

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE EUGÊNIO SIQUEIRA

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS
FINAS DE AÇO CORTEN.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

GOIÂNIA

2021

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

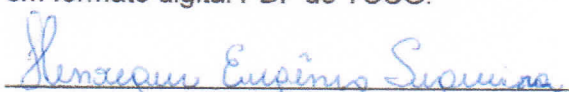
Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Henrique Eugênio Siqueira

Título do trabalho: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS FINAS
DE AÇO CORTEN.

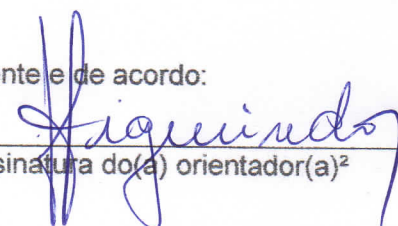
2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.


Assinatura(a) do(a)(s) autor(a)(es)(as)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 20 / 01 / 2021

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: (a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

Henrique Eugênio Siqueira

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS
FINAS DE AÇO CORTEN

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à disciplina Projeto Final de Curso, do
curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Goiás, como requisito parcial para
obtenção de título de Engenheiro Mecânico

Universidade Federal de Goiás - UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Kléber Mendes de Figueiredo

GOIÂNIA

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Eugênio Siqueira, Henrique
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS
FINAS DE AÇO CORTEN. [manuscrito] / Henrique Eugênio Siqueira.
2021.
56 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2021.
Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Aço Corten. 2. Patinável. 3. Microestrutura. 4. Soldagem.. I.
Mendes de Figueiredo, Kléber , orient. II. Título.

CDU 621

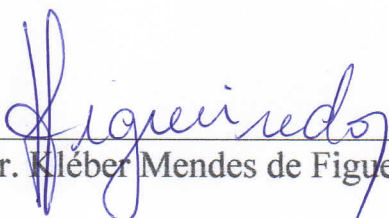
Henrique Eugênio Siqueira

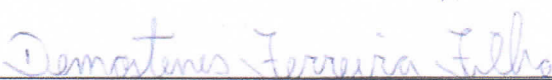
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS FINAS
DE AÇO CORTEN

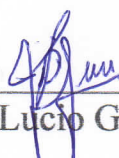
Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à disciplina TCC, do curso de
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Goiás, como requisito parcial para obtenção de
título de Engenheiro Mecânico

Goiânia, 20 de janeiro de 2021

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo


Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho


Prof. Dr. José Lucio Gonçalves Junior

GOIÂNIA

2021

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, durante todo meu ensino médio pedi à Deus em minhas orações que ele me abençoa-se com a possibilidade de cursar Engenharia Mecânica, que era meu grande sonho e hoje posso agradecer, por ter estado comigo ao longo dessa jornada.

A meus pais Everaldo e Cristiane e a meu irmão Eduardo, sem o apoio de meus familiares nada disso seria possível. Somente consegui chegar ao fim dessa jornada por ter vocês comigo.

A minha namorada Daniella Dias, que esteve comigo ao longo dessa caminhada e foi um dos mais lindos presentes que ganhei ao longo desses anos.

A todo o corpo de professores da Faculdade de Engenharia Mecânica, e em especial aos professores Kleber e Demostenes, que foram os primeiros a acreditar no meu trabalho e me convidaram a participar de minha iniciação científica que culminou nesse trabalho.

Ao corpo técnico da Faculdade de Engenharia Mecânica, que me apoiaram em todas as fases dessa jornada.

Ao corpo técnico da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, que se disponibilizou a realizar os ensaios de corrosão, em especial ao Prof. Jorge Luís Braz Medeiros, que atuou em meu favor junto a universidade.

Aos amigos que fiz na faculdade para levar para a vida, Lucas Moura, Ygor Peixoto, Pablo Shineydr, Yuri Luiz e Daniel Pereira, e a todos os outros alunos da iniciação científica que tanto auxiliaram no desenvolvimento dos experimentos e análises, sem eles não teria sido possível a realização deste trabalho.

À CAPES e ao CNPQ pelo apoio e subsídio financeiro ao trabalho.

RESUMO

Aços patináveis são amplamente utilizados na indústria devido a sua característica de formar uma camada de oxido protetora que é intimamente ligada com sua composição química. Em particular seu uso na forma de chapas é interessante devido ao seu baixo peso e boa resistência mecânica e química. A soldagem é um processo fundamental na manufatura aplicada ao aço Corten, porém pode ocasionar grandes modificações na composição química da junta soldada, modificações na microestrutura e distorções mecânicas devido as características intrínsecas ao processo.

Ante ao exposto o presente trabalho buscou encontrar o melhor parâmetro de soldagem para chapas de aço Corten de 2 mm de espessura e posteriormente avaliar quais modificações ocorrem nas características da junta soldada ao se operar com os eletrodos E 6013, E 7018 e E 7018 – W1.

O processo de soldagem foi realizado com os eletrodos E 6013, E 7018 e E 7018 – W1. As amostras foram preparadas para o ensaio de solda de topo, o ensaio foi realizado variando a corrente de operação e posteriormente variando a abertura de raiz. De cada cordão ensaiado, foram retiradas três amostras e preparadas para o ensaio de dureza e posteriormente foi realizada a avaliação da microestrutura do cordão de solda.

Os resultados encontrados indicam que o melhor parâmetro de soldagem para a chapa de 2 mm de espessura é 55 A e 0,75 mm de abertura de raiz, para os eletrodos E 7018 e E7018 – W1. A operação com o eletrodo E 6013 resultou em muitos respingos e instabilidade do arco elétrico. Notou-se uma tendência de que o aumento da corrente implica-se no aumento da dureza do cordão de solda, e foram encontradas como principais microestruturas Ferrita acicular e ferrita poligonal.

Palavras – Chave: Aço Corten, patinável, microestrutura, soldagem.

ABSTRACT

Skatable steels are widely used in industry due to their characteristic of forming a protective oxide layer that is closely linked with its chemical composition. In particular, its use in the form of plates is interesting due to its low weight and good mechanical and chemical resistance. Welding is a fundamental manufacturing process applied to Corten steel, but it can cause major changes in the chemical composition of the welded joint, changes in the microstructure and mechanical distortions due to the intrinsic characteristics of the process.

In view of the above, the present work sought to find the best welding parameter for 2 mm thick Corten steel sheets and subsequently evaluate what changes occur in the characteristics of the welded joint when operating with the E 6013, E 7018 and E 7018 - W1 electrodes .

The welding process was carried out with electrodes E 6013, E 7018 and E 7018 - W1. The samples were prepared for the butt weld test, the test was carried out by varying the operating current and then varying the root opening. From each tested bead, three samples were taken and prepared for the hardness test and subsequently the evaluation of the weld bead microstructure was carried out.

The results found indicate that the best welding parameter for the 2 mm thick plate is 55 A and 0.75 mm of root opening, for the electrodes E 7018 and E7018 - W1. Operation with the E 6013 electrode resulted in many spatter and arc arc instability. There was a trend that the increase in current implies an increase in the hardness of the weld bead, and were found as main microstructures Acicular ferrite and polygonal ferrite.

Keywords: Corten steel, patinable steel, microstructure, welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perda de massa x Tempo e ambiente dos aços patináveis.	17
Figura 2- Morfologia da microestrutura do aço patinável e aço estrutural.	18
Figura 3 - Composição química do eletrodo E 7018-W1.....	20
Figura 4 - Composição química do eletrodo E 7018 convencional.....	20
Figura 5 - Condições de ressecagem.	21
Figura 6 - Condições de armazenamento.	21
Figura 7 - Desenho esquemático do corpo de prova para o ensaio	23
Figura 8 - Composição química do aço corten.	23
Figura 9 - Ferrita poligonal e Ferrita acicular.	24
Figura 10 - Fonte de corte a plasma (a), Máquina de corte semiautomática (b)	26
Figura 11 - Lixadeira, discos e corpo de prova limpo.	26
Figura 12 - Fonte de Solda IMC Digital Plus	27
Figura 13 - Serra fita(a), Embutidora (b).....	28
Figura 14 – Politriz (a), Durômetro (b)	28
Figura 15 Corpo de prova.....	29
Figura 16 - Chapa soldada com corrente de 90 A.	30
Figura 17 - Cordão de solda confeccionado com corrente de 55 A e abertura de raiz de 0,75 mm.....	31
Figura 18 - Estruturas cristalinas encontrada por Costa (2019) para o centro do cordão.	31
Figura 19 - Estruturas cristalinas encontrada por Costa (2019) para Zona Termicamente Afetada.....	32
Figura 20 - Comparação entre Perlita fina(a) e Perlita Grosseira (b).....	32
Figura 21 - Eletrodo E 7018 - 60 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.....	33
Figura 22 Eletrodo E 7018 - 55 A, Centro do cordão, ampliação de 500x	33
Figura 23 - Eletrodo E 7018 - 50 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.....	34

Figura 24 - Eletrodo E 7018 - 45 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.....	34
Figura 25 - E 7018 - W1 - 60A, Centro do Cordão, Ampliação de 200x.....	35
Figura 26 - E 7018 - W1 - 55A, Cordão de solda, Ampliação de 200x	35
Figura 27 - E 7018 - W1 - 50A, Centro do cordão, Ampliação de 500x.....	36
Figura 28 - E 7018 - W1 - 45A, Centro do cordão, Ampliação de 500x.....	36
Figura 29 - Metal de base E 7018 - 50 A, Ampliação de 25x	37
Figura 30 - Metal de base E 7018 – W1 - 50 A, Ampliação de 25x	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – E 7018, avaliação da dureza Vickers, resultado preliminar.....	38
Tabela 2 – E 7018, avaliação da dureza Vickers em função da abertura de raiz, resultado preliminar.	38
Tabela 3 – E 7018-W1, avaliação da dureza, resultado preliminar.....	38
Tabela 4 - Dureza encontrada para o eletrodo E 7018 - W1	39
Tabela 5 - Dureza encontrada para o eletrodo E 7018	39
Tabela 6 - Levantamento preliminar da dureza das amostras.	45
Tabela 7 - Dados referentes a segunda análise da dureza Vickers E 7018 - W1.....	46
Tabela 8 - Dados referentes a segunda análise da dureza Vickers E 7018.....	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Aços patináveis, características básicas	15
2.1.1	Fatores que influenciam na formação da pátina	15
2.2	Microestrutura da pátina.....	17
2.3	Soldagem por eletrodo revestido.....	18
2.3.1	Tipos de revestimento para eletrodo.....	19
2.3.2	Eletrodos indicados para aço patináveis	20
2.4	Ressecagem do eletrodo.....	21
2.5	Ensaio de corrosão	22
2.6	Microestrutura característica do aço patinável.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Materiais utilizados	25
3.2	Equipamentos utilizados.....	25
3.3	Corte da chapa de aço corten.....	25
3.4	Limpeza das chapas.....	26
3.5	Procedimento de Soldagem.....	26
3.6	Preparação das amostras.....	27
3.6.1	Ensaio de dureza	27
3.6.2	Preparação das amostras na Politriz.....	28
3.7	Procedimento de avaliação da microestrutura.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30

4.1	Apresentação geral dos resultados	30
4.2	Avaliação da microestrutura.....	31
4.3	Avaliação da dureza dos cordões	38
4.3.1	Avaliação geral	40
4.4	Avaliação da resistência mecânica do cordão	40
4.5	Ensaio de corrosão.....	40
5	CONCLUSÃO.....	42
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
7	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Segundo a Confederação Brasileira da Construção e Aço – CBCA (2020), os aços patináveis foram apresentados ao mercado norte americano em meados de 1930, pela *U.S. STEEL*, onde comercialmente foi chamado de aço Corten e hoje pode ser encontrado também com a nomenclatura de aço Cor, onde foi dedicado a fabricação de vagões de carga. Pannoni, (2004) descreve que os vagões produzidos em aço patinável eram mais leves devido sua alta resistência mecânica, posteriormente foi verificado que esse material apresentava também um bom comportamento referente a resistência a corrosão.

A utilização de aços patináveis é altamente vantajosa pois, dispensam a pintura em determinados ambientes, implicando em redução de custos de manutenção, apresentam uma resistência mecânica elevada, que possibilita estruturas mais leves e maiores vãos livres. Ao serem protegidos por pintura, apresentam maior resistência a degradação, quando utilizados em ambientes mais agressivos, isso é, com poluição por dióxido de enxofre ou próximo a regiões marítimas, em comparação com aços comuns. Devido a essas características são amplamente aplicados na indústria metal mecânica e de construção civil. Pannoni, (2004)

O processo de soldagem tem largo emprego na indústria, sendo um processo fundamental de fabricação e manutenção empregados atualmente nos aços patináveis. Durante o processo de soldagem ocorre a fusão do metal de base podendo ou não ser aplicado um metal de adição, dentre os diversos fenômenos que ocorrem nesse instante está a difusão de elementos de liga e um tratamento térmico localizado. A soma desses fatores possibilita inferir que ocorrem modificações do ponto de vista macroscópico, destacando-se aqui deformações em sua geometria e o aspecto do cordão de solda e, no ponto de vista microscópico, referente a sua composição química e microestrutural. (MACHADO, 2007).

Sabendo que todas as características mecânicas de um material metálico estão intimamente ligadas à sua composição química, microestrutura e processos de fabricação é preciso então, estudar o processo de soldagem em aço patináveis, a fim de avaliar como suas características são afetadas após o processo de soldagem, quais estruturas se formam após a soldagem e quais os melhores parâmetros de operação. (COSTA, 1988)

1.2 Objetivos

Conforme apresentado os aços patináveis apresentam determinadas características de interesse que podem ser afetadas pelo processo de soldagem, em especial a sua capacidade de formação de pátina. Dentre os vários eletrodos disponíveis no mercado o eletrodo E 6013 tem uso regular entre profissionais da área de serralheria, sendo descrito como *eletrodo serralheiro ou eletrodo de serralheiro*, entretanto esse não apresenta a indicação do fabricante para ser aplicado aos aços patináveis. A construção de estruturas metálicas de maior responsabilidade geralmente se utiliza eletrodo E 7018 convencional, conforme indica BELLEI, 1998. Porém esse eletrodo também não é indicado para a operação em aço patinável.

Segundo o fabricante ESAB, o eletrodo indicado para a operação com aços patináveis é o eletrodo E 7018 –W1, porém seu custo é elevado em relação aos demais eletrodos e sua disponibilidade no mercado é baixa, por isso é comum que se realize o processo de soldagem com eletrodos E 7018 e E 6013 por conveniência e redução de custos. Logo o presente trabalho tem como objetivo:

- Levantar os parâmetros de soldagem para chapa de aço patinável de 2 mm de espessura.
- Realizar o processo de soldagem com os seguintes eletrodos:
 - E7018
 - E7018 W1
 - E6013
- Verificar a qualidade do cordão formada para cada eletrodo.
- Verificar se ocorrem alterações nas propriedades mecânicas e químicas do material de base após o processo de soldagem.
- Verificar
 - A microestrutura formada dados os três tipos de eletrodos aplicados.
 - Como está a formação da pátina na região próxima ao cordão de solda.

1.3 Estrutura

- O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica aplicada na construção do presente documento.
- O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados e o procedimento experimental.
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos da análise das amostras realizadas.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões que foram absorvidas do experimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços patináveis, características básicas

Os aços patináveis, são aços que apresentam uma elevada resistência a corrosão. Sua resistência é devido a formação da pátina, que é uma camada de óxido aderente, que funciona como barreira física, impedindo assim que o processo de oxidação avance. São amplamente utilizados dentro da construção civil em aplicações estruturais, bem como na indústria ferroviária e naval, pois sua camada de proteção aumenta a vida útil dos elementos e dispensa a aplicação de um revestimento de proteção. (DUTRA et. al., 2013).

A pátina é o produto da corrosão dos aços patináveis, e essa apresenta características bem definidas, nota-se que o aço carbono comum também sofre o processo de oxidação, porém quando esse processo ocorre não há a formação da pátina, entretanto o que se observa é a perda de massa e o comprometimento da estrutura devido à oxidação. Ante ao exposto é preciso definir quais os fatores que levam a formação da pátina, isso é, quais são os elementos de liga que estão associados à formação da camada de proteção, quais elementos do ambiente podem influenciar na formação da camada protetora e avaliar quais outros fatores podem impactar no processo.

2.1.1 Fatores que influenciam na formação da pátina

Os aços patináveis são resistentes a corrosão devido a adição dos seguintes elementos de liga, Cobre, Cromo, Silício e Fósforo (Cu, Cr, Si e P), que desenvolvem uma pátina, por isso são denominados de aços patináveis, porém não somente a adição desses elementos é suficiente para garantir a formação da camada de proteção. Para que ela ocorra, aspectos envolvidos quanto à composição química do material, o ambiente em que a estrutura se encontra e sua geometria, devem ser analisados (DUTRA et. al., 2013).

A **geometria da peça** influencia pois, esta altera os ciclos de umedecimento e secagem da superfície isso é, uma região aberta e outra fechada, com diferentes ciclos de umidade, porém constituídas do mesmo material, podem apresentar variações na formação da camada de proteção. Note como exemplo dois perfis estruturais, um em formato de I e outro em formato de U, o formato estrutural em U pode levar a um acúmulo maior de água, o que leva a uma maior umidade em seu interior, é possível então inferir que esse perfil apresenta uma taxa de oxidação maior que o perfil em I, pois a umidade é um fator que contribui para a oxidação.

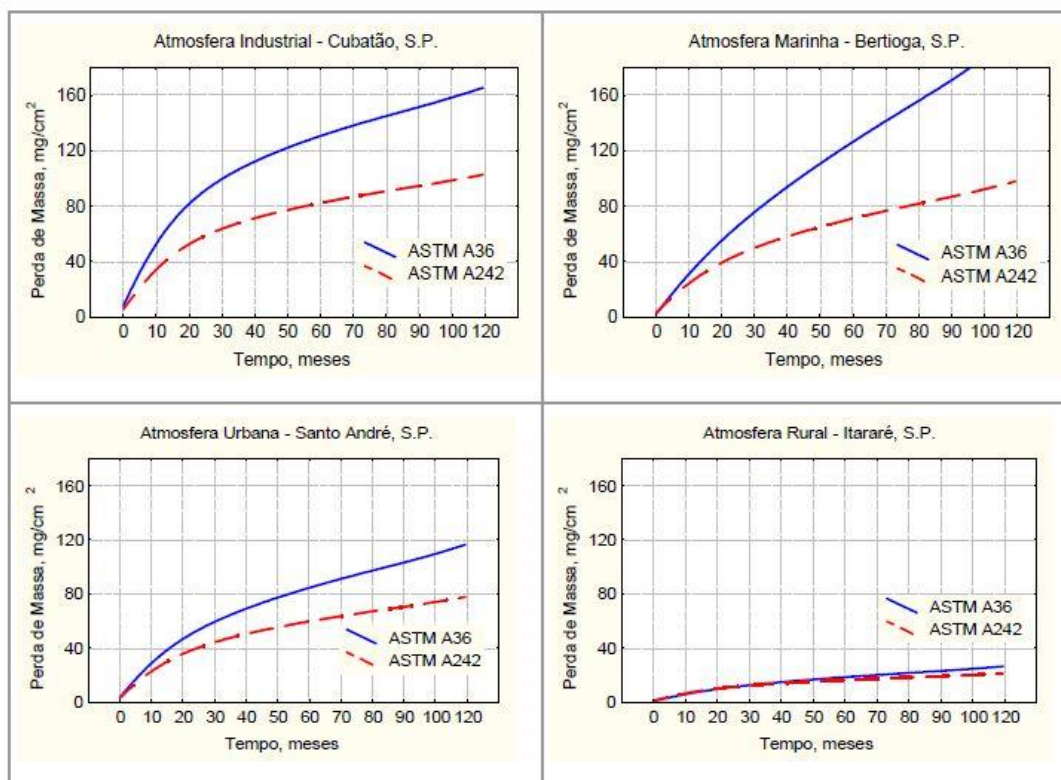
Outro ponto de preocupação importante são os **elementos de fixação**, isso é, parafusos, rebites, porcas, arruelas entre outros, que dada sua geometria podem apresentar uma corrosão localizada, por exemplo, o pite, no caso limite pode ocorrer também a formação de uma célula galvânica devido a diferença de potencial eletroquímico, dada a diferença de composição química. O processo de soldagem apresenta um fenômeno semelhante, dadas as mesmas razões, a soma desses fatores prejudica a formação da camada protetora. (DUTRA et. al., 2013).

À **composição química**, Pannoni (2004) destaca o cobre e o fósforo como elementos principais. É também comentada a presença de níquel e cromo como elementos secundários. A concentração de fósforo deve ser mantida abaixo de 0,1%, pois aumento de sua concentração prejudica as propriedades mecânicas do material.

Quanto ao **ambiente de operação** (DUTRA et. al, 2013 e PANNONI, 2004) apresentam conclusões semelhantes. Dentro de seus trabalhos, eles afirmam a existência de um ambiente doméstico, que é de baixo poder ofensivo à estrutura, logo tem pouca influência na formação da pátina. Os principais problemas são relacionados aos ambientes industriais e marinhos. Em ambos os casos existe a presença de elementos químicos em concentrações bem mais expressivas que no ambiente doméstico, que afetam o desenvolvimento da camada de proteção. Para o ambiente industrial, a presença de dióxido de enxofre, até certos limites, pode favorecer a formação da pátina. Em ambientes marinhos, a presença de cloreto de sódio e umidade são fatores que prejudicam as propriedades protetoras do material. Como mencionado, a vantagem dos aços patináveis é sua camada natural de proteção que dispensa o uso de revestimento, porém, o ambiente industrial e marinho pode se tornar tão agressivo à estrutura, que se recomenda a aplicação de tinta ou outros meios de proteção. Pannoni (2004) cita que valores na faixa de 250-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cloreto de sódio e Dióxido de enxofre) de concentração desses elementos, já se tornam prejudiciais para formação da pátina, o que indica a necessidade da adição de um revestimento de proteção. A Figura 1 apresenta a influência dos diferentes ambientes sobre o aço.

Os principais tipos de aços patináveis disponíveis no mercado são os aços “Cor-ten A” que recebem a designação ASTM-A-242 indicados para uso em aplicações arquitetônicas, “Cor-tem B” que recebem a designação ASTM-A 588 de uso estrutural e ASTM-A-606, indicado para chapas finas. (DUTRA et. al, 2013)

Figura 1 - Perda de massa x Tempo e ambiente dos aços patináveis.



Fonte - PANNONI, 2004.

2.2 Microestrutura da pátina.

Conforme mencionado todas as ligas metálicas apresentam ao longo do tempo oxidação, o aço carbono, o mais comum encontrado no dia a dia, quando apresenta oxidação, ocorre a formação da “ferrugem” que leva a perda de massa, e ao decorrer do tempo compromete a integridade física das estruturas. A “ferrugem”, nome comum dado ao produto formado pela oxidação do aço carbono, não se liga ao material de base. À medida que se forma ela se desprende do substrato, expondo mais uma vez a superfície ao processo de oxidação. A pátina, que é o produto da oxidação dos aços patináveis, se prende ao substrato formando assim uma camada protetora, que impede o progresso da oxidação.

Segundo Pannoni (2004), aços patináveis desenvolvem logo nos primeiros estágios uma camada de óxido distinta dos aços estruturais comuns. Essa camada é responsável por impedir o contato entre o metal de base, a umidade e o oxigênio.

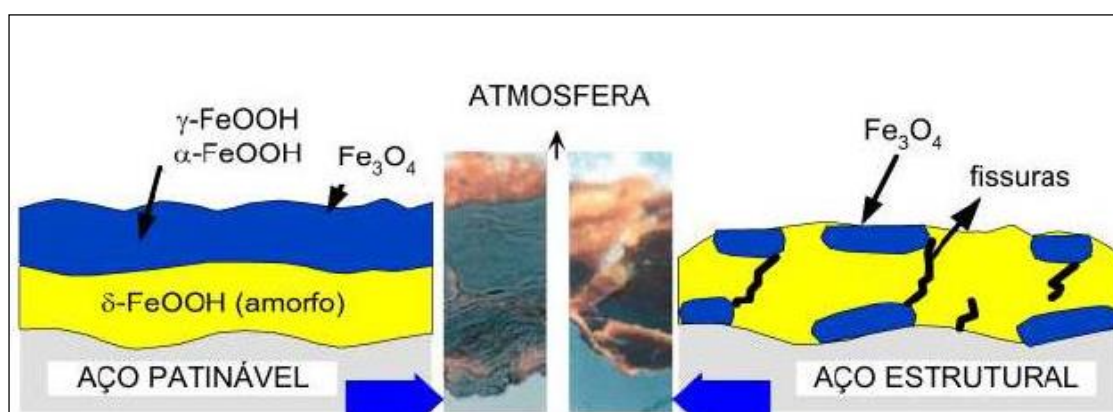
Basicamente, a ferrugem é constituída por cinco diferentes compostos de ferro: α -FeOOH (goethita), β -FeOOH (akaganeíta), γ -FeOOH (lepidocrocita), δ -FeOOH e Fe₃O₄ (magnetita).

A ferrugem que se produz sobre a superfície dos aços comuns compõe-se, de modo geral, de duas regiões distintas: uma interna, próxima à interface aço/ferrugem, constituída principalmente de FeOOH denso, e outra externa, que apresenta cristais pouco agregados de lepidocrocita, de goethita ou de ambas (PANNONI, 2004).

A composição e a estrutura cristalográfica da ferrugem que se forma sobre os aços patináveis são similares às da ferrugem gerada sobre o aço carbono. A goethita e a lepidocrocita estão presentes em ambos, em proporções similares. Nos primeiros, contudo, constata-se a presença, na interface metal/ferrugem, de uma nova fase, amorfa, rica daqueles elementos de liga neles presentes, como o cobre, o fósforo e outros. É justamente essa camada que, limitando o suprimento de água, oxigênio e estimuladores de corrosão à superfície metálica, inibe a dissolução desta, reduzindo drasticamente a velocidade com que sua corrosão se processa. Segundo vários autores, $\gamma\text{-FeOOH}$ é o principal constituinte da película interna, que se forma ao longo de exposições prolongadas do material à atmosfera. (PANNONI, 2004)

A Figura 2 apresenta a morfologia das diferentes microestruturas presentes no aço carbono e aço patinável, nota-se que os aços comuns não apresentam uma camada “rígida” de proteção e que existem trincas que possibilitam a entrada de umidade e estimuladores da oxidação, diferente ao que ocorre nos aços patináveis.

Figura 2- Morfologia da microestrutura do aço patinável e aço estrutural.



Fonte - Pannoni, 2004.

2.3 Soldagem por eletrodo revestido.

No processo de soldagem por eletrodo revestido, na abertura do arco elétrico, ocorre um curto circuito entre o eletrodo revestido consumível e a peça a ser unida. O revestimento do eletrodo, geralmente um material argiloso, tem como função produzir gases que atuam no sentido de proteger a poça de fusão de contaminantes externos, manter o arco elétrico estável

durante a operação, e em alguns casos pode transferir elementos de liga para a poça de fusão, conferindo assim alguma propriedade Mecânica/Metalúrgica desejada. (MACHADO, 2007).

Os primeiros procedimentos de soldagem com o eletrodo eram realizados com o eletrodo nu, isso é, sem revestimento, isso gerava problemas como inclusões, excesso de respingos e contaminação da poça por gases da atmosfera. Outro problema grave era a instabilidade do arco, o que limitava as possibilidades de operação. Apenas em 1910, o sueco Oscar Kjellberg, obteve a patente do primeiro eletrodo revestido com material argiloso, deu-se assim início à era moderna do eletrodo revestido. (MACHADO, 2007).

Os eletrodos podem ter seus diâmetros variando desde 1,5 a 8 mm, medidos na alma, isso é, o metal a ser fundido. O comprimento sofre uma variação maior, de 350 a 700 mm. O tipo de transferência metálica é definido de acordo com o nível de corrente utilizada, outro ponto importante é que a operação pode ocorrer em corrente contínua, CC, ou corrente alternada, CA. A escolha depende do tipo de eletrodo, da necessidade do operador, maquinário disponível, preferências históricas quanto ao tipo de operação, entre outros. (MACHADO, 2007).

2.3.1 Tipos de revestimento para eletrodo.

Os eletrodos são classificados conforme os elementos químicos e as proporções de que são constituídos, a partir disso recebem as seguintes classificações (MACHADO, 2007):

Ácidos: Contém altos níveis de óxido de ferro, manganês, silicato de manganês e ferro – manganês; não são muito utilizados pois geram uma junta soldada com baixas propriedades mecânicas/metalúrgicas, devido ao alto conteúdo de oxigênio.

Básicos: Possuem altos teores de carbonato de cálcio e fluorita, esses elementos colaboram para o controle de enxofre e fósforo, isso confere a esse tipo de eletrodo as melhores características mecânicas/metalúrgicas, destacando-se a tenacidade.

Celulósico: Apresenta grande produção de gases devido a queima dos compostos orgânicos, ocorre uma elevada inclusão de hidrogênio na poça logo não é indicado para juntas muito solicitadas.

Oxidantes: Constituído de óxido de ferro, porém não é muito utilizado pois produz uma junta com baixa tenacidade. Sua aplicação é mais voltada para a solda subaquática.

Rutílico: Apresentam 50% de rutílico, e até 15% de celulose, deve-se ter cuidado com os processos de secagem e ressecagem, pois se esta for realizada a elevadas temperaturas isso pode prejudicar a ação redutora e incrustar hidrogênio no metal de solda.

Básico/Rutílico: Apresenta uma razão rutilo/carbonato, aplicado geralmente para aços inoxidáveis.

O eletrodo E 7018 apresenta características básicas segundo fabricante ESAB (2021), o eletrodo E 7018 – W1 apresenta características básicas, o eletrodo E 6013 apresenta características rutilico.

2.3.2 Eletrodos indicados para aço patináveis

Segundo a ESAB o eletrodo indicado para a operação em aço patinável é o E 7018 – W1, cuja composição química é apresentada pela Figura 3, em comparação a composição química do eletrodo E 7018 e a apresentada pela Figura 4.

Figura 3 - Composição química do eletrodo E 7018-W1.

Composição Química					
C	Cr	Cu	Mn	Ni	Si
0.06 %	0.25 %	0.50 %	0.60 %	0.30 %	0.45 %

Fonte: Catálogo ESAB, disponível em: < <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/low-alloy-electrodes/ok-73-03.cfm> >, acesso em: 18/01/2021

Figura 4 - Composição química do eletrodo E 7018 convencional

Composição Química		
Typical Weld Metal Analysis %		
C	Mn	Si
0.07 %	1.3 %	0.5 %

Fonte: Catálogo ESAB, disponível em: < <https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/mild-steel-electrodes/ok-48-04.cfm> >, acesso em: 18/01/2021

Note que a principal diferença entre os eletrodos está na adição dos elementos de liga Cromo, Cobre e níquel. Os elementos de liga são adicionados para que ocorra compatibilidade química com o metal de base, e para que seja formada a pátina conforme indica o capítulo 2.1.1.

2.4 Ressecagem do eletrodo.

Os eletrodos são capazes de absorver a umidade do ambiente, quando isso ocorre existe a possibilidade de ocorrer a formação da trinca induzida por hidrogênio. A deposição de hidrogênio na junta soldada causa uma fragilização da mesma, tem-se então a indicação na literatura a necessidade de realizar o procedimento de ressecagem do eletrodo. Segundo Machado (2007), o primeiro passo deve ser consultar os dados fornecidos pelo fabricante, pois variações na composição química e fabricação de cada eletrodo podem gerar uma diferença de até vinte vezes na capacidade de absorver a umidade. Caso não existam informações mais precisas tabelas são fornecidas na literatura.

A Figura 5 e Figura 6 apresentam indicações dos parâmetros do procedimento de ressecagem.

Figura 5 - Condições de ressecagem.

Tipo do Consumível	Temperatura/Tempo de Ressecagem	Tipo do Consumível	Temperatura/Tempo de Ressecagem
Aço Inoxidável Rutilico	120 à 150 °C/2 horas	Ferro Fundido-Alma de Niquel ou Monel	150 à 180 °C/1 hora
Aço Inoxidável Básico/Rutilico	180 à 200 °C/2horas	Ferro Fundido-Alma de Aço Baixo Carbono	150 à 200 °C/1 hora
Cobre e suas Ligas Básico	200 à 250 °C /2 horas	Niquel e suas Ligas	200 à 250 °C/2 horas
Alumínio e suas Ligas	175 à 200 °C/1 hora		

Fonte - Machado, 2007

Figura 6 - Condições de armazenamento.

Classificação (AWS)	Umidade Máxima (%)	Condições de Estocagem		Ressecagem
		Exposto à Atmosfera	Estufa de Manutenção	
E6010, E6011	NE(b)	Temperatura Ambiente	NR(c)	NR
E6012, E6013, E6019, E6020, E6022, E6027, E7014, E7024, E7027	NE	30±10 °C com 50% de Umidade Relativa máxima	12 à 24 °C acima da Temperatura Ambiente	1 hora na Temperatura de 135±15 °C
E7015, E7016, E7018, E7028, E7048	0,6	NR	30 à 140 °C acima da Temperatura Ambiente	1 a 2 horas na Temperatura de 350 à 425 °C
E7015R, E7016R, E7016-1R, E7018R, E7018-1R, E7028R, E7048R	0,3	NR	Idem	Idem
E7018M	0,1	NR	Idem	Idem

Notas Relativas à Tabela 4.10: (a) O fabricante do consumível deve ser consultado, sempre que possível, sobre as melhores condições de estocagem e ressecagem para seu produto; (b) Não Especificado; (c) Não Recomendado.

Fonte - Machado, 2007

2.5 Ensaio de corrosão

Os mecanismos de corrosão não ocorrem de forma isolada em um contexto real, logo não é possível definir um ensaio que represente com exatidão o comportamento de uma peça em operação.

Segundo Gentil (1994), os ensaios de laboratório são aplicados para analisar, definir o comportamento e os mecanismos da corrosão em um ambiente controlado. Para se atingir uma melhor exatidão na análise, as peças ou estruturas devem ser monitoradas em seu ambiente de aplicação para se observar o avanço do processo de corrosão, então pode-se definir os meios de maior eficiência para proteção e especificar o material mais adequado ao meio corrosivo.

Para a avaliação da corrosão existem vários métodos, dado as limitações do laboratório vamos nos atentar as seguintes metodologias: **Avaliação visual**, permite analisar qual a morfologia e como se processou a corrosão. **Observação no microscópio** permite avaliar as modificações microestruturais da peça, se a corrosão ocorreu de forma intragranular ou intergranular, penetração de pite, comportamento do revestimento.

A taxa de corrosão é outra forma de avaliar o processo de corrosão, esse fator leva em conta a massa perdida, a área, tempo e densidade do material. Uma vez conhecida a taxa de corrosão de um material em um meio é possível definir o tempo de vida, bem como as dimensões de parede para um equipamento operar durante um determinado tempo antes de apresentar problemas estruturais.

A taxa de corrosão é definida pela Equação (1).

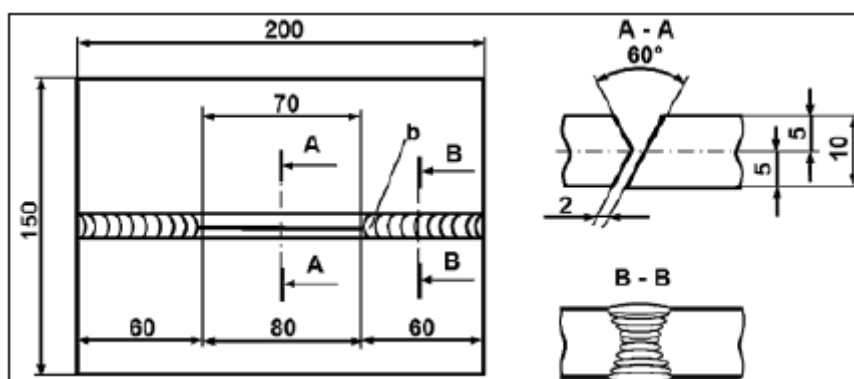
$$T = \frac{\text{Massa perdida}}{\text{Área} \cdot \text{Tempo} \cdot \text{massa específica}} \quad (1)$$

Fatores de conversão entre o sistema inglês e sistema internacional podem ser encontradas em diversas literaturas específicas.

2.6 Microestrutura característica do aço patinável.

Costa (2019), realizou a análise da microestrutura do cordão de solda, zona termicamente afetada e metal de base no processo de soldagem em aço corten. Em seu ensaio foi utilizado o arame tubular AWS A5.36 E81T1 GC, diâmetro de 1,2 mm. A Figura 7 apresenta o esquema do corpo de prova montado para o ensaio.

Figura 7 - Desenho esquemático do corpo de prova para o ensaio



Fonte: Costa, 2019

Segundo Costa (2019) a microestrutura da zona fundida será fortemente influenciada pela composição química e pela geometria da poça de fusão, essa por sua vez é afetada pelos parâmetros de soldagem em especial velocidade de soldagem e amperagem. Segundo Costa (2019) as principais estruturas encontradas para o cordão de solda durante seu experimento foram:

- FA – Ferrita acicular;
- FP – Ferrita Poligonal
- FQ – Ferrita quase poligonal;
- P – Perlita fina e
- IN – Inclusão não metálica.

Travassos (2016) indica que o aço corten, em geral, apresenta uma composição química de carbono de no máximo 0,2%, conforme apresenta a Figura 8.

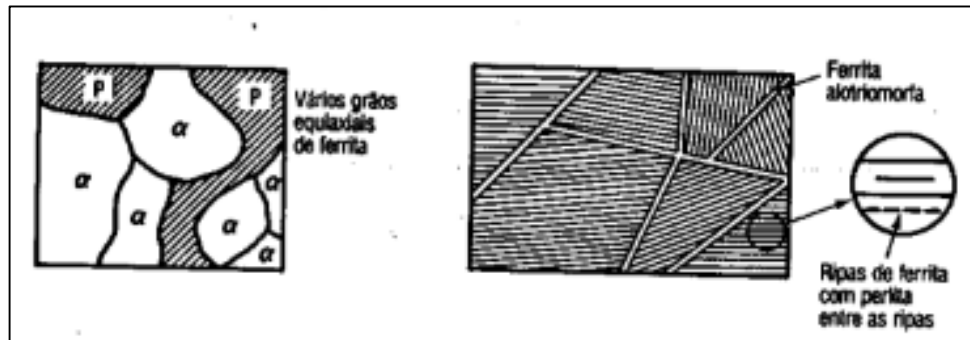
Figura 8 - Composição química do aço patinável.

AÇO	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	V	ASTM
USS CORTEN A	≤ 0,12	0,25- 0,75	0,20- 0,50	0,07- 0,15	≤ 0,05	0,25- 0,55	0,50- 1,25	≤ 0,65	-	A242
USS CORTEN B	≤ 0,19	0,30- 0,65	0,80- 1,25	≤ 0,04	≤ 0,05	0,25- 0,40	0,40- 0,65	≤ 0,40	0,02- 0,10	A588
USS CORTEN C	≤ 0,19	0,30- 0,65	0,80- 1,35	≤ 0,04	≤ 0,05	0,25- 0,40	0,40- 0,70	≤ 0,40	0,40- 0,10	A871

Fonte – Travassos (2016).

A **Ferrita** (Figura 9) tem sua formação preferencial no contorno do grão austenítico. Com o aumento da taxa de resfriamento observa-se sua formação no grão austenítico, com o aumento da velocidade de resfriamento observa-se a formação da **Ferrita acicular**, constituída de ripas de Ferrita e Cementita entra as ripas (Costa & Silva, 1998).

Figura 9 - Ferrita poligonal e Ferrita acicular.



Fonte - Costa & Silva, 1998

A **Ferrita poligonal** Aparece na forma de grãos, normalmente poligonais, e nucleia quase que exclusivamente no interior dos grãos austenítico. Bubnoff.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

- Chapa de aço patinável de 2 mm de espessura.
- Eletrodo E 7018.
- Eletrodo E 7018 - W1.
- Eletrodo E 6013 Ø 4.

Conforme apresentado pelo capítulo 1.2, os eletrodos E 7018 e E 6013 foram selecionados devido ao seu uso recorrente no processo de soldagem, os resultados encontrados para esses eletrodos serão comparados posteriormente com os resultados do eletrodo E 7018-W1 a fim de avaliar suas diferentes características.

3.2 Equipamentos utilizados

- Durômetro.
- Embutidora.
- Máquina de corte semiautomática.
- Lixadeira de bancada.
- Multímetro.
- Lixadeira manual e discos de Flap e desbaste.
- Fonte de Solda IMC.
- Fonte de corte a plasma.

3.3 Corte da chapa de aço corten

O primeiro passo foi o corte de uma chapa para a construção dos corpos de prova, uma chapa de aço corten de 3000 x 1200 mm foi cortada em quatro partes de 600 x 750 mm, de cada parte foram confeccionados corpos de prova de 50 x 200 mm, durante o corte foram utilizados os seguintes itens.

- Fonte de corte a plasma.
- Máquina de corte semiautomática.

Os parâmetros de corte utilizados foram 45 A, de corrente contínua e distância de 2 mm entre a peça e o bico de corte, Velocidade de corte de 750 cm/mim, capacidade máxima da máquina de corte semiautomática.

Devido as chapas utilizadas serem de 2 mm de espessura, uma grande deformação foi observada durante o corte, logo é preciso apoiar a chapa e prender da melhor forma possível para evitar que o bico toque a chapa fazendo com que este se queime. A Figura 10 apresenta os itens utilizados.

Figura 10 - Fonte de corte a plasma (a), Máquina de corte semiautomática (b)



(a)



(b)

Fonte – Próprio autor

3.4 Limpeza das chapas

Após a confecção dos corpos de prova, estes foram limpos utilizando a lixadeira para retirar a camada de proteção que havia nas chapas. Esta camada deve ser retirada, pois pode provocar inclusão de gases na poça de solda, inclusão de elementos químicos estranhos a junta de soldagem, isso pode levar a porosidade na junta o que causa falha mecânica da mesma. A Figura 11 mostra a lixadeira, os discos de desbaste e flap utilizados para a limpeza bem como o aspecto final do corpo de prova limpo.

Figura 11 - Lixadeira, discos e corpo de prova limpo.



Fonte – Próprio autor

3.5 Procedimento de Soldagem.

Com os corpos de prova limpos, os ensaios de soldagem foram iniciados.

O procedimento utilizado foi a solda de topo, as chapas foram fixadas na mesa com o auxílio de dois sargentos, para que ambas as pontas da mesma se mantivessem presas evitando a deformação.

Nos primeiros ensaios as chapas foram presas com uma abertura de raiz de 0,5 mm, o objetivo foi encontrar um parâmetro de soldagem que:

- Não perfurasse a chapa na abertura do arco.
- Apresentasse estabilidade durante o procedimento.
- Não provocasse adesão do eletrodo a peça.

Uma vez encontrado um parâmetro de corrente que apresentasse essas características, a corrente encontrada foi mantida constante e a distância entre as chapas passou a ser variada, a variação ocorreu entre 0,5 a 0,8 mm. O procedimento foi realizado utilizando-se o eletrodo E 7018 –W1, entretanto constatou-se que a corrente de soldagem ficou abaixo da faixa de 90 A - 110 A indicada pelo fabricante.

Para a soldagem foi utilizada a fonte de corrente IMC. A Figura 12 apresenta a fonte de soldagem utilizada.

Figura 12 - Fonte de Solda IMC Digital Plus



Fonte – Próprio autor

3.6 Preparação das amostras

3.6.1 Ensaio de dureza

Após os ensaios realizados as chapas foram cortadas utilizando a serra fita (Figura 13 - Serra fita(a), Embutidora (b)). Cada amostra foi embutida e lixada a fim de melhorar o aspecto e de facilitar a análise no durômetro (Figura 14 – Politriz (a), Durômetro (b)).

Figura 13 - Serra fita(a), Embutidora (b)



Fonte – Próprio autor

Figura 14 – Politriz (a), Durômetro (b)



Fonte – Próprio autor

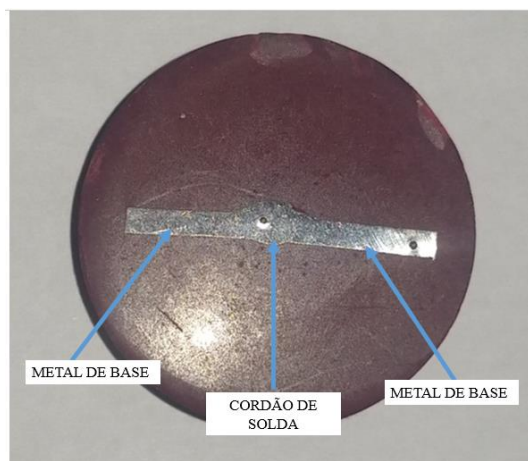
3.6.2 Preparação das amostras na Politriz

As amostras foram levadas a Politriz, onde foram lixadas sucessivamente com lixas de granulação 80, 120, 240, 600, 1200 e 2000, tendo o cuidado de alternar em 90° a direção do processo de lixamento.

Deve-se tomar cuidado nesse procedimento para que as amostras não sofram abaulamento, caso isso ocorra a análise da dureza e análise de imagens no microscópio será prejudicada. Posteriormente ao processo com as lixas as amostras foram polidas com o uso de alumina de 1,0 e 0,5 μ sucessivamente.

Com as amostras polidas, essas foram levadas ao durômetro, foram realizados nove medições em cada peça, sendo que adotou-se três medições antes do cordão de solda, três medições dentro do cordão de solda e três medições após o cordão de solda, conforme apresenta a Figura 15.

Figura 15 Corpo de prova



Fonte – Próprio autor

Após realizar a primeira avaliação dos resultados referente a dureza para os primeiros corpos de prova, constatou-se algumas divergências no resultado, foi então realizado um novo ensaio de soldagem, seguindo os passos apresentados nos capítulos 3.1 a 3.6.

Devido as divergências de resultados encontrados o segundo procedimento de soldagem foi realizado mantendo-se a abertura de raiz em 0,75 mm, a corrente de operação foi variada entre 45 A até 60 A. O ensaio foi realizado apenas com os eletrodos E 7018 e E7018 – W1, visto que a operação com o eletrodo E 6013 gerou uma quantidade elevada de respingos. Para a análise da dureza dos corpos de prova obtidos no segundo ensaio, foram realizadas três medições de dureza no metal de base antes do cordão de solda, quatro medições dentro do cordão de solda e três medições após o cordão de solda.

3.7 Procedimento de avaliação da microestrutura

Para a análise da microestrutura as amostras preparadas conforme indica o capítulo 3.6.2 e atacadas com ácido, conforme a norma E 407 -99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, com a seguinte composição: 8 g de FeCl_3 ; 25 ml de HCL; 100 ml de água.

As amostras foram atacadas durante 15 segundos, após esse período a amostra foi limpa e levada ao microscópio para a que se avaliar a microestrutura formada no cordão de solda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação geral dos resultados

Para encontrar o melhor parâmetro de soldagem foram realizados dois procedimentos, no primeiro, manteve-se uma abertura de raiz constante e foi variada a corrente de operação, em um segundo momento, foi mantida a corrente de operação e variada a abertura de raiz.

Os primeiros ensaios foram realizados utilizando correntes entre 90 A até 45 A. Para o ensaio com 90 A, a chapa furava logo na abertura do arco como mostra a Figura 16, logo esse valor foi descartado. Note que na Figura 16 são apresentados os valores de 230 – 190 A, esses valores são referentes às medições realizadas com o multímetro durante o procedimento de soldagem.

Figura 16 - Chapa soldada com corrente de 90 A.



Fonte – Próprio autor

A corrente foi reduzida então para 60 A, após isso a 55 A e após a 45 A.

A operação em 60 A resultava ainda em um arco que perfurava a peça, por isso ela foi reduzida.

Durante a operação com 45 A ocorria uma dificuldade em abrir o arco, o eletrodo aderiria ao material de base, logo o melhor parâmetro encontrado foi o de 55 A de corrente. Esse procedimento foi realizado mantendo a abertura da raiz em 0,5 mm constante.

O segundo passo após definir 55 A de corrente, variou-se a abertura de raiz em 0,50; 0,60; 0,70; 0,75 e 0,80 mm.

A operação entre 0,50 até 0,70 o arco se comportava bem, porém havia baixa penetração do cordão de solda, a operação com 0,80 mm ocorria um furo na chapa devido à abertura. Foi então encontrado o valor de 0,75 mm de abertura de raiz. A Figura 17 apresenta o cordão realizado com 55 A e $d = 0,75$ mm.

Figura 17 - Cordão de solda confeccionado com corrente de 55 A e abertura de raiz de 0,75 mm



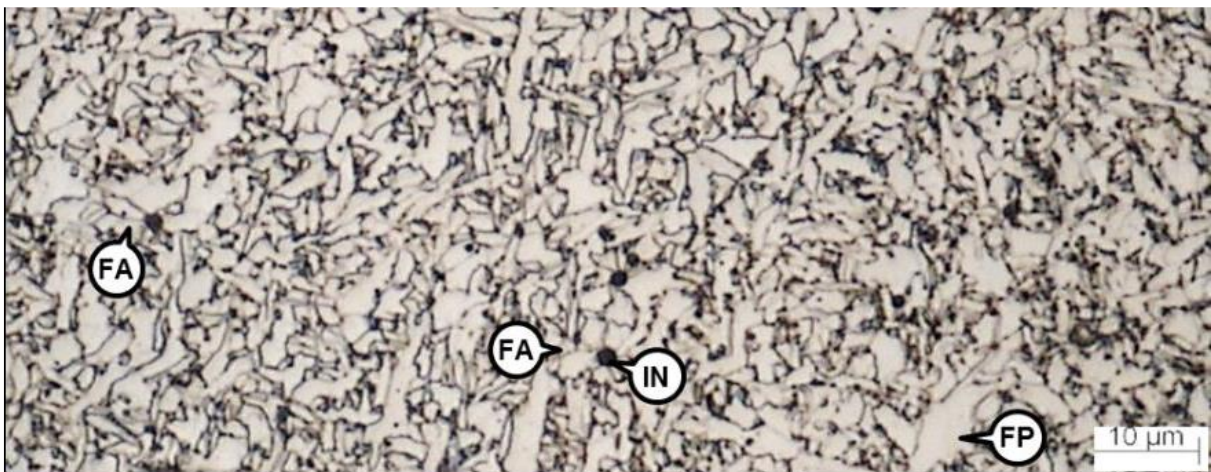
Fonte – Próprio autor

4.2 Avaliação da microestrutura

Para a avaliação da microestrutura foram consultados trabalhos similares ao experimento realizado. Os resultados encontrados por Costa (2019) são apresentados pela Figura 18 e Figura 19.

Foram consultadas também as notas de aula de Krelling ver Figura 20. Estes foram aplicados como base de comparação para o experimento realizado.

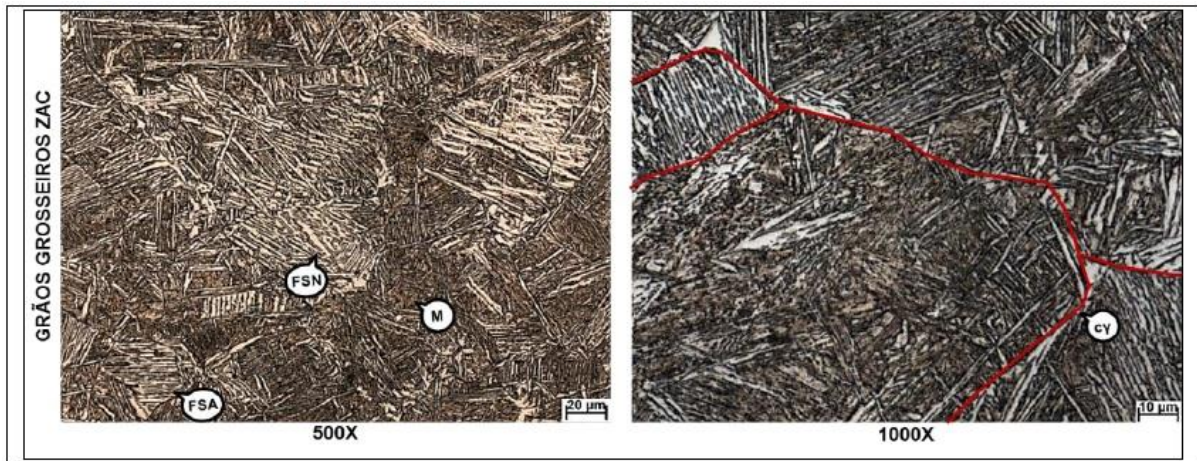
Figura 18 - Estruturas cristalinas encontrada por Costa (2019) para o centro do cordão.



FA – Ferrita Acicular; FP - Ferrita Poligonal ; IN - inclusões

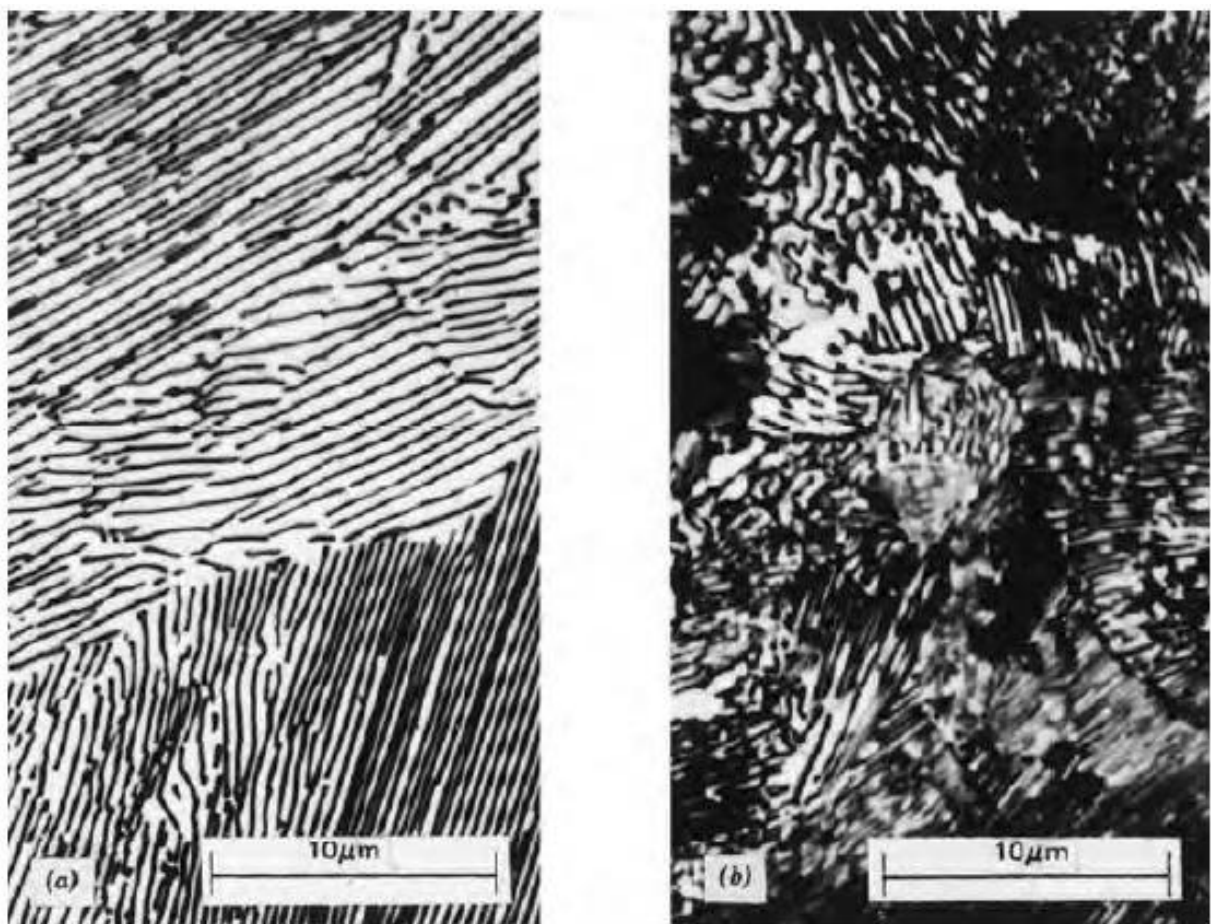
Fonte - Costa (2019).

Figura 19 - Estruturas cristalinas encontrada por Costa (2019) para Zona Termicamente Afetada.



FSA – Ferrita com segunda fase alinhada; FSN – Ferrita com segunda fase não alinhada; M – Martensita;
Fonte - Costa (2019).

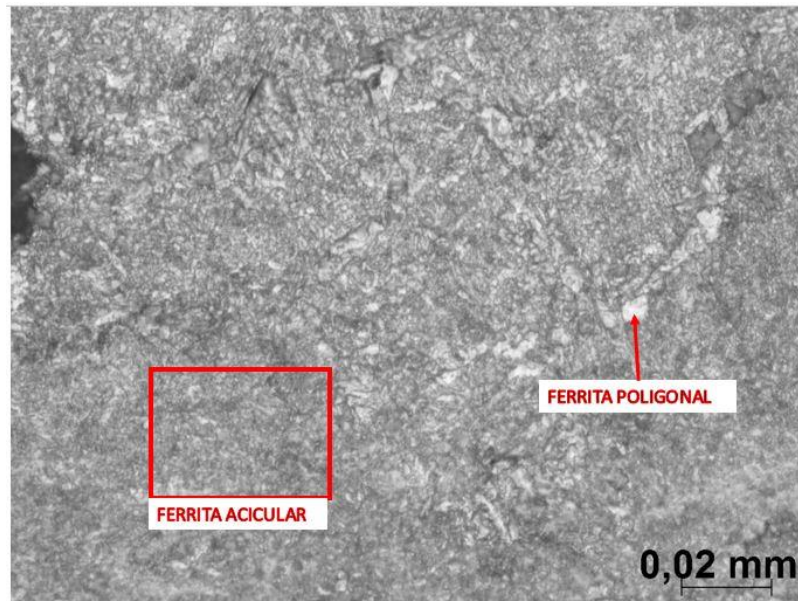
Figura 20 - Comparação entre Perlita fina(a) e Perlita Grosseira (b).



Fonte – Krelling (2019).

Para o eletrodo **E 7018 – 60A A**, (Figura 21) a análise indica a predominância da estrutura, Ferrita acicular e foram encontrados em alguns pontos Ferrita poligonal.

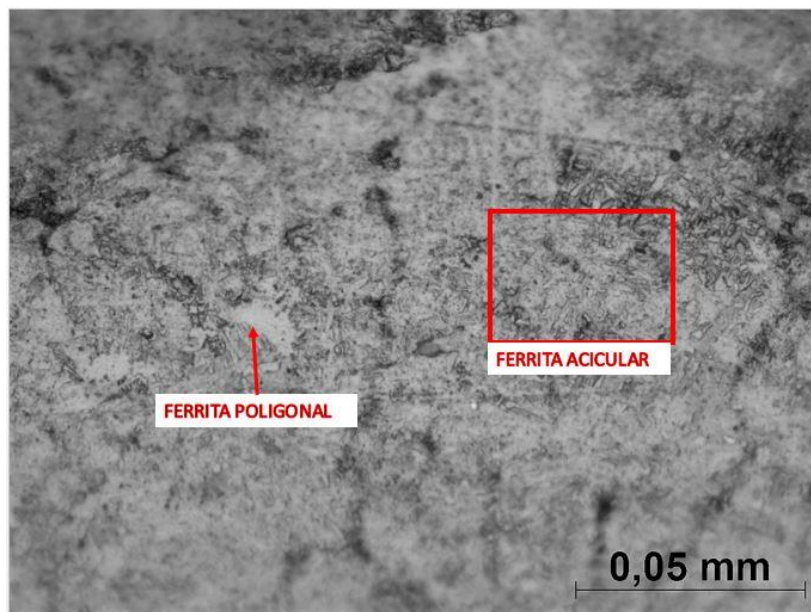
Figura 21 - Eletrodo E 7018 - 60 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.



Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo **E 7018 – 55A** (Figura 22) a microestrutura encontrada para o ensaio foi Ferrita acicular e Ferrita poligonal, porém foi observado uma formação excessiva de oxido sobre o cordão de solda.

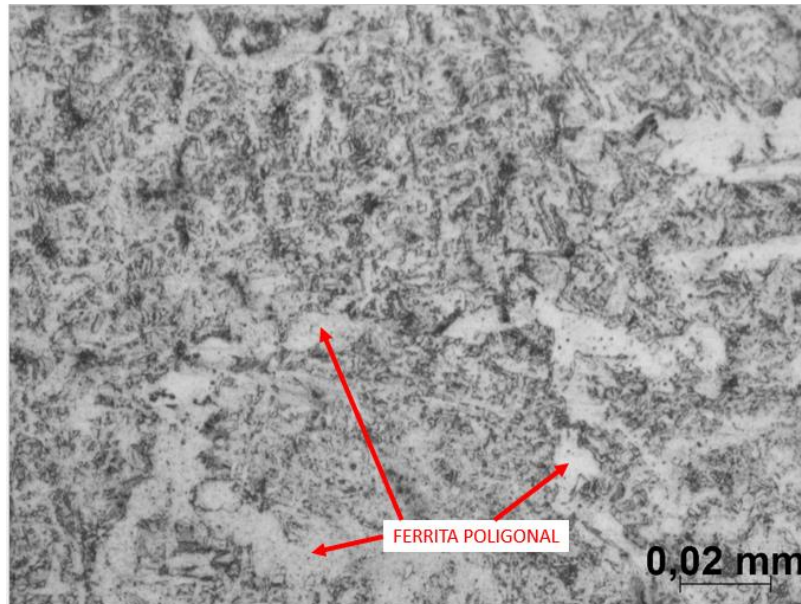
Figura 22 Eletrodo E 7018 - 55 A, Centro do cordão, ampliação de 500x.



Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo **E 7018 – 50 A** (Figura 23) notou-se um aumento da fase Ferrita Poligonal, ainda ocorreram evidências da fase Ferrita acicular, porém notou-se a redução dessa fase em relação aos ensaios anteriores.

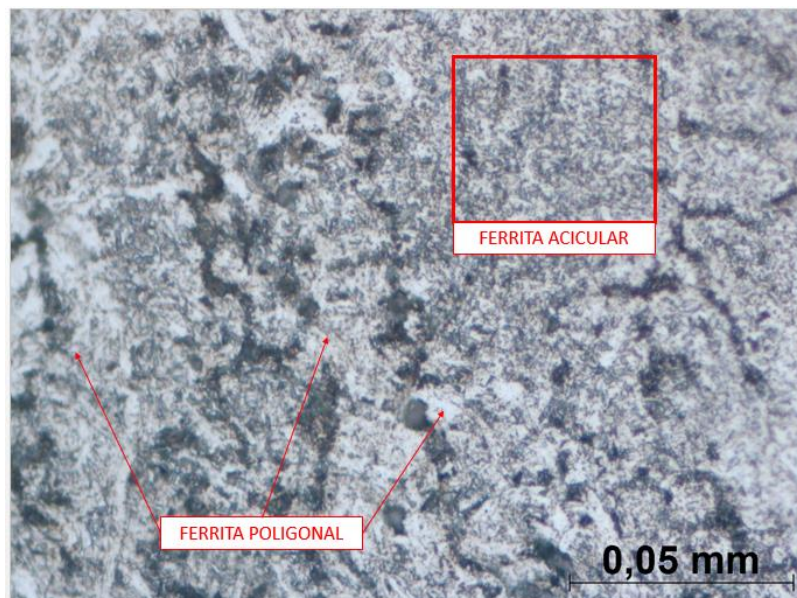
Figura 23 - Eletrodo E 7018 - 50 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.



Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo **E 7018 – 45 A** (Figura 24) a estrutura encontrada foi Ferrita acicular e Ferrita poligonal, com uma presença elevada de óxidos sobre o cordão de solda.

Figura 24 - Eletrodo E 7018 - 45 A, Cordão de solda, ampliação de 500x.

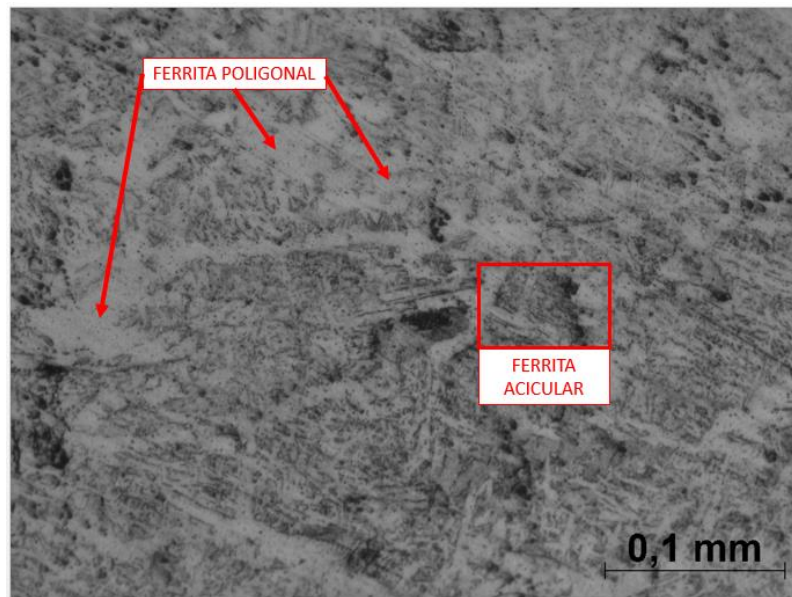


Fonte – Próprio autor.

Para o eletrodo **E 7018-W1 – 60A**, (Figura 25) foi encontrada a estrutura Ferrita acicular e Ferrita poligonal. Note que para o presente caso a área formada pela estrutura

Ferrita poligonal é maior que para o ensaio com o eletrodo E 7018 convencional, fato que se reflete na dureza observada entre os cordões.

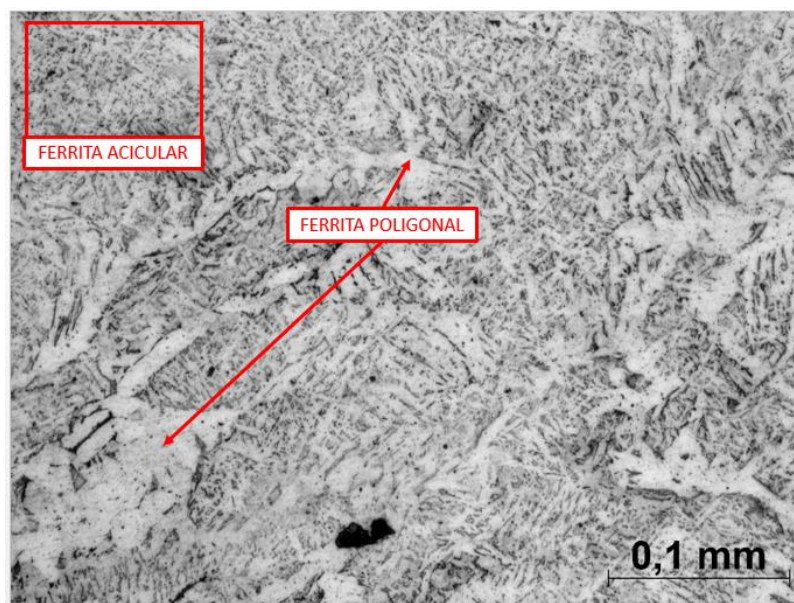
Figura 25 - E 7018 - W1 - 60A, Centro do Cordão, Ampliação de 200x.



Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo **E 7018-W1 – 55A**, foi encontrada a estrutura Ferrita poligonal com menor incidência de ferrita acicular (Figura 26).

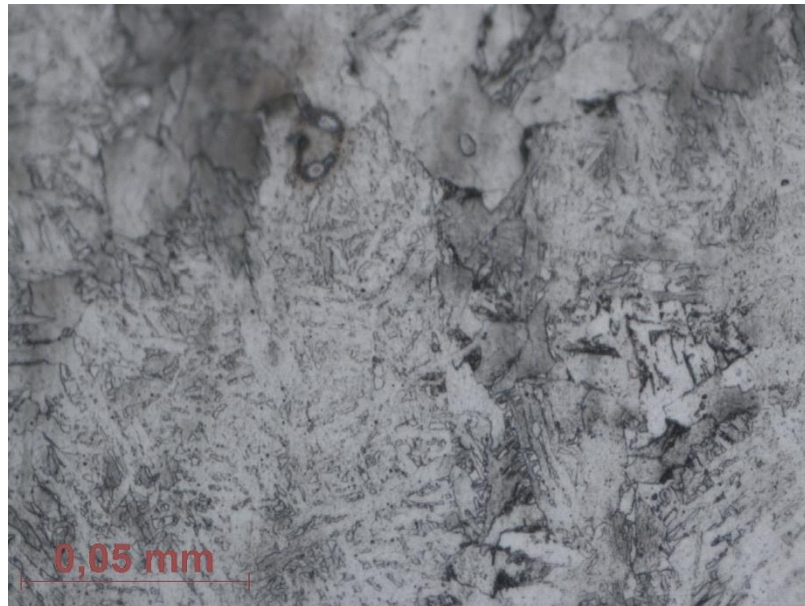
Figura 26 - E 7018 - W1 - 55A, Cordão de solda, Ampliação de 200x.



Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo **E 7018-W1 – 50A** foi encontrada a estrutura semelhante a Ferrita Poligonal (Figura 27), devido ao tamanho do grão formado.

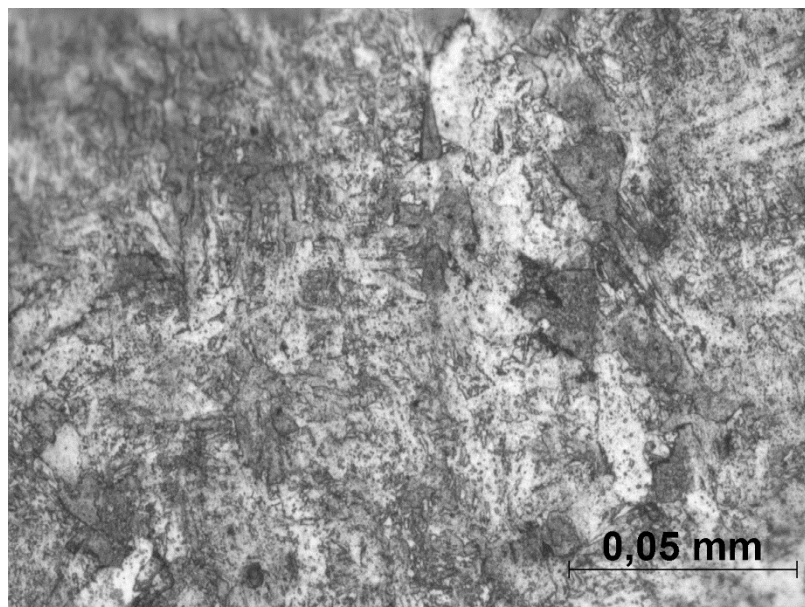
Figura 27 - E 7018 - W1 - 50A, Centro do cordão, Ampliação de 500x.



Fonte - Próprio autor.

Para o eletrodo **E 7018-W1 – 45A** foi encontrada a estrutura Ferrita acicular e Ferrita poligonal (Figura 28), avaliada ao centro do cordão.

Figura 28 - E 7018 - W1 - 45A, Centro do cordão, Ampliação de 500x.



Fonte - Próprio autor.

A Figura 29 e Figura 30 apresentam o aspecto do metal de base para dois ensaios diferentes, note que não ocorreram modificações expressivas no aspecto do metal de base, resultado que é confirmado pela pouca variação na dureza.

Figura 29 - Metal de base E 7018 - 50 A, Ampliação de 25x.

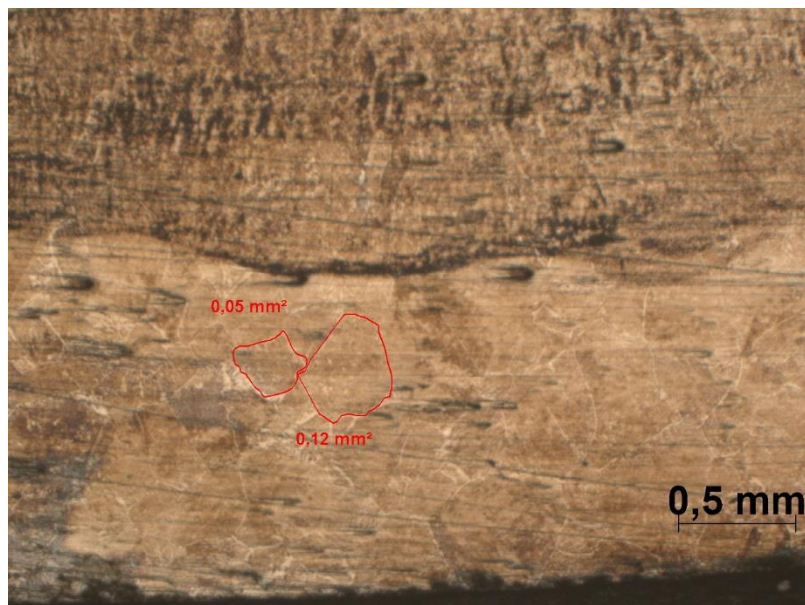
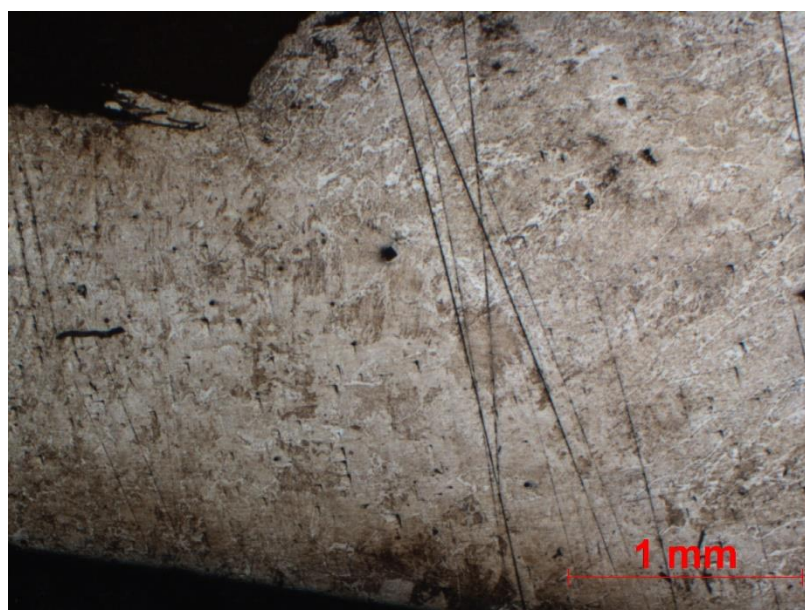


Figura 30 - Metal de base E 7018 - W1 - 50 A, Ampliação de 25x.



4.3 Avaliação da dureza dos cordões

Após os ensaios realizados, uma amostra foi retirada de cada chapa. Estas foram embutidas e suas durezas foram analisadas, seguindo sempre a sequência de três medições antes do cordão de solda, três dentro e três após o cordão conforme apresenta a Figura 15. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados. Os apêndices 4 a 11 apresentam os resultados em forma gráfica para melhor avaliação.

Tabela 1 – E 7018, avaliação da dureza Vickers, resultado preliminar.

	METAL DE BASE	CORDÃO DE SOLDA
E 7018, i = 90 A, d = 0,5	201,58	290,17
E 7018, i = 60 A, d = 0,5	199,12	287,53
E 7018, i = 55 A, d = 0,5	175,17	257,90
E 7018, i = 45 A, d = 0,5	191,67	274,00

Fonte – Próprio autor

A análise da Tabela 1 permite inferir que, para o eletrodo E 7018 convencional, há uma tendência de que a dureza no cordão de solda é sempre maior que a dureza no metal de base. Notou-se também que o aumento da corrente implicava no aumento da dureza ao centro do cordão. Após realizar o ensaio variando a corrente de operação, foi realizado a variação da abertura de raiz, os valores encontrados para a dureza desse ensaio são apresentados pela Tabela 2.

Tabela 2 – E 7018, avaliação da dureza Vickers em função da abertura de raiz, resultado preliminar.

	METAL DE BASE	CORDÃO DE SOLDA
E 7018, i = 55 A d = 0,80	178,52	264,67
E 7018, i = 55 A, d = 0,75	157,77	275,43
E 7018, i = 55 A, d = 0,50	175,17	257,90

Fonte – Próprio autor

A análise referente a Tabela 2 indica que o aumento da abertura de raiz provocou variação no valor médio da dureza no cordão de solda porém não de forma significativa como o aumento da corrente, seu principal efeito foi na abertura de arco. Para a Tabela 3 foram variados a distância de abertura de raiz, bem como a corrente de operação.

Tabela 3 – E 7018-W1, avaliação da dureza, resultado preliminar.

	METAL DE BASE	CORDÃO DE SOLDA
E 7018 W1, i = 55 A, d = 0,70	168,23	249,27
E 7018 W1, i = 45 A, d = 0,50	190,45	240,17

Fonte – Próprio autor

Para o eletrodo E 7018 – W1, notou-se que o aumento da corrente implicava no aumento da dureza do cordão de solda. A abertura de raiz não apresentou grande influência na variação da dureza.

Foi então realizado um novo ensaio, mantendo a abertura de raiz em 0,75 mm, por este ser o melhor parâmetro de soldagem encontrado. Foram ensaiados os eletrodos E 7018 e E 7018-W1. Os resultados encontrados são apresentados pelas Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Dureza encontrada para o eletrodo E 7018 - W1.

ELETRODO - AMP	METAL DE BASE	CORDÃO DE SOLDA
E 7018 - W1 - 60A	185,44	222,18
E 7018 - W1 - 55A	175,17	218,14
E 7018 - W1 - 50A	167,89	207,27
E 7018 - W1 - 45A	170,85	225,50

Fonte – Próprio autor

Quanto ao eletrodo E 7018 – W1, constatou-se que há uma tendência de que o aumento da corrente de operação provoque um aumento na dureza do cordão.

Constatou-se um aumento na fase Ferrita Poligonal nos ensaios para o eletrodo E 7018 – W1 em comparação com E 7018 convencional, esse fato justifica os menores níveis de dureza encontrado para esse ensaio.

Para o ensaio de 45A, notou-se que havia uma maior incidência de Ferrita acicular que Ferrita poligonal se comparado ao ensaio de 50 A, isso justifica o maior valor de dureza encontrado, visto ser uma característica da fase acicular apresentar maior dureza que a fase poligonal. Quanto ao metal de base não houve variação expressiva do valor de dureza. Quanto ao eletrodo E 7018 convencional, os resultados encontrados são apresentados pela Tabela 5.

Tabela 5 - Dureza encontrada para o eletrodo E 7018.

ELETRODO - AMP.	METAL DE BASE	CORDÃO DE SOLDA
E 7018 - 60A	167,05	232,72
E 7018 - 55A	159,89	221,63
E 7018 - 50A	162,23	220,88
E 7018 - 45A	181,03	253,31

Fonte – Próprio autor

A análise geral dos resultados indica que um aumento da corrente de operação, implicou em uma tendência no aumento da dureza do cordão.

Foi observado que durante o ensaio da amostra de 45 A, ocorreu um pico em sua dureza ao analisar a Figura 24 notou-se a formação da estrutura Ferrita acicular, que apresenta uma dureza maior que a ferrita poligonal, o que justifica o pico de dureza encontrado. O mesmo fenômeno foi observado no ensaio de 45 A para o eletrodo E 7018 – W1, isso pode ser justificado, pois soldagem com baixo aporte térmico favorece a formação de constituintes com baixa temperatura de formação (Costa, 2019), bem como pode afetar a taxa de resfriamento. Quanto maior a taxa de resfriamento, maior a tendência de formação de ferrita acicular. Notou-se, também, que em geral os ensaios apresentavam uma maior incidência de ferrita acicular, o que refletiu em maiores valores de dureza para o cordão de solda. Quanto ao metal de base, pode-se observar que sua dureza permaneceu razoavelmente constante, não sofreu variações expressivas.

4.3.1 Avaliação geral

Após avaliar os resultados encontrados tem-se que: A abertura de raiz apresenta pouco efeito quanto a dureza do cordão, sendo mais expressiva quanto a estabilidade do arco de solda.

Para o eletrodo E 7018-W1 e para o eletrodo E 7018 há uma tendência de aumento da dureza com o aumento da corrente.

Foi observado que o metal soldado utilizando o eletrodo E 7018 apresentava maior dureza que o com eletrodo E 7018-W1 possivelmente pela maior presença de ferrita acicular.

4.4 Avaliação da resistência mecânica do cordão

Segundo Souza (2004), a resistência ao escoamento pode ser aproximada pela dureza pela Eq. (2) onde σ_e é dado em (MPa).

$$HV = 3 \cdot \sigma_e \quad (2)$$

Com os valores encontrados no segundo ensaio, e utilizando a teoria apresentada em Souza (2004) é possível inferir que a resistência mecânica do cordão é superior a resistência mecânica do metal de base.

Então caso seja realizado um ensaio de tração sobre as amostras a tendência é que não ocorra o rompimento do cordão de solda e sim do metal de base.

4.5 Ensaio de corrosão

As amostras foram enviadas para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, para que fossem realizados os ensaios de corrosão em câmara salina e ensaio de polarização, o ensaio de névoa salina foi realizado durante 300 horas, Os resultados foram

similares junto ao cordão de solda, ZAC e Metal de base. Cada amostra foi observada de 24 em 24 horas. Os óxidos superficiais formados contribuíram para proteção do substrato, não apresentando degradação significativa do mesmo.

Foi tentado ainda ensaio de polarização potenciodinâmica anódica na UFRGS, mas pelas geometrias das amostras os primeiros ensaios foram inconclusivos, dificultando discussões e conclusões. Em suma não foi observada diferença significativa na formação do oxido de proteção quando ocorre a variação do eletrodo utilizado.

Não foi possível, portanto afirmar se a camada de oxido formada sobre o cordão de solda apresentava ou não as características de aderência e de proteção que o metal de base apresenta.

5 CONCLUSÃO

O primeiro ponto a se observar é que, operação de soldagem em chapas finas o operador deve se preocupar em primeiro lugar com a forma de fixar a mesma, isso porque a chapa tende a se deformar de forma considerável durante a soldagem, e isso pode afetar a qualidade da junta soldada.

Quanto aos parâmetros de operação, após avaliar os seguintes pontos: Abertura do arco, qualidade do cordão de solda e velocidade de soldagem. Entendeu-se que o melhor parâmetro de operação encontrado foi de 55 A e abertura de raiz de 0,75 mm, realizando a solda de topo. Notou-se que variações na distância da ponta do eletrodo até a chapa, afetavam significativamente a manutenção do arco, sendo essa uma variável ligada ao operador.

Quanto a variação da dureza das amostras, notou-se que a abertura de raiz era um fator de pouca relevância para a dureza, entretanto é um fator importante para a estabilidade e abertura do arco. Para os ensaios realizados em 45 A, notou-se um pico de dureza, isso está associado a maior presença da fase Ferrita acicular nessas amostras que para os ensaios de 55 A. Em linhas gerais ao aumento da corrente implica em um aumento da dureza do cordão de solda. Notou-se que a dureza do eletrodo E 7018 convencional é maior que a dureza do eletrodo E 7018 – W1, devido a maior incidência da fase Ferrita acicular para o eletrodo E 7018.

Quanto a resistência do cordão, é possível inferir que o cordão de solda apresenta maior resistência que o metal de base, para todos os casos observados, visto que a dureza do cordão foi sempre maior que a dureza do metal de base.

Quanto ao ensaio de corrosão os resultados foram inconclusivos sendo necessário avaliar a aplicação de outros ensaios sobre o aço corten.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são sugeridas as seguintes modificações no experimento.

- Realizar o processo de soldagem de chapas finas de aço corten, utilizando o processo de solda MIG/MAG – Arco Pulsado.
- Verificar a influência da composição química na dureza do material.
- Realizar a avaliação da dureza da junta soldada, utilizando o método Brinell, como forma de minimizar a influência de fases específicas da junta soldada.
- Realizar os ensaios de tração e dobramento para avaliar a resistência da junta.
- Verificar o processo de corrosão da junta.

7 REFERÊNCIAS

BELLEI, I.H, Edifícios industriais projeto e cálculo em aço, 2º Edição, Editora PINI LTDA, São Paulo, 1998.

CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. Disponível em: <<https://www.cbcaacobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em 20/02/2020

COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R, Aços e ligas especiais. 2º Edição, Editora PANNON GRÁFICA S.A., Sumaré, São Paulo, 1988.

COSTA, Adalto Vermeck. Soldabilidade de um aço patinável de alto silício para construção metálica com resistência extra à corrosão em atmosfera marinha. 2019. Tese (Mestrado em Eng. Metalúrgica) - Escola de Engenharia da UFMG - Universidade Federal De Minas Gerais, São Paulo, 2019.

Bubnoff, D. V., Ventrella V. A., Relação entre microestrutura / tenacidade ao impacto do metal de solda do aço api x-70 soldado por eletrodo revestido AWS E8010-G, Universidade Estadual de São Paulo - UNESP.

DUTRA, A. S., BOFF, U., MARQUES, A. S. e SCHAEFFER, L. Estudo analisa o uso de aços estruturais resistentes à corrosão atmosférica. Corte & Conformação de Metais. Janeiro 2013.

ESAB. Disponível em: < <https://www.esab.com.br/br/pt/index.cfm> >. Acesso em 01/01/2021.

GENTIL, V. Corrosão. 3ª Edição. LTC- Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A, Rio de Janeiro, 1994

KRELLING, Prof. M.sc.: Anael. - Diagramas TTT. (????) p. Notas de Aula. 7;8. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/T%3%A9cnico%20em%20Mec%3%A2nica%20Integrado/TTT/1%20-%20Diagramas%20TTT.pdf>>

MACHADO, I.G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre. 2007

PANNONI, F.D. História, Comportamento e Usos dos Aços Patináveis na Engenharia Estrutural Brasileira. 59º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, 2004.

Travassos S.J. et al., COR-TEN: Uma história de 50 anos no Brasil, Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016

SOUZA, S. A., Ensaios mecânicos de materiais metálicos, fundamentos teóricos e práticos. 5º edição, Editora Edgard Blucher LTDA. 2004

ANEXO 1

Tabela 6 - Levantamento preliminar da dureza das amostras.

MEDIÇÃO - DUREZA VICKERS									
ELETRODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E 7018, i = 90 A, d = 0,5	163,5	169,1	245,3	265,7	313,3	291,5	275	185	171,6
E 7018, i = 45 A, d = 0,5	174	168,6	269,2	315,9	328,2	177,9	185,4	175,3	177,5
E 7018, i = 55 A, d = 0,5	173,8	179,2	176,3	260,8	264,1	248,8	174	172,3	175,4
E 7018, i = 60 A, d = 0,5	166	176,9	260,4	266,8	309,9	285,9	238,9	175,2	177,3
E 7018, i = 55 A, d = 0,75	154,9	152,1	160	271,4	297,8	257,1	161,1	160,6	157,9
E 7018, i = 55 A, d = 0,8	181,5	176,8	186,9	269,3	286,4	238,3	198	160,4	167,5
E 7018 W1, i = 45 A, d=0,5	191,8	182,5	230,9	251	263,9	232,9	185	175,2	177,3
E 7018 W1, i = 55 A, d =0,7	162,3	167,1	175,3	235,5	281,4	203,6			
i = Amperagem utilizada (A) d = Abertura de raiz (mm)									
1, 2, 3 – Medições realizadas no metal de base 4, 5, 6 – Medições realizadas no cordão de solda 7, 8, 9 – Medições realizadas no metal de base									

ANEXO 2

Tabela 7 - Dados referentes a segunda análise da dureza Vickers E 7018 - W1.

DUREZA VICKERS PARA O ELETRODO E 7018 - W1										
ELETRODO - AMP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E 7018 - W1 - 60A	156,1	157,4	160,5	222,3	208,4	208,2	202	205,7	163,3	131,4
E 7018 - W1 - 60A	170,1	175,1	210,1	237,5	235,6	236,2	250,1	187,9	177,5	179,6
E 7018 - W1 - 60A	159	184,7	201	208,8	220,6	221,7	214,7	189,5	173,3	156,5
E 7018 - W1 - 55A	169,1	170,6	170	206,9	227,4	218,6	220,6	220,1	205,4	179
E 7018 - W1 - 55A	154,8	158,9	159,9	206,9	221,6	219,9	228,4	210,2	185,7	163,2
E 7018 - W1 - 55A	158,9	161,4	190,2	229	222,8	225,3	190,3	168,7	161,8	165,1
E 7018 - W1 - 50A	151,1	159,8	205,3	213,9	219,9	211	209,3	159,1	162,4	117,5
E 7018 - W1 - 50A	178,5	178,7	198	197,2	208,9	203,9	202,5	200,6	163,9	171,6
E 7018 - W1 - 50A	149,4	150,6	173,2	200,4	215,4	201,1	203,7	188,2	160,9	153,2
E 7018 - W1 - 45A	145,8	151,1	163,4	209,3	215	215,5	234,8	212	177,3	170
E 7018 - W1 - 45A	155,6	176,8	186,7	206,2	225,5	239,3	224	223,1	175,3	149,1
E 7018 - W1 - 45A	164,1	176,2	172	231,9	226,2	244,9	233,4	165,3	155	156,5
<p>1, 2, 3 – Medições realizadas no metal de base. 4, 5, 6, 7 – Medições realizadas no cordão de solda. 8, 9, 10 – Medições realizadas no metal de base.</p>										

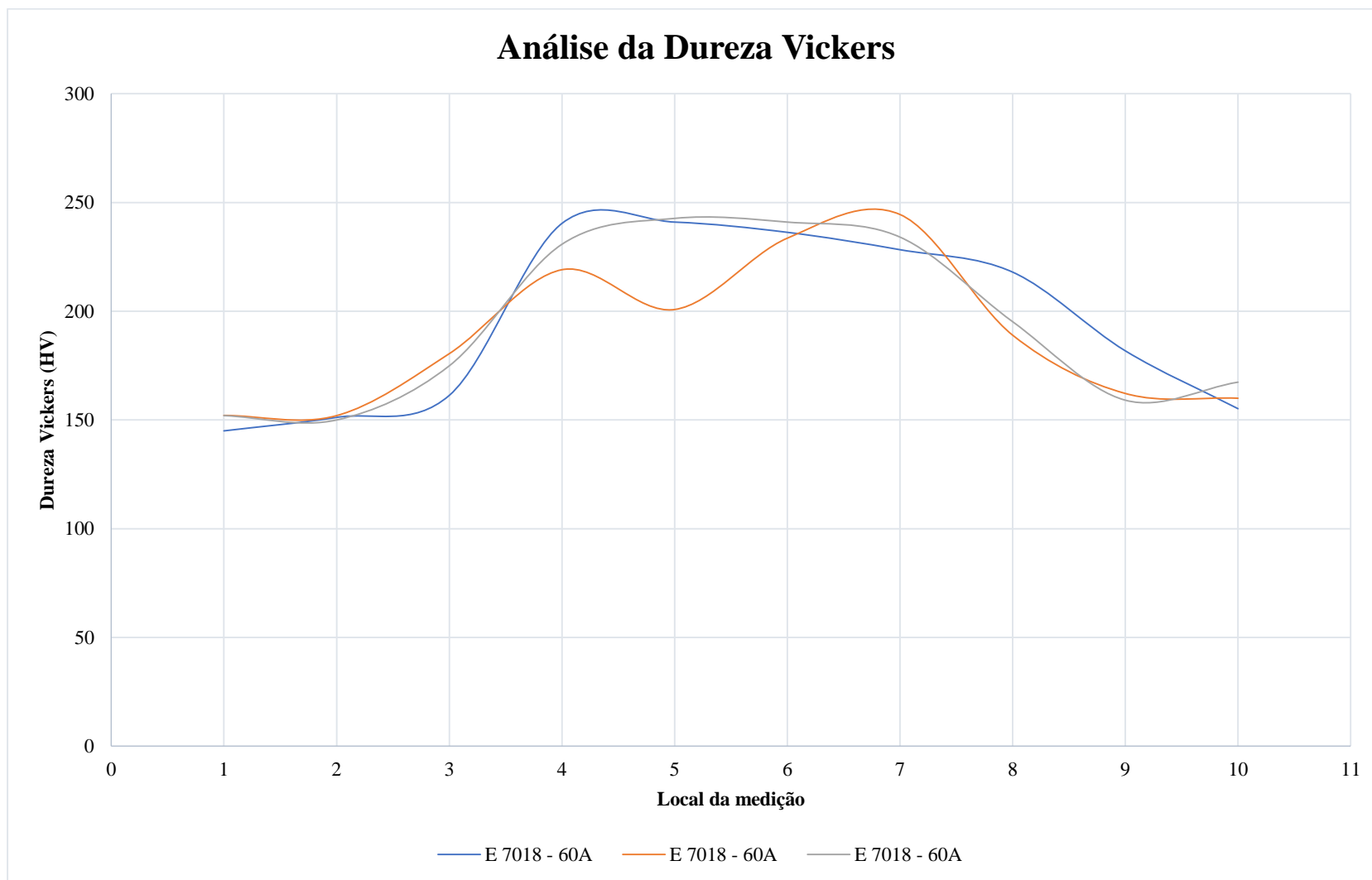
ANEXO 3

Tabela 8 - Dados referentes a segunda análise da dureza Vickers E 7018.

DUREZA VICKERS PARA O ELETRODO E 7018										
ELETRODO - AMP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E 7018 - 60A	145	151,2	161,3	240,4	241	236,3	228,3	218	181,8	155,2
E 7018 - 60A	152,1	152	180,5	219,1	200,8	233,6	244,5	189	162,2	160
E 7018 - 60A	152	150	174,9	230,8	242,7	241	234,1	195,2	159,1	167,4
E 7018 - 55A	152,7	150,6	154,4	213	226,1	248,9	234,2	188,4	159,6	154,9
E 7018 - 55A	168	165,8	160,7	201,5	228,7	226	205	170,3	160,4	154,3
E 7018 - 55A	160,3	156,1	175,3	220	219,3	226,4	210,5	152,4	145,6	148,2
E 7018 - 50A	153,9	162,1	170,2	209,3	238,1	246,2	240,7	-	-	-
E 7018 - 50A	144	146,2	155,8	182,2	194,5	205,3	204,9	174,4	153,2	156,6
E 7018 - 50A	152	156,8	158,6	223,9	222,1	249,6	245,5	201	194,2	154,4
E 7018 - 45A	156	166,7	166	227	231,9	229,7	234	155,6	146,5	154,5
E 7018 - 45A	182,7	180,9	192,9	228,2	274,6	287,2	310,6	230	294,6	193
E 7018 - 45A	173,1	178,1	165,3	250,7	275,5	268	222,3	172,2	180	170,4
<p>1, 2, 3 – Medições realizadas no metal de base. 4, 5, 6, 7 – Medições realizadas no cordão de solda. 8, 9, 10 – Medições realizadas no metal de base.</p>										

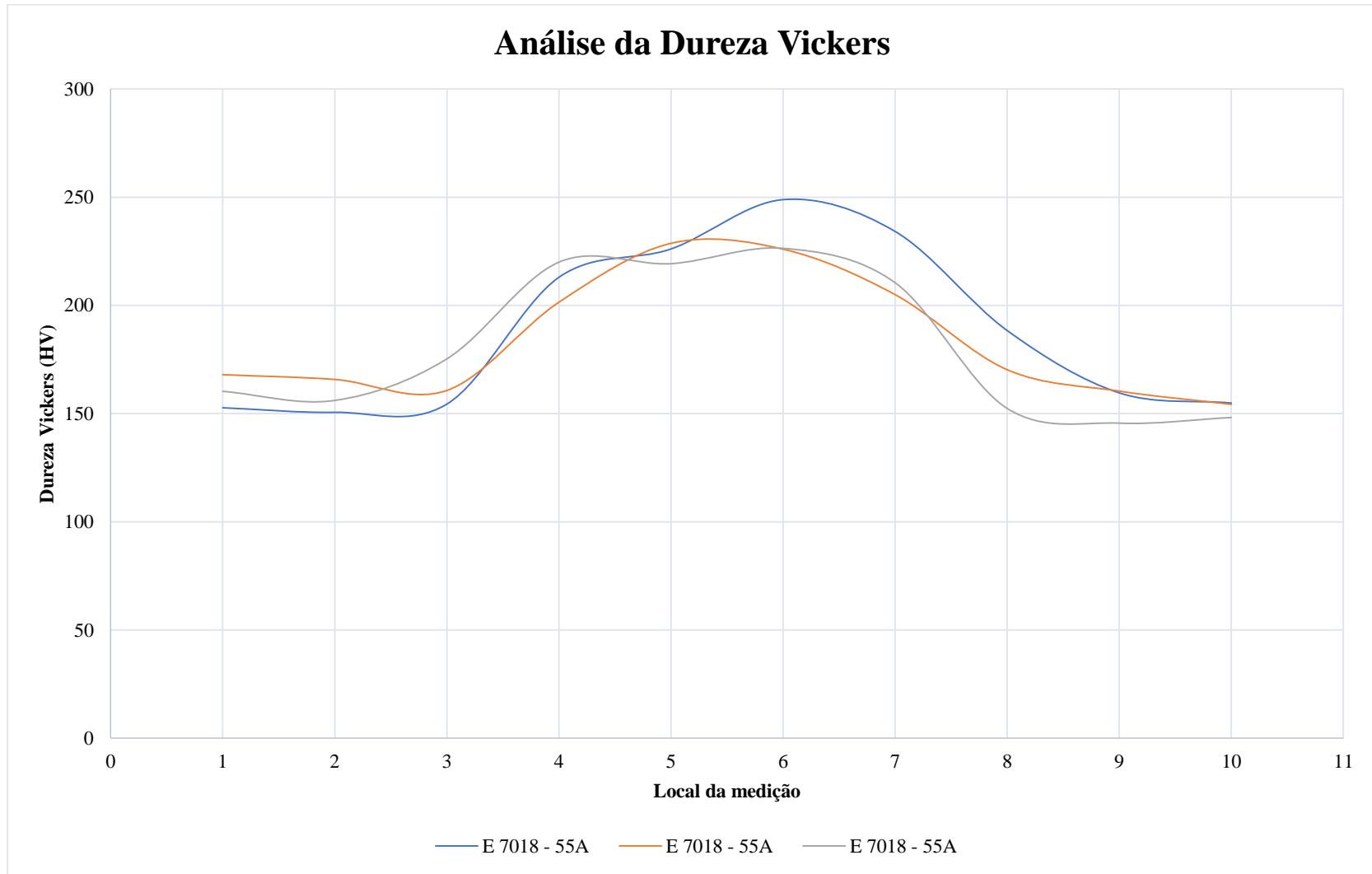
ANEXO 4

Gráfico 1: Avaliação da dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – 60 A.



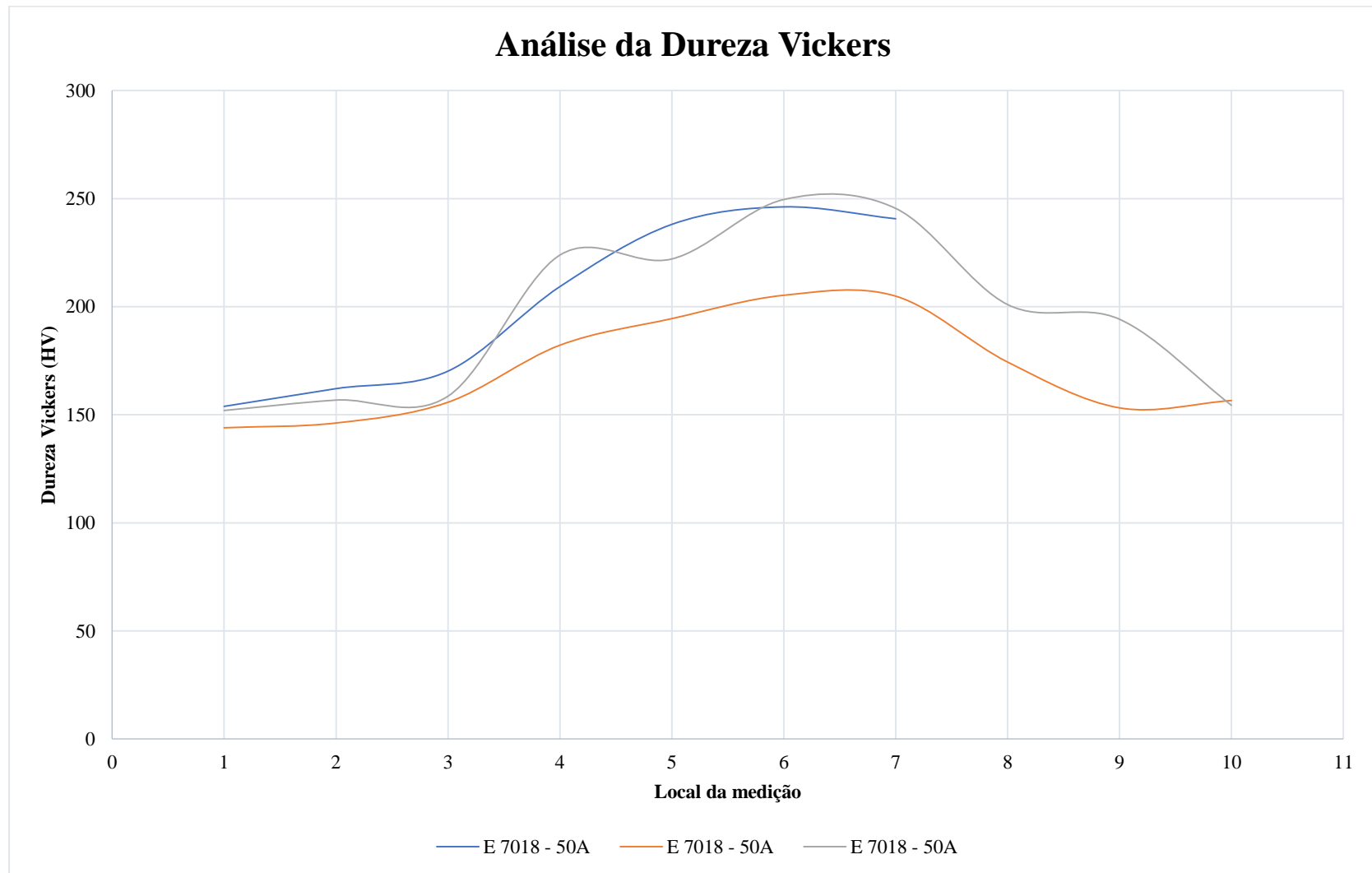
ANEXO 5

Gráfico 2: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 - 55 A.



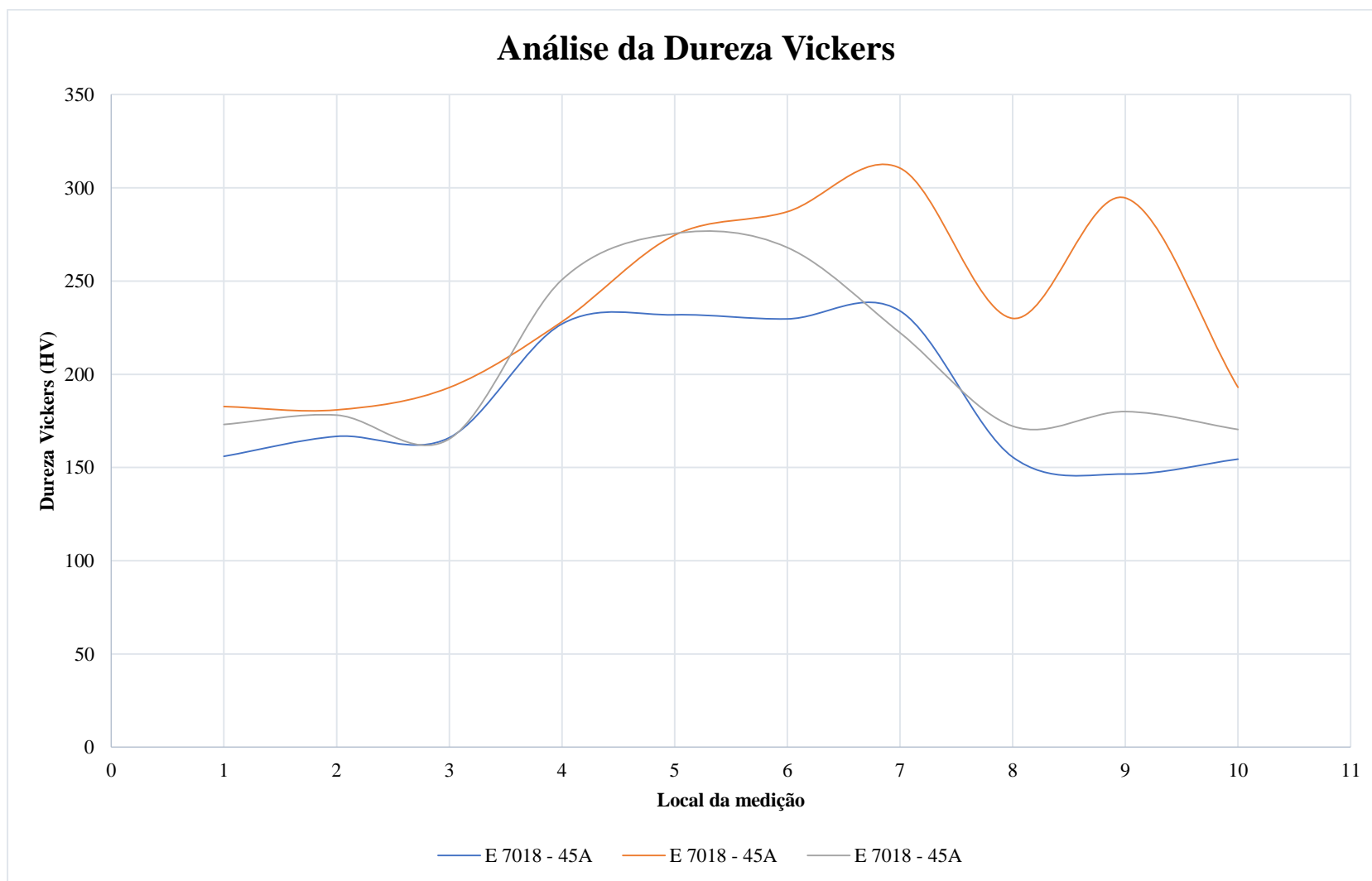
ANEXO 6

Gráfico 3: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – 50 A.



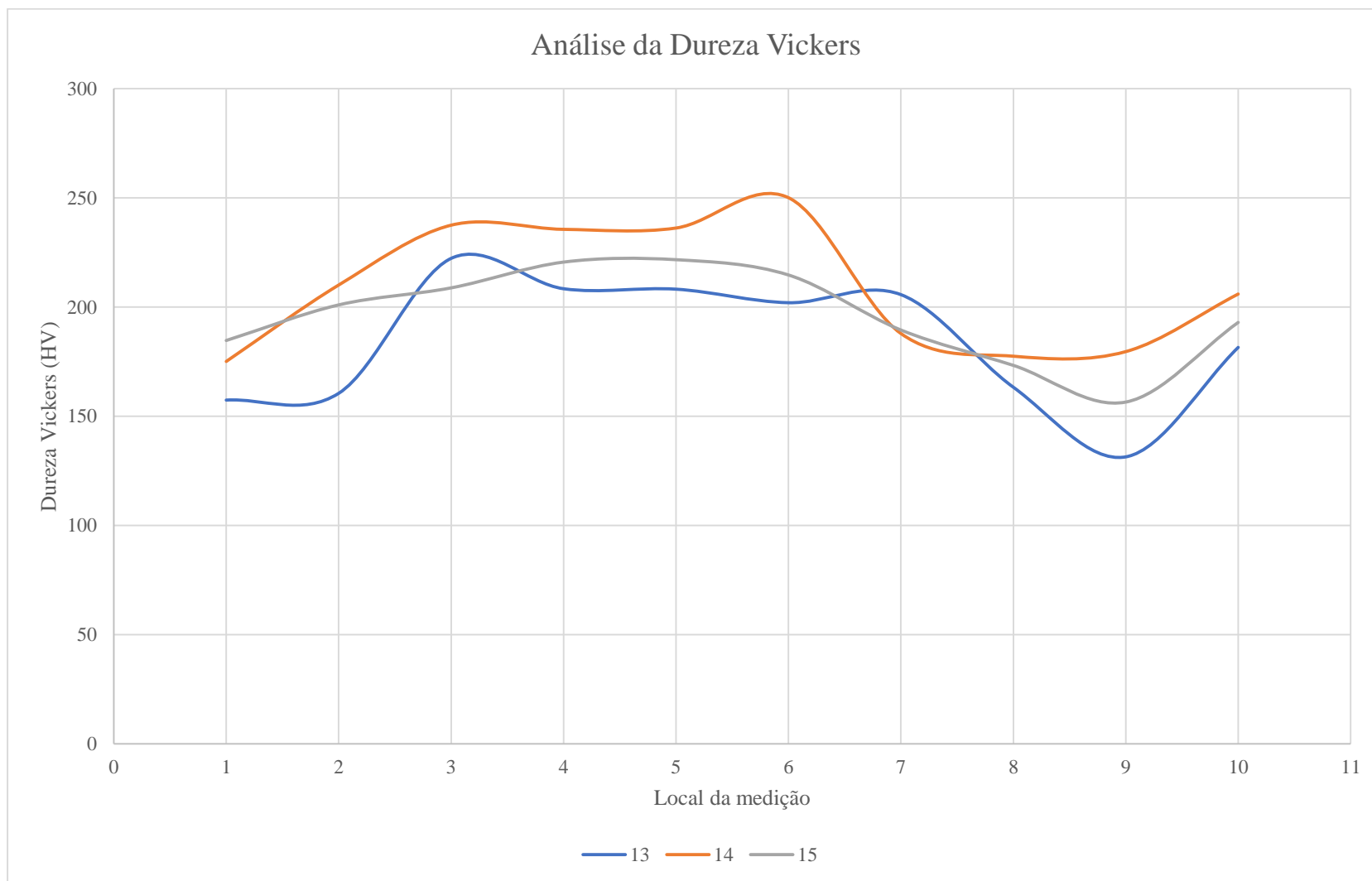
ANEXO 7

Gráfico 4: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – 45 A.



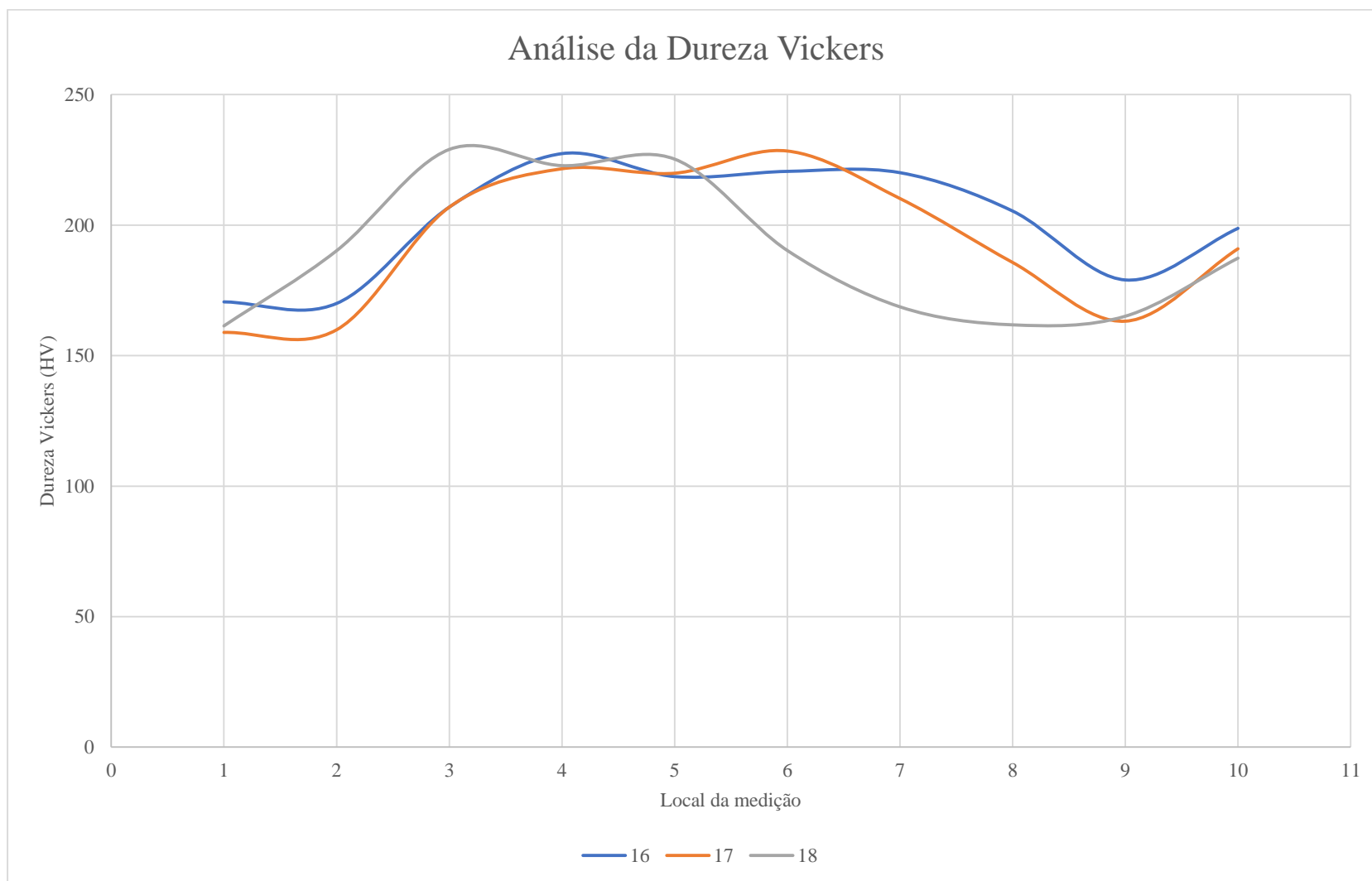
ANEXO 8

Gráfico 5: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – W1– 60 A.



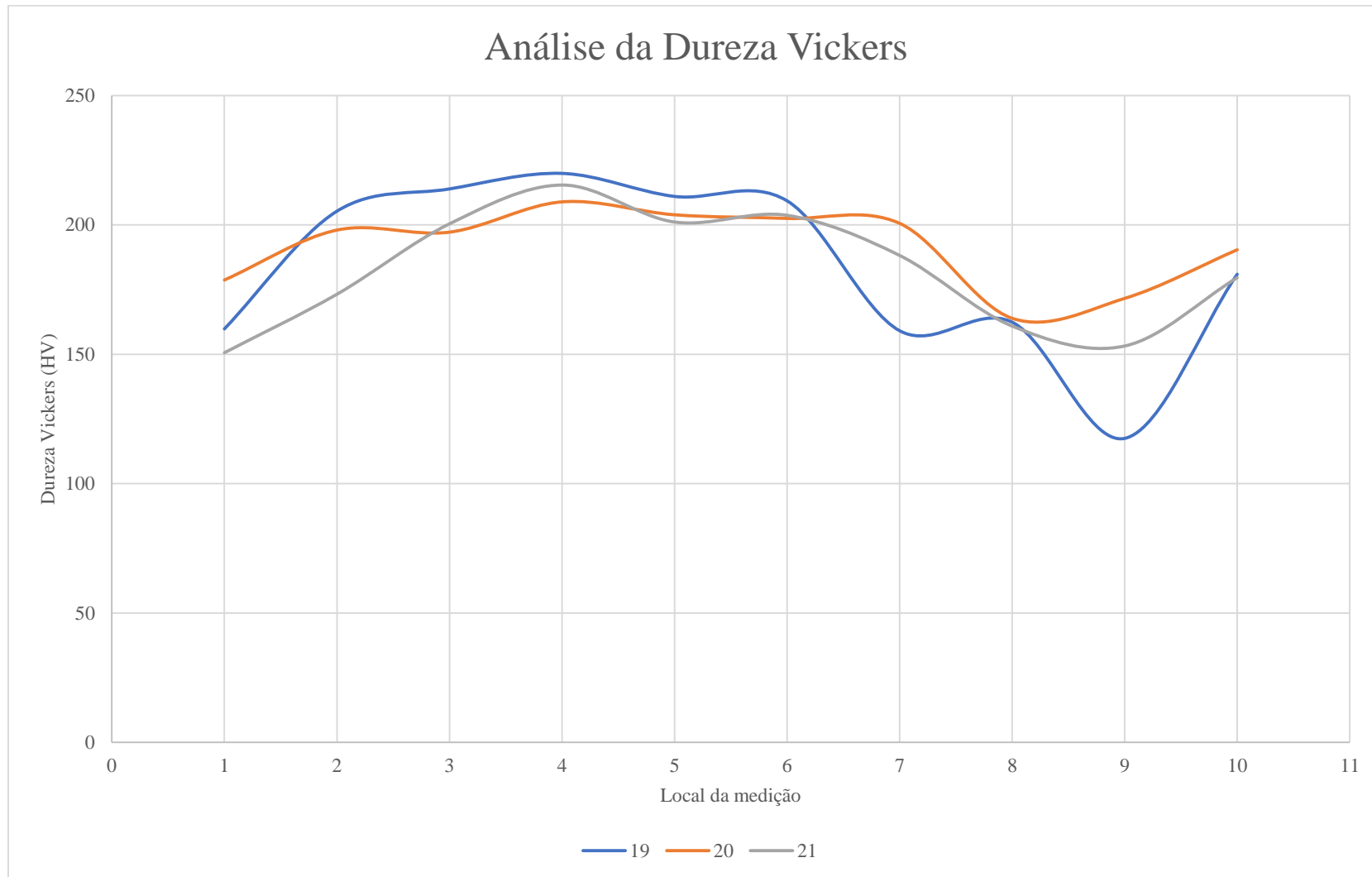
ANEXO 9

Gráfico 6: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – W1– 55 A.



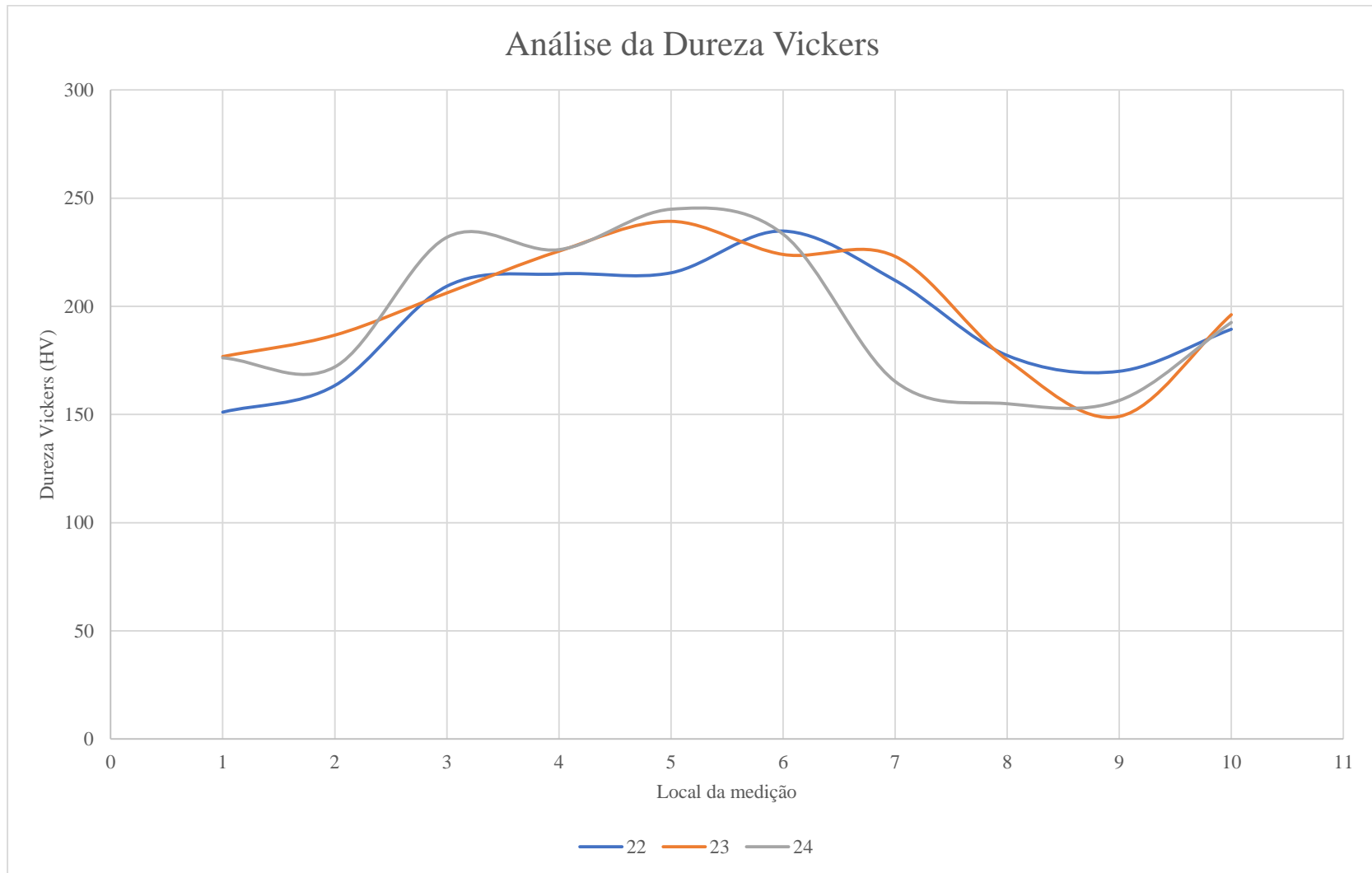
ANEXO 10

Gráfico 7: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – W1– 50 A.



ANEXO 11

Gráfico 8: Avaliação da Dureza ao longo do cordão de solda, para o eletrodo E 7018 – W1– 45 A.





APÊNDICE – 1 PLANO DE TRABALHO

PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Título: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM CHAPAS FINAS DE AÇO CORTEN, ESTUDO SOBRE A VARIAÇÃO DA CORRENTE DE OPERAÇÃO, ABERTURA DE RAIZ E POSSÍVEIS MODIFICAÇÕES NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CORDÃO DE SOLDA.

Dados	Discente
Matrícula/Nome	201301589 – Henrique Eugênio Siqueira
Telefone	62 981235653 / 62 35889529
E-mail	henriqueengenheiriomecanico@hotmail.com
Orientador(a):	Kléber Mendes de Figueiredo
Curso:	Eng. Elétrica () Eng. de Computação () Eng. Mecânica (x)
Certif. De Estudos	Não () Sim ()
Tipo de Projeto (Art. 13, Inciso V): Leia a lista de tipos de projeto Previstos na Resolução.	

Resumo

O projeto consiste em realizar ensaios de soldagem em chapas de aço patinável de 2 mm de espessura, com o objetivo de definir os melhores parâmetros de soldagem para esse material, avaliar o procedimento de soldagem isso é, ocorrem muitos respingos? o arco é aberto e se mantém com facilidade? E quaisquer outros parâmetros expressivos para o ensaio. O material de base apresenta elevada porcentagem de Cobre em sua composição, ao realizar a soldagem com eletrodos convencionais a saber, E6013 e E7018, espera-se que ocorram modificações em seu comportamento, mas quais? quais as modificações que ocorrem em relação ao se operar com o eletrodo E7018W1 indicado para aços patináveis, serão sobre essas questões que o projeto deverá se preocupar.

Após a realização dos ensaios, as amostras devem ser avaliadas quanto a sua microestrutura, composição química é resistência mecânica, os ensaios são necessários para comprovar a eficácia dos parâmetros de soldagem definidos.

I. Objetivos.

Os objetivos deste projeto são:

- Realizar ensaios de soldagem em chapas de aço patinável.
- Avaliar o procedimento de soldagem a fim de garantir sua viabilidade.
- Realizar a análise metalográfica do material com os seguintes objetivos:
 - Verificar a estrutura cristalina formada após o processo de soldagem.
 - Verificar a composição química do material.
- Concluir que os parâmetros de soldagem encontrados são adequados à aplicação em aços patináveis sem perda de suas características de proteção.

II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Realizar a revisão bibliográfica do tema.
- Realizar o ensaio de soldagem.
- Realizar a preparação das amostras para análise metalográfica.
- Análise metalográfica com o uso de microscópios.
- Análise química das amostras.

III. Resultados Esperados

Os resultados esperados neste projeto são:

- Definição dos parâmetros de soldagem para chapas com 2 mm de espessura.
- Entendimento quanto as modificações que ocorrem no metal de base ao ser soldado com os eletrodos E 6013 , E 7018 e E 7018 - W1.

IV. Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 1 – Semestre letivo de 2020.

Etapas do Projeto	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho
Pesquisa Bibliográfica	X				
Desenvolvimento	X	X	X	X	
Análise dos resultados	X		X	X	
Elaboração da Monografia conforme o caso			X	X	
Apresentação do Projeto Final				X	X

Goiânia, 10 de Março de 2020.

Henrique Eugênio Siqueira

201301589

Assinatura do(a) Prof.(a) Orientador(a):