



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS - CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE DE MEDEIROS BEZERRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS ELETRODOS E6010 E E6013
UTILIZANDO A SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO EM AÇO ASTM A36**

CARAÚBAS

2019

PEDRO HENRIQUE DE MEDEIROS BEZERRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS ELETRODOS E6010 E E6013
UTILIZANDO A SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO EM AÇO ASTM A36**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal Rural do Semiárido,
como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Carlos Cássio de
Alcântara

Co-orientadora: Núbia Alves de Souza
Nogueira

CARAÚBAS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488e Medeiros Bezerra, Pedro Henrique de.
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS ELETRODOS E6010 E
E6013 UTILIZANDO A SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO EM AÇO
ASTM A36 / Pedro Henrique de Medeiros
Bezerra. - 2019.
36 f. : il.

Orientador: Carlos Cássio de Alcântara.
Coorientadora: Núbia Alves de Souza Nogueira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2019.

1. SMAW. 2. Soldagem a arco elétrico. 3. Eletrodo
revestido. 4. ASTM A36. I. Cássio de Alcântara,
Carlos, orient. II. Souza Nogueira, Núbia Alves de,
co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas

da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO HENRIQUE DE MEDEIROS BEZERRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS ELETRODOS E6010 E E6013
UTILIZANDO A SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO EM AÇO ASTM A36**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal Rural do Semiárido,
como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

APROVADA EM: 11 / 03 / 2019

BANCA EXAMINADORA



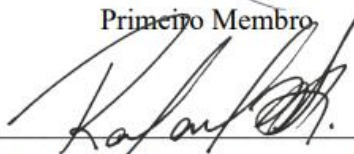
Prof.^o. Me. Carlos Cássio de Alcântara

Presidente



Prof.^o. Me. Daniel Nicolau Lima Alves

Primeiro Membro



Prof.^o. Rafael Bezerra Azevedo Mendes

Segundo Membro

Aos meus grandes amigos Elnatã Fernandes de Sousa (*In memoriam*), Marcílio de Souza Dantas (*In memoriam*) e Ranielton Gonçalves da Silva (*In memoriam*).

.

Dedico esse trabalho a minha família, pois nunca mediram esforços para minha educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para a concretização deste trabalho.

A Deus, por ter me dado força e sabedoria para a conclusão deste trabalho.

A minha família, especialmente a minha mãe Maria do Carmo de Souza Medeiros Filha pelo amor e apoio durante a minha vida. Ao meu irmão Pablo Ramon de Medeiros Bezerra pelo incentivo e companheirismo.

Aos meus avós Antônio Luiz de Souza Medeiros e Maria do Carmo de Souza Medeiros.

Aos meus tios, tias, primos e primas que estiveram ao meu lado e que contribuíram de alguma forma.

A meus amigos e colegas de curso. Em especial a Alanna Cortez, Doglas Marques, Edom Jobabe, Gentil Luédson, Igor Caldas, Jairo Luís, Jeny Késia, Jorge Câmara, Kenned Rossino, Lucas Gurgel, Marcelo Romell, Marcio Diego, Marcos Barbosa, Moisés Eduardo, Sarah Sunamyta e Yuri Felipe.

Ao meu orientador Prof. Me. Carlos Cássio de Alcântara. Obrigado pela confiança, orientação, dedicação e amizade que construímos em pouco tempo.

A Samir Adson, técnico do laboratório de mecânica, pela ajuda e contribuição para este trabalho.

A todos meus amigos (as) que estão presentes no meu dia a dia me incentivando.

Obrigado a todos.

Sou um homem afortunado e devo buscar
minha fortuna.

Henry Avery

RESUMO

Neste presente trabalho, onde o principal foco é a utilização do processo de soldagem a arco elétrico (SMAW) utilizando eletrodo revestido para realização de uma comparação entre os eletrodos revestidos E6010 e E6013. Para este estudo, os corpos de prova foram soldados utilizando os eletrodos citados acima em um aço ASTM A36, tendo como objetivo verificar qual eletrodo mais indicado no aço citado e assim como obter outras informações importantes acerca dos eletrodos e do aço. Através de ensaios de tração e dureza e pesquisas bibliográficas, obtendo alguns dados importantes como limite de escoamento e resistência a tração, assim como a dureza do material (Vickers), onde os dados obtidos foram satisfatórios para as amostras dos corpos de prova e através disso foi possível observar que ambos eletrodos podem facilmente ser aplicados ao aço em questão, contudo o que diferenciava qual eletrodo utilizar seria o tipo de aplicação onde esse eletrodo será empregado. O eletrodo E6010 comparado ao E6013 apresentou uma dureza mais elevada no metal de solda, visto que isto pode ser uma vantagem e uma desvantagem dependendo da aplicação. O eletrodo E6010 é utilizado quando é necessária uma alta penetração e para solda de raiz. O eletrodo E6013 é utilizado em soldagem de baixa penetração tendo um acabamento superficial de boa qualidade.

Palavras-Chaves: SMAW. Soldagem a arco elétrico. Eletrodo revestido. E6010. E6013. ASTM A36.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de acordo com o tipo de fonte de energia	15
Figura 2 - Classificação a partir da natureza da união	16
Figura 3 - Esquematização da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido	16
Figura 4 - Esquematização do SMAW	17
Figura 5 - Diâmetros de cabos para diferentes situações	18
Figura 6 - Especificações da AWS para eletrodo revestido	19
Figura 7 - Composição e função dos ingredientes do revestimento	20
Figura 8 - Classificação dos eletrodos revestidos segundo a AWS	22
Figura 9 - Esboço do corpo de prova do aço A36	24
Figura 10 - cortadora metalográfica de bancada	25
Figura 11 - Retificador para solda	25
Figura 12 - Durômetro ISH-TDV2000	26
Figura 13 - EMIC DL-3000.....	27
Figura 14 - Tensão x deformação do eletrodo E6010.....	28
Figura 15 - Ensaio de tração. a) Amostra 1 b) Amostra 2 c) Amostra 3.....	29
Figura 16 - Tensão x deformação do eletrodo E6013.....	30
Figura 17 - Ensaio de tração. a) Amostra 1 b) Amostra 2 c) Amostra 3.....	30
Figura 18 - Microdureza Vickers utilizando eletrodo E6010.....	31
Figura 19 - Microdureza Vickers utilizando eletrodo E6013.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM	14
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM	15
3.3 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO.....	16
3.3.1 Equipamentos.....	17
3.4 CONSUMÍVEIS.....	19
3.4.1 Classificação dos ingredientes	19
3.4.2 Tipos de revestimento.....	20
3.5 ESPECIFICAÇÃO AWS A5.1	21
3.6 ELETRODO E6010.....	22
3.7 ELETRODO E6013.....	23
4 METODOLOGIA.....	24
4.1 ELABORAÇÃO DO CORPO DE PROVA.....	24
4.2 ENSAIO DE DUREZA	26
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO	28
5.2 TESTE DE DUREZA	31
6 CONCLUSÕES.....	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A soldagem tem como principal objetivo unir duas ou mais peças de metal através da fusão como o principal meio, não comprometendo as propriedades físicas e químicas, vale ressaltar que não apenas os metais são soldáveis e metais podem ser soldados sem a fusão, com isto se torna um processo bastante importante e muito utilizado na indústria na engenharia e em outros campos. No que se aplicam as soldas, sabe-se que existem diversos tipos de soldas e que cada uma tem sua aplicação e tipo de material a ser unido (DINO, 2018).

Durante muito tempo a soldagem se manteve constante no aspecto de desenvolvimento. A grande mudança aconteceu no século XIX quando o arco elétrico foi descoberto em 1801 assim como o acetileno e a evolução das fontes de energia possibilitou grandes avanços e o surgimento da soldagem por fusão (BENVENHÚ, 2016).

Com as guerras mundiais e a industrialização houve uma necessidade de mais produtos metálicos consequentemente essa demanda acarretou em um maior desenvolvimento de equipamentos de soldagem e avanços das aplicações dessas máquinas (SILVA e PEREIRA, 2016).

Em 1890, N. G. Slavianoff e Charles Coffin desenvolveram a soldagem com eletrodo metálico nu. Com isso, durante algum tempo, a soldagem era realizada com este tipo de eletrodo, na formação da poça de fusão o eletrodo era consumido e com isso transformavam-se no metal de solda. No início do século XX foi notado que há uma necessidade em proteger o arco contra os agentes atmosféricos. O melhor método observado para a proteção do arco foi revestir o eletrodo com um tipo de material que ao adicionar calor iria formar uma proteção gasosa (FORTES, 2005).

Em 1904, Oscar Kjellberg, considerado o criador do eletrodo revestido. Inicialmente o eletrodo era revestido com um material argiloso que tinha como principal função facilitar a abertura do arco e a estabilidade do mesmo. No mesmo ano, Oscar fundou a ESAB (Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget). Com o avanço dos estudos na área fizeram com que em 1920 surgisse um eletrodo revestido extrudado o que melhorou significativamente a qualidade do metal de solda (FORTES, 2005).

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido um método antigo, mas ainda é muito utilizado devido ser as suas vantagens de ser um processo versátil devido a sua fácil adaptação aos materiais de diferentes espessuras e em qualquer posição de trabalho. O equipamento é de baixo custo. Pode ser utilizado na fábrica e no campo. Todo processo, possui algumas desvantagens que entre elas pode-se destacar é um processo manual, logo depende de quão

hábil é o operador fazendo com que haja variações nos parâmetros de soldagem. A baixa produtividade é um ponto negativo deste processo. A saúde do operador é um ponto importante e a soldagem a arco elétrico produz gases e fumos que é prejudicial à saúde (BALMER, 2005).

O processo de soldagem a arco elétrico é amplamente utilizado na indústria, entretanto, na literatura há poucas informações na comparação de dois eletrodos revestidos, logo a importância em analisar surge para que haja uma conclusão sobre sua aplicação e que serve como base para futuros trabalhos com novas análises entre eletrodos revestidos.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar as propriedades mecânicas de junta soldada utilizando os eletrodos E6010 e E6013 para a soldagem a arco elétrico em uma chapa de aço ASTM A36.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a resistência do cordão de solda;
- Analisar a dureza do cordão de solda;
- Construir a junta soldada;
- Realizar ensaio de tração;
- Realizar ensaio de micro dureza;
- Obter os gráficos de tensão x deformação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo refere-se à fundamentação teórica sobre o tema do trabalho. Neste capítulo será apresentado os aspectos gerais sobre o processo de fabricação soldagem.

3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem pode ser descrita como um processo que tem o intuito de unir duas peças metálicas ou não, com o uso de uma fonte de calor onde há ou não aplicação de pressão e como consequência deste processo tem-se a solda (NEVES, 2013).

Na literatura, a definição adotada pela Associação Americana de Soldagem (American Welding Society – AWS) é dada como “processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

As aplicações dos processos de soldagem estão inseridas em diversas áreas industriais como aviões, veículos, navios, componentes eletrônicos, confecções de estruturas metálicas, recuperação de eixos, peças de ferro-fundido e outros metais (NEVES, 2013).

Com isso, para obter um produto de alta qualidade com o menor custo possível um processo de soldagem adequado para tal necessidade é justificável. Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992) para os processos de soldagem existe dois pontos principais para uma análise mais detalhada. O primeiro ponto indica que os processos são baseados em dados experimentais e depende de diversos parâmetros, impedindo ou dificultando uma formulação matemática adequada. O segundo ponto é que tais processos dependem da habilidade e conhecimento do operador, dificultando o controle do processo.

Analisar esses pontos é de grande importância, pois aliada ao conhecimento fará com que haja um aprimoramento dos processos de soldagem visto que atualmente houve um aumento na procura de processos e consumíveis que ofereçam uma maior economia (SARNI, 2011).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Antes de iniciar a explicação dos processos de soldagem é importante mostrar quais os tipos de soldagem, como são classificados de acordo com o tipo de fonte de energia ou a partir da natureza da união. Para o processo de soldagem a partir da natureza da união esta é subdividida em dois grupos, o estado sólido e fusão. Para a soldagem feita em estado sólido ocorre uma aproximação da estrutura cristalina dos materiais através da energia mecânica e consequentemente desenvolve uma atração atômica (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992). A Figura 1 mostra a classificação do processo de soldagem usando o tipo de fonte de energia.

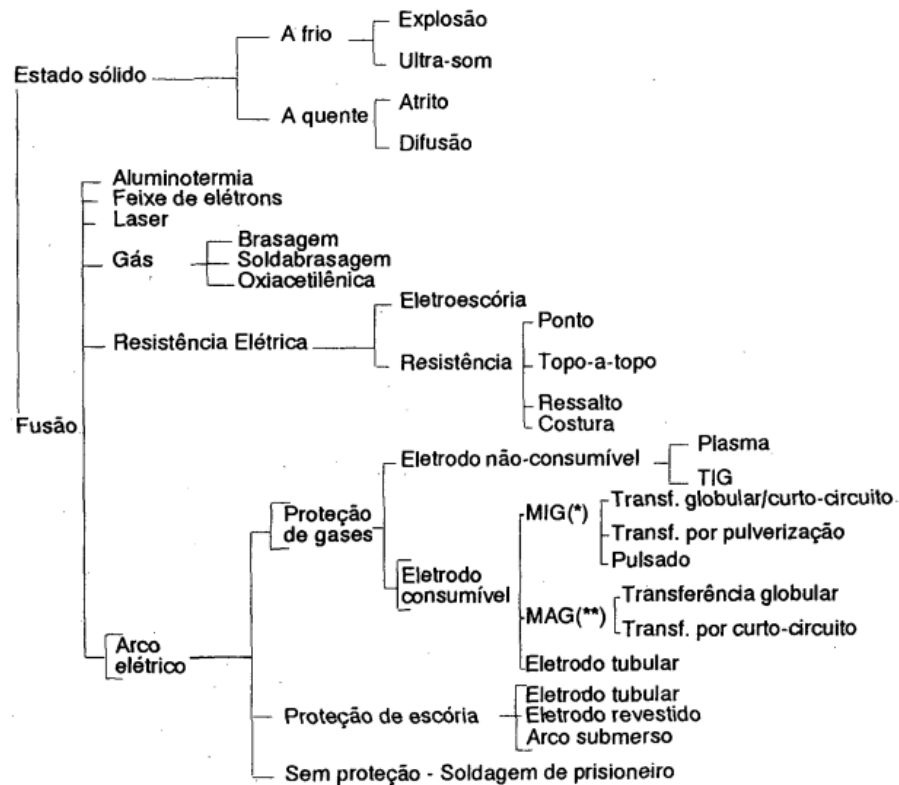
Figura 1 - Classificação de acordo com o tipo de fonte de energia

Fonte de Energia			Tipo de proteção				
			Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção
Mecânica						N	Explosão Atrito Ultra-som
Química	Chama		N		Oxiacetilênica		
	Reação exotérmica		N			Aluminotermia	
Elétrica	Resistência elétrica		N	N	N	Eletroescória	Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	Eletrodo tubular		Soldagem de prisioneiros
					MAG	Eletrodo revestido Arco submerso	
		Eletrodo não consumível	N	TIG			Eletrodo de carbono
Energia radiante	Eletromagnética			Laser		N	N
	Partículas		Feixe de elétrons		N	N	N

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

Para a fusão a soldagem é feita através de uma aplicação localizada de energia em uma parte da junta, onde os metais a serem unidos, o de base e o de adição, se fundem e, posteriormente, sofrem solidificação (MODENESI, 2012). A figura 2 apresenta a classificação a partir da natureza da união onde a mesma está subdividida em estado sólido e fusão como foi citado anteriormente

Figura 2 - Classificação a partir da natureza da união

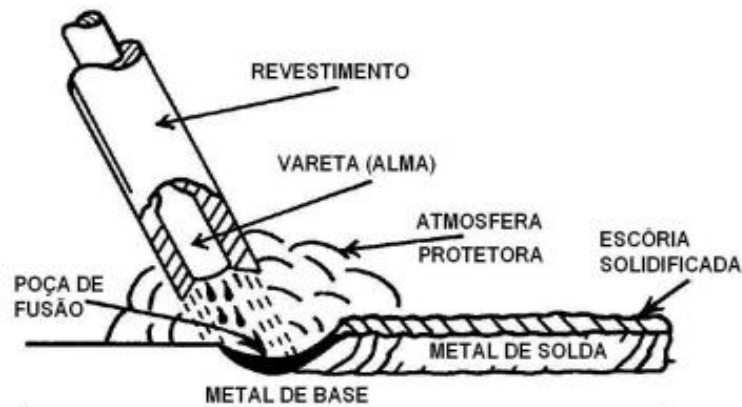


Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

3.3 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido também chamada de SMAW (Shielded metal arc welding) é um processo onde a fusão do metal ocorre através de uma alta temperatura gerada por um arco elétrico que é localizado entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base (VEIGA, 2011). A Figura 3 exemplifica uma esquematização básica do funcionamento da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

Figura 3 - Esquematização da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido



Fonte: Fortes (2005)

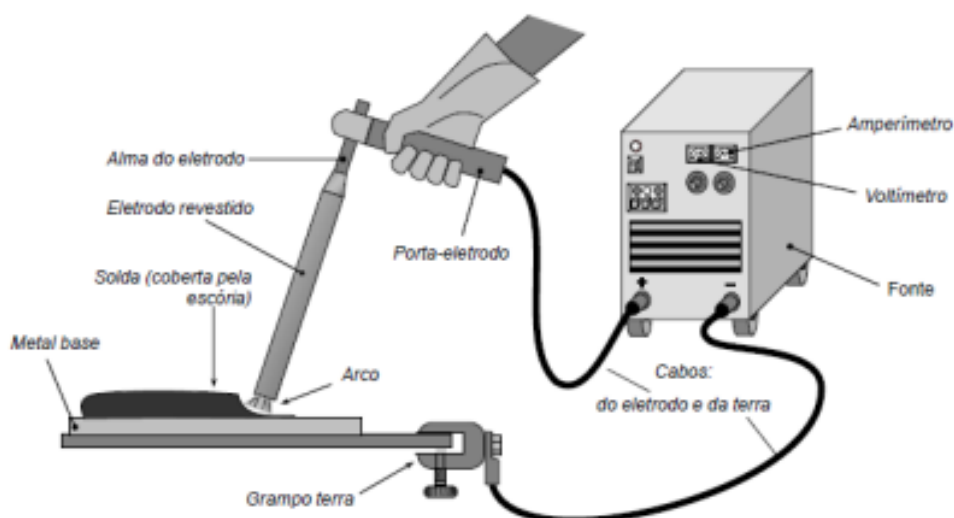
O eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica que é chamada de alma e pode ser trefilada ou fundida que tem como função conduzir corrente elétrica e serve de metal de adição para preencher a junta a ser soldada. A alma possui um revestimento que é composto por diversos materiais que tem como principais funções: estabilizar o arco elétrico; regular a composição química do cordão através da adição de elementos de liga e eliminação de impurezas e formar gases protetores da (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

3.3.1 Equipamentos

Os equipamentos para uma soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido consistem basicamente em fonte de energia, cabos, porta eletrodos, ferramentas e materiais de segurança. O transformador com corrente alternada é o tipo de fonte de energia que mais se aplica para este tipo de processo devido ao seu baixo custo de operação e manutenção (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Para a corrente contínua, dois modelos são adotados, a unidade geradora e transformador-retificador. A primeira opção é utilizada em trabalhos onde não há energia elétrica. Caso haja disponibilidade de energia elétrica, o retificador é preferível devido ao baixo custo envolvido. A figura 4 mostra uma esquematização dos equipamentos utilizados para a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Figura 4 - Esquematização do SMAW



Fonte: Medeiros (2018)

O porta-eletrodo é conectado em um polo da fonte de energia e o eletrodo é fixado no porta-eletrodo. O grampo terra é preso a peça e é conectado ao outro polo da fonte de energia. A tensão de um circuito aberto para o processo SMAW pode variar de 60 V a 90 V e a tensão de trabalho varia entre 20 V e 40 V. No entanto, dependendo de algumas variáveis como diâmetro do consumível e a posição de soldagem influenciam na corrente que pode ser de 30 A a 500 A (MEDEIROS, 2018).

Os cabos são responsáveis por transportar a corrente elétrica da fonte de energia para o porta eletrodo e da peça na qual está sendo trabalhada para a fonte de energia. São fabricados de cobre ou de alumínio, apresentando uma característica de flexibilidade para acessar áreas de difíceis acessos e por fim, não menos importante, devem ser cobertos por um material isolante (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011). A figura 5 exemplifica alguns cabos recomendados para diversas aplicações.

Figura 5 - Diâmetros de cabos para diferentes situações

Corrente de Soldagem (A)	Ciclo de Trabalho (%)	Diâmetro do cabo (mm) em função do Comprimento total (m)				
		0 - 15	15 - 30	30 - 46	46 - 61	61 - 76
100	20	4	5	6	6,5	7,5
180	20 - 30	5	5	6	6,5	7,5
200	60	6,5	6,5	6,5	7,5	8
200	50	6	6	6,5	7,5	8
250	30	6	6	6,5	7,5	8
300	60	8	8	8	9	10
400	60	9	9	9	10	12
500	60	9	9	9	10	12
600	60	9	9	9	12	2 x 10

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Os porta-eletrodos tem a função de fixar e energizar o eletrodo. Para que haja uma menor chance de choque é necessário que esteja corretamente fixado e os cabos estejam bem isolados. Para uma boa fixação é importante que as garras estejam bem conservadas, assim evitando que o eletrodo se solte.

Cada porta-eletrodo é fabricado para que trabalhe em uma faixa de diâmetro, isso ocorre devido a máxima abertura das garras para fixar o eletrodo e também pela corrente que pode conduzir. Para níveis de corrente mais elevado, é necessário que o porta-eletrodo seja maior, consequentemente o peso do será maior, logo o operador ficará mais suscetível a fadiga e para

evitar a fadiga é importante escolher o menor porta-eletrodo para a faixa de corrente elétrica na qual o operador irá trabalhar (JOAQUIM e RAMALHO, 2009).

3.4 CONSUMÍVEIS

O eletrodo revestido, como foi citado anteriormente, é constituído por uma vareta, denominada alma, com comprimento variando entre 23 e 45 cm dotado por uma camada que é o revestimento. Os eletrodos disponíveis atendem as imposições do mercado devido ao grande número de opções na qual a soldagem pode oferecer. Para melhor organização do mercado sociedades especifica o eletrodo para o tipo de aplicação. No Brasil, a AWS é a sociedade mais utilizada, como é mostrada na figura 6 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Figura 6 - Especificações da AWS para eletrodo revestido

Especificação	Tipo de eletrodo
AWS A 5.1	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço ao carbono
AWS A 5.3	Eletrodos revestidos para soldagem a arco do alumínio e suas ligas
AWS A 5.4	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço inoxidáveis
AWS A 5.5	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço de baixa liga
AWS A 5.6	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de cobre e suas ligas
AWS A 5.11	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de níquel e suas ligas
AWS A 5.13	Eletrodos revestidos para revestimento por soldagem a arco
AWS A 5.15	Eletrodos e varetas para soldagem do ferro fundido

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

3.4.1 Classificação dos ingredientes

Os ingredientes utilizados para revestir o eletrodo é classificado por alguns autores como sendo sólido e líquido. Os ingredientes sólidos são os materiais em pó e granulados que são encontrados na natureza necessitando de algum procedimento para que haja uma maior concentração e uma redução no tamanho até chegar no tamanho adequado para a aplicação desejada e o tamanho é um fator de grande importância. Os líquidos de modo geral são o silicato de sódio e o silicato de potássio (FORTES, 2005).

Há ainda outros tipos de ingredientes sólidos como ligas e compostos sintéticos que são produtos de reações químicas. Para a estrutura física dos ingredientes que compõem o revestimento a classificação é dividida em três tipos, tipo cristalino, fibrosa ou amorfa (não-cristalina). Os materiais cristalinos mais utilizados são o quartzo, mica e rutilo. A celulose que é um tipo de material fibroso e a sílica considerado um material amorfo é comumente empregado nos revestimentos dos eletrodos (FORTES, 2005).

Ainda de acordo com Fortes (2005), os ingredientes responsáveis para garantir o revestimento dos eletrodos são divididos em seis principais grupos, tais como elementos de liga, aglomerantes, formadores de gases, estabilizadores do arco, formadores de fluxo e escória e plasticizantes. A Figura 7 mostra alguns ingredientes utilizados nos eletrodos E6010 e E6013.

Figura 7 - Composição e função dos ingredientes do revestimento

Classe	Composição	
E6010	celulose	35%
	rutilo	15%
	ferro-manganês	5%
	talco	15%
	silicato de sódio	25%
	umidade	5%
E6013	Silicato de alumínio	10 - 15%
	Ferro	1 - 2%
	Calcário	5 - 10%
	Manganês	5 - 10%
	Quartzo	2 - 5%
	Silicatos	10 - 15%
	Óxido de titânio	>50%

Fonte: Próprio autor (2019)

3.4.2 Tipos de revestimento

Os tipos de revestimentos utilizados nos eletrodos podem ser classificados em quatro principais tipos, são eles o tipo básico, rutilico, ácido e celulósico. Quando o metal de solda é utilizado com o eletrodo básico as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material apresentam bons resultados onde o maior destaque é a tenacidade logo este eletrodo é usado em juntas de altas solicitações. Como os principais componentes utilizados nesse tipo de revestimento faz com que o metal de solda gerado seja altamente desoxidado e as inclusões de sulfetos e fosfetos são quase inexistentes (MEDEIROS, 2018).

Os eletrodos do tipo celulósico possuem uma elevada produção de gases que são resultantes da combustão sendo o CO_2 , CO , H_2 e H_2O (vapor) os principais. Possui uma alta penetração, mas em contrapartida a taxa de deposição é baixa e quando comparado com outros tipos de eletrodos a tensão do arco é alta. Quando é desejado um alto nível de resistência mecânica esse eletrodo não é aconselhado, pois no metal de solda há um grande nível de hidrogênio e isso faz com que haja uma produção de trincas (FORTES, 2005; MEDEIROS, 2018).

Os rutílicos são eletrodos que chegam a possuir até 50% de rutilo (TiO_2) cujo revestimento se dá pela adição de areia de rutilo ou ilmenita e a adição desses componentes proporcionam uma boa estabilidade, baixa tensão, pouco respingo, boa ductilidade e resistência mecânica e um bom cordão de solda. Para que o metal de solda não apresente um alto nível de hidrogênio é necessário que o consumível passe por uma secagem a uma baixa temperatura, se este processo não ocorrer o hidrogênio perde sua função redutora e o metal de solda irá apresentar grandes porosidades devido ao nitrogênio e o monóxido de carbono (MEDEIROS, 2018; NEVES, 2013).

Os eletrodos ácidos são revestidos principalmente de óxido de ferro, manganês e silício. A escória produzida por este tipo é ácida, abundante, se destaca com facilidade e é porosa. A penetração para este tipo de eletrodo é média, porém a taxa de fusão é alta fazendo com que a poça de fusão seja volumosa limitando a posição de soldagem para plana e horizontal. Para que seja evitada a formação de trincas de solidificação é necessário que o metal de base tenha baixo teor de carbono e seja livre de impurezas (NEVES, 2013).

3.5 ESPECIFICAÇÃO AWS A5.1

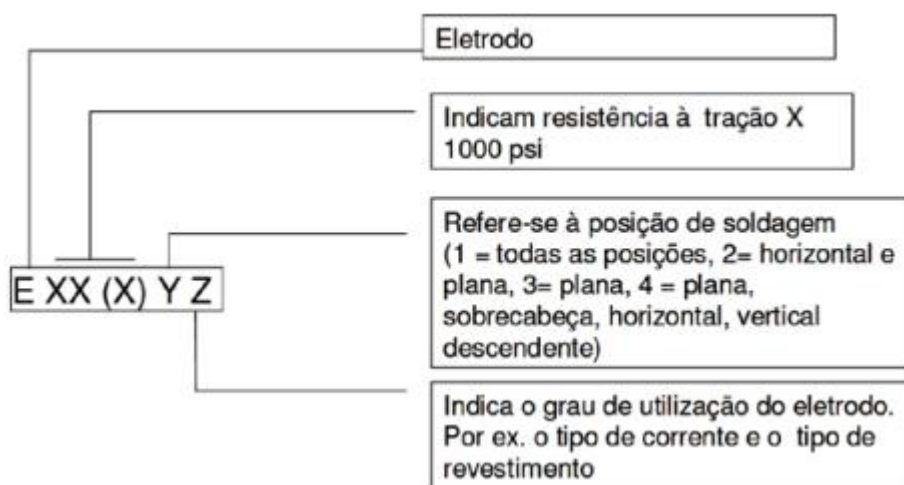
No Brasil a norma que rege os eletrodos revestidos é a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10614:1989 que é denominada de Eletrodos revestidos de aço carbono para a soldagem a arco elétrico. Contudo é uma norma pouco utilizada. A International Standard Organization (ISO) possui uma norma que nos últimos anos ganhou destaque a ISO 2560:2009 (Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of non-alloy and fine grain steels) onde países como Alemanha e Inglaterra já adotaram essa norma (NEVES, 2013).

A norma da American Welding Society (AWS) é uma especificação criada por um comitê de membros que fazem parte de fabricantes de consumíveis, tal como a ESAB, funcionários da indústria de soldagem e pesquisadores de universidades e laboratórios. A especificação da AWS A5.1 é feita para eletrodos de aço carbono e estes são classificados de

acordo com as propriedades mecânicas, no tipo de revestimento, na posição de soldagem e qual corrente utilizar (corrente alternada ou corrente contínua) (FORTES, 2005).

Os eletrodos revestidos para aço carbono são classificados da seguinte forma. Inicialmente é dotado de uma letra “E” seguido de quatro números, esses números indicam a resistência a tração, posição de soldagem, o tipo de corrente e o tipo de revestimento. A Figura 8 mostra uma esquematização de como é designado o a classificação (NEVES, 2013).

Figura 8 - Classificação dos eletrodos revestidos segundo a AWS



Fonte: Fortes (2005)

3.6 ELETRODO E6010

A seguir será explanado um pouco do eletrodo E6010, visto que o mesmo foi utilizado no presente trabalho, logo há a necessidade de obter informações acerca deste eletrodo.

O arco deste eletrodo é rígido, sendo a transferência de material por spray, sua penetração é boa, escória de fácil remoção devido a massa de celulose que é queimada durante a soldagem. É um eletrodo bastante utilizado de aço carbono com revestimento celulósico onde é necessária uma soldagem com alta penetração sendo a posição para todos os tipos, mas é ideal é utilizá-lo em solda de raiz (NEVES, 2013).

A composição desse eletrodo é 35% de celulose, 15% de rutilo, 5% de ferro manganês, 15% de talco, 25% de silicato de sódio e 5% de umidade, todos esses revestimentos representam cerca de 10 a 12% do seu peso total. Essa umidade faz com que o metal de solda possua um alto nível de hidrogênio. Sua aplicação é do mais variado tipo, pode ser utilizada para soldas do

tipo multipasses nas posições vertical e sobre cabeça, aços com baixos teores de carbono e em tubulações como um todo apresentando um ótimo desempenho (NEVES, 2013).

3.7 ELETRODO E6013

Assim como o eletrodo E6010, algumas informações sobre o E6013 serão explicadas a baixo, pois este eletrodo também fora utilizado no presente trabalho.

O revestimento aqui empregado é o rutilo (dióxido de titânio, TiO_2). A sua penetração é baixa o que implica que seja melhor aplicado em materiais de menores espessuras sem que fure a peça. Quando comparado com o eletrodo E6012, o E6013 apresenta melhores características como o arco mais leve, o cordão de solda apresenta uma superfície mais uniforme e menos respingos, logo dependendo da situação ou aplicação, os eletrodos E6013 está sendo empregado no lugar do E6012. Quando é utilizada a corrente alternada (CA) este eletrodo possui revestimento de potássio que faz com que o arco seja estabilizado com a utilização dessa corrente (FORTES, 2005; NEVES, 2013).

A seguir é listado alguns dos materiais mais utilizados no revestimento de eletrodos de aço e sua função. Celulose e dextrina são substâncias que geram uma atmosfera que tem função de proteger o arco. Os carbonatos têm objetivo de controlar as escórias básicas e fornecer uma atmosfera defensora com sua decomposição (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O dióxido de titânio (rutilo) reduz a velocidade de solidificação da solda e a viscosidade da escória. Ferro-manganês e o ferro-silício controlam a composição e possibilita a desoxidação da poça de fusão. Pó de ferro estabiliza o arco e aumenta a quantidade de metal depositado, ou seja, taxa de deposição. Argilas maior facilidade na fabricação do eletrodo por extrusão e formam escória. Fluoreto de cálcio é uma junção do carbonato com o dióxido de titânio que é controlar a basicidade da escória e reduzir a viscosidade (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

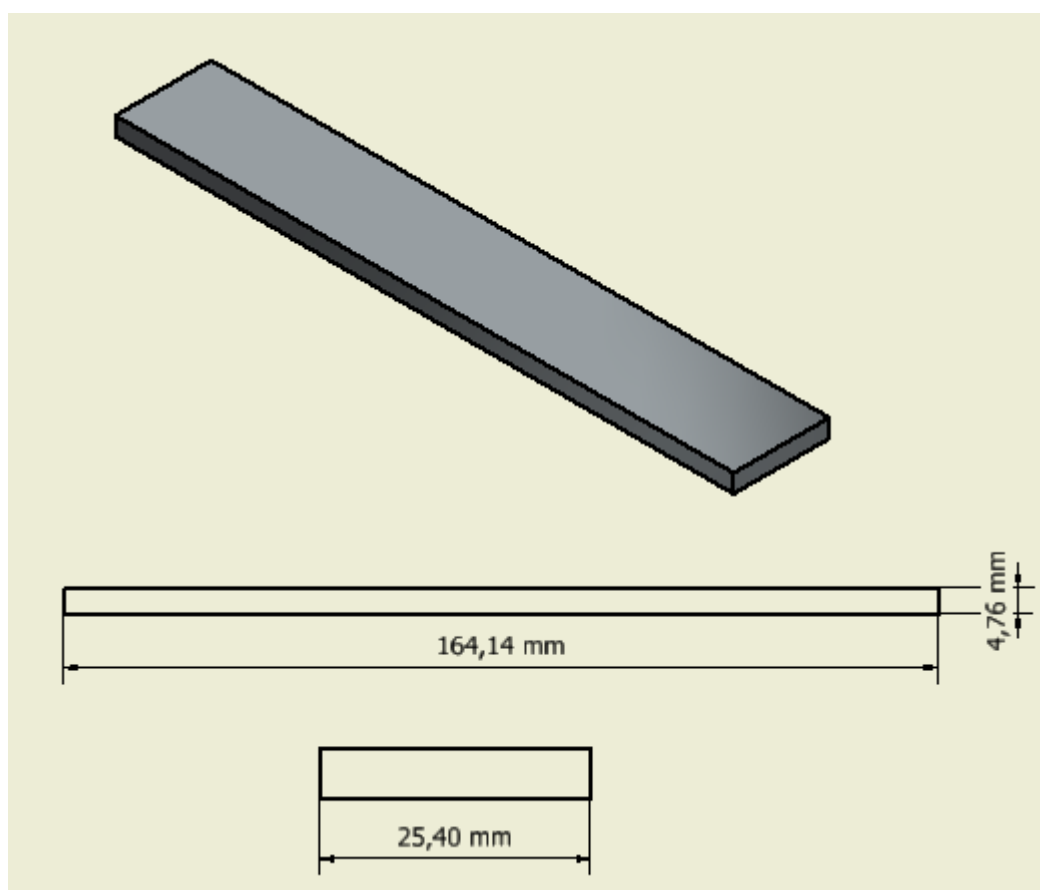
Silicatos ajuda na formação da escória, mais especificamente o silicato de potássio e o de sódio serve para estabilização do arco e ligante para o revestimento. Óxidos de ferro e manganês melhora a formação da escória, controla a viscosidade e mantém estabilidade no arco elétrico (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

4 METODOLOGIA

4.1 ELABORAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Foram elaborados 12 corpos de prova utilizando o aço ASTM A36 com dimensões 164,14 mm de comprimento, 25,40 mm de largura e 4,76 mm de espessura. Para a elaboração a norma utilizada foi a ABNT NBR ISO 6892-1:2013 Versão corrigida 2:2018 cujo título é “Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente”. A Figura 9 representa um esboço do corpo de prova.

Figura 9 - Esboço do corpo de prova do aço A36



Fonte: Próprio autor (2019)

Inicialmente para realização da soldagem, o metal base foi cortado ao meio com a utilização da máquina cortadora metalográfica de bancada Risitec CMR-60, semelhante à Figura 10 a seguir.

Figura 10 - cortadora metalográfica de bancada



Fonte: Risitec (2014)

Após a realização do corte de todos metal base o próximo passo é a soldagem. Foram soldadas seis amostras do metal base com o E6010 e posteriormente seis amostras do metal base com o E6013 utilizando o retificador para solda com eletrodos revestidos Origo™ Arc 426 da ESAB, semelhante ao da Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Retificador para solda



Fonte: ESAB (2008)

As características e especificações técnicas são mostradas na Tabela 1 fornecida pelo fabricante.

Tabela 1 – Características técnicas da fonte de soldagem

Frequência da rede 60 Hz	
Faixa de corrente / Tensão	65 A / 23 V – 425 A / 37 V
Tensão em vazio	80 V
Tensão de alimentação	220 / 380 / 440V 50 / 60Hz
Dimensões (L x C x A)	600 x 1200 x 730 mm
Peso	120 Kg

Fonte: Adaptado Esab (2008)

4.2 ENSAIO DE DUREZA

Com os corpos de prova confeccionados, três foram separados para a realização do ensaio de dureza. Para o ensaio as peças foram cortadas na máquina cortadora metalográfica de bancada CMR-60, a mesma utilizada para elaboração do corpo de prova. Os corpos de prova foram cortados em um comprimento total de 40 mm, onde do centro para a extremidade tem 20 mm.

As amostras foram lixadas manualmente numa poltriz da marca Teclago, modelo PL02E, utilizando as lixas com granulometria de 180, 320, 800 e 1200 grana respectivamente.

Com as peças lixadas o próximo passo é realizar o ensaio de dureza no durômetro automático digital micro-vicker ISH-TDV2000. O método empregado é o de dureza Vickers com carga de 0,5 kgf e um tempo de aplicação de 15 segundos. Para a obtenção dos dados foram realizadas 30 endentações de 0,5 mm cada. A figura 12 a seguir mostra o modelo utilizado.

Figura 12 - Durômetro ISH-TDV2000



Fonte: Próprio autor (2019)

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para o ensaio de tração foram confeccionados 3 corpos de prova utilizando o eletrodo E6010 e o E6013. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina EMIC DL-3000, com a célula de carga de 100 kN e a velocidade de avanço da garra de 20 mm/min. A figura 13 a seguir mostra um modelo semelhante utilizado para os ensaios

Figura 13 – EMIC DL-3000



Fonte: Máquinas (2013)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

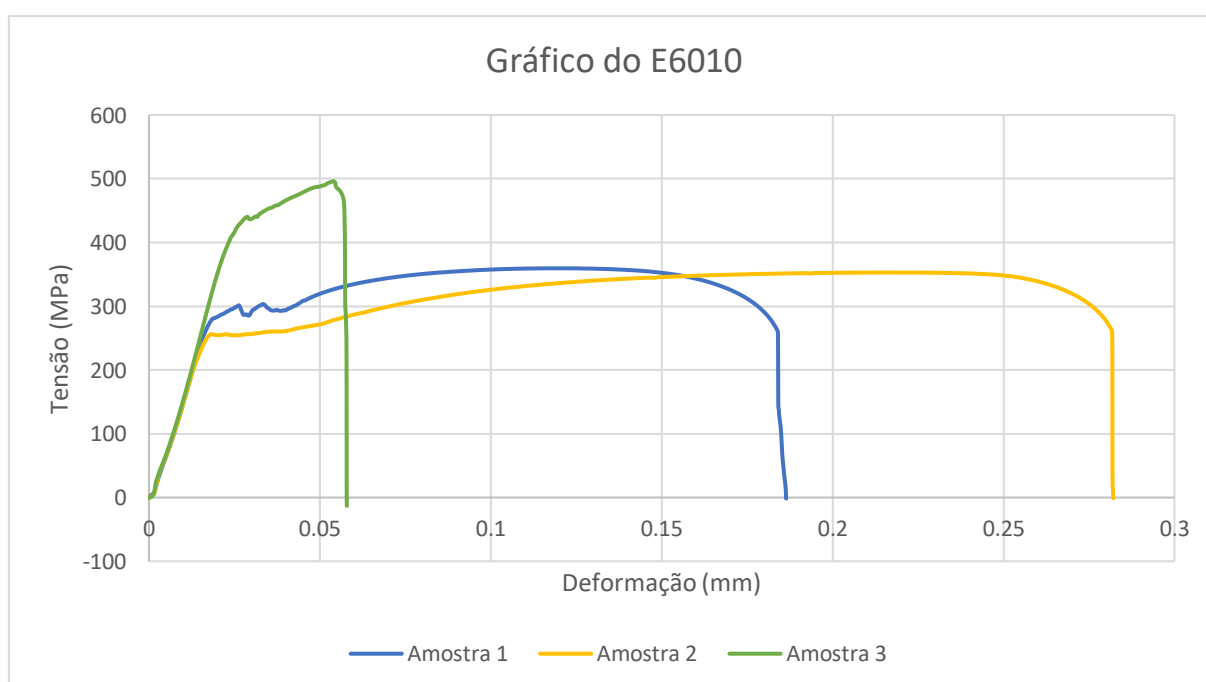
5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

A tabela 2 e 3 e as figuras 14 e 15 mostram os resultados dos ensaios de tração realizados para os eletrodos propostos no trabalho, onde algumas características foram observadas. As amostras 1 e 2 referentes a figura 14 apresentaram resultados do limite de escoamento satisfatórios para o aço ASTM A36. Para a resistência a tração as amostras 1 e 2 o resultado foi inferior ao mínimo exigidos para o aço ASTM A36, esse resultado inferior se dá pelo processo de temperatura que influencia nas propriedades mecânicas do ensaio de tração.

O corpo de prova foi submetido a soldagem no qual elevou sua temperatura influenciando assim nos resultados do ensaio de tração. Em geral, o que acontece quando há um aumento de temperatura é que a resistência a tração tenha uma diminuição e a há um aumento na ductilidade.

A amostra 3 da figura 14 mostrou resultados diferentes quando comparado com a amostra 1 e 2. Durante o ensaio de tração, as amostras 1 e 2 sofreram o rompimento no metal base. Para a amostra 3, o rompimento se deu no metal de solda. O motivo no qual houve a ruptura no metal de solda se deu pela falta de penetração no processo e consequentemente havendo poros ou vazios no corpo de prova, facilitando o rompimento no metal de solda. Com isso, o desvio padrão calculado apresentou altos valores.

Figura 14 - Tensão x deformação do eletrodo E6010



Fonte: Próprio autor (2019)

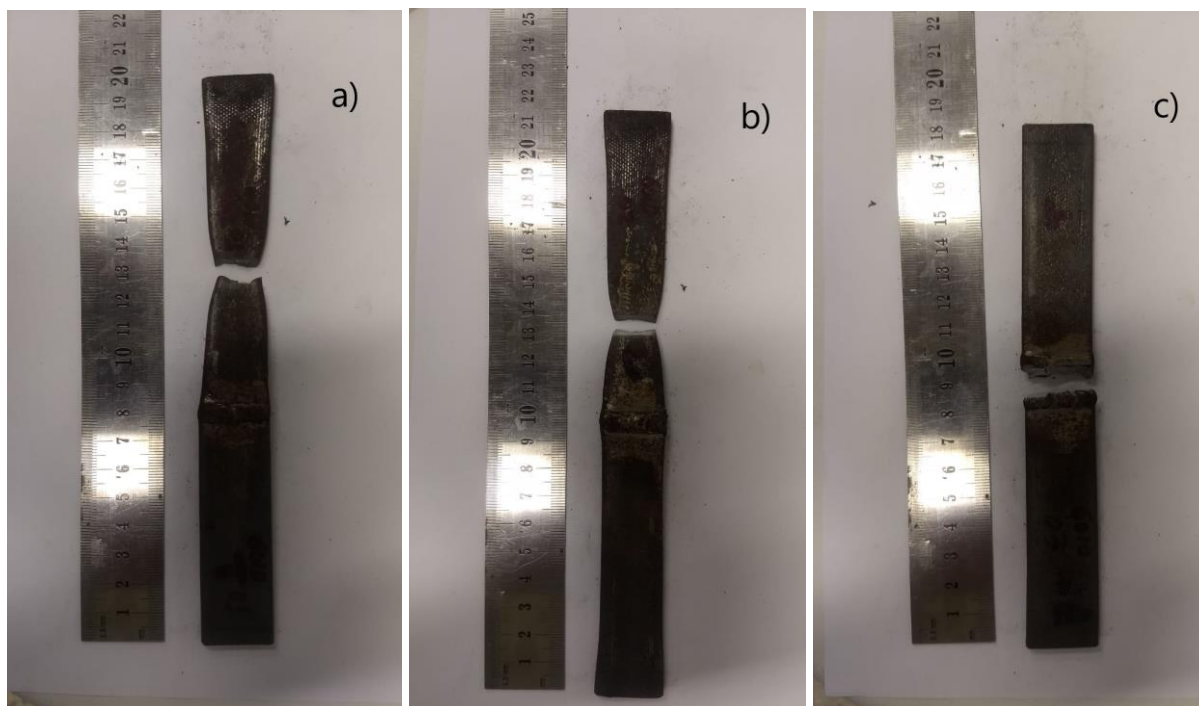
Tabela 2 - Valores do limite de escoamento, resistência a tração e limite de ruptura para o eletrodo E6010

Dados	E6010 - peça 1	E6010 - peça 2	E6010 - peça 3	Média	Desvio padrão
Limite de escoamento (MPa)	280 MPa	250 MPa	200 MPa	243 MPa	32,99
Resistência a tração (MPa)	360 MPa	350 MPa	500 MPa	403 MPa	68,47
Limite de ruptura (MPa)	260 MPa	265 MPa	300 MPa	275 MPa	17,79

Fonte: Próprio autor (2019)

A figura 15 mostra as imagens dos corpos de prova após a realização do ensaio de tração.

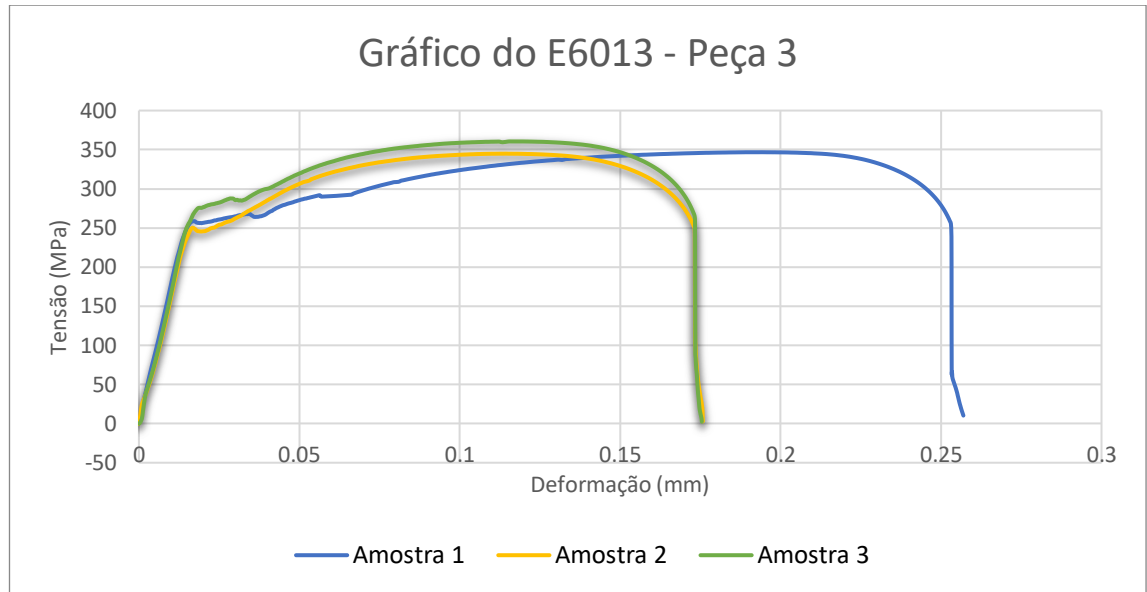
Figura 15 – Ensaio de tração. a) Amostra 1 b) Amostra 2 c) Amostra 3.



Fonte: Próprio autor (2019)

Para os resultados utilizando o eletrodo E6013 foram semelhantes ao E6010. O limite de escoamento da figura 16 ficou dentro do limite exigido pelo aço ASTM A36. Para a resistência a tração os resultados foram abaixo do exigido, uma vez que o corpo de prova passou pelo processo de soldagem e neste processo há um aumento de temperatura e isto faz com que as propriedades mecânicas dos materiais sofram alterações e uma das consequências do aumento da temperatura é a diminuição da resistência a tração.

Figura 16 – Tensão x deformação do eletrodo E6013



Fonte: Próprio autor (2019)

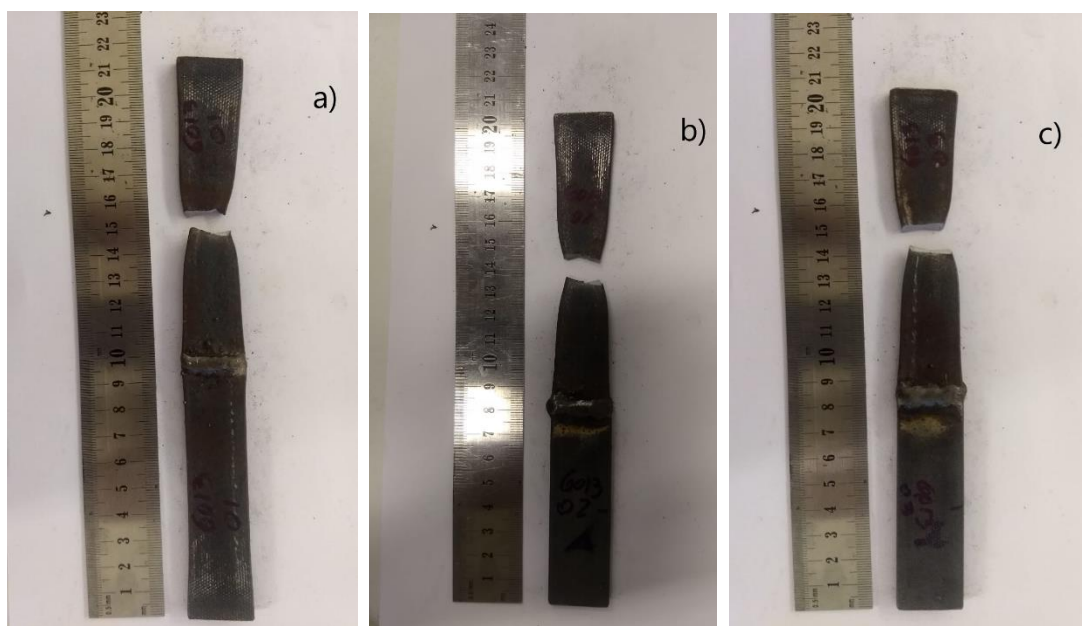
Tabela 3 - Valores do limite de escoamento, resistência a tração e limite de ruptura para o eletrodo E6013

Dados	E6013 - peça 1	E6013 - peça 2	E6013 - peça 3	Média	Desvio padrão
Limite de escoamento (MPa)	255 MPa	250 MPa	275 MPa	260 MPa	10,8
Resistência a tração (MPa)	350 MPa	345 MPa	360 MPa	351 MPa	6,23
Limite de ruptura (MPa)	255 MPa	250 MPa	260 MPa	255 MPa	4,08

Fonte: Próprio autor (2019)

A figura 17 mostra os corpos de prova após a realização do ensaio de tração

Figura 17 – Ensaio de tração. a) Amostra 1 b) Amostra 2 c) Amostra 3

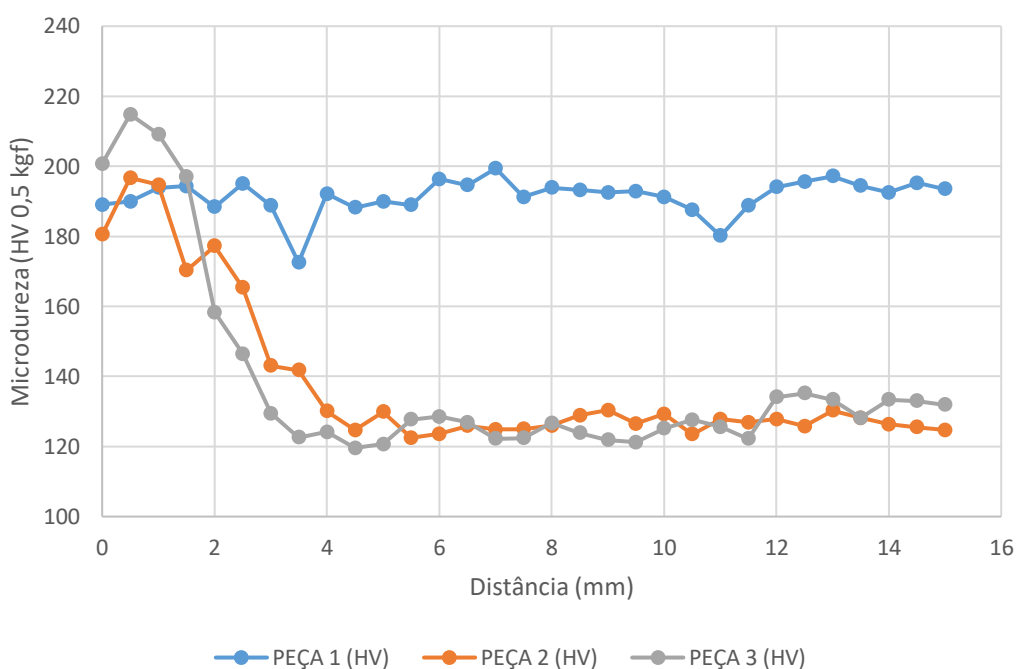


Fonte: Próprio autor (2019)

5.2 TESTE DE DUREZA

A figura 18 mostra o resultado de três amostras utilizando o eletrodo E6010. Com o resultado obtido, nota que a amostra 2 e 3 obtiveram uma maior dureza no metal de solda passando por queda na zona termicamente afetada (ZTA) e tendo seu menor valor na metal base. Para a amostra 1 o valor obtido não foi possível observar grandes variações na dureza. Há dois principais motivos para que não houvesse variação na dureza da peça 1. A primeira é ter ocorrido uma má preparação do corpo de prova originando uma superfície irregular e a segunda é velocidade de soldagem, fator difícil de controlar devido ao processo ser de forma manual.

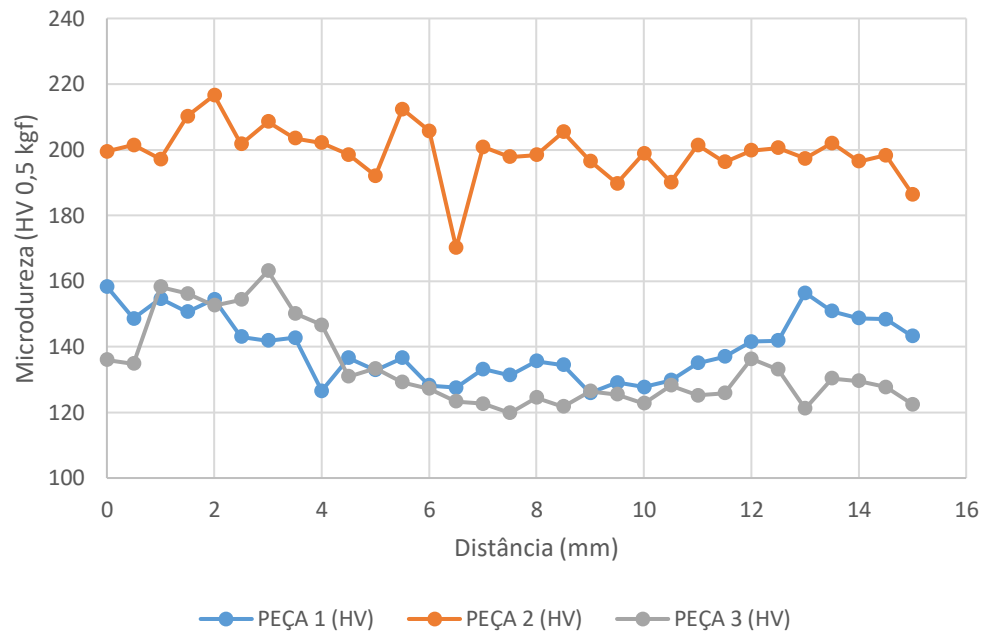
Figura 18 - Microdureza Vickers utilizando eletrodo E6010



Fonte: Próprio autor (2019)

Para as três amostras do eletrodo E6013, a figura 19 mostra as durezas obtidas no ensaio. Para a amostra 1 e 3 as durezas, assim como no E6010, foram maiores no metal de solda seguido por um decaimento na ZTA e sendo a menor dureza no metal base. Para a peça 2 houve uma semelhança ao E6010. Não foi possível notar uma grande variação na dureza. E assim como foi dito anteriormente isto está atrelado a uma deformação na superfície da amostra e a velocidade de soldagem.

Figura 19 - Microdureza Vickers utilizando eletrodo E6013



Fonte: Próprio autor (2019)

6 CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado com pesquisas bibliográficas e ensaios de tração e dureza, chegou-se à conclusão que para o ensaio de tração os resultados obtidos foram de certa forma semelhantes e alguns atingiram o resultado exigido para o aço ASTM A36.

A média do limite de escoamento para o eletrodo E6010 foi de aproximadamente 244 MPa e do eletrodo E6013 foi de 260 MPa, porém no teste de tração do E6010 um corpo de prova teve seu rompimento no metal de solda, logo o limite de escoamento foi inferior ao esperado, caso isso não tivesse ocorrido a média poderia ter sido igual ou próxima a média do E6013.

Para a resistência a tração, os valores obtidos para o E6010 foram abaixo do exigido com exceção do terceiro corpo de prova. Para o E6013 todos os valores encontrados estão fora do recomendado para o aço em estudo. Este fato se deu devido ao aquecimento do corpo de prova durante o processo de soldagem e por consequência a resistência a tração teve uma diminuição.

No ensaio de dureza do E6010 os resultados obtidos no metal de solda foram semelhantes para as três amostras analisadas. Para o E6013 houve uma diferença significativa na amostra 2 em relação as amostras 1 e 3. Porém esta diferença pode estar atrelada a uma superfície irregular.

O E6010 apresentou uma maior dureza no metal de solda, porém uma elevada dureza pode ser considerada uma desvantagem quando é aplicada em estruturas marítimas onde o principal problema é a fratura frágil do material. O E6010 é mais indicado para solda de alta penetração e solda raiz. O E6013 é utilizado onde se necessita baixa penetração.

Logo, com base no resultado, o eletrodo a ser utilizado no aço ASTM A36 seria relacionar qual tipo de aplicação o mesmo irá submeter-se.

REFERÊNCIAS

BALMER. **Processo de soldagem ao arco elétrico**. 2005. 20 f. Apostila técnica - Ijuí, 2005.

BENVENHÚ, Márlon da Silva. **AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESULTANTES DA SOLDAGEM DE MATERIAIS, PELO PROCESSO MAG**. 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

MÁQUINAS, B2b. **Máquinas Universais de Ensaio DL 3000**. Disponível em: <http://b2bmaquinas.com.br/Anuncios/Equipamentos_de_MediaAo_e_Controlde/Equipamentos/maquinas_universais_de_ensaios_dl_3000/10868_962_5/>. Acesso em: 15 jun. 2013.

DINO. **A história da soldagem e sua evolução para os dias atuais**. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/a-historia-da-soldagem-e-sua-evolucao-para-os-dias-atuais,c07e70e81e9395a88218eea4301aa43bw9wbfnab.html>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

ESAB. **Origo™ Arc 256 / 406 / 426 / 456**. Disponível em: <<https://www.asteco.com.co/images/imagenes/productos/equipos/fichastecnicas/I-EquiposparaSoldaryCortarporArcoElectrico/ELECTRODO-SMAW/ESAB/FichaTecnicaOrigoArc256-406-426-456.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2008.

FORTES, Cleber. **Apostila de eletrodos revestidos**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2005.

INFOSOLDA. **Era moderna**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/fundamentos/53-era-moderna>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

INFOSOLDA. **Processo com eletrodo revestido - fundamentos**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/164-processo-com-eletrodo-revestido-fundamentos>>. Acesso em: 19 fev. 2013.

JOAQUIM, Roberto; RAMALHO, José. **Equipamentos para soldagem com eletrodo revestido**. Disponível em: http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=823>. Acesso em: 09 nov. 2018.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Minas Gerais: Ufmg, 2011. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgtMUAL/soldagem-fundamentos-tecnologia-villani-modenese-bracarense-3a-ed-pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

MEDEIROS, Vítor Silva. **DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM MAIS ADEQUADOS PARA UNIÃO DE TUBOS DE PAREDE FINA PELO PROCESSO DE ELETRODO REVESTIDO**. 2018. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20556/3/Determina%C3%A7%C3%A3oPar%C3%A2metrosSoldagem.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

METALICA, Portal. **Processos de soldagem**. Disponível em: <http://wwwo.metalica.com.br/processos-de-soldagem>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico: soldagem I**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, fevereiro de 2012.

NEVES, Alisson Caetano. **Análise comparativa dos eletrodos revestidos E6010 e E6013 em aço SAE 1020**. 2013. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Técnico em Eletromecânica, Senai, Santo Antônio da Platina, 2013. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgtWVYAF/analise-comparativa-dos-eletrodos-revestidos-e6010-e6013>>. Acesso em: 1 nov. 2018.

RISITEC. **Cortadora**. Disponível em: <http://www.risitec.com.br/cortadora.html>>. Acesso em: 22 jun. 2014.

SARNI, Mírian Isabel Junqueira. **Estudo da soldagem GMAW convencional e pulsada de aço estrutural temperado e revenido utilizando eletrodo de alma metálica**. 2011. 81 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/96485>>.

SILVA, Tatyelle Cavalcante; PEREIRA, Warley Augusto. **COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CORDÃO DE SOLDA ENTRE SOLDAGEM TIG E ELETRODOS REVESTIDOS EM AÇO INOX**. Rio Verde, 2016.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: Processos e metalurgia. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992.