



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ARTUR SÁVIO DA CUNHA CARDINS

**ANÁLISE DE TENACIDADE AO IMPACTO EM JUNTA SOLDADA COM ELETRODOS
REVESTIDOS DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES EM AÇO ESTRUTURAL**

MOSSORÓ - RN

2017

ARTUR SÁVIO DA CUNHA CARDINS

**ANÁLISE DE TENACIDADE AO IMPACTO EM JUNTA SOLDADA COM
ELETRODOS REVESTIDOS DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES EM AÇO
ESTRUTURAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi – Árido - UFERSA, Campus Mossoró, para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga – DCAT/UFERSA.

MOSSORÓ-RN

2017

© 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 tornar-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.

C267a Cardins, Artur Sávio da Cunha.
ANÁLISE DE TENACIDADE AO IMPACTO EM JUNTA
SOLDADA COM ELETRODOS REVESTIDOS DE DIFERENTES
COMPOSIÇÕES EM AÇO ESTRUTURAL / Artur Sávio da
Cunha Cardins. - 2017.
44 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira
Fraga .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2017.

1. Soldagem. 2. Eletrodo Revestido. 3.
Tenacidade ao Impacto. 4. Aço ASTM A36. I. Fraga ,
Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira , orient. II.
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.

ARTUR SÁVIO DA CUNHA CARDINS

**ANÁLISE DE TENACIDADE AO IMPACTO EM JUNTA SOLDADA COM ELETRODOS
REVESTIDOS DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES EM AÇO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi – Árido - UFERSA,
Campus Mossoró, para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

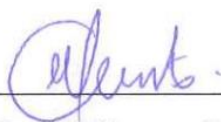
Aprovado em: 19/05/2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga - UFERSA

Orientador



Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante – UFERSA

Primeiro Membro



Prof. Gutemberg Ferreira Diniz – UFERSA

Segundo Membro

DEDICATÓRIA

Aos meu pais, Bonifácio e Maria
Edite, meus irmãos Jitana e Raul
que me apoiaram e me ajudaram
durante todo esse tempo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força, não só para conseguir meus objetivos, mas por ter me ajudado a levantar quando não conseguia cumpri-los.

Aos meus pais, Bonifácio Cardins Filho e Maria Edite da Cunha Cardins, pelo apoio, incentivo e amor incondicional que me deram durante toda essa jornada que se encerra, e tenho certeza absoluta que vão continuar a me apoiar na que segue.

Aos meus irmãos, Jitana Sára da Cunha Cardins e Raul Sérvulo da Cunha Cardins, que sempre me motivaram a continuar seguindo em frente.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, seu corpo docente, direção e administração que me proporcionaram uma formação de qualidade.

Ao meu orientador Francisco Edson Nogueira Fraga, pelo grande suporte, compreensão, correções construtivas e incentivos a mim dados.

A todos os monitores, que foram de fundamental importância para a aprovação de várias disciplinas.

Aylson que tanto me ajudou no desenvolvimento deste trabalho.

Yago Leite que me auxiliou com as atividades práticas deste projeto.

Amigos e colegas que me ajudaram direta ou indiretamente.

Todos os familiares que sempre me apoiaram e torceram por mim durante toda minha jornada.

A Luana Talita por ter me motivado, ajudado e acompanhado durante tantos anos de curso.

"Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Porém, não se trata de quão forte pode bater, se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada." Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar

(Rocky Balboa)

RESUMO

A soldagem é um processo que envolve a união de metais por meio da fusão, onde são necessárias elevadas temperaturas para sua execução. A grande quantidade de metais de solda presentes no mercado pode dificultar sua seleção, podendo resultar em um cordão de solda inadequado para uma determinada aplicação. Isso mostra a importância em estudar os diferentes tipos de metais de adição com objetivo de obter as melhores propriedades mecânicas da junta soldada. O material de base usado para a execução desse estudo foi o aço ASTM A36, sendo é um aço considerado de baixo carbono, que apresenta uma boa soldabilidade e é usado em construções estruturais e fabricação de equipamentos. A tenacidade ao impacto é uma das principais propriedades requeridas por um aço para que se evitem falhas repentinas de estruturas ou peças mecânicas. Tal propriedade pode ser estudada através do ensaio de impacto com corpos de prova Charpy-V que é padronizado pela norma ASTM E23. Sendo considerado no estudo que o material de adição possuir maior tenacidade ao impacto do que o material de base.

Palavras – Chave: Soldagem, Eletrodo Revestido, Tenacidade ao Impacto, Aço ASTM A36.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seções de microestruturas presentes em aços estruturais A-36	13
Figura 2: Classificação de eletrodos revestidos para aço carbono	14
Figura 3: Crescimento epitaxial do metal de solda perto da ZAC.	17
Figura 4: Crescimento competitivo na zona de fusão.....	18
Figura 5: Variação da forma da poça de fusão aumentando a velocidade de soldagem: (a) forma elíptica, (b) forma de gota.....	19
Figura 6: Fluxo de fabricação dos corpos de prova.....	23
Figura 7: Barra de aço A-36	24
Figura 8: Junta de topo com ângulo de chanfro 60°	25
Figura 9: Pannel da fonte de energia	25
Figura 10: a) Fonte de energia; b) Soldagem das juntas de topo.....	26
Figura 11: Junta soldada e pós usinagem	27
Figura 12: Retirada dos corpos de prova Charpy's.....	27
Figura 13: Corte das extremidades defeituosas.	28
Figura 14: Corpo de prova Charpy	29
Figura 15: Máquina para ensaio de impacto - capacidade 300 Joules.....	29
Figura 16: a) Colpaert b) Metalografia do material analisado.....	31
Figura 17. Defeito em corpos de prova do eletrodo E6013.....	35
Figura 18. Falha em corpos de prova do eletrodo E6013.....	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Resultados da média com desvio padrão dos ensaios Charpy	33
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ASTM A36.....	12
Tabela 2. Valores obtidos no ensaio de impacto, média e desvio padrão.	32
Tabela 3. Teste "t-student" para eletrodos de soldagem como parâmetro.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Resultados da média com desvio padrão dos ensaios Charpy	33
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1	AÇO ESTRUTURAL ASTM A-36	12
3.2	INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELETRODO NAS PROPRIEDADES DO METAL DE SOLDA	13
3.2.1	Eletrodo básico E7018	14
3.2.2	Eletrodo celulósico E6010	15
3.2.3	Eletrodo rutílico E6013	15
3.3	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA DOS ELETRODOS	16
3.4	INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DOS GRÃOS SOLIDIFICADOS NA POÇA DE FUSÃO SOBRE A TENACIDADE	16
3.5	INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	19
3.6	MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR OS RESULTADOS	21
3.6.1	Teste t-Student	21
3.6.2	Metodologia dos testes paramétricos	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL DE BASE E PREPARAÇÃO DAS JUNTAS	24

4.2	A SOLDAGEM DAS JUNTAS DE TOPO	25
4.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CHARPY'S	26
4.4	APLICAÇÃO DO TESTE DE HIPÓTESE	30
5	RESULTADOS E DISCURSSÕES	31
5.1	METALOGRAFIA.....	31
5.2	ENSAIO DE IMPACTO.....	32
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICAS.....	33
5.4	ANÁLISE DOS DEFEITOS NO CORDÃO DE SOLDA	34
6	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, observou-se um grande crescimento em estruturas soldadas nas mais diversas áreas da engenharia, uma vez que essas estruturas são geralmente empregadas em situações de alta responsabilidade. Qualquer erro devido a parâmetros de projeto inadequados pode colocar em risco a vida de pessoas e acarretar grandes perdas econômicas.

Segundo Marques et al. (2013) a definição de soldagem é dada como sendo um método de união metálica que consiste na utilização de forças microscópicas, interatômicas e intermolecular onde a união ocorre pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, ou destes com um material intermediário adicionado à junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas. Nesse trabalho será estudado esse material intermediária, também conhecido como material de solda ou de adição.

A grande quantidade de materiais de adição para soldagem presente no mercado pode dificultar sua escolha, podendo inibir bons resultados de resistência e tenacidade ao impacto do cordão de solda para uma determinada aplicação. Devido isso, é interessante estudar quais materiais de adição apresentam melhores resultados de tenacidade ao impacto na soldagem de uma determinada estrutura metálica.

Dentre a grande variedade de aços estruturais presentes no mercado, será aprofundado o estudo das propriedades mecânicas, especificamente a tenacidade, do aço estrutural ASTM A-36, bem como sua afinidade ao uso de diferentes eletrodos do ponto de vista da tenacidade ao impacto, onde serão utilizados três eletrodos: o E6010, E6013 e o E7018 que são comumente encontrados no mercado. Para determinar a tenacidade, propriedade mecânica importante para prever a fratura frágil, utilizando o ensaio de impacto Charpy a partir de corpos de provas com juntas soldadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral, analisar a influência do uso de diferentes materiais de adição em uma junta na determinação da tenacidade do material utilizando o metal de base aço A36 soldada por eletrodo revestido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e escrever sobre as propriedades do aço A-36;
- Caracterizar o aço A-36 através de metalografia;
- Quantificar através de ensaio de impacto a influência de diferentes metais de adição para uma junta soldada do aço A-36;
- Relacionar a influência dos diferentes matérias de adição (E6010, E6013 e o E7018) para com a tenacidade do material.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 AÇO ESTRUTURAL ASTM A-36

De acordo com Colpaert (2008), os aços estruturais são de médio e baixo carbono (em torno de até 0,25%) ligado ao manganês com teores de fósforo e enxofre controlados. São fabricados laminado ou até mesmo por forjamento, visto que é um aço produzido em grande escala. São usados em aplicações estáticas como vergalhões para concreto, barras, construção em geral.

A classificação ASTM (*American Society for Testing and Materials*) A-36 é a mais clássica encontrada no mercado, onde apesar de podermos identificar suas propriedades mecânicas, dificilmente conseguiríamos determinar para qual finalidade o aço é empregado especificamente.

Callister (2012) considera o aço A36 um aço carbono comum com baixo teor de carbono, sendo bastante utilizado na construção civil, como pontes e edificações;

Colpaert (2008) afirma que uns dos principais requisitos de propriedades para aplicação do aço estrutural é:

Tenacidade: se tratando de aplicação em estrutura estática, a prevenção da fratura rápida requer uma maior atenção para evitar inesperadas situações de riscos.

Soldabilidade: deve garantir uma mínima modificação no aço após passar por um processo de soldagem, garantindo assim boa propriedade após uma junta soldada.

Custo mínimo.

A Tabela 1 mostra a composição química do aço ASTM A36.

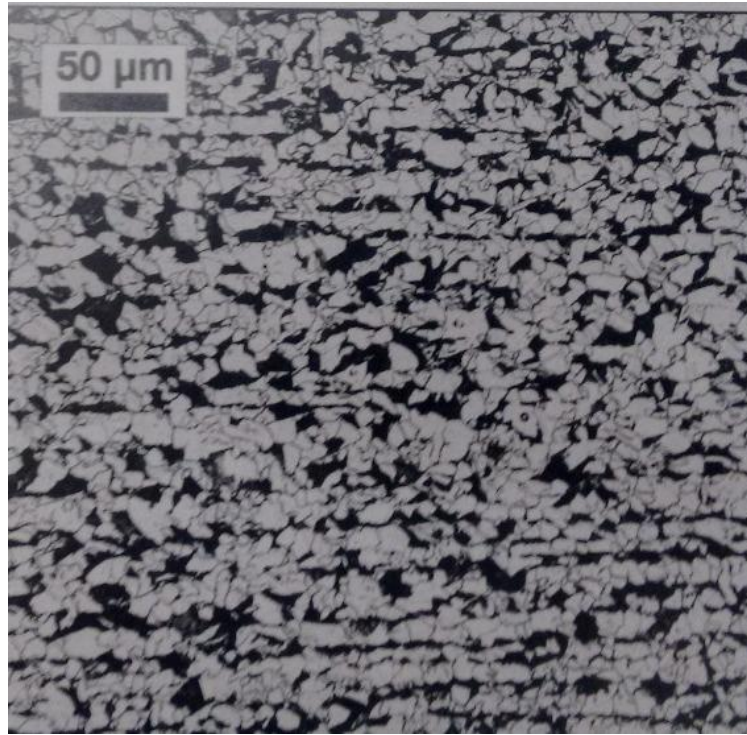
Tabela 1 - Composição química do aço ASTM A36

Material	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Ap	S	Ti	Nb
ASTM A36	0,13	0,2	0,98	0,024	0,02	0,01	0,36	0,12	0,002	0,001

Fonte: Cavalcante (2014)

A Figura 1 apresenta a metalografia de um aço estrutural A-36.

Figura 1: Seções de microestruturas presentes em aços estruturais A-36



Fonte: Colpaert (2008)

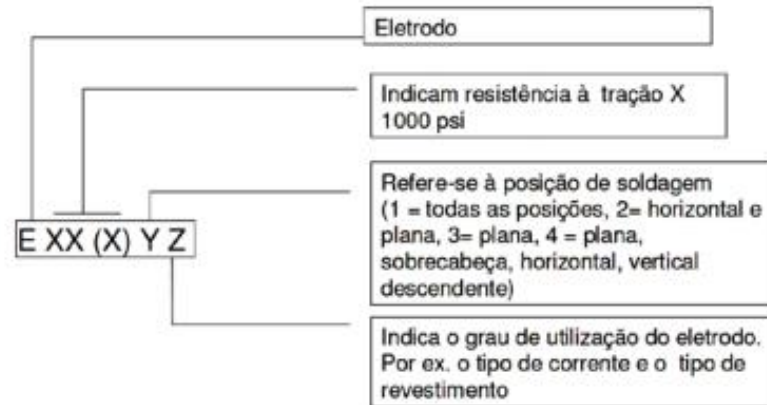
Estão presentes na microestrutura porções de ferrita equiaxial e perlita fina.

3.2 INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELETRODO NAS PROPRIEDADES DO METAL DE SOLDA

Existe uma diversidade de eletrodos revestidos com as mais diversas propriedades que influenciam tanto no processo de soldagem como nas propriedades da junta soldada. No presente trabalho foram utilizados três eletrodos com diferentes propriedades, porém com o mesmo diâmetro de 3,25 mm.

A Figura 2 apresenta a classificação dos eletrodos revestidos para aço carbono.

Figura 2: Classificação de eletrodos revestidos para aço carbono



Fonte: ESAB – Apostila de Eletrodos Revestidos.

3.2.1 Eletrodo básico E7018

A partir da apostila da ESAB de metalurgia da soldagem, os eletrodos E6013 também contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo - TiO_2) em seu revestimento. Eles são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. O revestimento contém compostos de potássio suficientes para estabilizar o arco na soldagem com corrente alternada (CA).

Os eletrodos de classificação E6013 foram originalmente desenvolvidos para apresentar baixa penetração e cordões de solda planos. Essas características permitiram a soldagem de chapas finas com esses eletrodos. Hoje em dia muitos eletrodos E6013 são empregados no lugar de eletrodos E6012 graças ao arco mais suave, menos respingos e superfície mais uniforme do cordão. Seu limite de resistência pode variar de 480 a 520 MPa. Sua faixa de corrente de utilização é de 88 a 160 A. E a proporção de seus elementos de liga são de 0,06% de C, 0,22% de Si e 0,37% de Mn.

3.2.2 Eletrodo celulósico E6010

De acordo com a apostila da ESAB de metalurgia da soldagem, os eletrodos E6010 foram desenvolvidos com o intuito de proporcionar uma atividade de soldagem e um metal de solda melhor. O revestimento é, predominantemente, uma pasta de celulose modificada com silicatos minerais, desoxidantes e silicato de sódio. A quantidade de revestimento desses eletrodos é pequena, cerca de 10-12% em peso. O arco tem uma penetração profunda e, com manipulação adequada do arco, cordões de solda de boa qualidade podem ser depositados em todas as posições. Como a massa de celulose se queima durante a soldagem, a escória é mínima e é normalmente de fácil remoção.

Esse eletrodo deve ser preferencialmente usado na soldagem de juntas de aço doce na posição vertical com abertura de raiz. Seu limite de resistência pode variar de 470 a 500 MPa. Sua faixa de corrente de utilização é de 80 a 140 A. E a proporção de seus elementos de liga são de 0,09% de C, 0,10% de Si e 0,30% de Mn.

3.2.3 Eletrodo rutilico E6013

A partir da apostila da ESAB de metalurgia da soldagem, os eletrodos E6013 também contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo - TiO_2) em seu revestimento. Eles são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. O revestimento contém compostos de potássio suficientes para estabilizar o arco na soldagem com corrente alternada (CA).

Os eletrodos de classificação E6013 foram originalmente desenvolvidos para apresentar baixa penetração e cordões de solda planos. Essas características permitiram a soldagem de chapas finas com esses eletrodos. Hoje em dia muitos eletrodos E6013 são empregados no lugar de eletrodos E6012 graças ao arco mais suave, menos respingos e superfície mais uniforme do cordão. Seu limite de resistência pode variar de 480 a 520 MPa. Sua faixa de corrente de utilização é de 88 a 160 A. E a proporção de seus elementos de liga são de 0,06% de C, 0,22% de Si e 0,37% de Mn.

3.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA DOS ELETRODOS

As propriedades mais importantes que podem ser melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga são a dureza, a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à corrosão. Dentre os eletrodos usados nesse trabalho, os principais elementos de liga encontrados são o carbono (C), o manganês (Mn) e o silício (Si).

O carbono é o elemento mais eficaz, mais empregado e de menor custo disponível para aumentar a dureza e a resistência dos aços. Uma liga contendo até 2,0% de carbono em combinação com o ferro é denominada aço, enquanto que a combinação com teor de carbono acima de 2,0% é conhecida como ferro fundido. Embora o carbono seja um elemento de liga desejável, teores altos desse elemento podem causar problemas; por isso, é necessário um cuidado especial quando se soldam aços de alto teor de carbono e ferro fundido.

A função mais comum do silício nos aços é como agente desoxidante. Normalmente aumenta a resistência dos aços, mas quantidades excessivas podem reduzir a ductilidade. Em consumíveis de soldagem é algumas vezes adicionado para aumentar a fluidez do metal de solda.

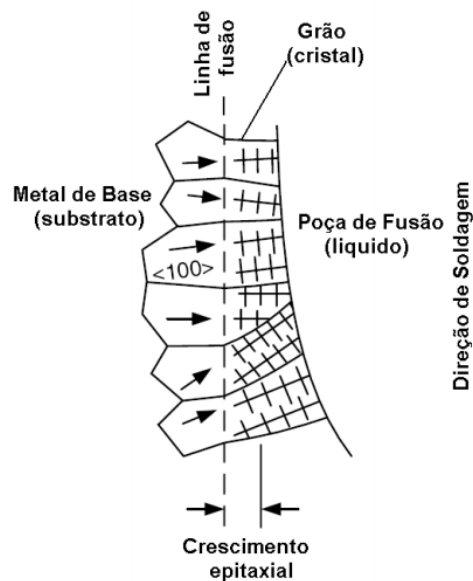
O manganês em teores até 1,0% está normalmente presente em todos os aços de baixa liga como agente desoxidante ou dessulfurante. Isso significa que ele prontamente se combina com o oxigênio e o enxofre para neutralizar o efeito indesejável que esses elementos possuem quando estão em seu estado natural. O manganês também aumenta a resistência à tração e a temperabilidade dos aços.

3.4 INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DOS GRÃOS SOLIDIFICADOS NA POÇA DE FUSÃO SOBRE A TENACIDADE

Segundo Modenesi (Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas, 2011), a perda de tenacidade na zona fundida está associada com a formação de estruturas de granulação grosseira durante a soldagem com elevado aporte térmico. Porém, para entender sobre a influência na morfologia dos grãos, se faz necessário a compreensão da solidificação da poça de fusão durante o resfriamento do cordão de solda.

Kou mostra que a solidificação do cordão de solda tem início a partir da zona parcialmente fundida. O crescimento ocorre com a mesma orientação cristalina dos grãos da zona parcialmente fundida, denominado crescimento epitaxial. A força motriz necessária para a nucleação dos novos grãos é baixa. Portanto, cada um desses novos grãos se solidifica, ao longo da mesma direção cristalográfica dos grãos da zona afetada pelo calor (ZAC). A Figura 3 apresenta o crescimento epitaxial.

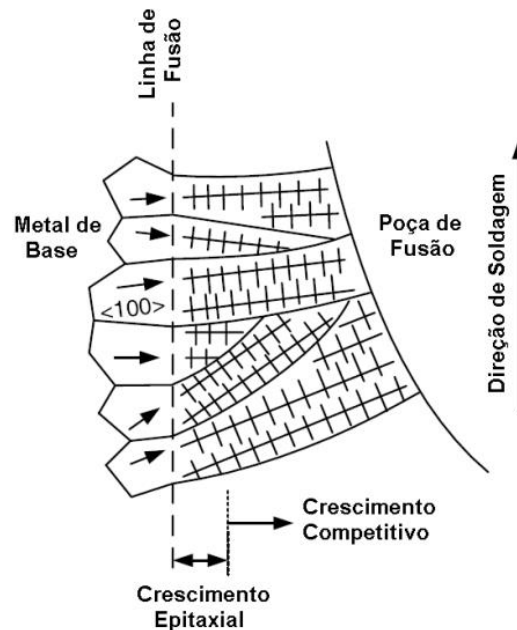
Figura 3: Crescimento epitaxial do metal de solda perto da ZAC.



Fonte: Welding Metallurgy, p145-167, 2002.

Após o início da solidificação em direção ao centro da zona de fusão, o crescimento dos grãos prossegue na direção paralela ao gradiente de temperatura máxima, favorecendo um crescimento competitivo de grãos. Os grãos com orientação favorável à direção do gradiente de temperatura máxima apresentam maior crescimento em relação, aos grãos que coincidem com direções menos favoráveis. A Figura 4 apresenta o crescimento competitivo.

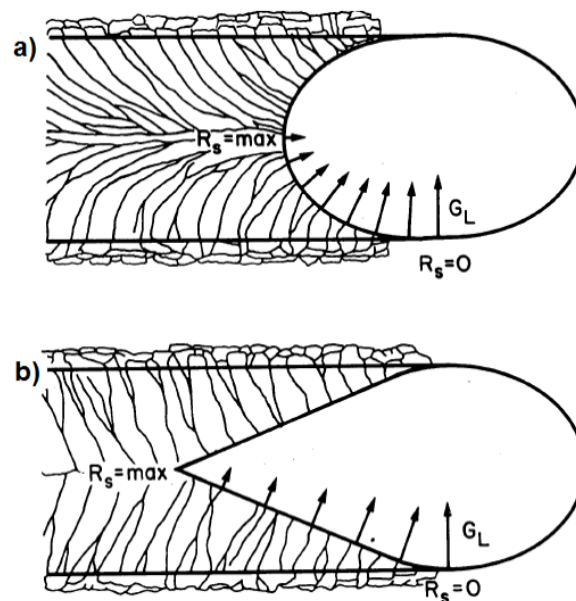
Figura 4: Crescimento competitivo na zona de fusão.



Fonte: Welding Metallurgy, p145-167, 2002.

Vários parâmetros podem influenciar na morfologia dos grãos da poça de fusão, porém, a velocidade de soldagem possui uma importância maior. A poça de fusão apresenta uma forma de gota em altas velocidades de soldagem e um formato elíptico em baixas velocidades de soldagem. Para soldagens com elevadas velocidades, é esperado o crescimento de grãos colunares que irão crescer sem ramificações até o centro da poça de fusão, os demais grãos crescerão formando uma parede no centro do cordão, proporcionando um maior índice de fraturas juntamente com a redução de tenacidade devido uma maior quantidade de grãos grosseiros. Para baixas velocidades os mesmos crescem curvos na direção do gradiente de temperatura máxima, onde os grãos sempre encontraram ótimas condições para o seu crescimento, possui assim uma microestrutura mais refinada de excelente resistência a formação de trincas, portanto uma melhor tenacidade. A Figura 7 mostra a variação da forma da poça de fusão com o aumento da velocidade de soldagem, onde também se pode observar no centro do cordão que o gradiente térmico é menor que na margem do cordão, e a velocidade de solidificação é maior.

Figura 5: Variação da forma da poça de fusão aumentando a velocidade de soldagem: (a) forma elíptica, (b) forma de gota.



Fonte: International Metallurgical Reviews, 1975.

Estas condições são aplicadas para metais puros com baixa quantidade de soluto. Para ligas metálicas a velocidade de solidificação é aumentada devido ao super resfriamento constitucional.

De acordo com Ohno, o super resfriamento constitucional para ligas metálicas, se dá quando surgem diferenças de composição química entre as partes líquida e sólida durante o processo de solidificação. Posteriormente, ocorre um acúmulo de soluto rejeitado pela parte recém solidificada frente à interface sólido líquido. Neste ponto, o líquido apresentará uma concentração de soluto maior do que a concentração inicial da liga, diminuindo ainda a temperatura de solidificação.

Não é apenas a forma da poça de fusão que é modificada, mas também a morfologia dos grãos, não só havendo grãos colunares, como também se formarão a partir da nucleação heterogênea grãos equiaxiais no centro da poça de fusão.

3.5 INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Uma junta soldada é submetida a temperaturas que dependem da energia de soldagem e temperatura de pré-aquecimento. Marques (2009) mostra que para calcular a energia de soldagem absorvida por uma junta, é dada pela Equação 1:

$$E_s = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

E_s = Energia de soldagem em (J/mm)

η = Eficiência térmica do processo

V = Tensão no arco (V)

I = Corrente de soldagem em (A)

v = Velocidade de soldagem (mm/s)

Analisando a equação observa-se que qualquer mudança na corrente de soldagem ou na tensão no arco ocasionará uma alteração proporcional da energia de soldagem, já a velocidade de soldagem acarretará em uma mudança inversamente proporcional dessa energia. Ou seja, a mudança de cada uma dessas propriedades irá influenciar no quanto de calor que a junta vai absorver no fim do processo, e é a partir da quantidade desse calor absorvido que é possível determinar a energia de soldagem. E assim a tendência de suas propriedades mecânicas.

De acordo com Filho (2008 apud RODRIGUES, 2011) quanto maior for o aporte de calor (energia de soldagem) inserido em uma junta soldada, maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, portanto, maior será a poça de fusão e mais larga a zona termicamente afetada. Isso ocasionará o maior crescimento dos grãos, tanto na ZAC como na poça de fusão, gerando assim grãos grosseiros com propriedades mecânicas (Tenacidade, resistência a tração e dureza) indesejadas.

Por outro lado, a utilização de baixos valores da energia de soldagem pode provocar falhas de penetração na junta soldada assim como elevadas velocidades de resfriamento, o que, em certas ocasiões pode ser prejudicial à junta soldada.

O ideal é buscar valores intermediário específicos para cada combinação de eletrodo revestido e material de base.

Conforme Marques et al. (2009 apud RODRIGUES, 2011) nem sempre existe uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na peça, pois os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de deslocamento) afetam de modo diferente a

intensidade do arco e o rendimento térmico do processo. Assim, embora utilizando o mesmo processo e energia de soldagem, é possível obter soldas com propriedades completamente diferentes pela variação individual dos parâmetros de soldagem.

3.6 MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR OS RESULTADOS

Os testes de hipótese constituem uma forma de inferência estatística. Hipóteses são afirmações sobre parâmetros populacionais e são testadas para ver se são consideradas verdadeiras ou não.

Esses testes podem ser paramétricos e não paramétricos. Um teste não paramétrico testa outras situações que não parâmetros populacionais. Estas situações podem ser relacionamentos, modelos, dependência ou independência e aleatoriedade. Já os testes paramétricos envolvem parâmetros populacionais.

3.6.1 Teste t-Student

O modelo estatístico usado para a análise de alguns dados desse trabalho foi o teste de hipótese *t-Student* no qual pode ser conduzido para comparar com uma população, duas amostras pareadas ou duas amostras independentes.

Esse teste usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula quando a estatística de teste (t) segue uma distribuição *t-Student*.

Essa premissa é normalmente usada quando a estatística de teste, na verdade, segue uma distribuição normal, mas a variância da população é desconhecida. Nesse caso, é usada a variância amostral e, com esse ajuste, a estatística de teste passa a seguir uma distribuição *t-Student*.

3.6.2 Metodologia dos testes paramétricos

Essa é a metodologia usada no desenvolvimento de qualquer teste de hipótese paramétrico:

I. Formular a hipótese nula (H_0)

$$H_0: \theta = \theta_0 \quad \text{Equação (2)}$$

- Expressar em valores aquilo que deve ser testado;
- Esta hipótese é sempre de igualdade;
- Deve ser formulada com o objetivo de ser rejeitada.

II. Formular a hipótese alternativa (H_1)

(Testes simples)

$$H_1: \theta = \theta_1 \quad \text{Equação (3)}$$

III. Definir um valor crítico (α)

- Isto envolve definir um ponto de corte a partir do qual a hipótese nula será rejeitada (aceita a hipótese alternativa).
- Esta hipótese é de fato a expressão daquilo que se quer provar.

IV. Calcular a estatística teste

- A estatística teste é obtida através dos dados amostrais, isto é, ela é a evidência amostral;
- A forma de cálculo depende do tipo de teste envolvido, isto é, do modelo teórico ou modelo de probabilidade.

V. Tomar uma decisão

- A estatística teste e o valor crítico são comparados e a decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese nula é formulada;
- Se for utilizado um software estatístico pode-se trabalhar com a significância do resultado (p-value) ao invés do valor crítico.

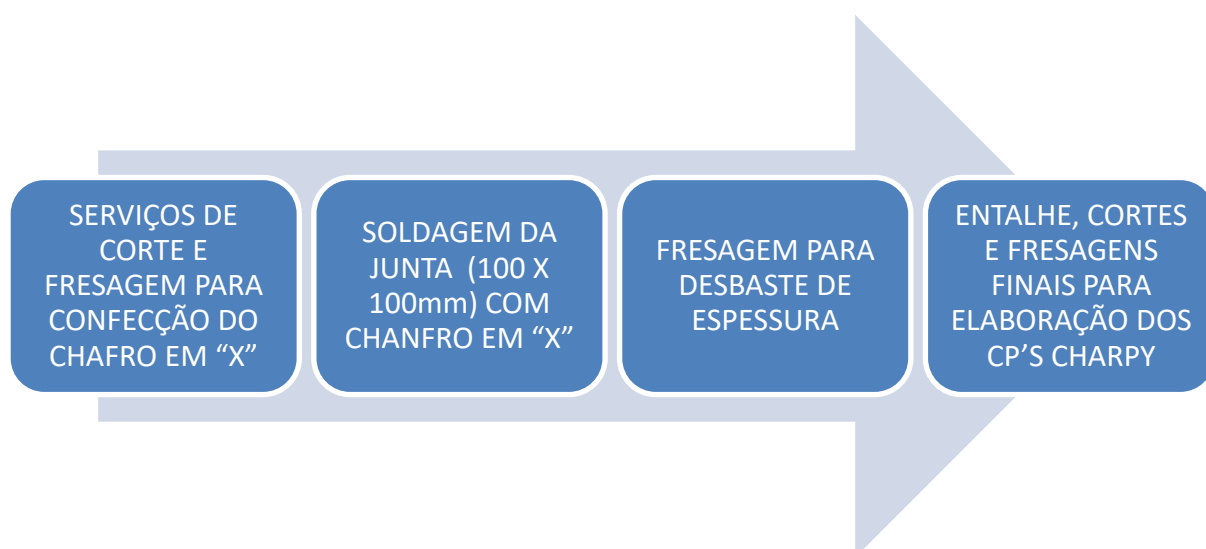
VI. Formular uma conclusão

- Expressar em termos do problema (pesquisa) qual foi a conclusão obtida;
- Não esquecer que todo resultado baseado em amostras está sujeito a erros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação dos corpos de prova a ser analisado foi realizada em parceria com a Universidade Feral Rural do Semi Árido – UFERSA- e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI-RN. Para fabricação dos corpos de prova seguiu-se o fluxo de acordo com a Figura 6.

Figura 6: Fluxo de fabricação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2017)

Afim de garantir maior confiabilidade aos resultados do trabalho, definiu-se um número satisfatório de amostras.

Em busca de excelência na fabricação dos corpos de prova, todas as soldas e usinagens foram executadas pelo SENAI-RN, no qual é considerado um centro de referência para tais serviços. Exceto pelos entalhes em “V” dos corpos de prova Charpy que foram executados no laboratório de usinagem da UFERSA.

Para um estudo dessa natureza, se faz necessário uma ótima execução da soldagem para atender todos os parâmetros exigidos e assim obter bons resultados quantitativos de propriedades mecânicas. Por isso se faz necessário a habilidade de um bom soldador

O método adotado para caracterização da influência da tenacidade no material de solda foi o uso de diferentes eletrodos (E7018, E6010 e E6013). Mantendo a corrente de soldagem constante à 130A.

Após confecção dos corpos de provas, foi realizado o ensaio Charpy nas instalações da UFERSA e análises estatísticas.

4.1 ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL DE BASE E PREPARAÇÃO DAS JUNTAS

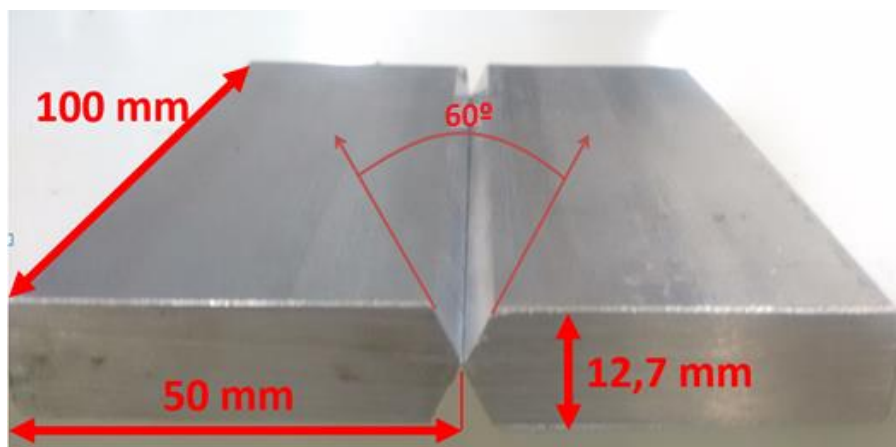
As juntas de topo de aço A-36 foram preparadas no SENAI-RN. Inicialmente, foi realizado serviço de corte e preparação da junta deixando-as com medida de 100 x 100 milímetros, sendo duas barras de 100mm x 50mm x 12,7mm uma junta (Figura 7). Seguidamente, as mesmas foram usinadas para elaboração do chanfro em “X” com ângulo de 60°, conforme Figura 8.

Figura 7: Barra de aço A-36



Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 8: Junta de topo com ângulo de chanfro 60°



Fonte: Autoria Própria (2017)

Ao todo, foram preparadas 9 juntas com ângulo de chanfro de 60° para serem preenchidas com solda. Foram usadas 3 juntas para cada eletrodo.

4.2 A SOLDAGEM DAS JUNTAS DE TOPO

Como o processo de soldagem com eletrodo revestido exige uma maior habilidade do soldador, os serviços foram realizados no SENAI-RN, que é considerado um centro de referência, garantindo assim qualidade e padronização em todas as amostras.

A fonte de energia utilizada nos fornece valores de corrente e tensão que foram registradas no momento da operação de soldagem, Ver Figura 9.

Figura 9: Painel da fonte de energia



Fonte: Autoria própria (2016)

As fontes de energia para eletrodo revestido são de corrente constante. Isso permitiu fixar um valor da corrente, mantendo a tensão constante. Apesar da energia de soldagem depender de vários fatores, é comprovado que ao variar apenas um parâmetro obtém-se uma significativa influência na energia final sobre o metal de base, refletindo diretamente nas propriedades mecânicas da junta soldada.

Figura 10: a) Fonte de energia; b) Soldagem das juntas de topo



Fonte: Autoria Própria (2017)

4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CHARPY'S

Com as soldas finalizadas, foram executados serviços de usinagem na máquina de fresa deixando toda a junta com 10mm de espessura para posterior corte e retirada dos Charpy's. Estes serviços foram realizados no SENAI-RN. A Figura 11 ilustra a soldagem finalizada e pós-serviço de usinagem na fresadora para poder iniciar os trabalhos e corte para a obtenção dos corpos de prova Charpy.

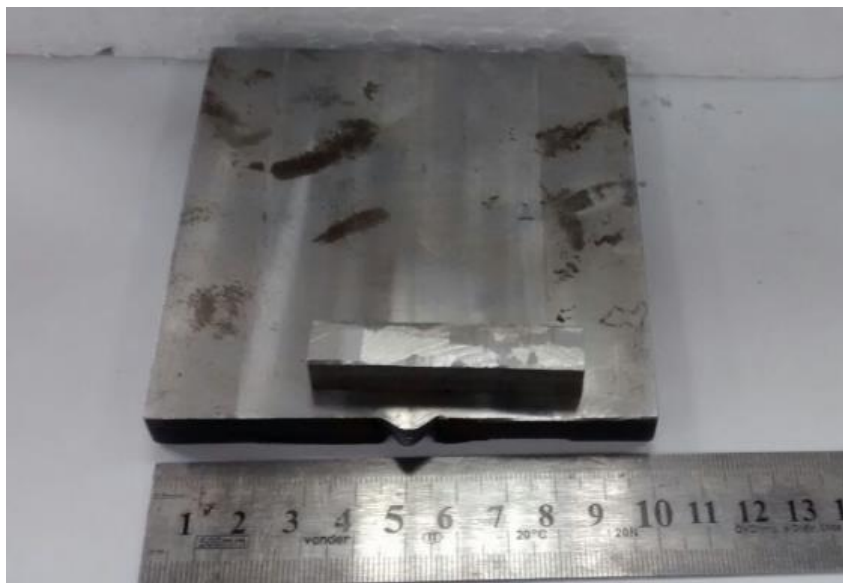
Figura 11: Junta soldada e pós usinagem



Fonte: Autoria própria (2017)

Os corpos de prova Charpy's serão necessários para determinar a tenacidade do material de solda, através do ensaio de impacto. A partir das 3 juntas soldadas de cada eletrodo de soldagem usado, foram retirados 16 corpos de provas para ensaio de impacto para cada condição de soldagem (Ver Figura 12), totalizando 48 amostras.

Figura 12: Retirada dos corpos de prova Charpy's

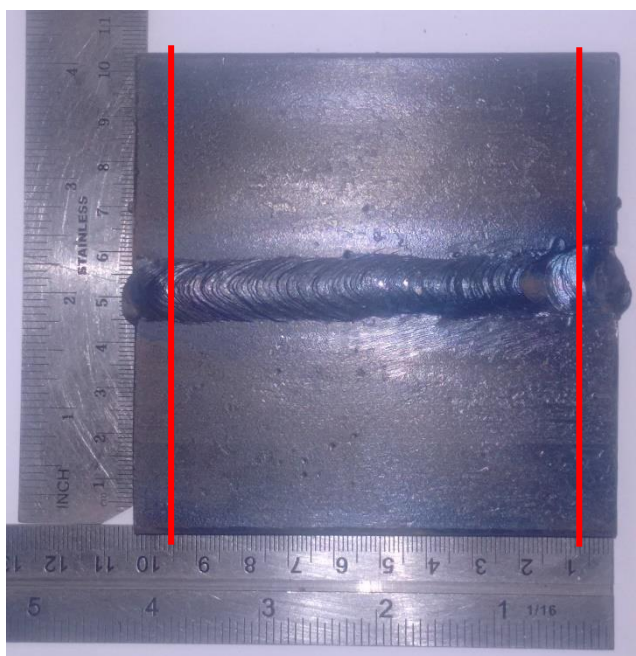


Fonte: Autoria própria (2017).

Como o presente trabalho avaliará o material de solda, antes da produção do entalhe Charpy, foi necessário a execução de uma macroscopia para a identificação do local exato do entalhe no material de solda para eletrodos de soldagem distintos.

Afim de obter melhores resultados as extremidades das juntas soldadas foram descartadas (cerca de 8 mm de cada lado), levando em consideração possíveis defeitos do processo devido a abertura e fim do arco, como falta de penetração e também o fato da peça está sem pré-aquecimento.

Figura 13: Corte das extremidades defeituosas.



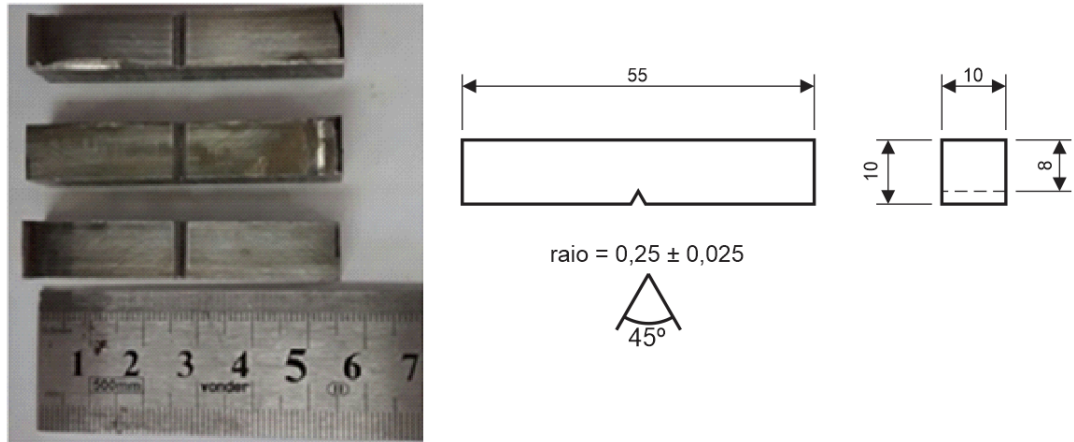
Fonte: Autoria própria (2017)

Para finalizar a preparação dos corpos de prova Charpy's, seguiu-se a norma NBR 6157 onde a mesma normatiza a determinação da resistência ao impacto em corpos de provas entalhados.

Os entalhes dos corpos de prova foram realizados no laboratório de produção mecânica da UFERSA com a máquina fresadora. O entalhe foi realizado no material de adição. Após o entalhe os corpos de provas estão prontos para realização do ensaio de impacto Charpy com dimensões especificadas pela norma.

Na Figura 14 é apresentado o resultado final da produção.

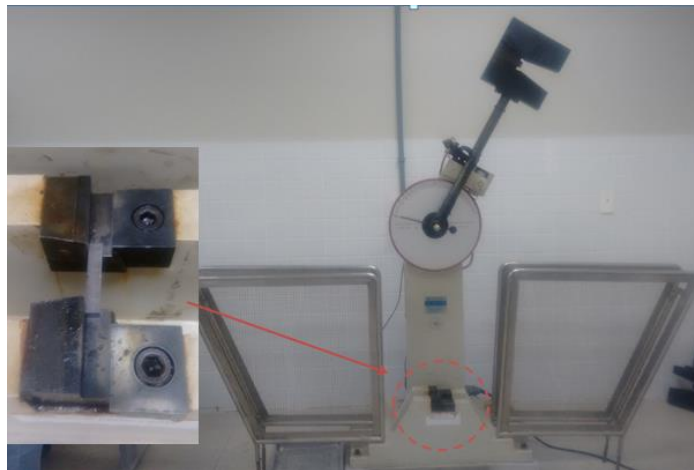
Figura 14: Corpo de prova Charpy



Fonte: Autoria própria (2017).

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados na máquina de testes modelo JB-W300 com martelo pendular de 300 Joules (Ver figura 15), seguindo a norma NBR 6157, foi analisado um total de 48 corpos de prova, comparando três eletrodos de soldagem (E6010, E6013 e E7018) e o metal de base.

Figura 15: Máquina para ensaio de impacto - capacidade 300 Joules



Fonte: Autoria própria (2017).

4.4 APLICAÇÃO DO TESTE DE HIPÓTESE

Foi utilizado um teste de hipótese “*t-Student*” entre as amostragens que possuam valores de variância similares.

Diante as médias das energias absorvidas levantadas, o teste pode verificar uma das seguintes hipóteses estabelecidas.

Hipótese nula – não existe diferença estatística entre as médias das variáveis de interesse;

Hipótese alternativa – existe diferença entre as médias das variáveis de interesse.

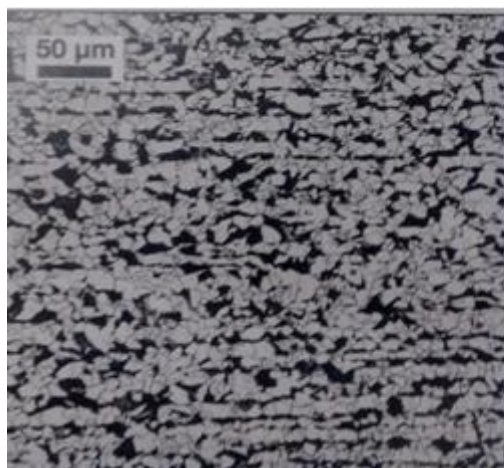
5 RESULTADOS E DISCURSÕES

No presente capítulo são apresentados os resultados que foram obtidos a partir dos ensaios de impacto, para avaliação da influência do metal de adição na tenacidade de juntas soldadas com os eletrodos revestidos E6010, E7018 e E6013. Esses resultados são comparados à tenacidade do material de base. A avaliação desses resultados é discutida inclusive estatisticamente.

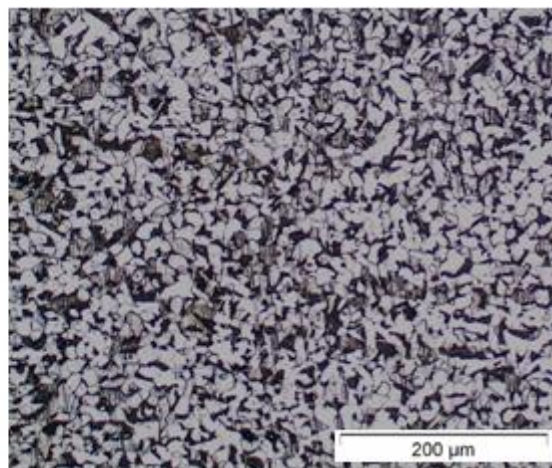
5.1 METALOGRAFIA

Inicialmente, foi realizado a metalografia do material de base que foi soldado. Ao analisar o resultado notamos que condiz com a literatura de Colpaert (2008), no qual é possível fazer comparativos entre as imagens das microestruturas, pode-se afirmar que realmente trata-se de um aço estrutural A-36 (Ver Figura 16).

Figura 16: a) Colpaert b) Metalografia do material analisado



Fonte: Colpaert (2008)



Fonte: Autoria própria (2016)

Ao comparar as imagens da Figura 16, observam-se diferenças no processo de fabricação onde a primeira foi laminada a quente, apresentando grãos de forma organizada.

As microestruturas do aço A-36 são constituídas basicamente de perlita (área escura) e ferrita.

5.2 ENSAIO DE IMPACTO

Na Tabela 1 são apresentados os valores de energia absorvida no ensaio de impacto, para cada eletrodo revestido avaliado, com respectivas média e desvio padrão.

Tabela 2. Valores obtidos no ensaio de impacto, média e desvio padrão.

	E7018	E6013	E6010	Metal de base
Corpo de prova	Energia Absorvida (Joules)			
1	209	48	120	134
2	201	58	124	158
3	164	53	103	146
4	136	50	101	162
5	188	45	112	144
6	176	65	119	138
7	108	43	122	152
8	147	48	112	148
9	170	56	115	156
10	156	48	110	-
11	222	47	-	-
12	218	48	-	-
13	162	48	-	-
14	250	50	-	-
15	208	48	-	-
16	-	75	-	-
17	172	56	-	-
Média	180	52,1	112	149
Desvio Padrão	36	8	7	9

Fonte: Autoria própria (2017)

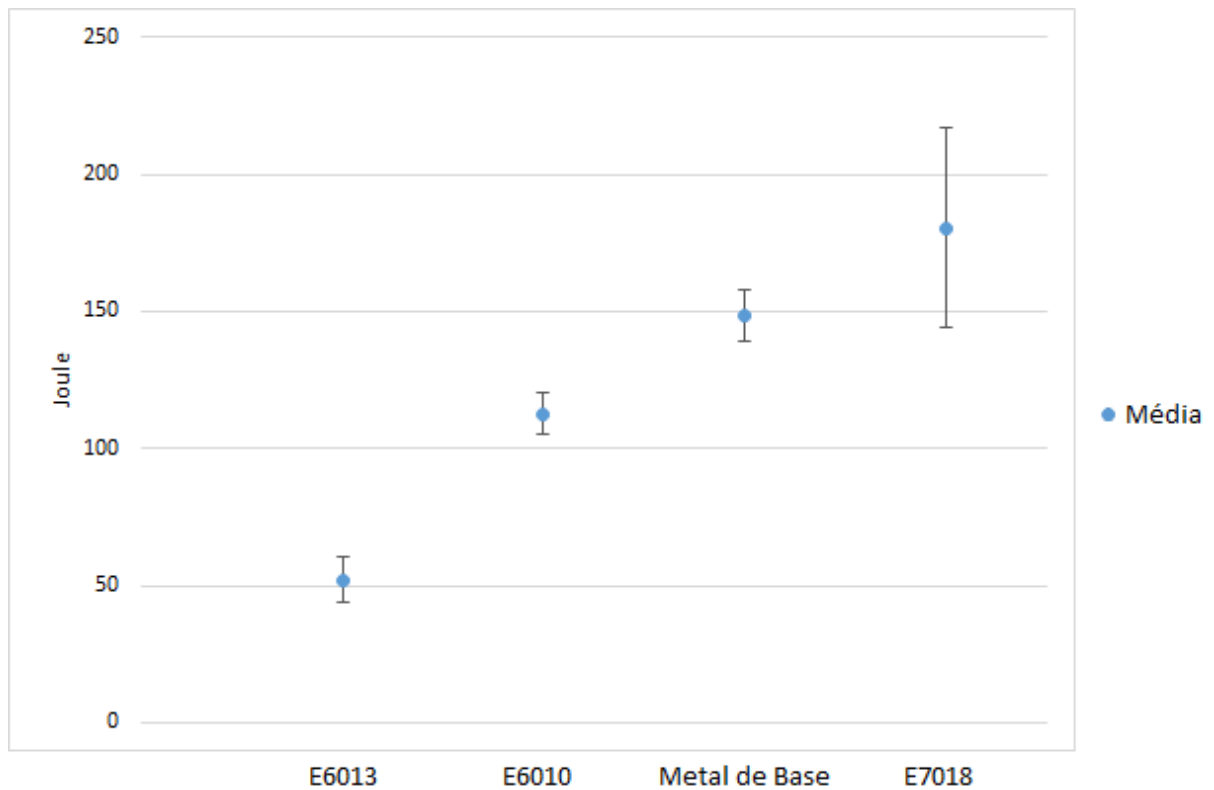
O motivo da desigualdade no número de amostras foi devido a constatação de não conformidades em alguns corpos de prova no qual foi necessário seu descarte.

O aço estrutural sem passar pelo processo de soldagem apresentou uma energia absorvida média de 149 Joules, ou seja, o processo de soldagem reduz à tenacidade ao impacto do material, cabendo ao engenheiro determinar parâmetros adequados de acordo com cada aplicabilidade.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICAS

Com os resultados obtidos, podemos quantificar as médias relacionando-as com seus respectivos desvios padrões (Ver Gráfico 1).

Gráfico 1. Resultados da média com desvio padrão dos ensaios Charpy



Fonte: Autoria Própria (2017)

É possível observar que existe diferença entre as médias dos eletrodos E6010, E6013 e do metal de base, onde já é possível garantir sem análises estatísticas a diferença de suas médias. Porém, se faz necessário uma um teste de hipótese entre o metal de base e o eletrodo E7018.

A Tabela 2 apresenta os dados para “t-student” (exportada do Excel).

Tabela 3. Teste "t-student" para eletrodos de soldagem como parâmetro

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Metal de base</i>	<i>E7018</i>
Média	148,6666667	180,4375
Variância	86	1318,6625
Observações	9	16
Hipótese da diferença de média	0	
gl	18	
Stat t	-3,312843203	
P(T<=t) uni-caudal	0,001934999	
t crítico uni-caudal	1,734063607	
P(T<=t) bi-caudal	0,003869998	
t crítico bi-caudal	2,10092204	

Fonte: Autoria própria (2017).

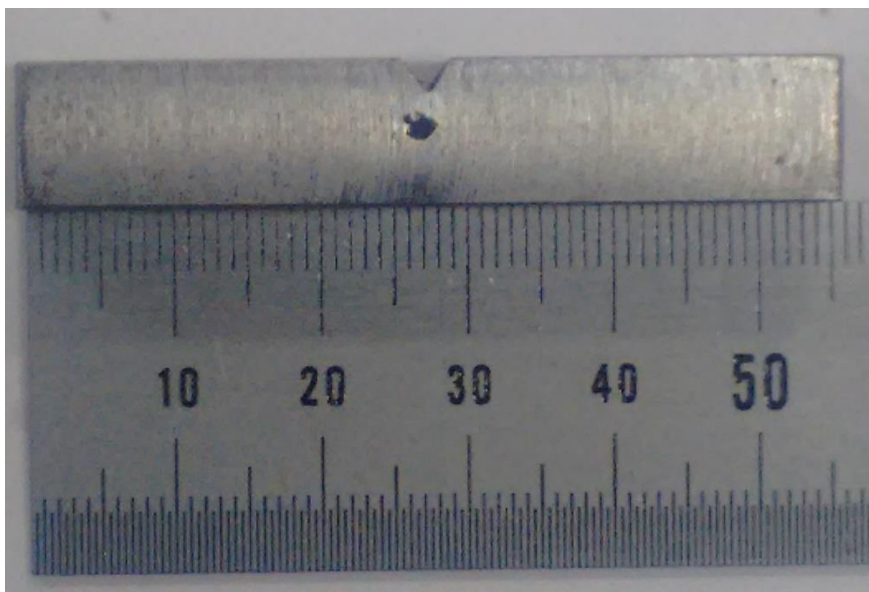
Para uma confiabilidade de 5%, como $P(T \leq t)$ bi-caudal = 0,003 < 0,05, rejeita-se a hipótese nula. Assim, aceitando a hipótese alternativa e comprovando que a energia absorvida pela junta soldada depende sim da escolha do material de solda usado, sendo assim diferentes.

As médias das energias absorvidas no material de solda e metal de base são diferentes para parâmetros variáveis, mostrando que a escolha do eletrodo influencia na tenacidade ao impacto de uma junta soldada.

5.4 ANÁLISE DOS DEFEITOS NO CORDÃO DE SOLDA

Devida a grande proximidade de propriedades mecânicas dos eletrodos E6010 e E6013 eram esperados resultados de tenacidade ao impacto similares, porém não foi o caso. Um dos motivos para isso foi a observação de vários corpos de prova da categoria do eletrodo E6013 defeituosos, como mostrado na Figura 17.

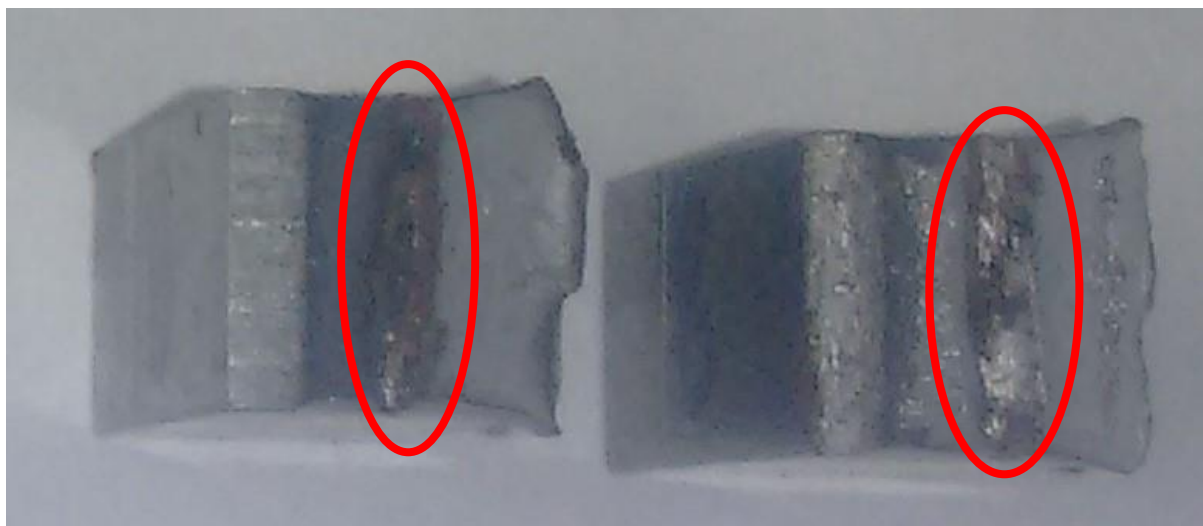
Figura 17. Defeito em corpos de prova do eletrodo E6013



Fonte: Autoria própria (2017).

Após o ensaio, observou-se falhas no interior do cordão de solda de todos os corpos de prova, como mostrado na Figura 18.

Figura 18. Falha em corpos de prova do eletrodo E6013



Fonte: Autoria própria (2017).

Trata-se de uma falta de fusão em seu interior. É possível associar esses defeitos devido as características do eletrodo rutílico E6013 de baixa penetração que ocasionou o defeito no cordão de solda.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, os resultados obtidos puderem ser avaliados segundo uma confiabilidade de 95%. As seguintes conclusões foram possíveis:

Este trabalho buscou caracterizar o aço estrutural A-36 por meio de uma análise metalográfica de sua microestrutura.

Foi identificado que os tipos de eletrodos revestidos estudados neste trabalho (E6010, E6010 e E7018), apresentam diferentes tenacidades ao impacto, sendo que estes foram soldados com condições semelhantes.

Foi quantificado que o eletrodo E7018 apresentou maior média de tenacidade o impacto em relação aos demais.

Também foi quantificado que os eletrodos E6010 e E6013 apresentaram menor tenacidade que o metal de base, juntamente que o E7018 apresentou tenacidade superior do mesmo. O metal de adição do eletrodo E6013 teve 52 J, o E6010 teve 112,5 J, o metal de base teve 149 J e o E7018 teve 180J.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. F. R. **Estudo comparativo da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI-316L utilizando os processos de soldagem TIG, FCAW e MIG/MAG.** 2008. Monografia, Centro Universitário de Itajubá, Itajubá.

BUENO, Roberto dos Santos. **Análise microestrutural de juntas soldadas de aço baixa liga.** 2010. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CALLISTER, Willian D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 7º Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.

CAMPOS, Paulo Tancredo de. **Caracterização Mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW).** Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2005.

CAVALCANTE, Fabrício José Nóbrega. **Avaliação do hidrogênio na tenacidade quase estática de uma junta soldada dissimilar constituída de aço AISI 8630M amanteigado com ER80S-D2.** 2014. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

COLPAERT, Humberto. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos.** 5º Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.

ESAB – **Apostila de Eletrodos Revestidos.** 2005.

ESAB – **Apostila de Metalurgia da Soldagem.** 2005.

GARCIA, R. V. ERICK. **Efeito da corrente de soldagem do processo tig pulsado Autógeno na microestrutura da zona fundida dos aços Inoxidáveis duplex uns s32304 e uns s32101.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Metalúrgicas e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre. Editado pelo autor, 1996.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MIRANDA, H. C. **Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobre-cabeça**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MORETTIN, Luiz Gonzaga. **Estatística Basica – Probabilidade e Inferência** (vol.2). Makron, 2010.

OHNO, A. "**Solidificação dos Metais**"; p. 53-149.

ORDÓÑEZ, Robert Eduardo Cooper. Dissertação de Mestrado, **Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

PAESE, C., CATEN, C., RIBEIRO, J. .L D. **Aplicação da Análise de Variância na Implantação do CEP**. Revista Produção, V. 11 n.1.

RODRIGUES, Emanuel Rezende, **Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36**, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

RODRIGUES, Lino Alberto Soares. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM A131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SANTOS NETO, Norival Ferreira dos. Dissertação de Mestrado, **Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 87 p.

SILVA, Roneles de Santana. **Influência do teor de hidrogênio no gás de proteção sobre as propriedades mecânicas de juntas soldadas do aço ASTM A-36**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

WALPOLE, R. E., MYERS, R.H., MYERS, S. L., YE, K. **Probabilidade e Estatística para engenharia e ciências**. [Tradução Vianna, L. F. P.]. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.