente utilizado na indústria metalmeccânica. Foi realizado também uma avaliação da qualidade superficial da junta soldada, por inspeção visual. Complementarmente foram realizadas análises macrográficas das juntas soldadas a fim de verificar principalmente a dimensões das juntas e a extensão das zonas termicamente afetadas. Os resultados mostraram que as juntas soldadas com eletrodo E6010 apresentam tensões residuais trativas na direção transversal no metal de solda. Contudo o eletrodo E7018 apresenta tensões compressivas, tanto no topo quanto na raiz do metal de solda, o que seria benéfico para as juntas soldadas.

Palavras-Chave: aço ASTM A36; soldagem por eletrodo revestido; tensões residuais; difração de raios-X; inspeção visual.

ABSTRACT

The shielded metal arc welding (SMAW) is still today the most used manufacturing process due to the low cost of the equipment, besides having versatility of coating composition, enabling numerous kinds of applications. However, residual stresses generated in manufacturing processes such as welding, could be detrimental to the life of the welded component in service because the stress of the service added to the residual stress could cause a premature failure. Thus, the expertise in the influence of welding parameters on the nature and magnitude of the residual stresses becomes critical to avoid failures and improve the life of the component in service. This study analyzed the influence of the coating composition of electrodes on the nature of the surface residual stress, measured by diffraction of X-rays by $\sin^2\Psi$ method generated an ASTM A36 steel, used extensively in metalworking industry. It was also carried out an evaluation of the surface quality of the welded joint, by visual inspection. In addition, micrographic analyzes of welded joints in order to check dimensions especially the joints and the extents of heat-affected zones were performed. The results showed that the welded joints with E6010 electrodes have tensile residual stresses in the transverse direction in the weld metal. However, E7018 electrode has compressive stresses in both the top and root of the weld metal, which is beneficial for the welded joint.

Keywords: ASTM A36 steel; shielded metal arc welding; residual stress; X-ray diffraction; coating composition; visual inspection; metallographic test.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1 – Motivação.....	1
1.2 – Justificativa	1
1.3 – Objetivo.....	2
1.4 – Metodologia	2
1.5 – Organização do Trabalho	2
CAPÍTULO 2	4
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 – Aço ASTM A36.....	4
2.1.1–Soldagem do Aço ASTM A36	5
2.2–Soldagem com Eletrodo Revestido	5
2.2.1 – Tipos de Revestimento de Eletrodo	8
2.2.2 – Avaliação da Qualidade da Solda	10
2.3 – Tensões Residuais	12
2.3.1 – Tensões Residuais em Soldagem	14
2.3.2 – Tensões Residuais na Soldagem do Aço ASTM A-36	16
2.3.3 – Medição das Tensões Residuais.....	18
2.3.4 – Método de Difração por Raios-X.....	19
CAPÍTULO 3	24

MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 – Materiais.....	24
3.2 – Métodos.....	24
3.2.1 – Corte.....	24
3.2.2 – Soldagem.....	25
3.3 – Análise das tensões residuais	27
3.4 – Ensaio de Inspeção Visual.....	29
3.5 – Macrografia	29
CAPÍTULO 4.....	30
RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 – Cálculo do aporte térmico	30
4.2 – Qualidade Superficial das Juntas Soldadas.....	31
4.3 – Macrografia.....	33
4.2 – Análise de Tensões Residuais	35
CAPÍTULO 5.....	42
Conclusão.....	42
CAPÍTULO 6.....	44
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	44
Referências Bibliográficas	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido[9].....	6
Figura 2: Circuito de soldagem por Eletrodo Revestido [13]	7
Figura 3: Eletrodos Revestidos para Aços Carbono[14]	8
Figura 4: Superposição das tensões residuais dos tipos I, II e III [19].....	14
Figura 5: Distribuição das tensões residuais em juntas de topo de processo a arco convencional: (C) contração, (R) Resfriamento superficial mais intenso e (T) Transformação de fase[19].....	15
Figura 6: Distribuição das tensões residuais(a) longitudinal e (b) transversal na superfície de uma junta soldada de aço ASTM A36 [22]	16
Figura 7: Distribuição das tensões longitudinal e transversal no interior de uma junta soldada de aço ASTM A-36[22]	17
Figura 8: Distribuição de dureza na amostra soldada [23].....	18
Figura 9: Métodos de medição de tensões residuais [26].....	19
Figura 10: Difração de raios-X [19].....	20
Figura 11: Distribuição tridimensional da tensão residual [25]	21
Figura 12: Relação θ_ϕ versus $\text{sen}^2\psi$ [22].....	22
Figura 13: Chapa de aço ASTM A36: (a) dimensões da chapa inicial; (b) esquema de corte da chapa inicial (unidades em mm).	25
Figura 14: Desenho esquemático da junta soldada: (a) vista frontal, (b) vista superior	26
Figura 15: Analisador de tensões por raios-X: (a) equipamento completo; (b) sistema medidor	28
Figura 16: Pontos de medição dos perfis longitudinal (L) e transversal (T)	28
Figura 17: Topo da junta soldada com eletrodo (a) E7018, (b) E6013 e (c) E6010... ..	32
Figura 18: Macrografia (a) amostra 2 (E7018); (b) amostra 4 (E6013); e (c) amostra 5 (E6010)	34
Figura 19: Tensões residuais na MS Longitudinal - Topo	36

Figura 20: Tensões residuais no MS Longitudinal – Raiz	36
Figura 21: Tensões residuais no MS Transversal - Topo	37
Figura 22: Tensões residuais no MS Transversal - Raiz	38
Figura 23: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - Topo	39
Figura 24: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - Raiz	40
Figura 25: Tensões residuais na ZTA Transversal – Topo	40
Figura 26: Tensões residuais na ZTA Transversal – Raiz	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química do aço ASTM A36.....	24
Tabela 2: Propriedades mecânicas d aço ASTM A36.....	24
Tabela 3: Composições químicas dos eletrodos E6010, E6013 e E7018.....	26
Tabela 4: Parâmetros de soldagem.....	26
Tabela 5: Parâmetros de soldagem.....	31
Tabela 6: Tensões residuais no metal de solda.....	35
Tabela 7: Tensões residuais na ZTA.....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	20
Equação 2:	20
Equação 3	21
Equação 4.....	21
Equação 5.....	21
Equação 6:	22
Equação 7:	22
Equação 8:	23
Equação 9.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TR = Tensões residuais

ZTA = Zona termicamente afetada

MB = Metal de base

MS = Metal de solda

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

TMCP = *Thermo-mechanically controlled process*

SAW = *Submerged arc welding*

SMAW = *Shielded metal arc welding*

AWS = *American welding society*

END = Ensaio não-destrutivo

TOFD = *Time of flight diffraction*

MIG = *Metal inert gas welding*

MAG = *Metal active gas welding*

MPa = Megapascal

mm = milímetro

API = *American Petroleum Institute*

ABNT = Associação brasileira de normas técnicas

HB = *Hardening Brinell*

Kgf = kilograma-força

n= números inteiros

λ = comprimento de onda

d = distância inter-planar

θ = ângulo entre o feixe incidente e o plano refrator

ε = deformações principais

σ = tensões principais

E = módulo de elasticidade do material

ν = coeficiente de Poisson

φ = ângulos de reflexão do plano cristalino

θ_0 = valor do ângulo de Bragg para o material sem tensão residual

K = fator de escala de equipamento

L_{50} e L_0 = distância entre as intensidades máximas dos feixes difratados em relação à linha de referência

ΔL_{calib} = diferença entre L_{50} e L_0 para os feixes difratados pelo material de calibração (sem tensões residuais)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Motivação

A presença de tensões residuais (TR), geradas em todos os processos de fabricação podem configurar em um grande problema em campo, já que se somadas a tensões de carregamento externo trativo podem causar falhas inesperadas. Em contrapartida, essas mesmas tensões, se compressivas, podem ser benéficas a estrutura, impedindo propagações de trincas e falhas por fadiga. Logo, o estudo dos parâmetros de soldagem, processo de fabricação mais utilizado, e sua influência na geração de tensões residuais se mostra de grande valia para indústria metalmeccânica.

1.2 – Justificativa

A soldagem é um dos processos de fabricação mais aplicado na indústria atualmente e, neste mesmo contexto, mesmo sendo um processo de pouca produtividade, a soldagem por eletrodo revestido é largamente aplicada no Brasil, principalmente na construção naval (navios e plataformas) devido a sua grande versatilidade. Contudo, a presença de tensões residuais pode prejudicar a eficiência das juntas soldadas e levar a falhas catastróficas, pois tensões residuais trativas têm efeito deletério nos materiais, diminuindo a vida em fadiga e a resistência à corrosão sob tensão dos mesmos. Por outro lado, tensões superficiais de caráter compressivo oferecem benefícios, principalmente, por ser uma barreira para a propagação de trincas.

Na soldagem as tensões residuais são resultado de uma interação complexa entre os parâmetros de soldagem como geometria da junta, velocidade de soldagem, número de passes e o tipo de material de enchimento. Assim, se torna fundamental o estudo sobre como cada um dos parâmetros de soldagem pode afetar a natureza (trativa ou compressiva) e a magnitude das

tensões residuais geradas nos processos de soldagem, em particular o processo por eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*).

1.3 – Objetivo

Este trabalho tem como objetivo analisar como o tipo de eletrodo (rutílico, básico ou celulósico) influencia na qualidade superficial das juntas soldadas produzidas pelo processo de eletrodo revestido, bem como a natureza (compressiva ou trativa) e magnitude das tensões residuais geradas na soldagem de um aço estrutural ASTM A36.

1.4 – Metodologia

O material de base utilizado neste trabalho foi uma chapa de aço estrutural ASTM A36, amplamente empregado na indústria naval, cortado com processos que resultassem em uma zona termicamente afetada (ZTA) mínima para não influenciar nos resultados.

As soldagens por eletrodo revestido foram realizadas no laboratório de soldagem (LASOL) do CEFET/RJ, com controle dos parâmetros. Após a soldagem, as tensões residuais superficiais foram medidas por difração de raios-X no laboratório de análises de tensões (LAT) da UFF, pelo método $\text{sen}^2 \Psi$, nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, em três regiões distintas: metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS). O ensaio de inspeção visual foi realizado no laboratório de metalografia (LAMAT) do CEFET/RJ, assim como as macrografias.

1.5 – Organização do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos: revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusão, e sugestões para trabalhos futuros.

Na revisão bibliográfica, os conceitos e definições que se julgaram relevantes são expostos para melhor embasamento teórico e desenvolvimento do trabalho.

Em materiais e métodos é exposto o detalhamento do procedimento para a confecção das amostras, definindo o material utilizado, o corte utilizado para fabricação das amostras, o processo de soldagem; além de descrever os ensaios realizados afim de medir e analisar os resultados no que tange o estado de tensões da peça e sua qualidade superficial.

No capítulo resultados e discussões são apresentados os dados relativos aos ensaios realizados, podendo dessa forma discutir esses resultados e chegar a conclusões, tema do capítulo posterior, conclusão.

Nas sugestões para trabalhos futuros é exposto que novas fronteiras podem ser exploradas de forma a complementar, validar ou rebater as conclusões achadas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Aço ASTM A36

O aço ASTM A36 faz parte da classe de aços-carbono para aplicação em componentes estruturais, como estrutura navais, de pontes, locomotivas, máquinas, que possuem propriedades físicas bem definidas, permitindo sua utilização em projetos que exijam boa soldabilidade e resistência mecânica. Os aços do tipo A36 contém porcentagens de carbono inferiores a 0,3%, resultando em uma boa ductilidade, atributo ideal para trabalhos mecânicos e soldagem [1, 2].

A composição química do aço é o principal fator que determina as suas propriedades. Para os aços carbono comuns, como o aço ASTM A36, a presença de carbono e manganês influencia positivamente na resistência mecânica e dureza da peça, porém afeta negativamente propriedades como soldabilidade e ductilidade do aço. Por este motivo são adicionadas pequenas quantidades de outros elementos de liga, com intuito de obter melhores propriedades do material [2]. A adição desses elementos de liga pode resultar em um aço com propriedades mais homogêneas, com uma boa ductilidade e elevada relação entre limite de resistência e limite de escoamento, além de melhorar a soldabilidade do mesmo[1].

Outro fator importante que pode influenciar nas propriedades do aço é o processo de fabricação a qual esse material é submetido. O trabalho a quente pode conferir a estrutura uma boa ductilidade, além de uma homogeneidade satisfatória. Os processos de fabricação mais utilizados para se obter chapas de aço ASTM A36 é a laminação convencional ou laminação controlada somada a um resfriamento acelerado, também conhecido como processo controlado termo mecanicamente, do inglês *Thermo-Mechanically Controlled Process*(TMCP)[3].

A soldabilidade é uma característica muito importante para este tipo de material, pois devido a sua aplicação na indústria, a soldagem é um processo de fabricação constantemente utilizado. O aço A36 pode ser soldado sem alteração de sua estrutura. Contudo, quanto maior for a quantidade de carbono no aço, menor será sua soldabilidade, necessitando de um resfriamento mais lento para evitar características microestruturais indesejadas, como a ferrita com segunda fase alinhada, que apresenta baixa resistência a propagação de trincas. [2,4].

2.1.1–Soldagem do Aço ASTM A36

O desempenho esperado para uma junta soldada depende intrinsecamente da aplicação a que se destina. Assim, é importante conhecer bem o material sendo soldado e os parâmetros de projeto, tanto da junta soldada como da estrutura. Algumas características ideais que uma junta soldada deveria apresentar são: resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniformes ao longo da solda e similares às propriedades do material [5].

Como na grande maioria das juntas soldadas há a aplicação de calor, e conseqüente deformação plástica do material, podem ocorrer mudanças microestruturais no material, além da possibilidade do surgimento de descontinuidades, como trincas e vazios[5].

A maior parte das composições empregadas para metal depositado por junta soldada em aços estruturais e de baixa liga depende de morfologias adequadas de ferrita para obter as propriedades desejadas, como por exemplo, tenacidade [6]. Parâmetros de soldagem como corrente, velocidade de soldagem, tipo de chanfro, entre outros, podem gerar alterações significativas na microestrutura dos materiais, como aço A36 [5].

Um exemplo de influência de intensidade de corrente pode ser verificada no trabalho de Da Silva, et al (2003) [7]. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de soldagem a arco submerso (SAW) com corpos de prova de aço A36, de perfil T, utilizando três correntes diferentes: 800A, 850A e 900A. De acordo com os resultados dos ensaios, a soldagem com corrente de 800A favorece a formação dos constituintes microestruturais de baixa temperatura de transformação, como a ferrita com segunda fase alinhada, que é indesejável para o metal de solda, já que apresenta baixa resistência a propagação de trincas. Já com corrente de 850A, obteve-se a formação de ferrita acicular, reduzindo a presença da ferrita com segunda fase alinhada. E finalmente com corrente de 900A, reduziu-se a fração volumétrica de ferrita acicular, aumentando a fração de ferrita primária.

2.2–Soldagem com Eletrodo Revestido

A soldagem por eletrodo revestido (SMAW) é definido, segundo a *American Welding Society* (AWS), como um processo a arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo de alma

metálica revestido e a peça que será soldada, que permite a coalescência entre os materiais pelo aquecimento gerado [8].

Cada componente do eletrodo tem uma função específica. A função da alma metálica é fornecer metal de adição para o enchimento da junta, além de conduzir corrente elétrica. Como principais funções do revestimento podem ser citadas: estabilizar o arco elétrico, adicionar elementos de liga no cordão de solda, eliminar de impurezas e proteger a poça de fusão e o metal de solda [8]. A Figura 1 apresenta um esquema do processo de soldagem por eletrodo revestido.

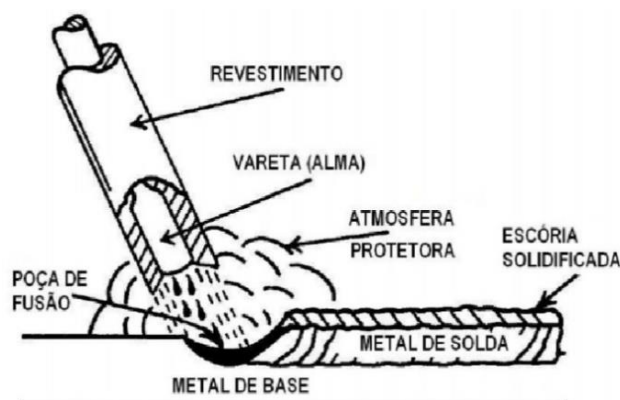


Figura 1: Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido[9]

A principal característica do SMAW é a versatilidade de ligas soldáveis e parâmetros operacionais, resultado do extenso número de formulações possíveis para o revestimento do eletrodo. Contudo, se comparado a processos com eletrodo contínuo, a produtividade é muito baixa, por se tratar de um processo totalmente manual. Outras desvantagens são o alto custo de treinamento para se qualificar um soldador, visto que o processo depende inteiramente do operador para manter os parâmetros de soldagem, como o comprimento do arco (“*stick-out*”); a necessidade de cuidados especiais no armazenamento de certos eletrodos, que se expostos podem ficar contaminados, prejudicando a qualidade da junta soldada; e o grande volume de gases gerados no processo. Posto isso, pode se citar o baixo custo e simplicidade do equipamento utilizado; e a possibilidade de aplicação desse método em ambientes de difícil acesso e abertos, como vantagens do processo [10, 11].

A tensão do arco durante o processo SMAW não pode ser controlada quando o mesmo é manual, não sendo possível a precisão necessária no controle da distância entre o eletrodo e a peça a soldar, além da transferência de metal que é diretamente relacionada a variação do

comprimento de arco. O revestimento utilizado no eletrodo também é um fator que modifica a tensão de arco. Contudo deve se estar atento as especificações de cada fabricante, pois correntes muito elevadas podem causar a degradação dos revestimentos do eletrodo. A intensidade da corrente é diretamente proporcional a taxa de deposição, que é determinante para a produtividade do processo, assim como a penetração da solda e forma do cordão [10, 12].

Em relação a velocidade de resfriamento, altas intensidades de corrente podem ser combinadas com velocidades de soldagem elevadas para manter reduzida a energia de soldagem, possibilitando altas taxas de deposição aliada a uma microestrutura refinada. Outro parâmetro que influencia na produtividade do processo é a dimensão do eletrodo. Quanto maior o diâmetro do eletrodo, maximiza-se a taxa de deposição de metal. O ângulo de solda permite um melhor fluxo térmico entre as partes soldadas, controlando o formato do cordão e a alimentação da poça de fusão. O equipamento utilizado no processo SMAW possui uma configuração muito simples, conforme mostrado na Figura 2 [10].

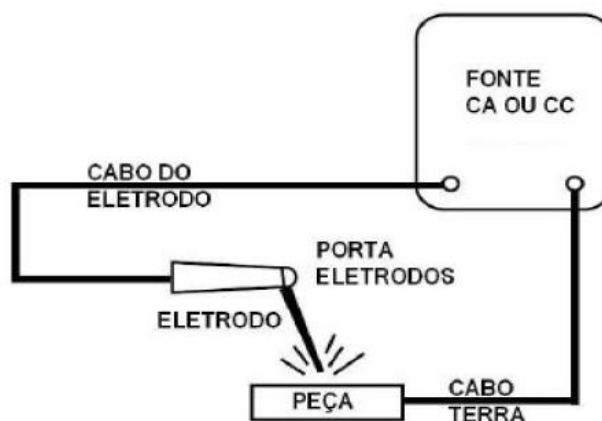


Figura 2: Circuito de soldagem por Eletrodo Revestido [13]

As fontes para o processo SMAW podem operar com corrente contínua, sendo possível utilizar a polaridade direta ou inversa (reversa), ou com corrente alternada, dependendo do revestimento que irá se utilizar [10].

2.2.1 – Tipos de Revestimento de Eletrodo

O eletrodo revestido é composto de uma vareta metálica, a alma, recoberta por uma camada de fluxo, o revestimento, variando de 1,5 a 8 mm de diâmetro, sendo a alma normalmente fabricada pelo processo de extrusão. Variadas composições químicas podem ser obtidas dependendo da aplicação a qual se destina. Alguns elementos de liga são adicionados para se obter determinadas especificações e aplicações, como por exemplo silício e alumínio, desoxidantes associados a maior estabilidade do arco [4, 8].

A composição do revestimento influencia diretamente nas características operacionais do eletrodo, assim como nas propriedades mecânicas da junta soldada e, conseqüentemente, na sua composição química. O revestimento também é usado para realizar o refino metalúrgico, como por exemplo dessulfuração; formar uma camada de escória protetora, assim como permitir sua fácil remoção; possibilitar a soldagem em diferentes posições; evitar contaminações na superfícies da junta; reduzir o nível de respingos e fumo; diminuir a velocidade de resfriamento da solda, com intuito de evitar microestruturas e falhas indesejadas; possibilitar o uso de diferentes correntes e polaridades, assim como aumentar a taxa de deposição de metal [8].

Devido a extensa gama de eletrodos utilizados para as diferentes aplicações foi feita uma classificação para que se pudesse ser comercialmente viável a aquisição desses diversos consumíveis. A classificação mais utilizada é a da AWS, que é realizada conforme mostrado na Figura 3 [4].

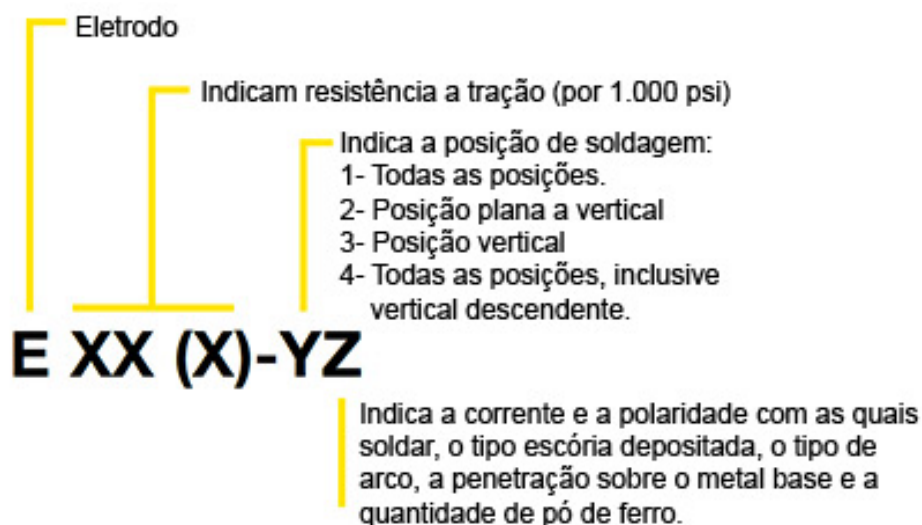


Figura 3: Eletrodos Revestidos para Aços Carbono[14]

Os revestimentos podem ser classificados em diferentes grupos, de acordo com sua composição química [8,15]:

- Celulósico: possui elevada quantidade de material celulósico, uma substância orgânica constituída predominantemente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), que em operação gera muitos gases, em sua maioria hidrogênio, monóxido de carbono, e dióxido de carbono (CO₂), que protegem a poça de fusão. A penetração é muito elevada, em contrapartida gera também muitos respingos. Contudo, as propriedades mecânicas da solda são boas. Dependendo da composição química do revestimento, a quantidade de hidrogênio pode ser elevada, o que pode elevar a tendência a fragilização. A escória formada no processo é fina, e de rápida solidificação, o que permite a soldagem em diferentes posições. A sua aplicação é normalmente restrita a soldagem com corrente contínua e polaridade reversa, devido à baixa estabilidade do arco.
- Rutílico: apresenta elevada quantidade de rutilo (TiO₂). Devido a essa composição possui alta estabilidade do arco e pouco respingo, o que proporciona um bom aspecto superficial do cordão de solda. Entretanto, a resistência a fissuração a quente é baixa. Produz escória abundante e de fácil remoção. Esses eletrodos proporcionam baixa penetração. A resistência mecânica e ductilidade obtidas são boas, podendo utilizar corrente contínua ou alternada.
- Básico: possui quantidade significativa de carbonato de cálcio. Fornece depósito com baixo teor de hidrogênio. A decomposição do revestimento gera uma escória básica, que aliada ao dióxido de carbono advindo do carbonato protege a solda. Essa escória proporciona a dessulfuração da solda. Como consequência, as propriedades mecânicas, como resistência a fissura a quente ou a frio, se tornam melhores. Pode ser utilizado com corrente alternada ou corrente contínua.
- Ácido: constituído de óxidos de ferro, manganês e sílica. Essa composição produz uma escória de caráter ácido, abundante e porosa, de fácil retirada. Como a taxa de deposição é alta, a poça de fusão é volumosa, o que limita as posições de soldagem. Pode ser utilizado corrente contínua ou alternada, gerando uma penetração média. Dependendo da composição química do revestimento, pode haver baixa deposição de carbono e manganês, o que proporciona baixa resistência, porém alta ductilidade da junta soldada.

A taxa de respingo é baixa e as propriedades da solda são boas, mas a resistência a formação de trincas, causadas pela solidificação, é baixa.

- Oxidante: tem sua composição constituída principalmente por óxido de ferro e manganês. Tem como aspecto uma escória oxidante, abundante e de retirada fácil. Não pode ser utilizado em aplicações de responsabilidade, por possuir uma baixa penetração. Apesar disso, a aparência do cordão de solda é satisfatória. Pode ser utilizado com corrente contínua e corrente alternada.

2.2.2 – Avaliação da Qualidade da Solda

A integridade da junta soldada depende da qualidade do metal de base e dos parâmetros utilizados no processo de soldagem. Avanços no desenvolvimento dos materiais e nos métodos de testes mais seguros para a avaliação dos mesmos foram feitos devido as frequentes demandas por alta tecnologia [16].

Descontinuidades em juntas soldadas podem ser classificados como trincas, mordeduras, inclusão de escória e outras. Os ensaios não destrutivos (END's) incluem métodos capazes de proporcionar informações sobre os defeitos/descontinuidades presentes em um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas. Os ensaios não destrutivos estão em constante desenvolvimento, possibilitando a determinação quantitativa do tamanho, formato e localização dos defeitos/descontinuidades. A avaliação da integridade estrutural obtida através de END's, juntamente com as propriedades dos materiais e condições operacionais dos equipamentos ou estruturas, possibilita a previsão de algum dano e até mesmo a vida útil dos mesmos [6, 16].

Os END's podem ser aplicados em todas as etapas do processo: fabricação, construção, montagem e manutenção de equipamentos e são extensamente utilizados nos setores de petróleo, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval e nuclear, principalmente.

Diversos métodos podem ser utilizados para avaliar uma junta soldada dependendo do material, dimensões, sensibilidade requerida e acessibilidade para inspeção, por exemplo. Os principais ensaios não destrutivos são [6,16]:

- Inspeção visual: provavelmente o mais usado, para verificação de descontinuidades superficiais. Pode ser utilizado em vários estágios da soldagem, fornecendo informações importantes sobre a qualidade do cordão de solda. Para muitas soldas não críticas, muitas avaliações são feitas principalmente por inspeção visual. Equipamentos podem ser utilizados para melhorar a inspeção visual, como microscópios, lente de aumento e câmeras de vídeo.
- Teste de líquido penetrante: bastante utilizado para verificação da qualidade superficial de peças soldadas. Também pode ser realizado em diversos passes da soldagem, para que dessa forma se mantenha a qualidade da solda. Utilizado com sucesso para materiais ferrosos e não-ferrosos.
- Teste de partícula magnética: empregado para verificar descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Para se obter melhores resultados são aplicadas partículas magnéticas fluorescentes, fornecendo ao processo uma sensibilidade maior. Pode ser utilizado com corrente alternada, sendo a mais indicada para encontrar descontinuidades subsuperficiais; e corrente direta para placas mais finas.
- Ultrassom: excelente para detectar formato e tamanho de descontinuidades na solda. Porém juntas soldadas de determinados materiais, como aço inox austenítico e ligas de níquel com espessuras maiores que 10mm são problemáticas para o teste por ultrassom. Esses problemas ocorrem devido a anisotropia acústica desses materiais. Melhoras no teste de ultrassom são desenvolvidas modificando as ondas de ultrassom para ondas longitudinais, minimizando problemas como o relatado acima. No teste por ultrassom convencional, somente a amplitude do sinal refletido é estudado. Já no caso de soldas de metais austeníticos não se pode depender unicamente ou até mensurar a amplitude do sinal devido ao fraco sinal emitido, e por isso, parâmetros como frequência do espectro, podem fornecer informações mais seguras. Um desenvolvimento desse teste é a técnica de *Time of Flight Diffraction*(TOFD), que possui resultados mais confiáveis que do ultrassom convencional. Para sua aplicação são colocados dois sensores, um de cada lado da região testada. Em um dos lados é emitido uma onda, que é recebida pelo sensor do lado oposto. Quando existe alguma descontinuidade, como uma trinca por exemplo, há uma difração da onda de ultrassom. Conseguem-se por meio de aplicação de trigonometria, calcular a profundidade da trinca.

- Radiografia: um dos ensaios não destrutivos vastamente utilizados para detectar descontinuidades internas nas peças soldadas, como porosidades por exemplo. É utilizado também para detectar mudanças na composição do material e localização de partes, escondidos por conta da montagem da estrutura, indesejadas. Com o exame radiográfico consegue-se ver a natureza da descontinuidade e medir seu comprimento efetivo. Descontinuidades como porosidade, baixa penetração, inclusões, entre outros são facilmente detectadas pela radiografia. A detecção de trincas pelo teste radiográfico é influenciada pela posição e dimensão dessa trinca, o ângulo de incidência desse raio-X, distância entre o filme e a trinca e a sensibilidade do filme. A radiografia está sendo largamente utilizada para inspeção de diversas variedades de juntas soldadas e montagens de componentes em diversos tipos de indústria. A utilização de alta resolução possibilita uma melhor definição de descontinuidades e a detecção de pequenas descontinuidades em chapas muito finas e de geometria complexa.

Pode-se concluir que os ensaios não destrutivos têm um papel muito importante na indústria atual, principalmente na área da soldagem, reduzindo custos operacionais e detectando falhas internas e externas entre e após os processos de soldagem [16].

2.3 – Tensões Residuais

Cada vez mais os projetos de estruturas e componentes na engenharia estão menos conservativos, afim de se reduzir os custos de projeto. Neste contexto, há um interesse crescente na caracterização da natureza e magnitude das tensões residuais, combinadas com as tensões aplicadas, afim de avaliar a possível geração de falhas estruturais [17].

Tensões residuais (TR) são as tensões que permanecem no material, mesmo após todas as solicitações externas ou gradiente térmico terem sido retirados. Sua principal causa é a deformação não uniforme ao longo de uma seção. A soma das tensões residuais está em equilíbrio, ou seja, a resultante é nula. Contudo, quando há desequilíbrio nesse sistema, causado pelo processamento do material, essas tensões serão redistribuídas, até que se encontre novamente o estado em que somatório de forças seja nulo [17, 18].

A classificação mais comum dos tipos de tensões residuais existentes está definida na literatura como:

- Tipo I: As tensões residuais do Tipo I, ou macroscópicas, são tensões que se estendem por grandes porções volumétricas se compararmos ao tamanho de grão do material, sendo as deformações homogêneas e auto equilibrantes. As dimensões do material podem ser alteradas devido a forças e momentos, ligados a tensão residual, que não estejam em equilíbrio. Pode ocorrer em materiais que sofreram deformações não uniformes, como por exemplo em processos de laminação e têmpera de aços.
- Tipo II: São tensões residuais microscópicas, que se distribuem uniformemente ao longo ou em boa parte de um grão. Ocorre na interface entre fases e partículas precipitadas e a matriz. O equilíbrio ocorre pelas forças de interação existente entre vários grãos.
- Tipo III: São micro tensões localizadas ou tensões submicroscópicas, que se expandem nas dimensões interatômicas dentro de uma porção de um grão. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina, tais como, vazios, impurezas e falhas de empilhamento, entre outros.

A superposição das tensões residuais dos tipos I, II e III, conforme demonstrado na Figura 4, determina o estado total de tensões residuais em um ponto particular do material [19,20].

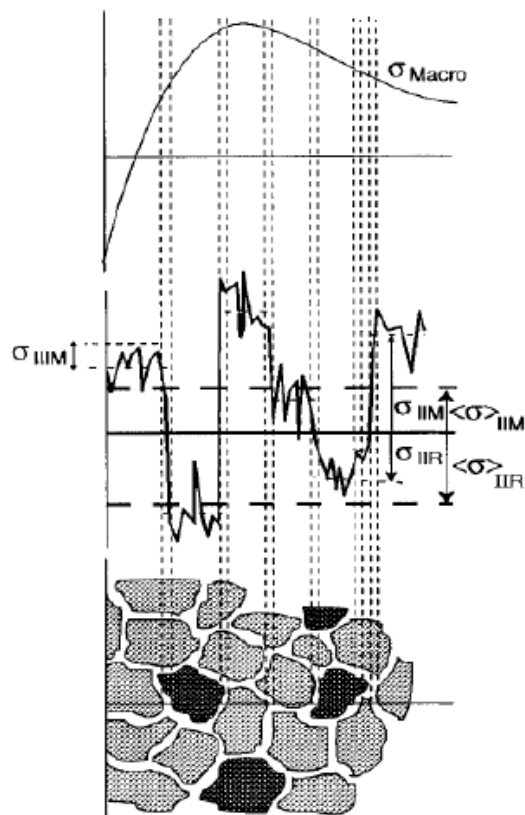


Figura 4: Superposição das tensões residuais dos tipos I, II e III [19]

2.3.1 – Tensões Residuais em Soldagem

As operações de soldagem, em geral, envolvem intenso aquecimento localizado nos materiais. Essas regiões termicamente afetadas sofrem dilatações, que são dificultadas pelo seu entorno, que sofre menor aquecimento, gerando eventuais deformações. Após o resfriamento da peça, tensões internas e distorções se desenvolvem nessa junta. Essas tensões podem, então, afetar o desempenho das estruturas [18].

Os parâmetros estruturais, como a geometria e o tipo de junta; dos materiais, como propriedades físicas e mecânicas; além dos parâmetros do processo de soldagem, como corrente e voltagem, estão diretamente ligados a distribuição das tensões residuais. Essas tensões influenciam as deformações causadas pela solda, além de trincas, resistência à fadiga e fraturas do material [21].

Os efeitos das tensões residuais podem ser benéficos ou não, dependendo da natureza (trativa ou compressiva), magnitude e distribuição das mesmas. Tensões residuais trativas são prejudiciais pois reduzem a resistência do material à forças externas trativas aplicadas. Mas tensões residuais compressivas, ao contrário, podem ser utilizadas para benefício do material, desenvolvendo projetos de materiais e componentes resistentes a danos por fadiga, por exemplo [19]. A Figura 5 mostra a distribuição das TR que ocorrem em juntas soldadas por processos convencionais a arco.

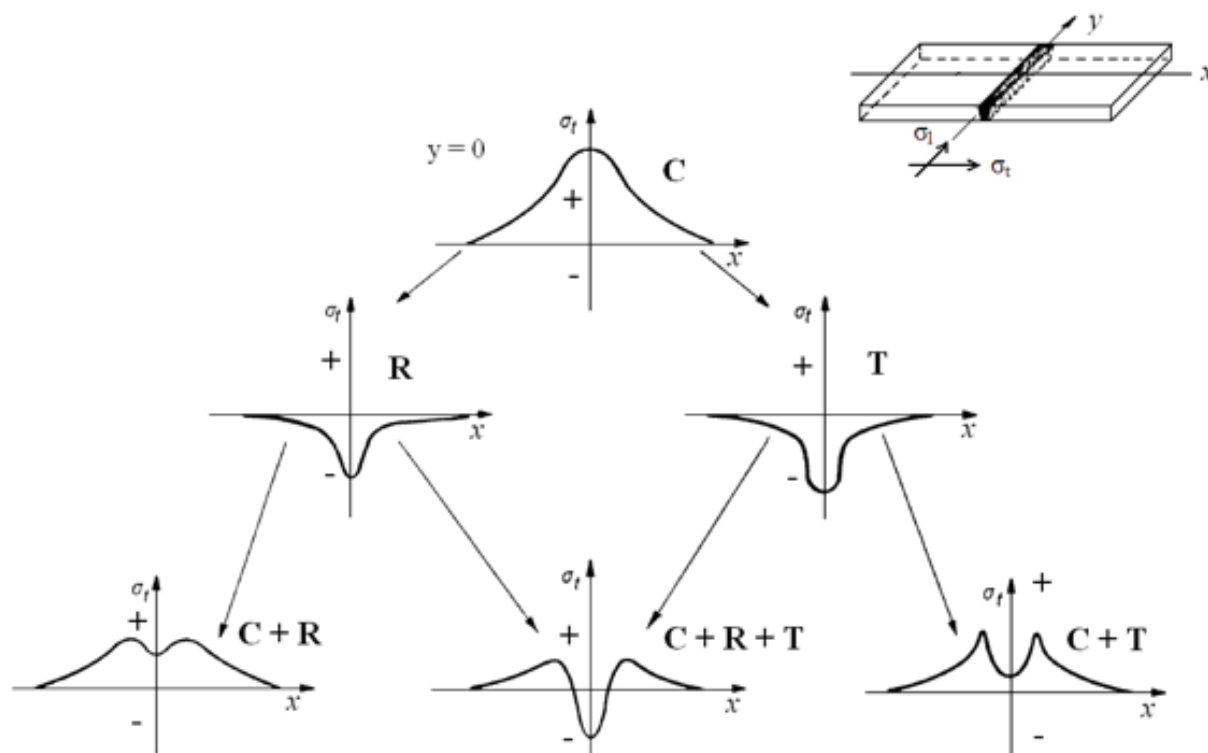


Figura 5: Distribuição das tensões residuais em juntas de topo de processo a arco convencional: (C) contração, (R) Resfriamento superficial mais intenso e (T) Transformação de fase[19]

Como pode ser observado na Figura 5, a região central da junta soldada pode estar sujeita a tensões residuais de tração, resultantes da contração do material, cujo valor máximo pode ser próximo ao limite de escoamento do material. Essas tensões residuais tendem a reduzir de intensidade em regiões mais afastadas da junta soldada[18].

2.3.2 – Tensões Residuais na Soldagem do Aço ASTM A-36

Turibus, *et al* (2010) [22] realizou um trabalho que consistia em medir as tensões residuais, por difração de Raios-X, em uma junta soldada de aço ASTM A36 pelo processo *Metal Inert Gas (MIG)*. Os parâmetros utilizados no processo foram velocidade de soldagem de 370 mm/min e velocidade de alimentação do arame de 350 pol/min.

Os resultados obtidos pelos autores podem ser observados na Figura 6 onde verifica-se que as distribuições das tensões longitudinais e transversais são similares. Essas distribuições foram caracterizadas pela presença de tensões trativas no cordão de solda e tensões compressivas na ZTA e na região do metal de base. Contudo, nota-se que as tensões residuais são significativamente maiores no metal de solda na direção longitudinal (Figura 6a) [22].

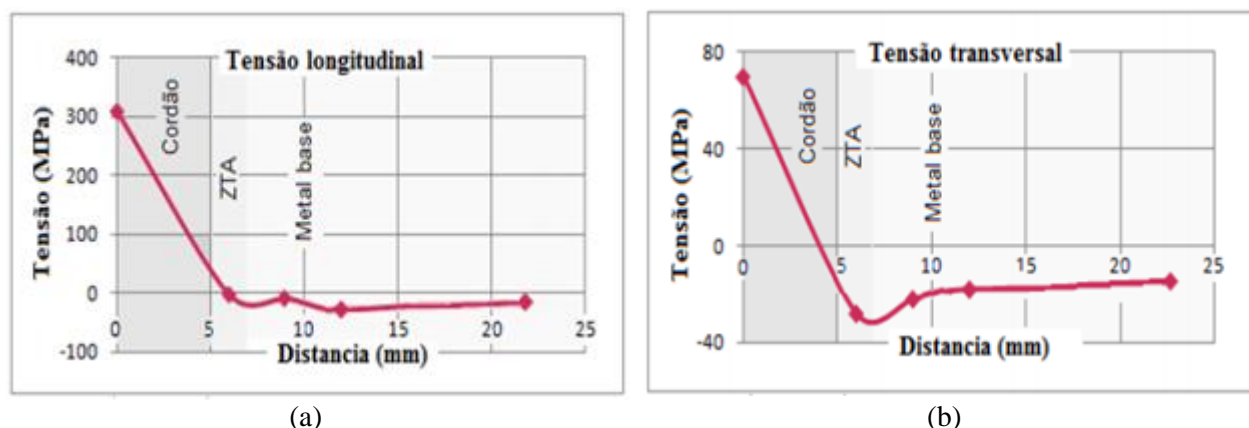


Figura 6: Distribuição das tensões residuais (a) longitudinal e (b) transversal na superfície de uma junta soldada de aço ASTM A36 [22]

Neste mesmo trabalho foram realizadas medidas de TR em profundidade e, na figura 7a, pode-se verificar que a tensão residual na direção longitudinal pouco se modifica com a profundidade, mantendo-se trativa, com o valor na faixa de 300MPa a 450MPa. Entretanto, na figura 7b, na qual se tem os valores para a direção transversal, percebe-se que a tensão residual se modifica de trativa, mais próxima à superfície da amostra, com valor de 80MPa, para compressiva no interior da peça, com valor de -40MPa [22].

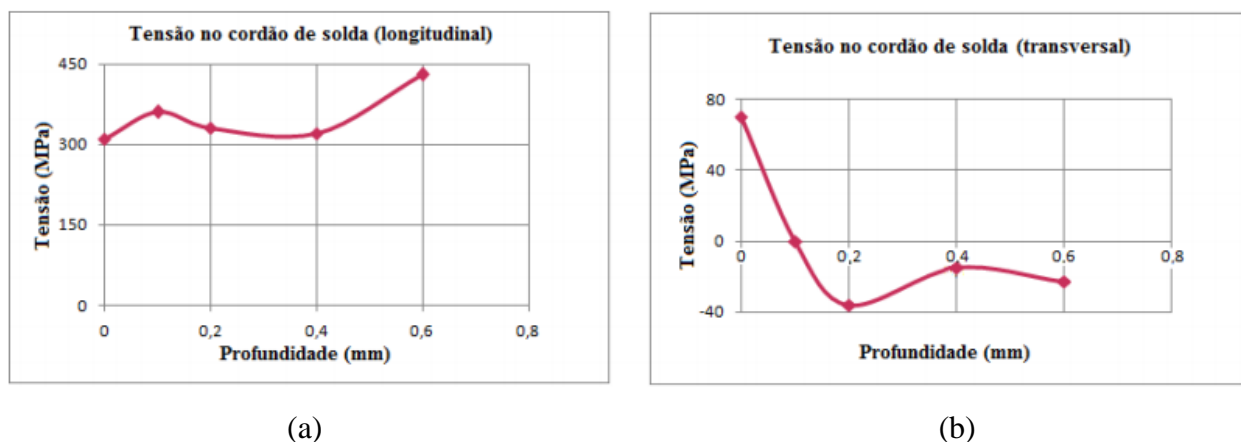


Figura 7: Distribuição das tensões longitudinal e transversal no interior de uma junta soldada de aço ASTM A-36[22]

Neto, *et al* (2011) [23] realizou um trabalho, cujo objetivo é avaliar tensões residuais de amostras via método de dureza Brinell. A comparação dos valores obtido por indentação de amostras que não sofreram soldagem, somente processos de fabricação de chapas, e de juntas que foram soldadas por eletrodo revestido permitiu classificar se as tensões residuais seriam tratativas ou compressivas. O eletrodo revestido utilizado foi o E6013, com diâmetro de 2,5mm e a corrente utilizada foi de 85A.

O método de indentação utilizado foi o Brinell (HB), com uma carga de 62,5 kgf para puncionar uma esfera de aço de 2,5mm de diâmetro sobre a peça a ser analisada, parâmetros normalizados pela ASTM, norma E10.

O conceito desse método é de que se existe tensão residual compressiva na superfície da peça, o indentador encontrará maior dificuldade de penetrar a amostra, indicando uma maior dureza da peça comparada com uma amostra livre de tensões residuais. Portanto haverá uma superposição de tensões residuais na peça, resultado das diferentes fases da fabricação. O resultado final, em termos de tensões residuais, tanto pode aumentar a resistência da amostra quanto reduzi-la, ou até mesmo não produzir efeito significativo.

Baseado nas análises das diferentes posições de medidas nas amostras soldadas por eletrodo revestido chegaram à conclusão de que a tensão residual aumenta das bordas para o centro, conforme mostrado na Figura 8. Contudo, os valores obtidos indicam que não há diferença nas posições simétricas, posições 1 e 8, 2 e 7, 3 e 6, 4 e 5, sendo as regiões 4 e 5 mais próximas a zona termicamente afetada, sofrendo mais influência em termos de tensão residual.

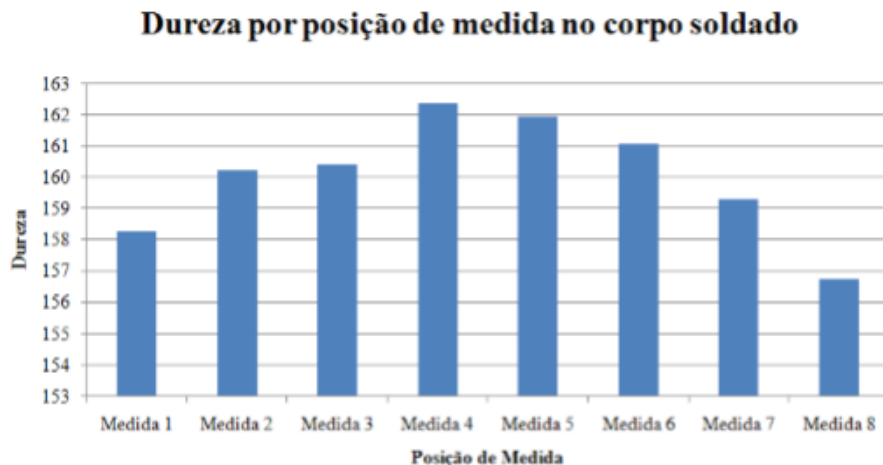


Figura 8: Distribuição de dureza na amostra soldada [23]

Pode-se concluir que a soldagem introduziu tensões residuais no corpo, de natureza compressiva, conforme provado pelos dados coletados nos ensaios de indentação, o que beneficia a peça, evitando propagação de trincas por exemplo. Essa tensão residual aumentou de intensidade das bordas em direção ao centro.

2.3.3 – Medição das Tensões Residuais

Existem diversos métodos para medição das tensões residuais, podendo ser divididos em dois grupos: métodos destrutivos e métodos não-destrutivos. Nos métodos destrutivos, ocorre a destruição parcial ou total da peça, nos quais os dados colhidos serão utilizados para medir as tensões presentes na peça. Enquanto que os métodos não-destrutivos permitem manter a forma e dimensões originais da estrutura, sem impedir as medições durante todo o processo [17].

Entre os métodos destrutivos mais comuns pode-se citar: método do furo cego, método do anel e método do contorno. E os principais métodos não-destrutivos são: método da difração de raios-X, método da difração de nêutrons, método de ultrassom e método magnético. A Figura 9 apresenta as vantagens e restrições dos principais métodos de medição de TR utilizados atualmente. O uso dessas técnicas pode ser benéfico, pois o conhecimento das origens,

distribuição e magnitude das tensões possibilita fazer estimativas sobre resistência das estruturas projetadas [17,24, 25].

Descrição	Furo Cego	Raios X	Difração de Nêutrons	Ultrassom	Magnético
Hipóteses Básicas	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Padrão material policristalino, de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e receptor	Material ferromagnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica; Microscópica	Macroscópica; Microscópica Submicroscópica	Macroscópica Microscópica Submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Variação da velocidade da onda ultrasônica	Amplitude do ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Área de análise mínima (padrão)	0,5 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ²	0,1 mm ² alta frequência e 30 mm ² no método convencional	1 mm ² com Barkhausen e 100 mm ² com permeabilidade magnética
Minima profundidade de análise	20 μm	Dezenas de micrômetros	1 mm	15 μm a 300 μm	100 μm

Figura 9: Métodos de medição de tensões residuais [26]

2.3.4 – Método de Difração por Raios-X

O método de difração por raios-X, ou tensometria por difração de raios-X, é uma técnica de medição de tensões residuais não destrutiva. Tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-X (Figura 10). O princípio de funcionamento pode ser explicado de forma simples pela incidência de um feixe monocromático de raios-X, que incide sobre um material sólido, e então ocorre o espalhamento, ou difração, desse feixe pelos átomos que compõe o material.

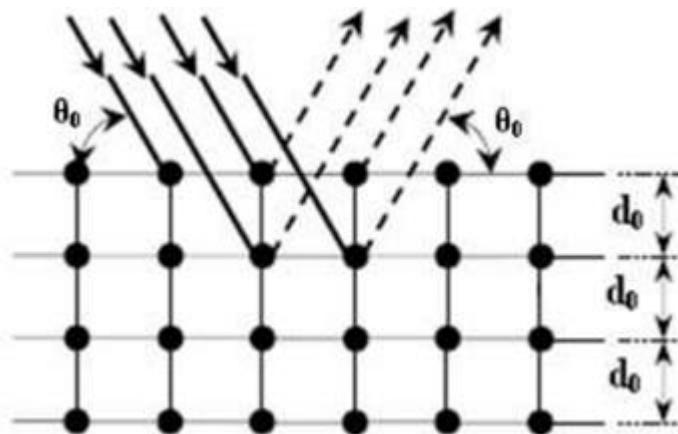


Figura 10: Difração de raios-X [19].

Nesta técnica, quando as distâncias entre os planos são bem definidas, pode-se determinar o valor das tensões aplicadas e residuais do material, por intermédio da - Equação 1: Lei de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Onde:

n = números inteiros

λ = comprimento de onda

d = distância interplanar

θ = ângulo entre o feixe incidente e o plano refrator.

A variação das distâncias interplanares implica na mudança do ângulo de difração, sabendo que o comprimento de onda é constante, já que estamos utilizando um feixe monocromático. Pode-se perceber então, que quanto maior o ângulo de difração, maior será a precisão de medida. Diferenciando a Equação 1, podemos obter, baseado na teoria de difração de raios-X em materiais cristalinos, a Equação2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = - \cot \theta \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

Pela Lei de Hooke, a teoria da elasticidade dos materiais sólidos tem as seguintes relações entre tensões e deformações para estado triaxial, nas Equação 3, Equação3, Equação 4:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (5)$$

Onde,

ε = deformações principais

σ = tensões principais

E= módulo de elasticidade do material

ν = coeficiente de Poisson

A Figura11, mostra o modelo do estado plano de tensões e para a adequação ao estado real, usa-se as coordenadas polares.

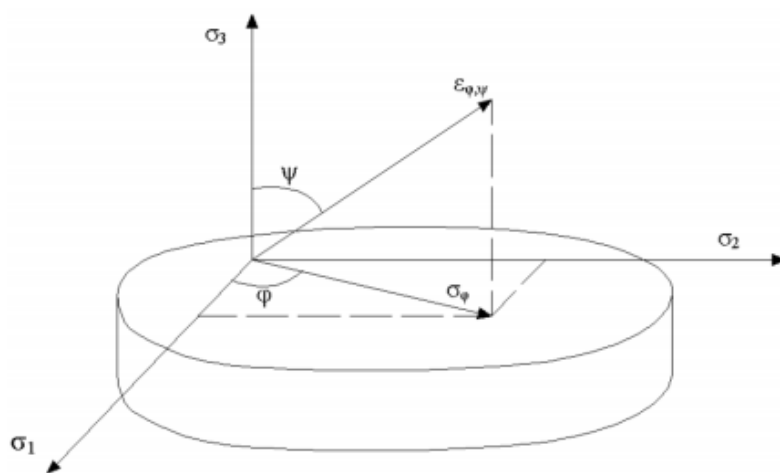


Figura 11: Distribuição tridimensional da tensão residual [25]

Observando a figura acima, pode-se perceber que a tensão na direção perpendicular à superfície (σ_3) é nula por ser uma medição superficial. Então, a equação da deformação pode ser escrita pela Equação 5:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

A tensão (σ_{φ}) pode ser determinada pela Equação 6:

$$\sigma_{\psi} = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{\cot \theta_0 (\theta_{\varphi,\psi,2} - \theta_{\varphi,\psi,1})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad (7)$$

Os ângulos de reflexão do plano cristalino (φ_1 e φ_2) são muito importantes, pois sem eles não é possível determinar as componentes da tensão. Pode-se visualizar na Figura 12 o que se tem demonstrado pela Equação (7). A tensão residual existente no material é diretamente proporcional à derivada de 2θ , em função de $\sin^2\psi$.

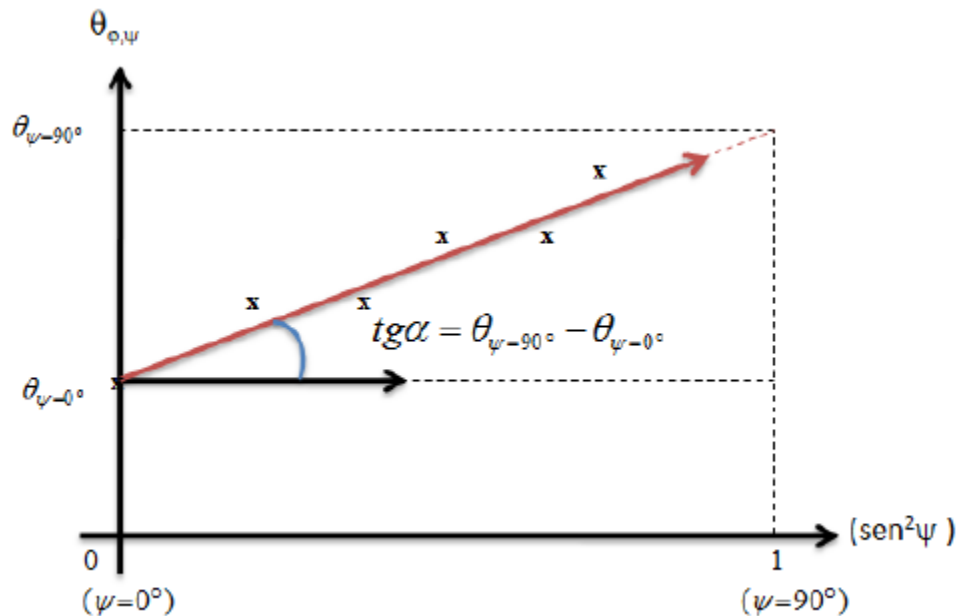


Figura 12: Relação θ_{φ} versus $\sin^2\psi$ [22]

O cálculo final da tensão pode ser obtido pela Equação 7:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)} \cot \theta_0 \cdot K \{ (L_{50} - L_0) - \Delta L_{calib} \} \quad (8)$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do material;

ν : Coeficiente de Poisson;

θ_0 : Valor do ângulo de Bragg para o material sem tensão residual;

K: Fator de escala do equipamento;

L_{50} e L_0 : Distância entre as intensidades máximas dos feixes difratados em relação à linha de referência;

ΔL_{calib} : diferença entre L_{50} e L_0 para os feixes difratados pelo material de calibração (sem tensões residuais) [19, 25].

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Materiais

O material de base utilizado neste projeto foi o aço ASTM A36, fornecido pela TENAX Aços Especiais em forma de chapa, laminado e de 4,8mm de espessura, com dimensões iniciais de 400 x 1000mm. A composição química e as propriedades mecânicas, fornecidas pelo fabricante, podem ser observadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Composição Química do aço ASTM A36

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Nb	Al	Cu	Ti
0,11	0,87	0,02	0,017	0,01	0,02	0,01	0,02	0,002	0,042	0,01	0,001

Tabela 2: Propriedades mecânicas d aço ASTM A36

	$\sigma_{L,R}$ (MPa)	$\sigma_{L,E}$ (MPa)
Norma ASTM A36	400-550	≥ 250
Fabricante	446	301

3.2 – Métodos

3.2.1 – Corte

O corte dos corpos de prova foi feito em dois processos, inicialmente pelo processo de conformação mecânica a frio (guilhotina) e, posteriormente, pelo processo de usinagem (serra de fita).

Na primeira etapa de corte utilizou-se uma guilhotina do CEFET-RJ, obtendo 8 (oito) chapas de dimensões de 200 x 250mm. O segundo processo de corte foi realizado com uma serra de fita. Cada uma das 8 (oito) amostras foi usinada, resultando em 16 (dezesesseis) peças de dimensões 200 x 125mm. Devido ao intenso aquecimento causado pela usinagem, utilizou-se um fluido refrigerante para minimizar esse efeito, que poderia resultar em uma zona termicamente afetada. As dimensões da chapa inicial e da chapa final, além do layout de corte pode ser visto na Figura 13.

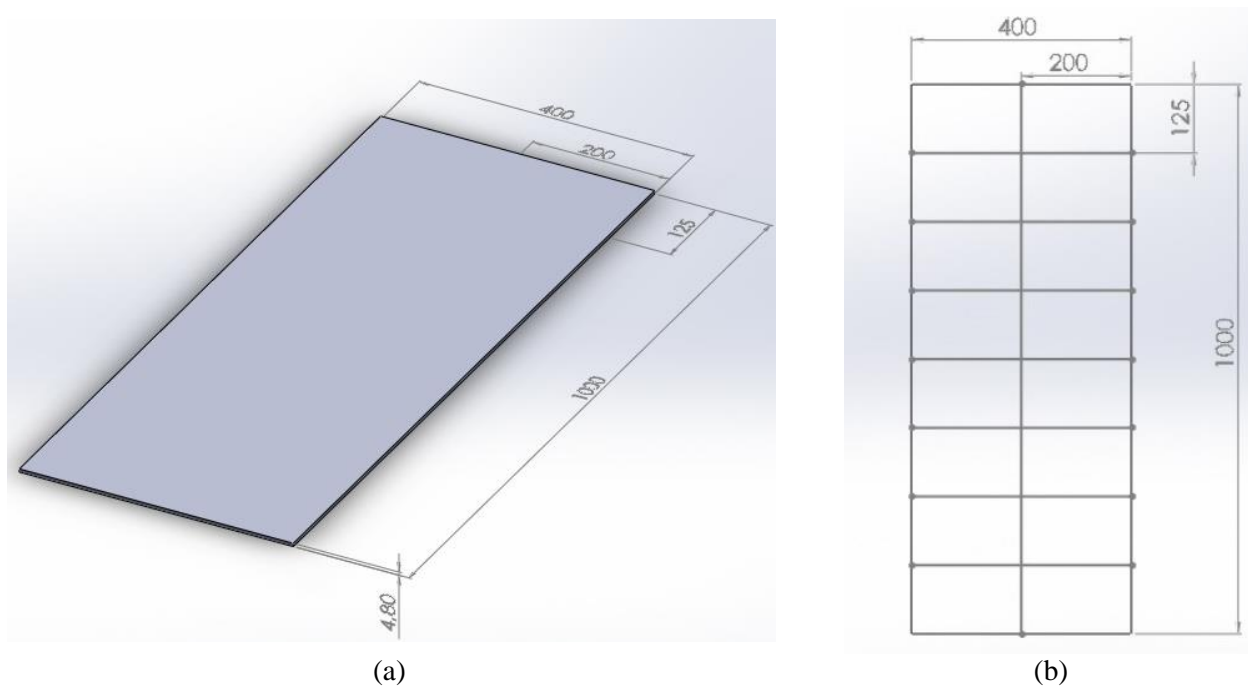


Figura 13: Chapa de aço ASTM A36: (a) dimensões da chapa inicial; (b) esquema de corte da chapa inicial (unidades em mm).

3.2.2 – Soldagem

O processo de soldagem por eletrodo revestido foi empregado neste trabalho para a obtenção das amostras. Sendo o objetivo desse projeto estudar a influência do tipo de eletrodo nas tensões residuais e na qualidade superficial de juntas soldadas foram utilizados 3 tipos de eletrodo: E7018 (eletrodo básico, juntas 1 e 2), E6013 (eletrodo rutílico, juntas 3 e 4), e E6010 (eletrodo celulósico, juntas 5 e 6), cujas composições químicas, conforme fornecidos pelo

fabricante, são mostradas na Tabela 3. Os parâmetros de soldagem utilizados são apresentados na Tabela 4. A Figura 14 mostra um esquema das juntas de topo obtidas na soldagem.

Tabela 3: Composições químicas dos eletrodos E6010, E6013 e E7018

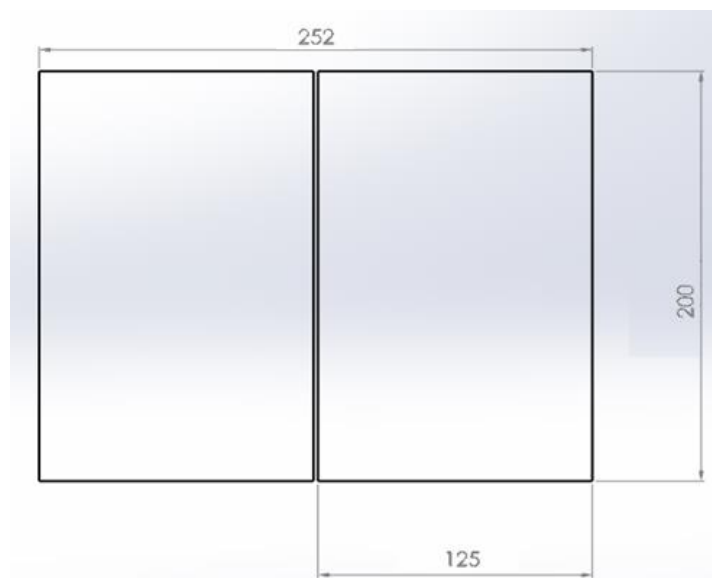
Análise Química (%)									
Eletrodo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
E6010	0,048	0,12	0,22	0,012	0,008	0,022	0,02	0,005	0,016
E6013	0,064	0,23	0,37	0,015	0,009	0,016	0,028	0,003	0,014
E7018	0,064	0,28	1,21	0,017	0,01	0,084	0,027	0,01	0,004

Tabela 4: Parâmetros de soldagem

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Diâmetro do Eletrodo (mm)	Polaridade
100	22 a 26	2,70 a 3,77	3,25	CC+



(a)



(b)

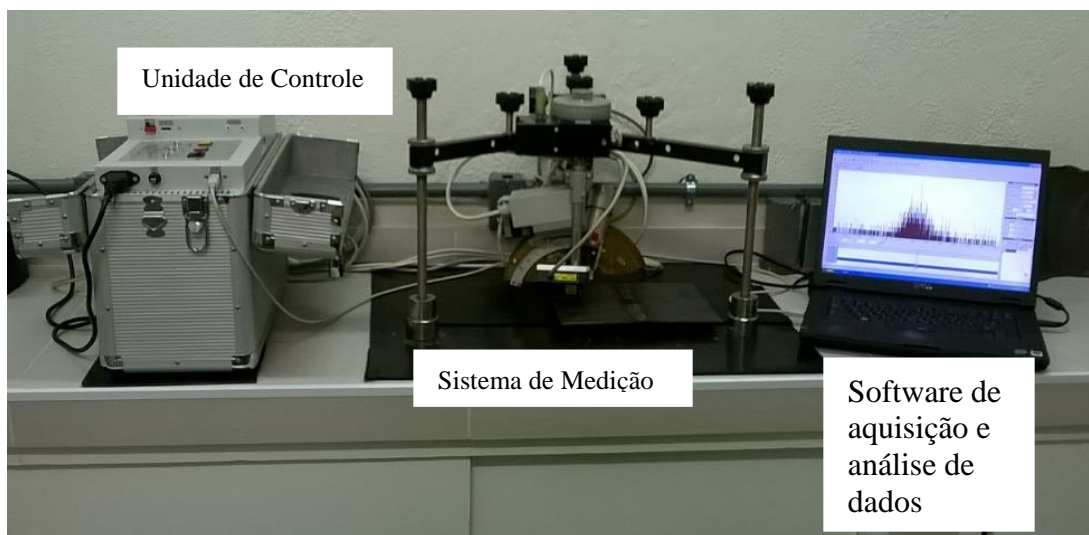
Figura 14: Desenho esquemático da junta soldada: (a) vista frontal, (b) vista superior

Ao total foram utilizadas 12 amostras de aço ASTM A36 para obtenção de 6 juntas soldadas, sendo 2 juntas para cada eletrodo. Para o cálculo do aporte térmico foi considerado que a eficiência do processo por eletrodo revestido é de aproximadamente 70% [27].

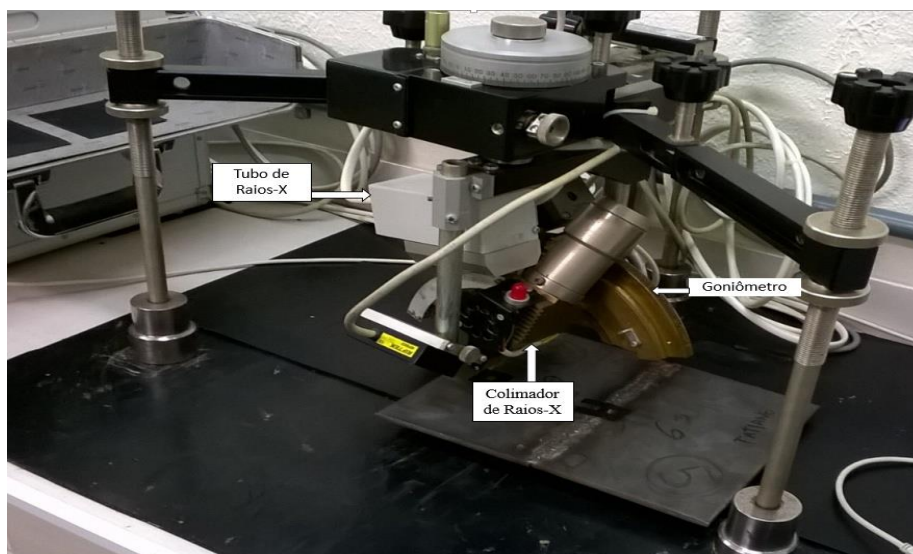
3.3 – Análise das tensões residuais

As tensões residuais superficiais foram medidas e analisadas nas direções transversal e longitudinal ao cordão de solda das amostras no Laboratório de Análise de Tensões (LAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense - UFF.

Foi utilizada a técnica de tensometria por difração de raios-X para a medição das tensões residuais pelo método $\text{sen}^2\psi$, utilizando radiação $\text{CrK}\alpha$, com comprimento de onda $\lambda_{\text{CrK}\alpha} = 2,2809\text{\AA}$ difratando o plano cristalográfico (211) da ferrita. O equipamento utilizado para análise de tensões pode ser visto na Figura 15.



(a)



(b)

Figura 15: Analisador de tensões por raios-X: (a) equipamento completo; (b) sistema medidor

As amostras foram medidas em ambos os lados da chapa, topo e raiz, nas direções transversal (T) e longitudinal (L) ao cordão de solda em três regiões distintas: metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). A Figura 16 detalha os pontos medidos nas amostras.

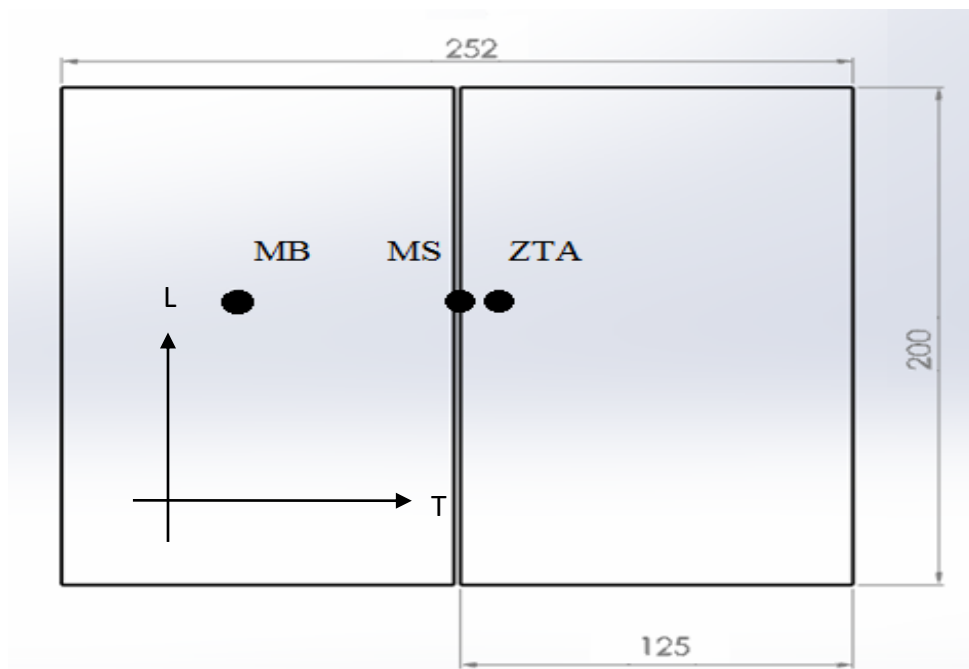


Figura 16: Pontos de medição dos perfis longitudinal (L) e transversal (T)

3.4 – Ensaios de Inspeção Visual

Posteriormente a análise de tensões residuais foi realizado o ensaio de inspeção visual nas amostras, com intuito de verificar quaisquer não conformidades nas juntas soldadas. Para fins de resultado serão selecionadas regiões das juntas que apresentam defeitos, realizando um comparativo entre a qualidade das juntas fabricadas com os diferentes eletrodos. O ensaio de inspeção visual consiste em observar defeitos e descontinuidades superficiais da junta soldada, avaliando suas dimensões e posicionamento na amostra.

3.5 – Macrografia

As macrografias das juntas soldadas foram realizadas no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ. Para tal foram selecionadas 3 juntas soldadas, uma para cada tipo de eletrodo utilizado, das quais foram retiradas amostras para análise da extensão das regiões do metal de solda e das zonas termicamente afetadas.

O processo de preparo da amostra para análise consiste em embutir as amostras em uma base de baquelite, e posteriormente lixar as amostras com lixas de granulação variada, até 1200. Posteriormente, a superfície polida foi atacada por um reagente, Nital 2%. Finalmente, as amostras foram analisadas no microscópio óptico Olympus UC50, utilizando a lente com aumento de 12,5 vezes, com intuito de verificar a extensão da ZTA.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Cálculo do aporte térmico

A energia de soldagem (H), que pode ser definida como sendo a energia fornecida à junta, pela fonte de calor, por unidade de comprimento, é útil na avaliação dos efeitos metalúrgicos da operação de soldagem, e na avaliação de tensões residuais. Também chamada de aporte térmico (ou *heat input*) é um parâmetro que pode ser definido como apresenta a Equação 8 mostrada abaixo[27].

$$H = \eta \frac{VI}{v} \quad (9)$$

Onde, H é a energia de soldagem, em J/mm; V é a tensão de soldagem (V); I é a corrente de soldagem (A); v é a velocidade de soldagem (mm/s) e η é um fator adimensional de rendimento, que no caso da soldagem por eletrodo revestido varia entre 0,65 até 0,85 [27].

Considerando que houve pouca variação da voltagem entre os processos de soldagem das 6 amostras, como mostra a Tabela 5, pode-se afirmar que houve manutenção do comprimento de arco, ou “*stick-out*”. A velocidade de soldagem das amostras também foi similar, havendo pouca variação entre as juntas, exceto a amostra 5. O aporte térmico (H) foi calculado para todas as juntas. Justifica-se o tempo menor de soldagem para a amostra 1 pelo fato de ter sido feito o ajuste da corrente de soldagem, resultando em um cordão de solda de menor dimensão. Já a amostra 5 teve um tempo menor de soldagem devido a velocidade aplicada pelo soldador. Os resultados de aporte térmico podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem

Junta	Tipo eletrodo	Δt (s)	v (mm/s)	V (V)	H(kJ/mm)
1	E7018	54	2,96	24	0,57
2	E7018	74	2,70	22	0,57
3	E6013	70	2,86	24	0,59
4	E6013	71	2,82	26	0,65
5	E6010	53	3,77	24	0,45
6	E6010	62	3,23	22	0,48

4.2 – Qualidade Superficial das Juntas Soldadas

Primeiramente, é preciso expor que todas as juntas apresentaram defeitos. Entretanto, para cada condição foi analisada a região da amostra mais crítica, com relação aos tipos e quantidade de defeitos. A Figura 17 apresenta o topo das amostras soldadas pelos três eletrodos: E6010, E6013 e E7018.

Com relação as juntas soldadas com eletrodo básico (E7018) foi inspecionada a amostra 2, que pode ser verificada na figura 17 (a) acima. Foi medido a largura do cordão de solda, que possui dimensão de 9,0 mm, a altura do reforço do cordão, que é de 5,0mm. Pode ser observado na Figura 17(a) que o processo de soldagem gerou poucos respingos, característica desse tipo de eletrodo, e algumas mordeduras.

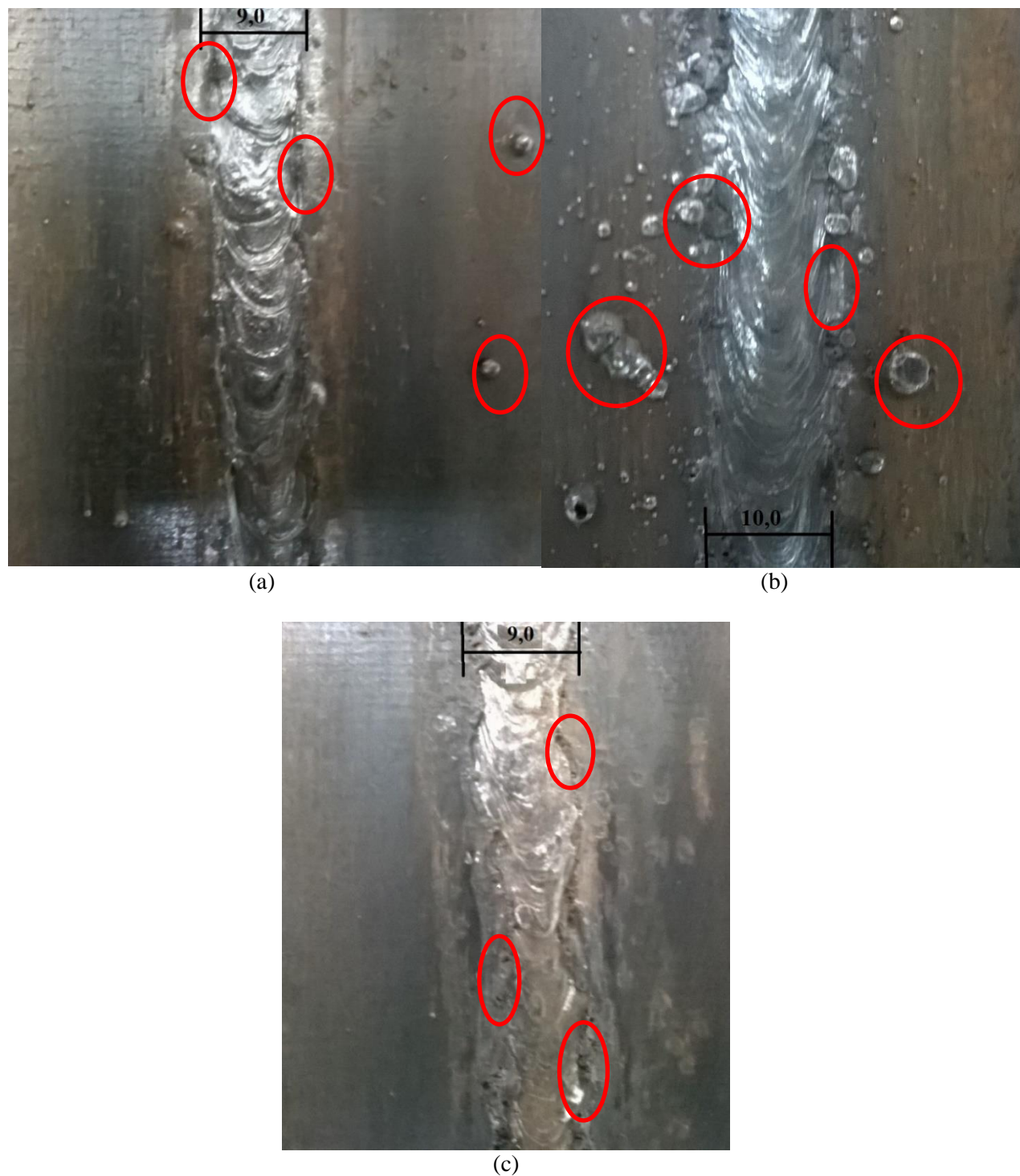


Figura 17: Topo da junta soldada com eletrodo (a) E7018, (b) E6013 e (c) E6010.

Na inspeção do topo da junta 4, soldada com eletrodo rutílico (E6013), que pode ser vista na Figura 17(b), foi medido 10mm de largura do cordão e 5,5mm, em média, de altura do reforço. Pode ser verificado na Figura 17(b) que foi gerada uma maior quantidade de respingos

com esse eletrodo, em relação ao E7018. Pode-se observar também que o processo gerou alguns defeitos, como inclusão de escória.

Inspecionando a amostra 5, soldada com eletrodo celulósico E6010, que pode ser observada na Figura 17(c), foi medido a espessura do cordão de solda, de dimensão 9mm e a altura do reforço do cordão, que é 6,2mm. Pode ser verificado na Figura 17 (c) que foi gerado pouco respingo, porém houve o aparecimento de porosidade, além de algumas concavidades e inclusão de escória.

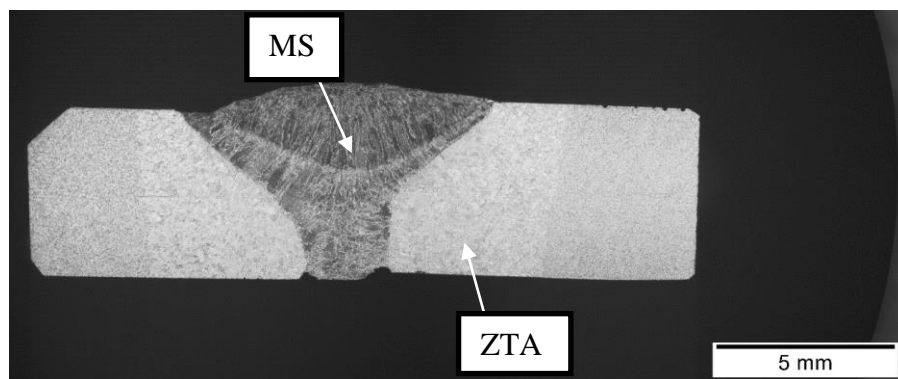
Contrário à literatura [8, 15], o eletrodo E6013 resultou em juntas com muitos respingos, comparado ao E6010. Isso pode ser explicado pela baixa energia de soldagem gerada no processo de soldagem com o eletrodo E6010, em relação aos outros eletrodos revestidos.

4.3 – Macrografia

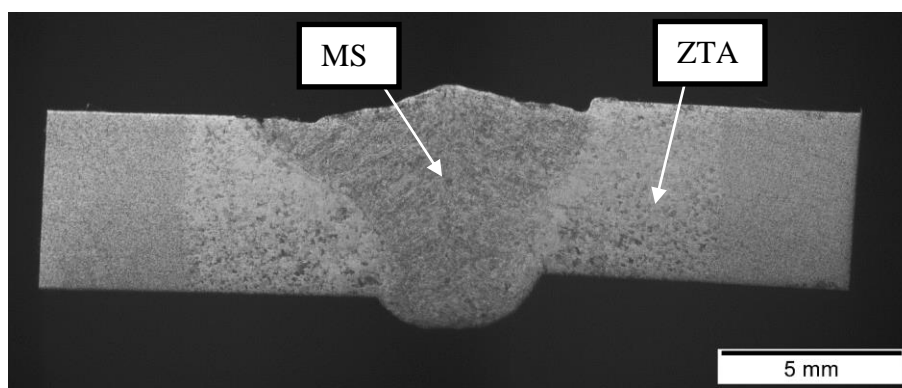
Para verificar com maiores detalhes a profundidade de penetração, os defeitos e a extensão das zonas termicamente afetadas de cada junta soldada foram feitas análises macrográficas.

Analisando a Figura 18 é possível observar que a junta soldada com eletrodo celulósico [Figura 18(c)] apresentou uma falta de penetração muito grande que, como relatado anteriormente, pode ser decorrente da maior velocidade de soldagem empregada pelo soldador. Consequentemente, sendo os aportes térmicos muito semelhantes, as juntas soldadas pelos eletrodos do tipo básico (E7018) e rutílico (E6013) apresentam uma extensão de ZTA bem semelhantes. Contudo, nota-se que as microestruturas são bem discrepantes, sendo necessário uma análise microestrutural para melhor detalhamento da microestrutura presente em cada região.

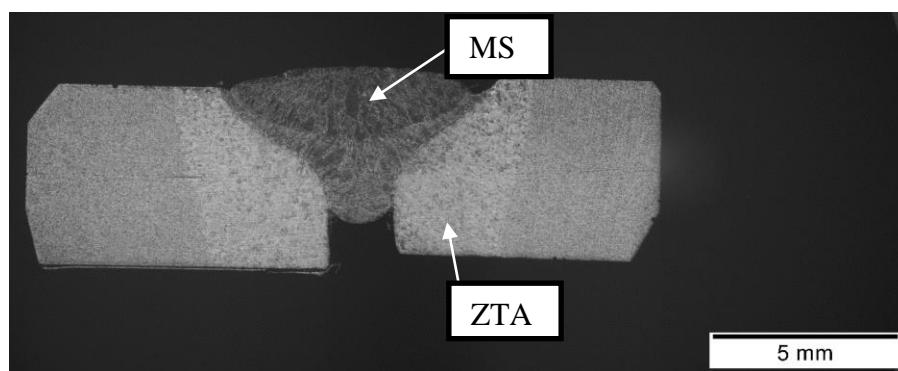
A presença de defeitos do tipo mordedura mostra que o aporte térmico pode ter sido mal dimensionado em relação a corrente e velocidade de soldagem ou, em último caso, houve uma má manipulação do eletrodo durante a execução das juntas.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: Macrografia (a) amostra 2 (E7018); (b) amostra 4 (E6013); e (c) amostra 5 (E6010)

4.2 – Análise de Tensões Residuais

As tensões residuais foram medidas inicialmente no metal de base (MB), sendo encontrado uma média, na direção transversal de -35 ± 5 MPa e na direção longitudinal de -60 ± 10 MPa. Esses resultados mostram a natureza compressiva das tensões residuais geradas no processo de fabricação da chapa de aço ASTM A36.

A soldagem SMAW foi realizada manualmente em passe único com chanfro reto. Após o processo de soldagem, as tensões residuais foram analisadas nas 6 amostras em duas regiões: metal de solda (MS) e zona termicamente afetada (ZTA), nas direções longitudinal (L) e transversal (T) ao cordão, sendo analisadas o topo e a raiz de cada junta soldada.

A Tabela 6 mostra os valores obtidos das tensões residuais no metal de solda (MS). As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados do ensaio na direção longitudinal no metal de solda.

Tabela 6: Tensões residuais no metal de solda

Eletrodo	Amostra	Tensões Residuais (MPa)			
		Topo		Raiz	
		L	T	L	T
E7018	1	73±24	-165±6	29±3	-60±3
	2	55±16	-52±9	101±15	-85±5
E6013	3	188±21	-208±19	-168±14	-48±3
	4	-20±6	-70±15	-173±23	-171±14
E6010	5	-89±9	75±31	224±6	128±10
	6	-286±33	-282±44	32±4	89±5

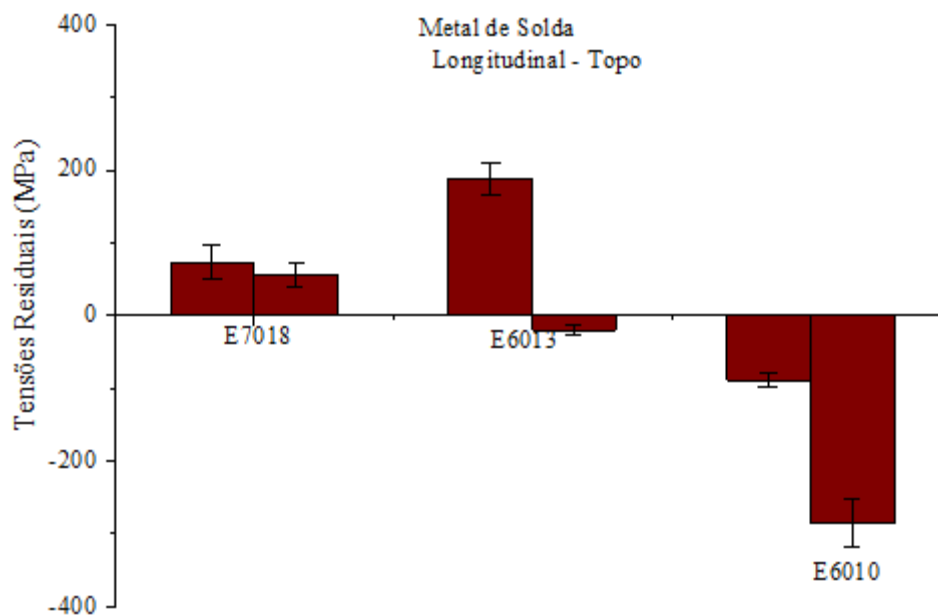


Figura 19: Tensões residuais na MS Longitudinal - Topo

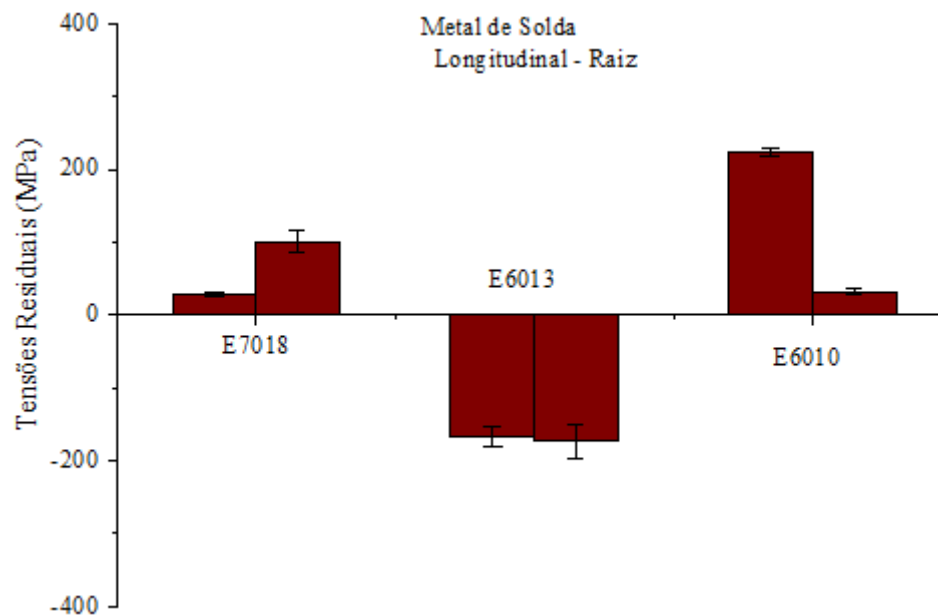


Figura 20: Tensões residuais no MS Longitudinal – Raiz

Analisando os resultados obtidos no MS observa-se que as juntas soldadas com eletrodo E7018 (juntas 1 e 2) possuem comportamento trativo na direção longitudinal tanto no topo como

na raiz da junta, com valores médios de 64MPa e 65MPa, respectivamente. Por outro lado, as juntas 5 e 6 (soldadas com eletrodo E6010) apresentam comportamento trativo na raiz, com maior valor médio de tensão (da ordem de 110MPa) que as amostras anteriores, porém apresentam comportamento compressivo no topo. Nas amostras 3 e 4, soldadas com eletrodo E6013, foi verificado que na raiz, as duas amostras tiveram comportamento compressivo, com valores médios de -110MPa, porém no topo houve uma divergência de comportamento, sendo trativo na amostra 3 e compressivo na amostra 4, o que poderia ser resultado de alguma heterogeneidade metalúrgica. As Figuras 21 e 22 mostram as tensões residuais no metal de solda na direção na transversal das juntas soldadas.

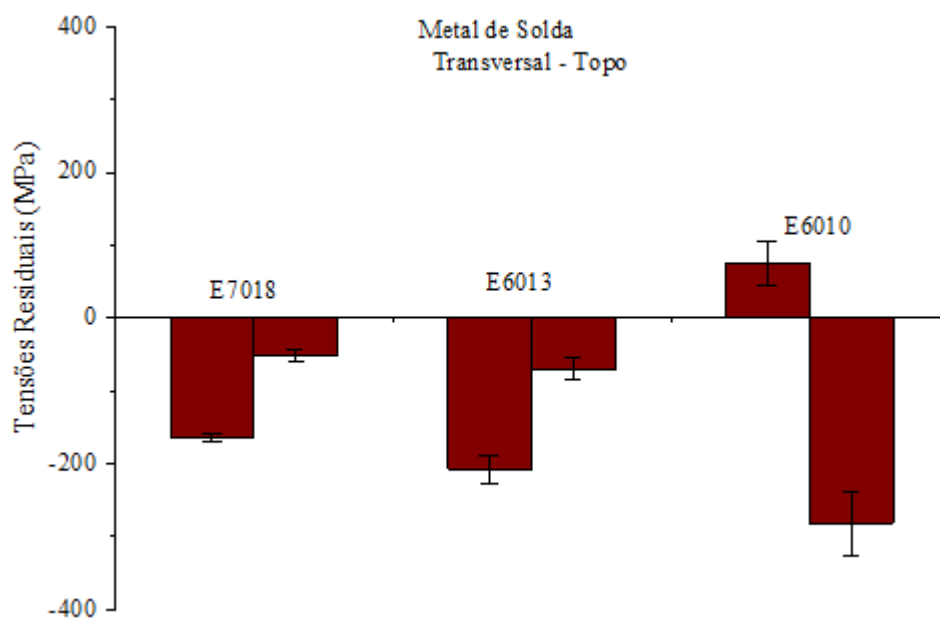


Figura 21: Tensões residuais no MS Transversal - Topo

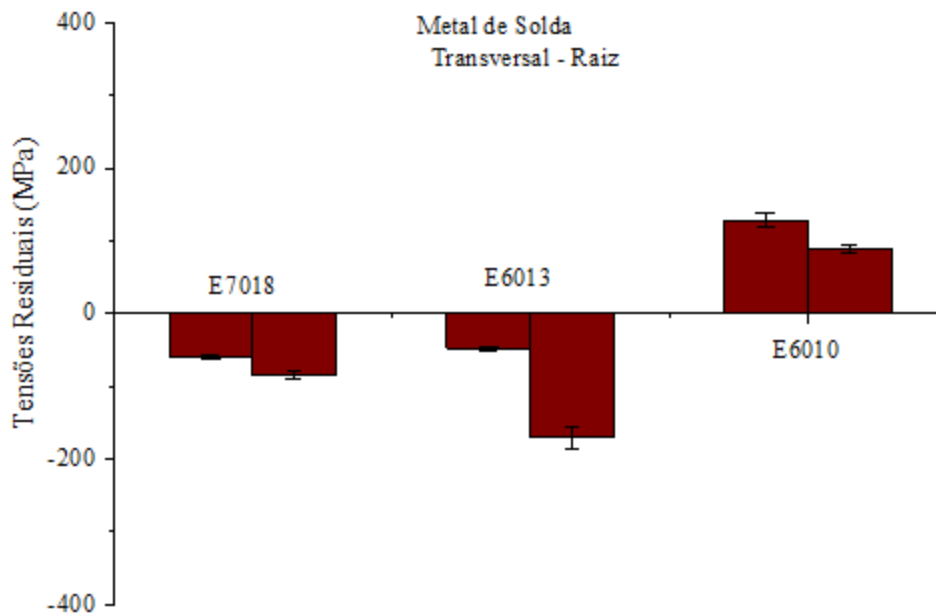


Figura 22: Tensões residuais no MS Transversal - Raiz

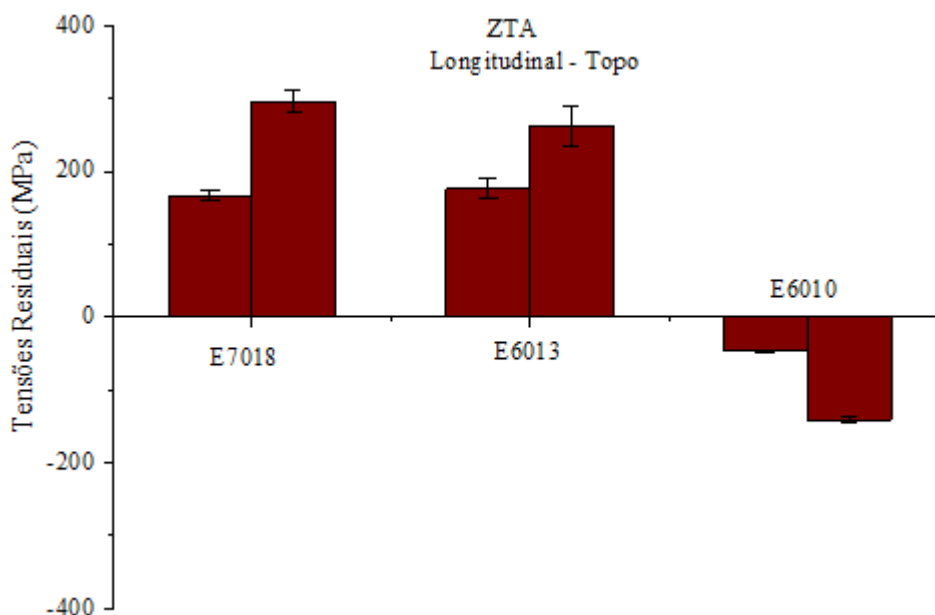
Observando os resultados da análise de tensão residual no MS na direção transversal pode ser verificado que para as juntas soldadas com os eletrodos E7018 e E6013 existe um comportamento compressivo homogêneo, tanto no topo como na raiz, com uma média, respectivamente, de -108MPa e -72MPa. Contudo, as amostras 5 e 6, soldadas com eletrodo celulósico E6010, apresentam comportamento trativo na raiz da junta, e uma divergência no resultado da análise no topo, na direção transversal, sendo trativo na amostra 5 e compressivo na amostra 6. Com os dados da tabela 5 é possível dizer que o motivo para ocorrência de comportamento trativo na raiz das juntas 5 e 6 pode ser devido a maior velocidade de soldagem imposta. Maiores velocidades de soldagem tendem a gerar uma contração mais intensa, o que de acordo com a Figura 5 (apresentada na revisão bibliográfica) tende a gerar tensões residuais transversais trativas, principalmente pelo fato de ter havido falta de penetração, ou seja, o volume de metal de solda é muito pequeno.

Analisando em seguida a região da ZTA, a Tabela 7 apresenta os valores das tensões residuais nas direções longitudinal e transversal. As Figuras 23 e 24, mostram os resultados obtidos na ZTA na direção longitudinal no topo e raiz da junta

Tabela 7: Tensões residuais na ZTA

Eletrodo	Amostra	Tensões Residuais (MPa)			
		Topo		Raiz	
		L	T	L	T
E7018	1	167±6	-218±35	18±5	-33±8
	2	296±16	-63±6	190±40	-62±5
E6013	3	176±14	-84±10	-114±32	-84±19
	4	262±28	-66±14	-111±14	-121±8
E6010	5	-47±1	-165±20	-173±20	-268±11
	6	-141±4	-281±28	-422±21	-355±21

Observando as Figuras 23 e 24 pode ser verificado que o comportamento das amostras 1 e 2 é trativo de magnitude elevada, no topo e na raiz da junta, da ordem de 232MPa e 104MPa respectivamente; nas amostras 3 e 4 o comportamento do topo se mostra trativo, inferior as amostras anteriores, da ordem de 219MPa, mas o da raiz é compressivo, com valores médios de -112MPa; já o das amostras 5 e 6 se verifica um comportamento compressivo tanto no topo, quanto na raiz da junta, com valores médios de -94MPa e -298MPa respectivamente.

**Figura 23: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - Topo**

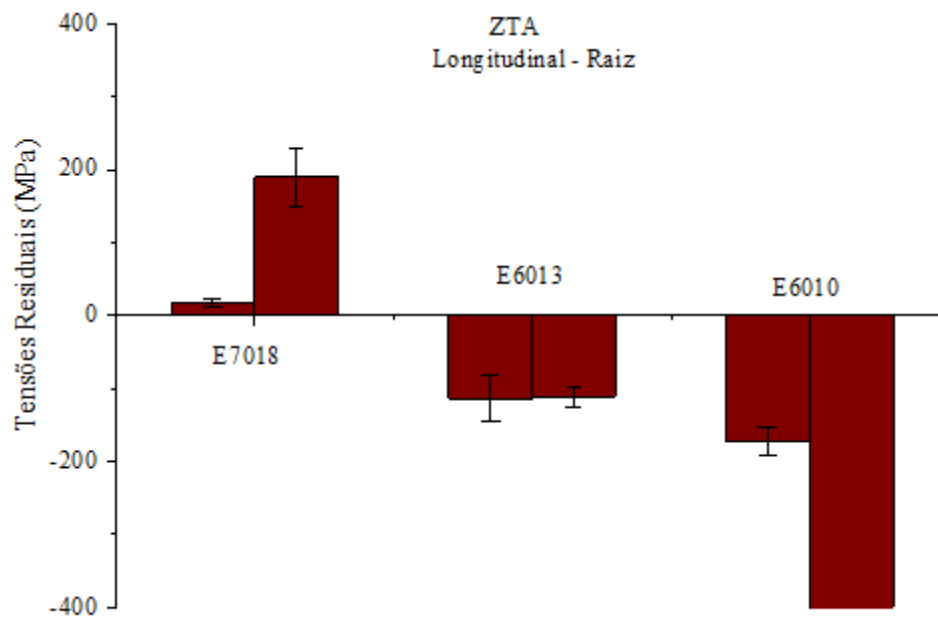


Figura 24: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - Raiz

As figuras 25 e 26 apresentam os valores de tensão residual obtidos na região da ZTA na direção transversal ao cordão de solda.

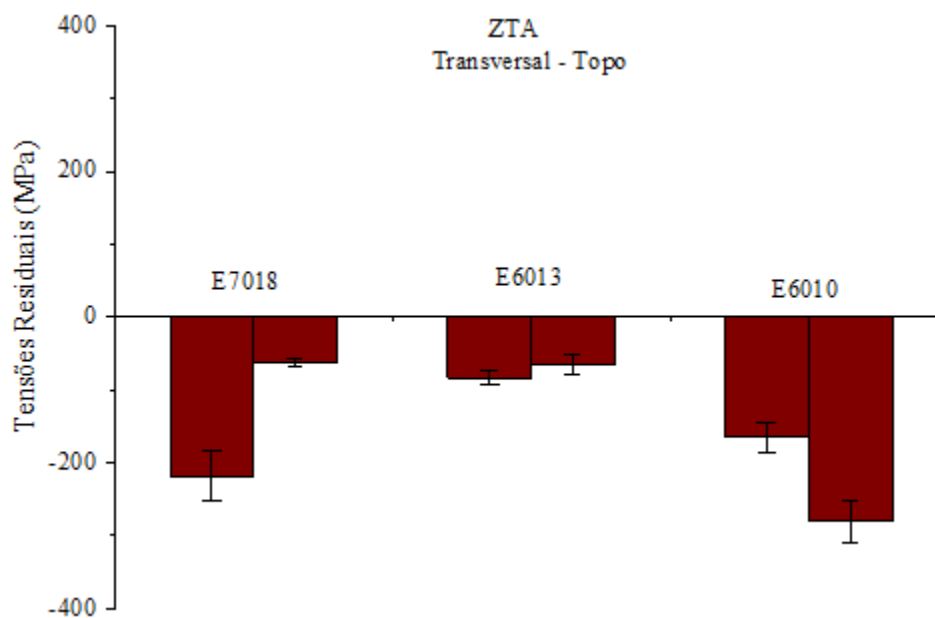


Figura 25: Tensões residuais na ZTA Transversal – Topo

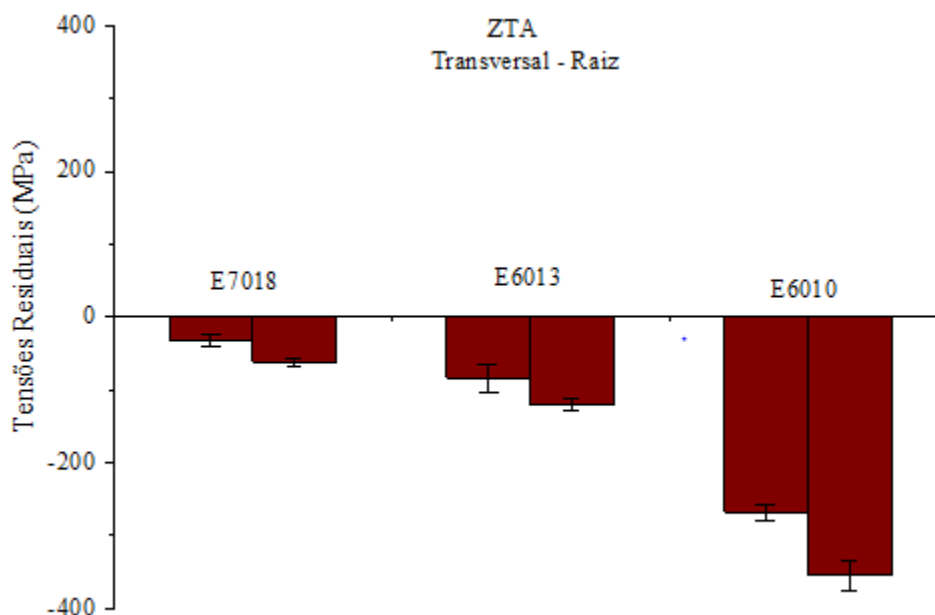


Figura 26: Tensões residuais na ZTA Transversal – Raiz

As Figuras 25 e 26 apresentam um padrão de tensões compressivo em todas as amostras analisadas, no topo e raiz da junta. Pode-se atentar aos valores encontrados, sendo uma média das amostras 1 e 2, no topo -140MPa, e na raiz -47MPa; nas amostras 3 e 4, no topo -75MPa, e na raiz -102MPa; e nas amostras 5 e 6, no topo -223MPa, e na raiz -312MPa.

Comparando as juntas soldadas com *heat input* semelhantes, E7018 e E6013, onde apenas o tipo de eletrodo é um parâmetro de grande diferença, observa-se que as tensões têm mesma magnitude comparada de região em região. Contudo, as juntas soldadas com eletrodo rutílico (E6013) apresentam valores médios em compressão maiores, o que seria benéfico para junta.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O presente trabalho, que teve como objetivo analisar as tensões residuais e a qualidade superficial de juntas soldadas pelo processo SMAW de um aço ASTM A36 com três eletrodos distintos, sendo eles E6010, E6013 e E7018, permite as seguintes conclusões:

1. As juntas soldadas com o eletrodo E6010 apresentaram comportamento trativo na raiz do metal de solda, tanto na direção longitudinal como na transversal, o que pode ser explicado da maior velocidade de soldagem imposta, o que gera contrações mais severas nas estruturas. Contudo, a ZTA apresentou tensões residuais compressivas nas duas direções.
2. As tensões residuais longitudinais das juntas soldadas com os eletrodos E6013 e E7018, que possuem aportes térmicos semelhantes, apresentaram comportamentos diferentes. Para as juntas soldadas com E7018 observou uma tendência trativa tanto no MS quanto na ZTA, no top de na raiz. Entretanto, na raiz das juntas soldas com E6013 foram medidas tensões compressivas na raiz, tanto do MS quanto na ZTA.
3. As tensões residuais transversais das juntas soldadas com os eletrodos E6013 e E7018 apresentaram comportamento homogêneo. Tanto no metal de solda como na ZTA as juntas fabricadas pelos dois eletrodos possuem comportamento compressivo tanto no topo como na raiz, o que é benéfico para a estrutura.
4. Por meio da inspeção visual pode-se verificar que, ao contrário da literatura, o eletrodo E6010 gerou poucos respingos e baixa penetração. O eletrodo que apresentou a melhor penetração, porém muitos respingos foi o E6013. Com relação ao eletrodo E7018 observou-se um comportamento conforme previsto na literatura, com poucos respingos e média penetração.
5. Através do ensaio visual de da análise macrográfica ficou evidente uma grande quantidade de defeito, principalmente mordeduras, que estão diretamente relacionadas ao aporte térmico (em relação a corrente e velocidade de soldagem) ou manipulação incorreta do eletrodo durante a execução das juntas. Por meio da macrografia também pode-se observar que a maior ZTA gerada foi na junta soldada com o eletrodo E6013,

o que pode ser explicado pela maior taxa de deposição de material e penetração na junta.

6. A junta fabricada com o eletrodo E7018 gerou uma ZTA com extensão semelhante à obtida com E6013 e menor quantidade de defeitos. As tensões residuais apresentaram comportamento compressivo na direção transversal a junta, tanto no topo quanta na raiz no metal de solda e na ZTA, o que seria benéfico para a integridade das juntas soldadas.

CAPÍTULO 6

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar novamente a soldagem com o eletrodo E6010 utilizando o parâmetro de velocidade de soldagem correto.
2. Análise microestrutural das juntas soldadas.
3. Analisar as tensões residuais em outros pontos das juntas soldadas.
4. Fazer perfis em profundidade das tensões residuais para verificar seu comportamento, tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada.
5. Realizar ensaios de dureza para tentar correlacionar com a magnitude das tensões residuais medidas.
6. Utilizar outros parâmetros de soldagem para avaliar o impacto na qualidade das juntas e nas tensões residuais geradas.

Referências Bibliográficas

[1] TENAX AÇOS ESPECIAIS. Aços para construção mecânica. Disponível em: http://www.tenax.com.br/dados/produtos/catalogos/Catalogo_Construcao_Mecanica.pdf.

Acessado em: 10. jun. 2016.

[2] DALCIN, R.L.; Estudo da soldagem multipasses entre os aços dissimilares AISI 4140 e aço ASTM A36 sem tratamento térmico posterior, Dissertação de Bacharelado; FAHOR, Horizontina, MG, Brasil, 2012.

[3] USIMINAS. Chapas Grossas. Disponível em: <https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-catalogo-chapasgrossas-v16-baixa.pdf>. Acessado em: 10. jun. 2016.

[4] BARBEDO, N.D.D.; Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica, Dissertação de M.Sc.; UFI, Itajubá, MG, Brasil, 2011.

[5] MODENESI, P.J.; Soldabilidade de algumas ligas metálicas, UFMG, 2011. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>. Acessado em: 10. jun. 2016.

[6] JUNIOR, D.R.L.; Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW, Dissertação de M.Sc.; UFP, Recife, PE, Brasil 2013.

[7] DA SILVA, A.F. et al (2003); Análise microestrutural do metal de solda de perfis soldados de um lado só utilizados na construção civil. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/cobef20030558.pdf>. Acessado em: 10. jun. 2016.

[8] CRUZ, A.S.; Estudo dos defeitos no processamento de soldagem por eletrodo revestido – um estudo de caso. Revista Eletrônica Ciência e Desenvolvimento, Amazonas, v.1, n.1, p. 48-54, 2015.

[9] COFINÕ, R.C.; Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch, Dissertação de Bacharelado; FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil, 2010.

[10] FILHO, A. L.; Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão, Dissertação de M.Sc.; UFI, Itajubá, MG, Brasil, 2005.

[11] Popović, O, Prokić-Cvetković, R., Burzić, M., Lukić, U., Beljić, B.; Fume and gas emission during arc welding: Hazards and recommendation; Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.37, p.509–516, 2014.

[12] Aalami-Aleagha, M. E., Rashidi, A. M.; Correlated macrostructural parameters of weld and weld current in the SMAW of small pipes; Journal of Mechanical Science and Technology, v.26, p.81-185, 2012.

[13] MORAES, A. N., QUINTELA, A. R. M., MOREIRA, D. A., QUEIROS, T. H. L., BRIÃO, F. S.; Teste de qualidade de eletrodos revestidos por solda a arco elétrico; Ciências exatas e tecnológicas, v.3, n.1, p.153-164, 2015.

[14] ESAB,
http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/como_identificar_eletrodo_corrente_correta_soldagem.cfm. Acessado em: 10. jun., 2016.

[15] FORTES, C.; VAZ, C. T.; Apostila de Eletrodos Revestidos, ESAB, 2005. Disponível. em:
http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf. Acessado em: 10. jun. 2016.

[16] BALDEV, R., SULBRAMANIAN, C. V.; Nondestructive testing of welds; Materials Evaluation, p.1251-1254, 1999.

[17] WITHERS, P. J., BHADSHIA, H. K. D. H.; Residual Stress Part 1– Measurement Techniques, and Part 2 – Nature and origins; Materials Science and Technology, v.17, p. 355-375, 2001.

[18] MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., Editora UFMG, 3^a Edição, 2014.

[19] CHUVAS, T. C.; Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma, Dissertação de Mestrado, UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2012.

[20] KANDIL, F. A., LORD, J. D., FRY, A. T., GRANT, P. V.; A review of residual stress measurement methods - a guide to technique selection; NPL Materials Centre, Teddington Middlesex, UK, 2001.

[21] JEYAKUMAR, M.; CHRISTOPHER, T.; NAGESWARA RAO, B.; Residual stress evaluation in butt welded joint of ASTM A36 steel plates, International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering, v.4, p.581-587, 2013.

[22] TURIBUS, S. N.; CALDAS, F. C. M.; MIRANDA, D. M.; MONINE, V. I.; J. ASSIS, J. T.; Tensometria por técnica de difração de raios X aplicada a análise de soldagens, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, p. 4830-4836, Campos do Jordão, SP, Brasil.

[23] NETO, A. V. L., SILVA, A. S.C., BRAGA, D. U., NEVES, F. O.; Análise comparativa das tensões residuais em chapa de material metálico ferroso laminado após a soldagem com eletrodo revestido; 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, RS, 2011.

[24] ESTEVES, M. C.; Alívio das tensões residuais de soldagem por shot peening na construção naval, Dissertação de Bacharelado; UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

[25] MAIA, T. M.; Análise das tensões residuais geradas nos processos de soldagem MIG/MAG e Plasma, Dissertação de Bacharelado; CEFET, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

[26] DE SOUZA, D. A.; Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza, Dissertação de Mestrado UFSJ, São João del Rei, MG, Brasil, 2012.

[27] MARQUES P. V., MODENESI, P. J.; Algumas equações úteis em soldagem, Soldagem e Inspeção São Paulo, v. 19, n.01, p.091-102, 2014.