



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



**Avaliação da influência do aporte térmico na microestrutura da ZAC de juntas
soldadas do aço inoxidável ENDUR 300.**

BRUNO MARTINS QUINTÃO

Itajubá, fevereiro de 2023.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



Avaliação da influência do aporte térmico na microestrutura da ZAC de juntas soldadas do aço inoxidável ENDUR 300.

BRUNO MARTINS QUINTÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais,
Projetos e Processos.

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni
Correa.

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo
Albergaria Ferreira.

Itajubá, fevereiro de 2023.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Avaliação da influência do aporte térmico na microestrutura da ZAC de juntas soldadas do aço inoxidável ENDUR 300.

Autor: **Bruno Martins Quintão**

Orientador: **Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa**

Coorientador: **Dr. Leonardo Albergaria Ferreira**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: **Projeto, materiais e Processos.**

Composição da Banca Examinadora:

Dr. Vanessa Bawden de Paula M.A. Laboratório Nacional de Astrofísica – LNA/MCTI.

Prof. Dr. Gilbert Silva – Universidade Federal de Itajubá.

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado forças, paciência e perseverança na realização deste grande sonho.

Aos meus pais, Creuza e Benedito, por estarem sempre ao meu lado, orando por mim, e por sempre priorizarem meus estudos sem poupar esforços para que eu conseguisse conquistar sonhos e objetivos profissionais.

A minha esposa Viviane, pelo incentivo, apoio, compreensão e acompanhamento durante o estudo.

A Zilma, Edenizio e Victor, pelo estímulo à conclusão de todas etapas do Mestrado.

A minha irmã Luana, pelo apoio à preparação das amostras, Fernando e Yasmin, pelo incentivo e apoio profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmilson Otoni Correa e ao coorientador, Prof. Dr. Leonardo Albergaria Ferreira, pela competência, dedicação, paciência, amizade e principalmente acolhimento.

Ao Pesquisador Reginaldo Pinto Barbosa, pela atenção, acompanhamento e dedicação junto a mim durante todo o estudo. Também pelo apoio dos pesquisadores Ricardo José, Geovane Martins Castro e Maurício Pinheiro.

À Indústria Mecânica Vitaly, pela doação dos arames de soldagem, através da empresária Flaviana Gaggiato.

O suporte do Senai por meio da gerente Andreza Mônica, através do espaço cedido para soldagem, onde possibilitou a abertura de novas parcerias com Aperam.

Ao Profissional de Soldagem Elzeir Andrade Ferreira, pela dedicação, acompanhamento e instruções técnicas passadas durante todo este estudo.

A Siderúrgica Aperam South América, pelo fornecimento dos corpos de prova, abertura de seu laboratório e todo apoio dado durante pesquisas realizadas.

A Willian Leonel e Alisson Silva Winther, pelo apoio na revisão deste trabalho.

RESUMO

Diante de um mercado cada vez mais competitivo e exigente, as siderúrgicas produtoras de aços inoxidáveis vêm desenvolvendo produtos cada vez mais resistentes e de melhor custo benefício às aplicações recomendadas. Estes aços desfrutam de um cenário propício para aplicações nos mais variados campos da engenharia. Entretanto, nota-se um desprovimento de informações em relação aos impactos dos parâmetros do processo de soldagem na qualidade final do cordão de solda. Desta forma, o objetivo desse trabalho é avaliar a influência do aporte térmico de soldagem na microestrutura da zona afetada pelo calor (ZAC) dos aços inoxidáveis comerciais Endur 300. Assim, o desenvolvimento de estudos que visam determinar a melhor faixa de energia de soldagem se faz necessário de modo a garantir que tanto o balanço de fases quanto as propriedades mecânicas do material não sejam severamente prejudicadas numa posterior aplicação. O trabalho é composto pela caracterização da ZAC das juntas soldadas através do processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) com aportes térmicos de 4,2, 6,7 e 9,1 kJ/cm. Foi realizada a soldagem nos três aportes térmicos escolhidos, e após seguiu-se para a análise do metal base e dos cordões de solda mediante ensaios de Microdureza Vickers, tração, dobramento guiado 180°, macroscopia, microscopia óptica (MO), análise de fratura (MEV) encerrando com a quantificação de fases via software. Os resultados demonstraram que a taxa de resfriamento natural das três condições testadas não foi suficiente para provocar mudanças microestruturais significativas no balanço das fases Ferrita e Martensita encontradas na ZAC. Em relação às propriedades mecânicas, a alteração de aporte térmico também não gerou impacto na qualidade final das juntas soldadas.

Palavras-chave: Endur 300, GMAW, ZAC, Ferrita, Martensita.

ABSTRACT

Faced with an increasingly competitive and demanding market, steel producers of stainless steel have been developing increasingly resistant and cost-effective products for recommended applications. These steels enjoy a favorable scenario for applications in the most varied fields of engineering. However, there is a lack of information regarding the impacts of the welding process parameters on the final quality of the weld bead. Thus, the objective of this work is to evaluate the influence of the welding heat input on the microstructure of the heat-affected zone (HAZ) of Endur 300 commercial stainless steels. It is necessary in order to guarantee that both the phase balance and the mechanical properties of the material are not severely impaired in a subsequent application. The work comprises the characterization of the HAZ of welded joints using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process with thermal inputs of 4.2, 6.7 and 9.1 kJ/cm. Welding was carried out in the three chosen thermal inputs, and then proceeded to the analysis of the base metal and weld beads through Vickers Microhardness tests, traction, 180° guided bending, macroscopy, optical microscopy (OM), fracture analysis (SEM) ending with phase quantification via software. The results showed that the natural cooling rate of the three conditions tested was not enough to cause significant microstructural changes in the balance of the Ferrite and Martensite phases found in the HAZ. Regarding the mechanical properties, the change in heat input also did not impact the final quality of the welded joints.

Keywords: Endur 300, GMAW, HAZ, Ferrite, Martensite.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 IMPORTÂNCIA DO TEMA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	17
2.1.1 Aços Inoxidáveis ferríticos	18
2.1.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	18
2.1.3 Aços Inoxidáveis Duplex.....	19
2.1.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos	19
2.1.5 Aços Comercial Endur 300.....	20
2.2 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO	22
2.2.1 Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr.....	22
2.2.2 Diagrama de Schaeffler.....	23
2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	24
2.3.1 Variáveis de Processo.....	27
2.4 EFEITO DA ENERGIA DE SOLDAGEM (ZAC)	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 MATERIAIS.....	32
3.2 MÉTODOS	34
3.2.1 Caracterização do metal base	36
3.2.2 Processo de soldagem.....	37
3.2.3 Seccionamento dos corpos de prova.....	38
3.3 ENSAIOS E ANÁLISES	44
3.3.1 Análise microscópica.....	44
3.3.2 Análise macroscópica.....	45
3.3.3 Análise das propriedades mecânicas.....	46

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 ENSAIOS METALOGRAFICOS	50
4.1.1 Macrografia - Dimensões do cordão de solda	50
4.1.2 Quantificação de Ferrita na ZAC.....	50
4.2 ENSAIOS MECÂNICOS	57
4.2.1 Ensaios de tração	57
4.2.2 Ensaios de dobramento.....	58
4.2.3 Ensaios de Microdureza Vickers	59
4.3 ANÁLISE DE FRATURA - MEV.....	60
5. CONCLUSÕES.....	63
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXO A – MICROGRAFIAS DA JUNTA SOLDADA	75
ANEXO B – IMAGENS DE MACROGRAFIAS DA JUNTA SOLDADA	77
ANEXO C – IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	79

Lista de Figuras

Figura 1 - Caçamba fabricada com aço Endur 300.	14
Figura 2 - Diagrama do tratamento termomecânico de obtenção da liga Endur 300.	21
Figura 3 - Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr.	22
Figura 4 - Diagrama de Schaeffler com representação de Ligas.	24
Figura 5 - Equipamentos para o processo de soldagem GMAW	26
Figura 6 - Diferentes distâncias entre a extremidade do bico de contato e a peça.	29
Figura 7 - Área preparada para soldagem.	33
Figura 8 - Fonte retificadora multiprocesso.	33
Figura 9 - Dispositivo de travamento.	34
Figura 10 - Fluxograma da metodologia empregada.	35
Figura 11 - a) Microestrutura do metal base (Endur 300). b) Contagem de fases manual do metal base.	36
Figura 12 - Amostra preparada para soldagem.	38
Figura 13 - Croqui referência para amostragem de junta soldada.	39
Figura 14 - Prensa de embutimento.	40
Figura 15 - Lixadeira/politriz.	41
Figura 16 - Croqui ensaio tração.	42
Figura 17: Corpos de prova de tração para cada energia testada.	43
Figura 18 - Amostras para o ensaio dobramento.	43
Figura 19 - Microscópio Óptico.	44
Figura 20: MEV Senai CETEF.	45
Figura 21 - Microscópio Óptico Olympus.	46
Figura 22 - Corpos de prova de tração a) corpos de prova referentes ao metal de adição, b) corpos de prova para cada energia testada.	47
Figura 23 - Máquina Universal de ensaios EMIC 600.	47
Figura 24 - Microdurômetro ótico.	48
Figura 25 - Croqui regiões de impressão – Microdureza Vickers.	49
Figura 26 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 4,2 kJ/cm.	51
Figura 27 - Gráfico de percentual de fases – Energia de 4,2 kJ/cm.	51
Figura 28 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 6,7 kJ/cm.	52
Figura 29 - Gráfico de percentual de fases – Energia de 6,7 kJ/cm.	53
Figura 30 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 9,1 kJ/cm.	53

Figura 31 - Gráfico de percentual de Fases – Energia de 9,1 kJ/cm.	54
Figura 32 - Curvas de ciclo térmico obtidas para soldas de 1,1 kJ/mm (Baixa) e 1,8 kJ/mm (Alta).....	55
Figura 33 - Diagrama CCT – 3CR12 (1.4003) UNS S 41003.....	56
Figura 34 - (a) Gráfico de tração 03 amostras de Metal Base sem solda (b) Gráfico de tração amostra soldada com aporte de 4,2 kJ /cm (c) Gráfico de tração amostra soldada com aporte de 6,7 kJ /cm e (d) Gráfico de tração amostra soldada com aporte 9,1 kJ /cm.	57
Figura 35 - Corpos de prova após ensaio de dobramento guiado 180°. 1 amostras de 4,2 kJ/cm, 2 amostras de 6,7 kJ/cm e 3 amostras de 9,1 kJ/cm.	58
Figura 36 - Resultado de Microdureza Vickers por condição soldada.....	59
Figura 37 - Impressões realizadas na ZAC (Hv). (a) amostras de 4,2 kJ/cm, (b) amostras de 6,7 kJ/cm e (c) amostras de 9,1 kJ/cm.....	60
Figura 38 - a) Superfície da fratura, aporte 4,2 KJ/Cm (12x), b) Superfície da fratura, aporte 6,7 KJ/Cm (12x), c) Superfície da fratura, aporte 9,1 KJ/Cm (12x), d) Clivagens e dimples, 4,2 kJ/cm (850x), e) Clivagens e dimples, 6,7 kJ/cm (850x), f) Clivagens e dimples, 9,1kJ/cm (850x), g) Detalhes de clivagens, 4,2 kJ/cm (1100x), h) Detalhes de clivagens, 6,7 kJ/cm (1100x) e i) Detalhes de clivagens, 9,1 kJ/cm (1100x).	61

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do aço UNS S41003.	21
Tabela 2 - Propriedades do metal de adição utilizado.	30
Tabela 3 - Composição química (% em peso) do aço inoxidável Endur 300	36
Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem utilizados no experimento.	37
Tabela 5 - Parâmetros da quantificação de fases via OmniMet.	45
Tabela 6 - Medidas da face e raiz dos corpos de prova soldados.	50

Abreviaturas e siglas

Ar	<i>Argônio</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CCC	<i>Cúbico de Corpo Centrado</i>
CCT	<i>Continuous Cooling Transformation</i>
CETEF	<i>Centro Tecnológico de Fundição</i>
δ	<i>Delta</i>
ESAB	<i>Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
He	<i>Helio</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEV	<i>Microscopia Eletrônica de varredura</i>
MS	<i>Martensite Start</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
N	<i>Newton</i>
Nb	<i>Nióbio</i>
RBC	<i>Rede Brasileira de Calibração</i>
SENAI	<i>Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial</i>
Ti	<i>Titânio</i>
ZAC	<i>Zona Afetada pelo Calor</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O critério utilizado na seleção de um aço para determinada aplicação é sua resistência mecânica aliada à sua resistência à corrosão, ductilidade, soldabilidade, custo-benefício, entre outros. Nesta perspectiva, a indústria moderna vem aumentando significativamente o emprego de aços inoxidáveis, pois estes apresentam a melhor combinação entre propriedades mecânicas, resistência à corrosão e conseqüentemente maior vida útil. Assim, o metal tem conquistado diversificados segmentos da indústria mundial e são uma importante classe de materiais com um largo campo de aplicação, sendo imprescindíveis em diversas áreas (AZEVEDO *et. al.*, 2017).

Os aços inoxidáveis surgiram em 1930 e adquiriram uma certa importância comercial em 1940. Desde então estas ligas tem sofrido uma série de alterações tanto no quesito composição química, quanto na tecnologia empregada em seu processo de produção (SOUZA *et. al.*, 2012).

Suas principais características são: alta resistência à corrosão atmosférica, geral e química, resistência mecânica elevada, boa tenacidade, resistência moderada ao calor, baixa rugosidade superficial, facilidade de conformação mecânica, e mantêm suas propriedades mesmo quando submetidos a elevadas temperaturas ou a temperaturas muito baixas. Possui uma relação custo/benefício favorável, baixo custo de manutenção, além de ser um material reciclável, sendo largamente reprocessado em aciarias elétricas (OLIVEIRA, 2016).

Além de todas estas características, também adquirem passividade quando ligados com alguns outros elementos químicos, tais como o cromo e o níquel e, em menor grau, o cobre, o silício, o molibdênio e o alumínio. Esta passividade pode ser entendida como um mecanismo que protege os aços inoxidáveis tornando-os resistentes e que os diferem dos demais aços, sendo resultante da formação do óxido ou hidreto na superfície do metal, que é estabilizado pelo cromo e impede o contato do metal base com a atmosfera, assim, perante a este processo de passivação, justifica-se a alta resistência à corrosão que os aços inoxidáveis apresentam diante de uma grande variedade de ambientes (ANDERSEN *et. al.*, 2020).

Mesmo com grande diversidade de classificações e características que possibilitam inúmeras aplicações nos segmentos de aços especiais, a indústria Siderúrgica Aperam South America se viu diante de um grande desafio, criar um aço que alie a alta resistência à corrosão, economicidade, performance mecânica e a alta resistência ao desgaste abrasivo. Dentro deste contexto, foi desenvolvido o aço de nome comercial Endur 300, um aço inoxidável martensítico, projetado para fornecer todas estas características, aliadas a boa capacidade de conformabilidade.

O Endur 300 apresenta baixo teor de carbono, contendo 10,5 - 12,5% de cromo, com microestrutura predominantemente martensítica, conferindo boas propriedades mecânicas e apresentando uma dureza nominal de 300HB (APERAM, 2021).

Por ser extremamente resistente, essa liga é recomendada para aplicações que demandam um efeito combinado de resistência à corrosão e ao desgaste, como, caçambas rodoviárias/ferroviárias, linha amarela (escavadeiras, retroescavadeiras, guindastes) podendo atuar em segmentos diversos, tais como, minério, solo, carvão, brita, calcário e diversas outras finalidades estruturais. A figura 1 mostra a aplicação do mesmo em implementos rodoviários, no caso, de uma carreta graneleira.

Figura 1 - Caçamba fabricada com aço Endur 300.



Fonte: Aperam 2021.

De modo geral a soldagem de aços inoxidáveis com essa característica pode causar problemas, como aumento de dureza na ZAC e a formação de estrutura martensítica com Ferrita retida, interferindo diretamente em sua propriedade mecânica.

A Ferrita é a primeira fase que se solidifica nos aços de baixo e médio teor de carbono, sendo resultante de uma reação chamada peritética, no aço carbono. Ela ocorre também em aços inoxidáveis, por um mecanismo semelhante ao que ocorre nos aços ao carbono, porém sob forte influência dos teores de cromo e níquel, sendo normalmente uma fase dúctil e bastante deformável mesmo à temperatura ambiente, podendo se tornar dura e frágil pela adição em sua composição de elementos solúveis, como por exemplo o fósforo. Na microestrutura dos aços inoxidáveis martensíticos é considerada uma fase indesejável, pois pode influenciar no desempenho da resistência à fadiga, tenacidade e corrosão sob tensão (HENKE, 2013).

Assim, um balanço de fases desproporcional nesta região (ZAC), pode provocar uma série de defeitos, redução da vida útil e conseqüentemente improdutividade (HAMZE, 2013).

Devido à escassez de informações na literatura sobre o impacto dos parâmetros de soldagem utilizados na liga comercial Endur 300, o presente trabalho visa avaliar, por meio de metodologia aplicada, a influência do aporte térmico na microestrutura presente na zona afetada pelo calor (ZAC) das juntas soldadas, por meio de caracterização metalográfica e ensaios mecânicos.

1.2 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência do aporte térmico de soldagem no balanço de fases presentes na ZAC e no comportamento mecânico do aço inoxidável comercial ENDUR 300.

Objetivos específicos

- Quantificar Ferrita e Martensita presente na região da zona afetada pelo calor (ZAC), para cada aporte térmico aplicado.
- Avaliar comportamento mecânico da junta soldada para três aportes térmicos.

- Verificar qual a influência de cada aporte térmico na formação de Ferrita na ZAC.

1.3 Importância do tema

- Avaliar o grau de influência dos aportes térmicos testados, na formação de microestruturas presentes na zona afetada pelo calor (ZAC) dos aços inoxidáveis Endur 300.
- Verificar se a microestrutura da ZAC em cada aporte térmico avaliado, pode provocar mudanças significativas na resistência mecânica da solda (Endur 300) de modo a impactar em sua posterior aplicação.

1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica acerca das particularidades e benefícios encontrados na aplicação de aços inoxidáveis, processo de soldagem GMAW, sendo enfatizada a influência dos parâmetros do processo na qualidade da junta soldada.

Já no Capítulo 3, é mostrado o escopo dos métodos, ferramentas e considerações fundamentadas para o desenvolvimento deste trabalho. Subdivide-se em etapas de preparação de corpos de prova, soldagem, amostragem, ensaios mecânicos, análises macrográficas e micrográficas.

Análises e discussões acerca dos resultados obtidos através dos experimentos são apresentadas no Capítulo 4.

A apresentação deste estudo é encerrada com as conclusões finais presentes no Capítulo 5.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, sobretudo estudos de relevância para o âmbito das características de soldagem dos aços inoxidáveis, com foco na liga comercial Endur 300 através do processo GMAW.

2.1 Aços Inoxidáveis

Aços inoxidáveis são ligas ferrosas cujos sistemas base são Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni contendo no mínimo 10,5% de cromo em sua composição. Esse teor de cromo induz a formação de um filme passivo que é caracterizado por ser uma camada de óxido compacta e aderente ao metal base. Ela protege o aço da ação de agentes corrosivos (atmosfera, meios aquosos ou orgânicos), promovendo a resistência à corrosão (PAPAVINASAM, 2014).

Além do cromo, outros compostos de liga podem aumentar a resistência à corrosão. São eles o níquel, o nitrogênio e o molibdênio. Por outro lado, a presença de carbono diminui a resistência a corrosão, uma vez que este se combina com o cromo formando carbonetos, causando diminuição do cromo disponível nessas regiões do material. Por isso, o teor de carbono deve ser observado atentamente para que o material não perca esta característica de proteção (CHENG X *et. al.*, 2018).

Vale ressaltar que nos aços inoxidáveis, os elementos de liga podem aparecer em solução sólida intersticial ou substitucional, proporcionando melhorias nas propriedades para algumas aplicações. Estes elementos podem ser classificados como elementos ferritizantes, como: Cr, Mo, Ti, Si, Al, Nb, V, W e B atuando como estabilizadores da fase Ferrita ou elementos estabilizadores da austenita, chamados austenitizantes: Ni, Cu, C, N, Mn e Co (ZOU, UEJI, HIDETOSHI, 2015).

Diante as características citadas, tais aços são classificados considerando a sua microestrutura resultante na temperatura ambiente. Assim, levando em conta esse critério, os aços inoxidáveis são divididos em quatro classes: ferríticos, martensíticos, austeníticos e duplex (TAVARES *et. al.*, 2014).

2.1.1 Aços Inoxidáveis ferríticos

As ligas ferríticas são todas ferromagnéticas, tem boa ductilidade e conformabilidade, limite de escoamento relativamente alto, a resistência a altas temperaturas é relativamente boa quando comparado com a série austenítica, que tem maior resistência ao calor (CASHELL, 2014).

São constituídos, a temperatura ambiente, de uma solução sólida de Ferrita rica em cromo com pouco carbono dissolvido, dado o seu baixíssimo limite de solubilidade na Ferrita. Em geral, os aços inoxidáveis ferríticos são mais baratos que os austeníticos e duplex, e normalmente apresentam melhor estampabilidade e resistência à corrosão sob tensão. Em contrapartida, possuem uma menor resistência à corrosão localizada e baixa soldabilidade. Esses aços possuem tenacidade menor do que o tipo austenítico e sua resistência é aumentada moderadamente por trabalho a frio (CORTIE,2016).

Os mais conhecidos possuem o teor médio de cromo de 18% e o de níquel de 8%, cuja adição de níquel para teores acima de 3,5% provoca um aumento do intervalo de temperatura em que a liga é totalmente austenítica, e que se amplia com maiores teores de Ni, enquanto que a temperatura de início de formação da martensítica (MS) é reduzida (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2014).

2.1.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais resistentes à corrosão e os mais utilizados, tendo como características não serem magnéticos, não tratados termicamente, quando encruados, adquirem dureza bem superior a de outros aços do mercado, considerando a mesma taxa e esforço de deformação. Este aumento da dureza é atribuído à instabilidade da austenita, que sob o efeito de tensões do encruamento transforma-se parcialmente em Ferrita (supersaturada de carbono), em condições parecidas a que a Martensita colaboraria para este aumento de dureza ocasionado. Possuem boa tenacidade e resistência mecânica em temperaturas elevadas e podem ser empregados em diversos meios corrosivos, tanto em baixas como em altas temperaturas, além de possuírem boa soldabilidade (COSTANZA,2016).

Devido às transformações que ocorrem na microestrutura quando expostos a altas temperaturas, as propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos podem ser facilmente degradadas em operações de soldagem, acarretando em falhas no desempenho do

material. Para evitar que isso ocorra, é necessária atenção especial aos parâmetros de soldagem, como corrente, gás de proteção e o aporte térmico (SILVA, 2020).

2.1.3 Aços Inoxidáveis Duplex

As ligas austeno-ferríticas (duplex) vêm numa crescente utilização principalmente onde se exige uma maior resistência a ambientes corrosivos, maior resistência à oxidação, resistência mecânica elevada e alta tenacidade, quando em comparação a dos aços inoxidáveis austeníticos. Como todos os outros metais e ligas, as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex dependem de variáveis como tamanho de grão, textura e grau de segregação (DAMIN, 2017).

Devido às características mencionadas acima, estes aços são largamente aplicados na indústria *off – shore*, devido as propriedades físico químicas que garantem maior qualidade e produtividade em suas inúmeras aplicações no setor (DELFINO, 2019).

2.1.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos, são essencialmente compostos de uma liga Fe-Cr-C. Geralmente o teor de cromo presente nessas ligas se encontra na faixa entre 12 e 18%, e carbono entre 0,1 e 0,5%, embora em alguns casos esse teor pode chegar até 1%.

Seu comportamento mecânico pode ser comparado ao dos aços carbono temperáveis devido a sua semelhança, em boa fluidez, conformabilidade, resistência a ambientes abrasivos e ao desgaste operacional (SILVA, 2010).

Ao serem aquecidos a uma temperatura suficientemente alta, são austenitizados, pois este é o novo campo de estabilidade. Dependendo da taxa de resfriamento da austenita, a mesma se transformará em novas fases. Uma taxa de resfriamento suficientemente baixa produzirá Ferrita e carbonetos, e se esta for suficientemente elevada a ponto de suprimir a difusão de carbono, a Martensita será formada (DALMAU, 2014).

Geralmente, a temperatura de início de formação da martensita, M_s , é afetada pela composição química, tamanho de grão austenítico e taxa de resfriamento. Elevadas temperaturas de austenitização e taxas de resfriamento diminuem a temperatura M_s , (TSAI *et. al.*,2002).

Existe uma relação entre a taxa de resfriamento e a temperatura M_s , que pode ser racionalizada considerando que um aumento na taxa de resfriamento restringe a transformação martensítica. Assim, uma maior quantidade de força motriz termodinâmica é requerida para iniciar a transformação por cisalhamento da austenita em martensita, o que significa que M_s diminui com o aumento da taxa de resfriamento.

Ainda, para taxas de resfriamento menores a quantidade de carbonetos e nitretos de cromo que precipitam é maior, diminuindo a quantidade de carbono e cromo em solução, o que aumenta a temperatura M_s (VILELA *et. al.*,2019).

Este grupo de aços inoxidáveis pode ser considerado equivalente a família de aços destinados para os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, com o diferencial alinhado ao alto teor de cromo em sua composição química. A presença do cromo eleva a temperabilidade do material, retardando as reações da austenita para perlita e/ou bainita, formando assim, uma maior proporção do microconstituente Martensita, que por sua vez adquire ao aço uma maior dureza e resistência mecânica (SILVA, 2010).

A maior dificuldade encontrada para a utilização dos aços inoxidáveis martensíticos é sua baixa soldabilidade. Dentre as causas que contribuem para tal característica, tem-se a formação de trincas a frio, provocadas pela presença de hidrogênio (proveniente da atmosfera) associada à alta dureza junto ao metal de solda e na ZAC (Zona Afetada pelo Calor) (CARVALHO,2020).

Tem como aplicação componentes de turbinas a vapor, em componentes de bombas de líquidos corrosivos, árvores de comando e hélices marinhas, implementos rodoviários e ferroviários, componentes de aeronaves, além de utensílios de cozinha e cutelaria (facas e tesouras), instrumentos cirúrgicos (tesouras cirúrgicas, porta-agulha e bisturis, entre outros), indústria petroquímica em componentes usados para craqueamento, na indústria alimentícia em componentes de contato direto com alimentos (ZANELLA, 2018).

2.1.5 Aços Comercial Endur 300

A liga Endur 300 é resultante de um tratamento termomecânico aplicado à liga UNS S41003, que tem estrutura predominantemente martensítica. Abaixo, na tabela 1, a composição química da liga UNS S41003 (APERAM,2021).

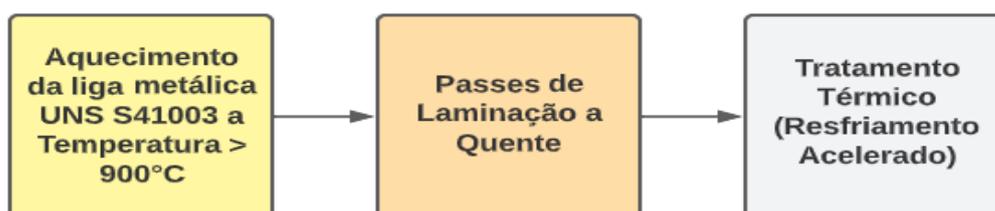
Tabela 1 - Composição química (% em peso) do aço UNS S41003.

C	Cr	Ni	Mn	N	Si	S	P	Fe
0,03	10,5 - 12,5	1,00	1,50	0,03	1,0	0,015	0,04	bal.

Fonte: Aperam S.A

O tratamento consiste em um aquecimento do aço a 1°C por segundo até atingir temperaturas maiores que 937°C, resultando em completa austenitização da microestrutura, seguido por múltiplos passes de laminação a quente, induzindo o refinamento de grãos devido ao processo de recristalização. A liga é então submetida a um resfriamento rápido após o último passe de laminação, resultando em uma microestrutura completamente martensítica. A Figura 2 mostra as etapas desse processo.

Figura 2 - Diagrama do tratamento termomecânico de obtenção da liga Endur 300.



Fonte: Adaptado de Marques 2021.

Após este processamento, origina-se a liga Endur 300, com baixo teor de carbono e pequenas adições de cromo e níquel. Seu diferencial reside na alta resistência mecânica e dureza nominal de 300 HV, decorrentes de sua microestrutura refinada e predominantemente martensítica; aliada à manutenção de sua tenacidade, soldabilidade e capacidade de conformação a frio (APERAM,2021).

Com excelente propriedade de conformabilidade a frio, é possível dobrar o aço Endur 300 a 180° como ocorre no aço carbono de baixa liga ASTM A36. Um diferencial desta liga é o seu baixo teor de carbono, que evita necessidade de tratamento térmico pós-soldagem (MARQUES, 2021).

2.2 Diagrama de Equilíbrio

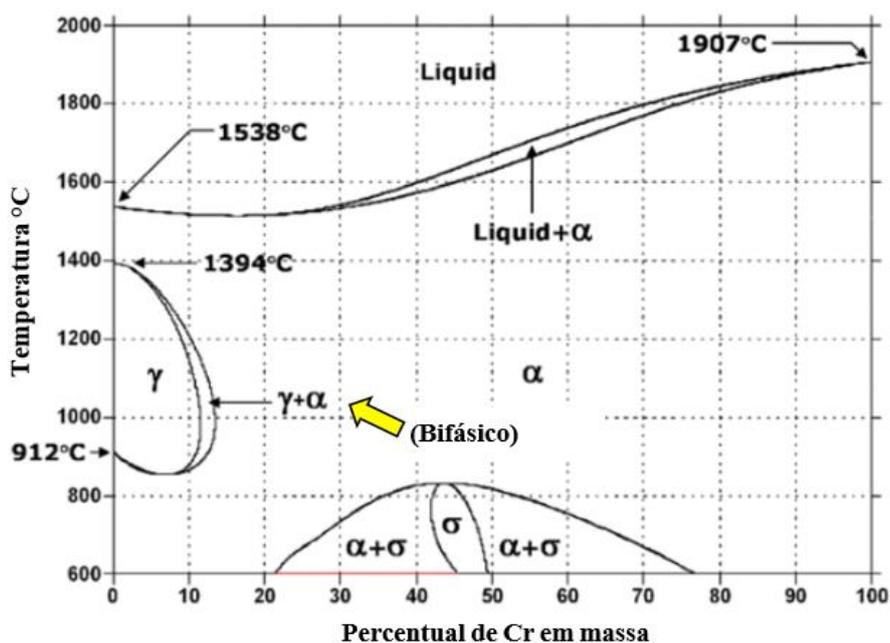
Os diagramas de equilíbrio permitem uma avaliação das possíveis fases presentes no material, no entanto seu uso apresenta algumas limitações. A primeira limitação a ser considerada é que, na maioria dos sistemas, dificilmente o equilíbrio é atingido. Outra dificuldade é que as novas ligas comerciais que vêm sendo desenvolvidas normalmente apresentam pelo menos mais de dois componentes diferentes e a disponibilidade de diagramas quaternários é muito restrita (PADILHA, PLAUT E RIOS, 2006).

Para melhor compreensão das fases presentes na classe dos aços inoxidáveis nas diversas composições, temperaturas e microestruturas serão realizadas as análises e estudos dos diagramas Fe-Cr e Schaeffler.

2.2.1 Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr

Abaixo no diagrama de equilíbrio Fe-Cr, apresentado na Figura 3, observa-se que a solidificação, independentemente dos teores desses elementos, ocorre com a formação de uma fase CCC, conhecida como Ferrita. (VICENTE, 2018).

Figura 3 - Diagrama de Equilíbrio Fe-Cr.



Fonte: Adaptado Vicente, 2018.

A faixa de temperatura de formação da austenita reduz rapidamente para concentrações superiores a 7% do elemento Cr. Entretanto, para teores entre 12 e 13%, o material apresenta a transformação parcial da Ferrita e com teores de cromo superiores a aproximadamente 13%, é possível estabilizar a Ferrita. O material permanece bifásico (Ferrita e austenita) na faixa de temperatura entre 900 e 1200°C e para concentrações de Cr entre 10 e 13% respectivamente (MORAES, 2020).

O campo austenítico no sistema Fe-Cr tem grande importância para a indústria, visto que os aços inoxidáveis de composição base ferro-cromo se classificam em os aços inoxidáveis ferríticos, cujos teores de cromo são elevados o suficiente para estabilizar a estrutura ferríticas em toda a faixa de temperaturas do estado sólido, e aços inoxidáveis martensíticos, que apresentam teores de cromo inferiores, possibilitando a austenitização e a têmpera da liga. Os aços inoxidáveis martensíticos também apresentam teores mais elevados de carbono, para facilitar o tratamento térmico de têmpera do material (BUBANI,2007).

2.2.2 Diagrama de Schaeffler

O diagrama de Schaeffler é muito utilizado para fazer um prognóstico da solda de aços inoxidáveis, sendo considerado o método mais importante para avaliação do depósito de solda neste grupo de aços. Fornece uma estimativa da composição química e a microestrutura através dos teores equivalentes dos elementos níquel e cromo. (ZHANG,2021).

As Equações 1 e 2, apresentadas abaixo, são utilizadas no diagrama de Schaeffler para o cálculo dos teores de cromo e níquel equivalentes:

Equação 1: Cálculo de Cromo equivalente

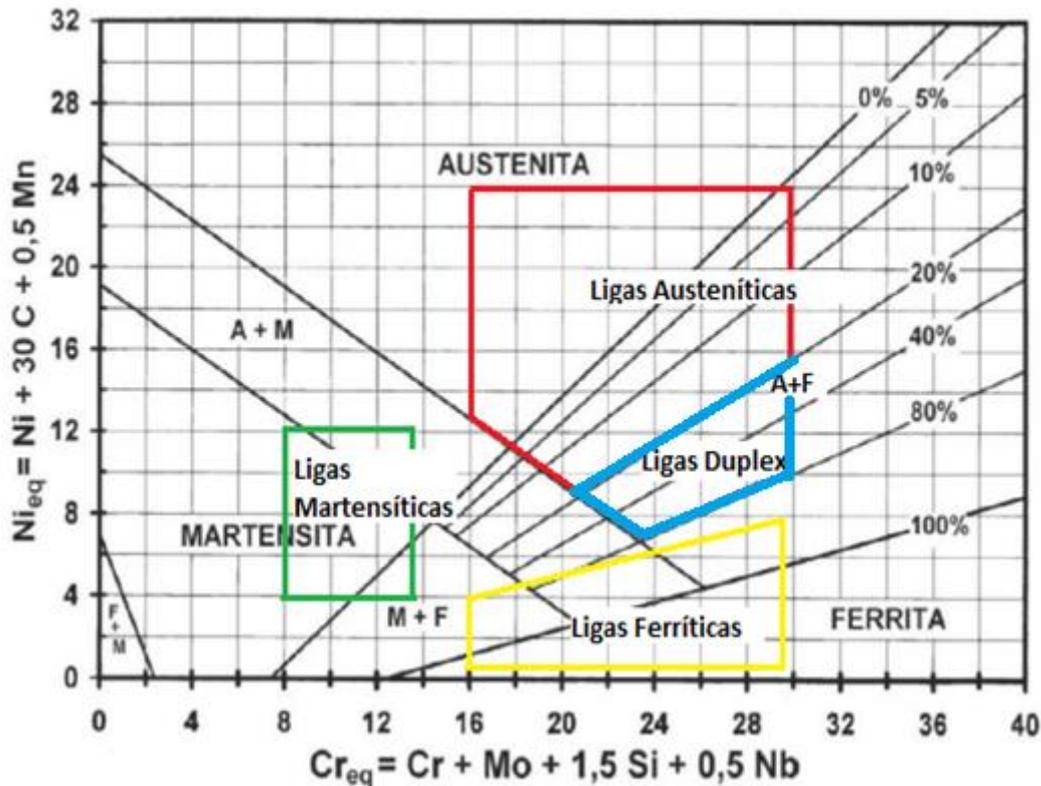
$$Cr(eq) = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb \quad \text{Equação (1)}$$

Equação 2: Cálculo de Níquel equivalente

$$Ni(eq) = \%Ni + 30\%C + 0,5 \%Mn \quad \text{Equação (2)}$$

A Figura 4 ilustra o Diagrama de Schaeffler apresentando as regiões predominantes de ligas ferríticas, martensíticas, austeníticas e duplex, respectivamente.

Figura 4 - Diagrama de Schaeffler com representação de Ligas.



Fonte: Adaptado de Modenesi, 2016.

O diagrama de Schaeffler oferece um caminho prático para a estimativa quantitativa da microestrutura do material, contudo os efeitos que as taxas de resfriamento podem ter sobre estes balanços ainda não foram relatados (MODENESI, 2016).

2.3 Processo de Soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW (do inglês Gas Metal Arc Welding) tem ampla aplicação nos diferentes segmentos industriais, por sua versatilidade, custo, produtividade, facilidade, entre outras vantagens. É um dos processos mais utilizados na união de materiais através da soldagem. É empregado na fabricação, manutenção, recuperação de peças e equipamentos e, também, em revestimentos de superfícies metálicas (MODENESI, 2016).

O processo é caracterizado pela abertura e manutenção de um arco elétrico entre o metal de base e o metal de adição especificado pelo procedimento. O metal de base é o material metálico a ser fundido que forma a poça de fusão e o metal de adição é o arame que é alimentado continuamente e em conjunto propiciaram a união metálica. É necessário que esse arame (metal de adição) apresente uma proteção gasosa que irá viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra contaminantes presentes na atmosfera vizinha (ALVES, 2009).

No início do processo, um curto-circuito entre o eletrodo e a peça produz a passagem de elevada corrente, provocando grande aquecimento. Com este aquecimento e a ruptura do curto circuito o arco se mantém de forma continuada. A partir daí o arame forma gotas metálicas que são transferidas para a poça de fusão, formando assim o cordão de solda (FILHO, 2012).

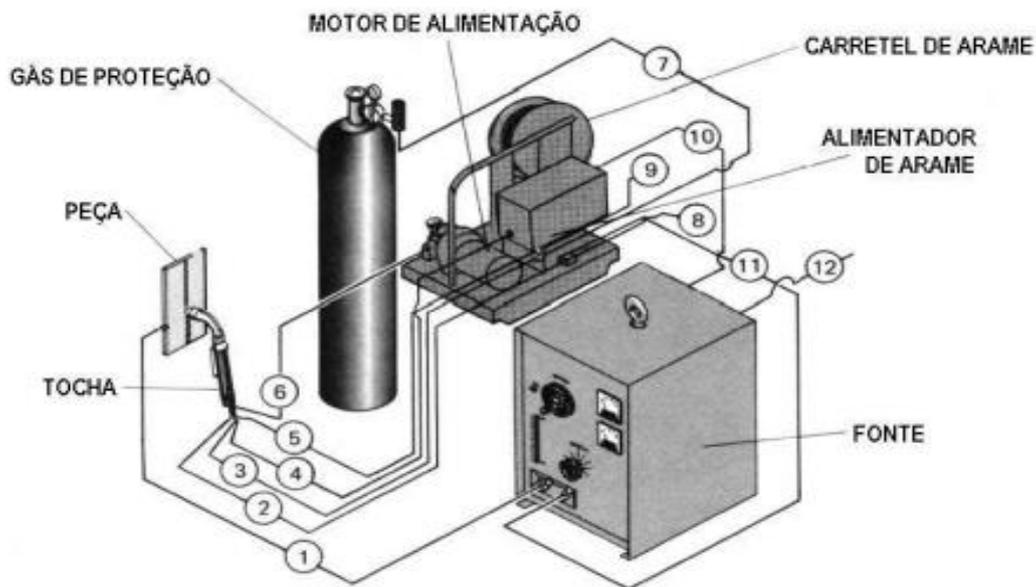
Ressalta-se como benefícios do processo de soldagem GMAW, também conhecido como MIG/MAG, em relação ao processo via eletrodo revestido, a alta performance, a possibilidade de ser mecanizada ou automatizada, a grande versatilidade de materiais e espessuras aplicáveis e a ausência de operações de remoção de escória (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2014).

O que difere o processo se classificado como MIG ou MAG é a especificação do gás de proteção que será utilizado durante o processo de soldagem. O MIG utiliza proteção por gás inerte como Ar e He, ou mistura de gases, já a soldagem MAG utiliza mistura de um ou mais gases ativos (como por exemplo, o CO₂) com gases inertes ou apenas CO₂ puro (SCOTTI E PONOMAREV, 2014).

O processo GMAW pode ser operado nos modos automático, semiautomático e mecanizado, sendo utilizado principalmente no modo semiautomático. Metais como aços carbono, aços de alta-resistência e baixa liga, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldadas em diferentes posições de forma adequada se forem escolhidos apropriadamente os gases de proteção, os eletrodos e as variáveis do processo (VILLANI, MODENESI, BRACARENSE, 2006).

A Figura 5 mostra os equipamentos que são utilizados no processo GMAW. O conjunto é composto por uma fonte de energia, o arame alimentador, tocha, o cilindro com o gás de proteção e a própria peça a ser soldada (metal de base) (ESAB, 2014).

Figura 5 - Equipamentos para o processo de soldagem GMAW



Fonte: Fortes, 2005.

1. Cabo de solda (negativo).
2. Refrigeração da tocha (entrada de água).
3. Gás de proteção.
4. Gatilho da tocha.
5. Refrigeração da tocha (retorno da água).
6. Conduíte do arame.
7. Gás de proteção vindo do cilindro.
8. Saída de água de refrigeração.
9. Entrada de água de refrigeração.
10. Entrada de 40V (CA).
11. Cabo de solda (positivo).
12. Conexão para fonte primária (220V/380V/440V).

No processo de soldagem citado, são disponíveis tochas refrigeradas a água ou secas (refrigeradas pelo gás de proteção) e tochas com extremidades retas ou curvas.

Geralmente são adicionados sistemas de refrigeração na tocha para facilitar o manuseio. Nos casos em que são executados trabalhos com altas correntes é possível

usar uma tocha mais robusta e específica para a aplicação em que for requisitada (ESAB, 2014).

De acordo com Scotti E Ponomarev (2014), o processo GMAW tem suas vantagens e desvantagens. As principais vantagens são a elevada taxa de fusão do arame, a possível variação dos modos de transferência metálica, menor diâmetro do eletrodo que permite um arco concentrado promovendo alto poder de fusão do metal base, além da alta produtividade.

Já as desvantagens do processo podem ser conhecidas como: a grande sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, necessidade de um ajuste muito rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda, o custo elevado de equipamentos, em comparação ao processo de eletrodo revestido além da menor variedade de consumíveis (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2014).

2.3.1 Variáveis de Processo

As variáveis são extremamente importantes para determinar as características finais do cordão de solda. Elas são responsáveis pela ocorrência de alguns tipos de defeitos e discontinuidades e podem influenciar também nas propriedades finais da peça a ser soldada. Dimensões inadequadas do cordão podem fazer com que a estrutura soldada falhe dependendo da carga a que irá ser submetida. Quanto maior for o aporte térmico maior serão valores dimensionais de largura, penetração e área da ZAC (SOUZA,2016).

Os parâmetros podem ser ajustados e trabalhados individualmente, porém são totalmente dependentes para obtenção de um cordão de solda de qualidade. A seguir são citadas as variáveis mais importantes para o processo de soldagem GMAW (BARBEDO, 2011).

2.3.1.1 Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem é conhecida como a tensão entre o eletrodo e a peça sendo influenciada pela corrente do arco, pelo perfil da ponta do eletrodo, pela distância bico de contato peça e pelo tipo de gás de proteção. Também é responsável pela profundidade de penetração e pela formação de respingos. Quando ocorre uma

diminuição dessa tensão no arco, seu comprimento é menor, a penetração na solda diminui e os cordões ficam mais estreitos. Mas quando ocorre o aumento exagerado, o comprimento do arco aumenta, favorecendo a ocorrência de porosidades (Kuntz, 2016).

Tal parâmetro também influencia as dimensões do cordão de solda, de forma que quanto maior for a tensão, maior será a área do cordão de solda (Santana, 2016).

Deve-se existir um ajuste adequado, pois caso a tensão seja reduzida bruscamente, dificulta a fusão do arame, e o arco se comporta de forma instável. Por outro lado, se a mesma for excessiva, pode causar trincas na junta e empeno do metal de base (MARQUES *et. al.*,2014).

2.3.1.2 Corrente de Soldagem

No processo de soldagem GMAW a corrente se relaciona à velocidade de alimentação, de modo que quando modificada a velocidade de alimentação estamos alterando também a corrente na mesma proporção (GIRALDO, 2008).

A escolha da corrente vai depender da espessura da peça a ser unida, das características necessárias ao cordão e do diâmetro do eletrodo. Uma corrente muito baixa pode diminuir a estabilidade do processo de soldagem, implicando na descontinuidade da operação (BARBEDO, 2011).

2.3.1.3 Velocidade de Avanço

O parâmetro velocidade representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta soldada. Com uma velocidade muito baixa, a quantidade de material depositado aumenta, porém a poça fica com dimensões elevadas fazendo com que a penetração seja baixa. Em contrapartida, se for utilizada uma velocidade muito elevada, a quantidade de calor transferido para o metal de base é reduzida e a penetração também diminui, podendo causar defeitos no cordão (falta de penetração) (BARBEDO, 2011).

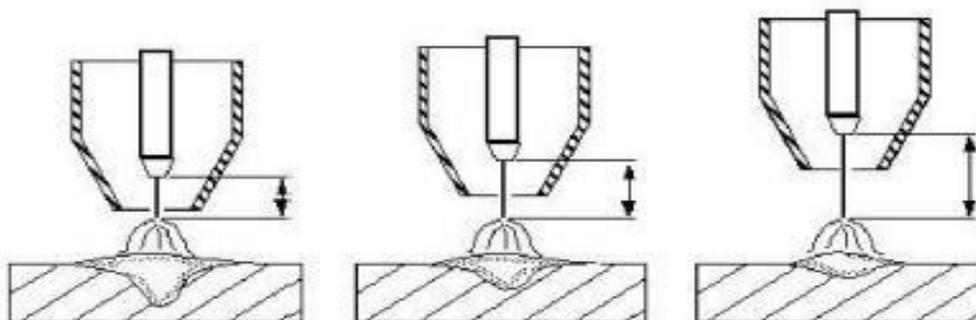
2.3.1.4 Extensão Livre do Eletrodo

A extensão do eletrodo ou *Stick-out* é reconhecida como a distância entre a extremidade do bico de contato e a peça a ser soldada. Essa extensão do eletrodo está relacionada à corrente de soldagem necessária para fundir o arame a certa velocidade

de soldagem. Com o aumento da extensão do eletrodo temos uma queda na amperagem e uma elevação na voltagem de serviço, uma menor quantidade de corrente é necessária para fundir o arame devido ao aquecimento do mesmo pelo aumento da resistência elétrica do circuito. Portanto, aumentando-se a distância bico, aumenta-se a taxa de fusão do arame e vice-versa (SOLCI, 2015).

A importância de controlar essa extensão do eletrodo está no fato de que grandes extensões podem resultar em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor de arco, resultando em baixa penetração e defeitos na geometria do cordão. A Figura 6 mostra o comportamento da extensão do eletrodo em diferentes distâncias (MORGANTI, 2013).

Figura 6 - Diferentes distâncias entre a extremidade do bico de contato e a peça.



Fonte: Morganti, 2013.

Por outro lado, extensões muito baixas, apesar de contribuir em para a penetração, podem causar falta de fusão nas laterais e produzir mordeduras na junta soldada.

2.3.1.5 Metal de Adição

Os aços inoxidáveis martensíticos são uma liga composta de uma mistura de ferro com no mínimo 10,5% de cromo. Além disso, possuem o teor de carbono inferior a 0,1%, teor de cromo entre 12 e 18% e de níquel entre 2 e 4%. Em elevadas temperaturas, estes aços adotam uma microestrutura austenítica, porém, após passar posteriormente pelo processo de têmpera, a austenita se transforma em martensita, conferindo maior dureza e resistência mecânica (JOPEMAR, 2016).

Desta forma, para cada tipo de aço, um tipo de consumível deve ser selecionado a fim de garantir a microestrutura e propriedades mecânicas como também a composição química adequada da região de união dos materiais através do processo de soldagem (MODENESI, 2011).

Neste estudo, o metal de adição indicado pela fabricante do aço Endur 300, Aperam South America, foi o ER309LSi (24% Cr e 13% Ni). Este metal de adição apresenta variações de alto teor de molibdênio, que tem a característica de elevar a resistência à corrosão e capacidade de manter a forma e operar em altas temperaturas, e o silício que dá estabilidade ao arco, além de uma melhor fluidez da poça e melhorar o balanço entre ductilidade e resistência mecânica da junta. (Machado, 2000).

Abaixo na Tabela 2, as propriedades mecânicas e a composição química do metal de adição.

Tabela 2 - Propriedades do metal de adição utilizado.

Composição Química (% em peso)										Propriedades Mecânicas Típicas ER 309L Si	
C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Cu	Fe	Limite de Resistência (MPa)	Along. (%)
0,02	23	13,5	0,10	0,7	1,8	0,015	0,003	0,10	bal.	600	35

Fonte: Adaptado Catálogo de Consumíveis ESAB 2020.

2.4 Efeito da Energia de Soldagem (ZAC)

Denomina-se energia de soldagem a quantidade de energia fornecida por determinada unidade de tamanho de cordão de solda pelo seu deslocamento de uma fonte de calor. Causa alterações no metal base e no metal de adição, independentemente de sua origem. Os aspectos da junta soldada como a macroestrutura do metal de adição, o crescimento dos grãos e as transformações na microestrutura, são estabelecidos pelo fluxo térmico que tem grande influência nesses aspectos citados acima (MACHADO, 2000).

Pode-se calcular a energia de soldagem com a equação abaixo:

Equação 3: Cálculo da energia de Soldagem

$$E = \frac{V \cdot I}{v} \quad \text{Equação (03)}$$

E = Energia de Soldagem, I = Corrente, V = Tensão, v = Velocidade de Soldagem

A intensidade da energia de soldagem promove mudanças na taxa de resfriamento do material e conseqüentemente em sua microestrutura. Com a energia de soldagem mais elevada, a ZAC irá aumentar e a dureza será menor. Portanto, estes itens devem ser controlados durante o processo de soldagem (DALCIN, 2016).

A permanência em altas temperaturas tem influência significativa na alteração da microestrutura da região da ZAC em aços inoxidáveis ferríticos. Já nos aços inoxidáveis martensíticos, esta característica não é tão acentuada, pois as alterações na microestrutura da região da ZAC deste aço dependem do teor de carbono em sua composição química.

Devido à elevada temperabilidade, a região da ZAC austenitizada durante a soldagem apresenta uma estrutura martensítica após o resfriamento, aumentando a resistência mecânica e diminuindo a tenacidade na região (DALCIN, 2016).

Também, quando a região da ZAC for submetida a um patamar de temperatura entre 420-870° C por um longo período de tempo poderá ocorrer a precipitação de carbonetos. Neste patamar de temperatura, a velocidade de difusão do cromo no aço é relativamente baixa, favorecendo a precipitação de carbonetos, que forma uma fina região empobrecida em cromo junto aos contornos de grão. Caso o teor de cromo desta região fique abaixo de 11%, será uma região empobrecida de cromo formando uma zona sensibilizada, que terá sua capacidade de resistência à corrosão reduzida. Esta região empobrecida de cromo, quando exposta a um meio corrosivo, os carbonetos não são atacados, mas, sim, a fina região empobrecida de cromo que é menos resistente à corrosão, dando origem a corrosão intergranular. Uma maneira de restringir a sensibilização é adicionar elementos estabilizantes como o Nb ou Ti. Estes elementos combinam com o carbono e formam carbonetos que se precipitam aleatório e não nos contornos de grão, evitando assim a sensibilização (LIMA, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontra-se o detalhamento de materiais e metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo. Com o principal objetivo de verificar a influência do aporte térmico de soldagem na formação de microconstituintes presentes na ZAC dos aços inoxidáveis comerciais Endur 300, foram realizadas análises na amostra de metal base (sem solda) e em 03 aportes térmicos distintos, 4,2 kJ/cm, 6,7 kJ/cm e 9,1 kJ/cm, preservando o mesmo metal de adição, gás de proteção e metal de base.

Parâmetros de soldagem definidos juntamente a equipe de pesquisadores da fabricante do aço, de forma a garantir uma diferença mínima de 2,0 kJ/cm entre testes, e que os cordões de solda apresentassem qualidade final adequada, conforme avaliação do profissional nível II em soldagem.

Posteriormente, foram extraídos corpos de prova para realização de ensaios mecânicos e metalográficos, a fim de analisar a resistência mecânica e o balanceamento das fases presentes na ZAC.

Foi avaliado o efeito dos três aportes térmicos na formação de fases e correlacionados dados dos ensaios mecânicos a microestrutura predominante da região verificada.

3.1 Materiais

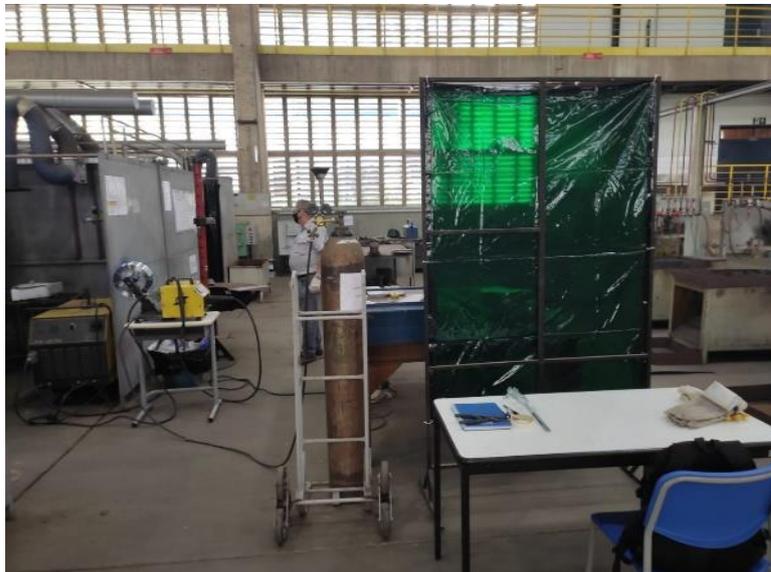
Foram utilizadas amostras do aço inoxidável ENDUR 300 disponibilizadas pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da indústria Siderúrgica Aperam South America de Timóteo, Minas Gerais. Recebidas amostras nas dimensões de 4,75 x 150 x 400 mm.

Neste estudo, o metal de adição indicado pela fabricante do aço para realização da soldagem foi o arame de solda ER309LSi, com diâmetro de 1,2 mm, e o gás de proteção o StarGold Flex, com 2% de oxigênio e 98% de argônio. Com baixa porcentagem de carbono em sua composição, este metal de adição tem como característica metalúrgica a redução de precipitação de carbonetos de cromo, aumentando dessa forma, a resistência à corrosão intergranular.

Todo procedimento de soldagem foi realizado seguindo procedimentos técnicos e de segurança, com acompanhamento de pesquisadores da Aperam e profissional

certificado nível II em soldagem. A área foi isolada e devidamente preparada para a realização das atividades, conforme figura 7.

Figura 7 - Área preparada para soldagem.



Fonte: Autor.

A fonte de energia empregada para o processo de soldagem GMAW foi uma fonte retificadora multiprocesso, modelo LAI 550, da ESAB, com corrente máxima de 550 Amperes, conforme figura 8.

O processo de soldagem foi semiautomatizado através de uma “tartaruga” de oxicorte, onde foi adaptado o bico de soldagem.

Figura 8 - Fonte retificadora multiprocesso.



Fonte: Autor.

A fim de proporcionar maior controle e qualidade da solda, também foi projetado e fabricado um dispositivo de travamento, que garantiu melhor fixação, precisão na abertura da raiz e proteção gasosa da mesma, conforme figura 9.

Figura 9 - Dispositivo de travamento.

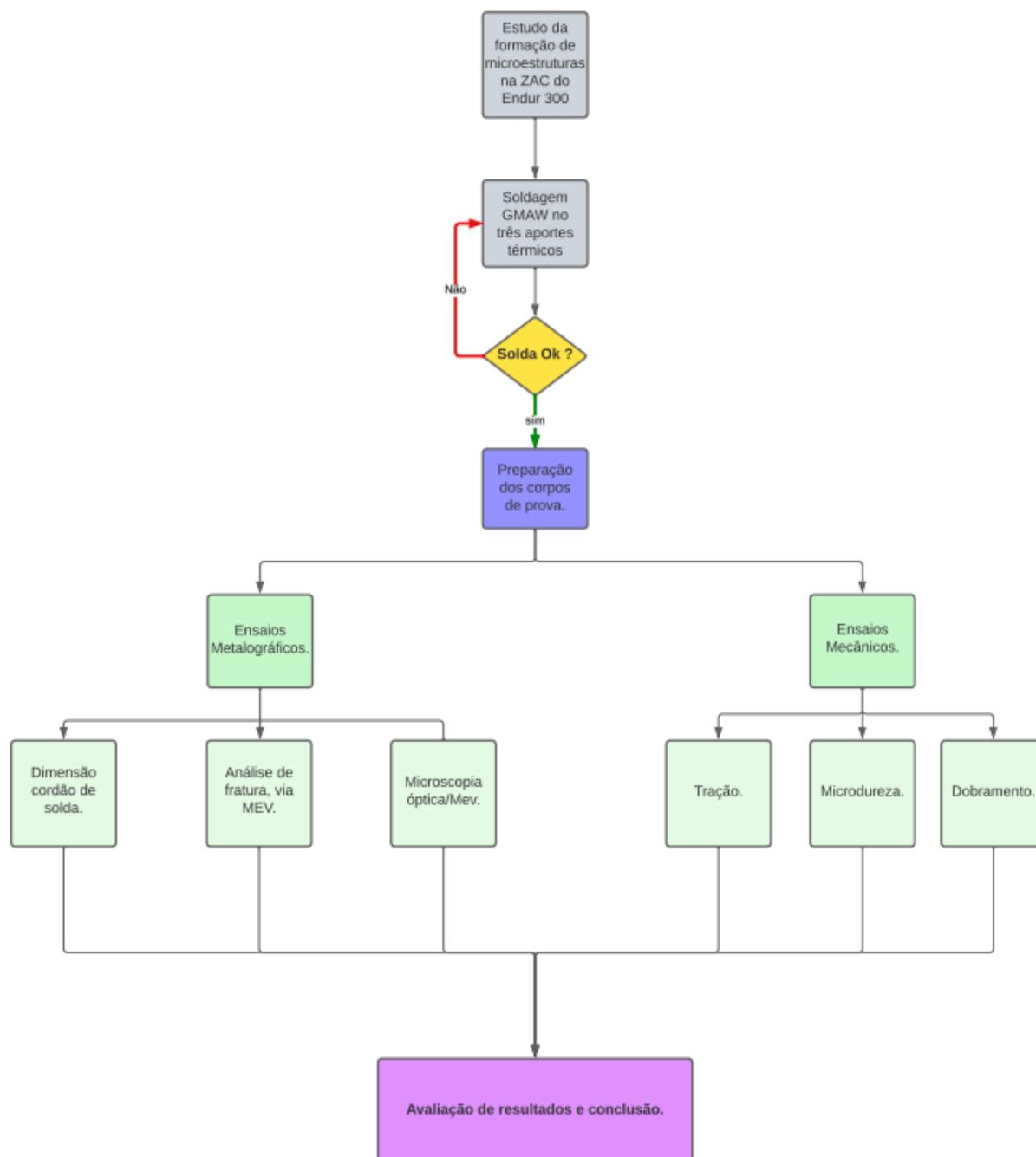


Fonte: Autor.

3.2 Métodos

A metodologia do estudo foi organizada de acordo com os objetivos e necessidades de cada etapa da experimentação. Como pode ser verificado na Figura 10, para realização dos experimentos, primeiro foi feita a soldagem do material em três aportes térmicos distintos, seguida da preparação, inspeção dos corpos de prova e posteriormente realização dos ensaios mecânicos e metalográficos pertinentes ao trabalho. O detalhamento do procedimento experimental é apresentado nas subseções seguintes.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Autor.

3.2.1 Caracterização do metal base

O metal base utilizado neste estudo foi o aço inoxidável Endur 300, na forma de chapas com 4,75 mm de espessura. Conforme mencionado no trabalho, é um aço novo no mercado e necessita de mais estudos envolvendo sua soldabilidade.

Este material tem alta resistência a abrasão, boa conformabilidade podendo ser aplicado principalmente em segmentos da construção civil e mineração. A composição química do metal base recebido da fábrica (Aperam South America), foi obtida após espectrometria óptica, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% em peso) do aço inoxidável Endur 300

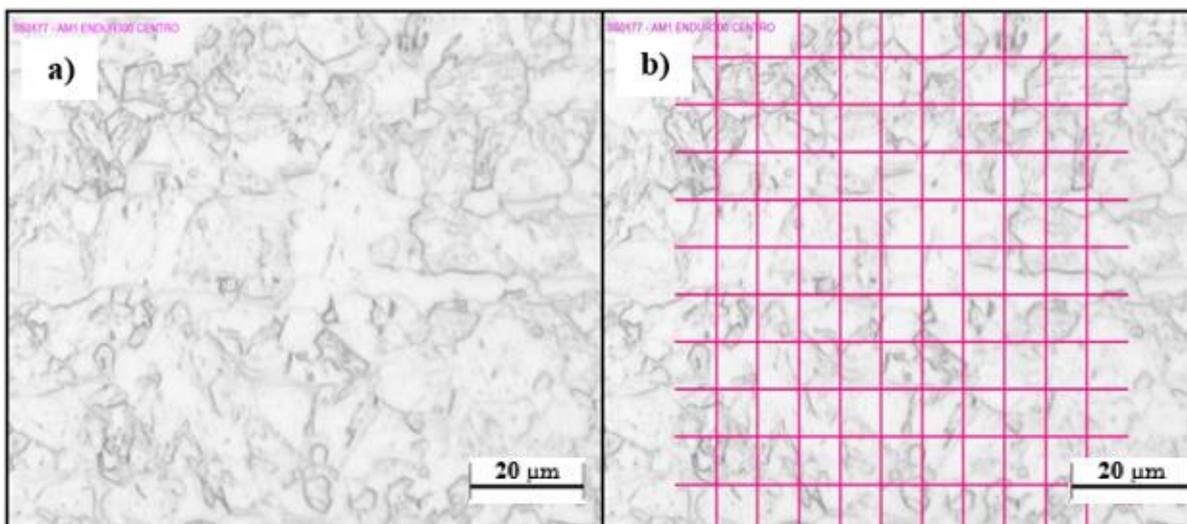
C	Cr	Ni	S	Al	Mn	Mo	N	Si	Ti	P	Fe
0,0108	11,563	0,3718	0,0008	0,021	0,6286	0,072	0,0187	0,4867	0,0014	0,0243	bal.

Fonte: Autor.

Além da composição química, também foi reconhecida a microestrutura do aço através da realização de micrografia e posteriormente realizada a contagem de fases.

Foram levantadas frações de martensita e ferrita, através da metodologia de contagem manual, conforme norma ASTM E562, apresentada na figura 11.

Figura 11 - a) Microestrutura do metal base (Endur 300). b) Contagem de fases manual do metal base.



Fonte: Autor.

Após o procedimento de contagem de fases, chegou-se ao volume de 85% de Martensita presente no material, sendo o restante (15%) de Ferrita. Segundo Marques (2021), o resultado deste balanço de fases deve-se a um resfriamento rápido após o último passe de laminação, resultando em uma microestrutura predominantemente martensítica.

Os resultados foram obtidos em parceria com o centro de pesquisas da Aperam South America, que cedeu os seus laboratórios para análise.

3.2.2 Processo de soldagem

Inicialmente foi feita a fixação das chapas dispositivo, aferida a velocidade da tartaruga, vazão do gás de proteção, tensão e corrente da máquina.

Todos os parâmetros de soldagem foram ajustados de forma a garantir os três níveis de aportes térmicos desejados no experimento. Abaixo na Tabela 04 estão representados detalhes dos parâmetros utilizados.

Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem utilizados no experimento.

Parâmetros de soldagem - Endur 300			
Identificação	012021-1	022021-1	032021-2
Espessura (mm)	4,75	4,75	4,75
Metal de adição	ER309lsi	ER309lsi	ER309lsi
Gás de Proteção	Stargold	Stargold	Stargold
Abertura de raiz (mm)	02	02	02
Stick-Out (mm)	15	15	15
Velocidade (cm/min)	60	50	40
Vazão de gás (l/min)	12	12	12
Tensão (V)	20,4	24,4	24,9
Corrente (A)	208	228	244
Energia (kJ/cm)	4,2	6,7	9,1

Fonte: Autor.

A fórmula utilizada para a determinação dos valores de energia em kJ/cm foi:

$$E = \frac{60 \cdot U \cdot I}{1000 \cdot V} \quad \text{Equação (04)}$$

E = Energia de Soldagem, I = Corrente, U = Tensão, V = Velocidade de Soldagem.

Abaixo na figura 12, os corpos de prova fixados no dispositivo, com abertura ajustada e tocha posicionada.

Figura 12 - Amostra preparada para soldagem.

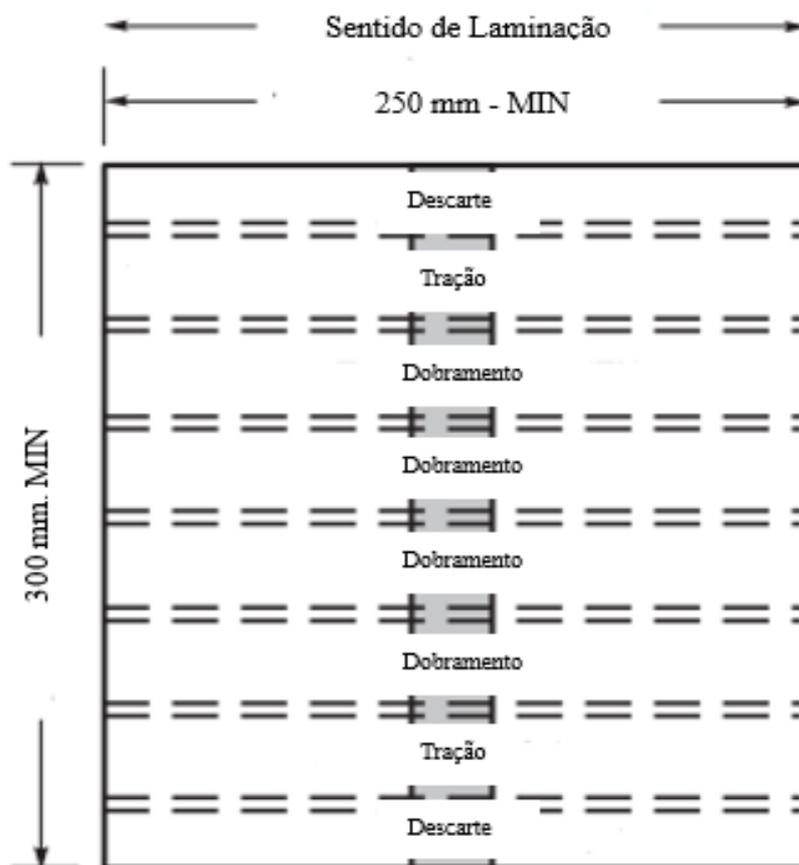


Fonte: Autor.

3.2.3 Seccionamento dos corpos de prova

Após a realização do processo de soldagem das chapas de aço inoxidável, os cordões de solda foram seccionados de acordo com a referência de croqui, adaptado conforme norma AWS D1.6, como mostra a Figura 13. A análise das seções ao longo do comprimento de cada cordão de solda busca aferir a formação/quantificação de fases, características mecânicas e dimensionais em função do aporte térmico.

Figura 13 - Croqui referência para amostragem de junta soldada.



Fonte: Adaptado AWS D1.6.

Ao longo deste trabalho, a nomenclatura CP01, por exemplo, refere-se as amostras do cordão de solda 01 (012021), com aporte térmico de 4,2 kJ/cm, enquanto CP02 (022021) refere-se as amostras do cordão de solda 02, com aporte térmico de 6,7 kJ/cm, o CP03 (032021) teve aporte térmico de 9,1 kJ/cm.

As amostras para microscopia óptica e ensaios de dureza Vickers foram preparadas no Laboratório de Metalografia do Senai CETEF (Centro Tecnológico de Fundição), presente no Senai da cidade de Itaúna MG.

3.2.3.1 Preparação dos corpos de prova para metalografia

As amostras de metalografia foram preparadas seguindo rigorosamente os seguintes procedimentos:

Realizado o embutimento a quente utilizando prensas modelo PRE 40MI, Marca Arotec, como a mostrada na Figura 14, e resina fenólica (baquelite) marca Teclago. O embutimento é realizado a fim de facilitar o manuseio da amostra, visto que suas dimensões reduzidas dificultam a sua manipulação.

Figura 14 - Prensa de embutimento.



Fonte: Autor.

Após embutimento, as amostras foram devidamente identificadas e em seguida lixadas. No processo de lixamento foram utilizadas lixas de carbeto de silício (SiC) com as seguintes granulometrias: 220, 400, 600 e 1200 Mesh. A finalidade do lixamento é remover a deformação plástica produzida durante o corte da amostra e obter uma superfície plana e paralela. Neste processo foram utilizadas lixadeiras/politrizes modelo PL02E, Marca Teclago, como a apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Lixadeira/politriz.



Fonte: Autor.

A etapa seguinte foi o polimento das amostras. O objetivo do polimento é retirar os riscos provocados pelo lixamento, fazendo com que a superfície da amostra a ser analisada fique não apresente riscos e tenha aspecto espelhado devido sua rugosidade baixa. Este procedimento foi realizado em três etapas:

- a) Polimento utilizando pasta de diamante com granulometria de 3 a 6 μm marca Schneider. O pano de polimento utilizado foi da Marca Struers. Este polimento visa a retirada da maioria dos riscos oriundos do lixamento.
- b) Polimento utilizando pasta de diamante com granulometria de $\frac{1}{2}$ μm Schneider e o pano de polimento utilizado foi da marca Struers. Este polimento visa retirar todos os riscos oriundos do lixamento e do polimento anterior.
- c) Polimento utilizando OP-S (sílica coloidal) e pano de polimento da marca Schneider. Este polimento visa retirar todos os riscos oriundos do lixamento e polimento anterior. Após este procedimento a amostra se encontra espelhada.

Em seguida foi realizada a limpeza da amostra com detergente e água corrente, seguida do ataque químico utilizado uma solução de ataque conhecida como Behara.

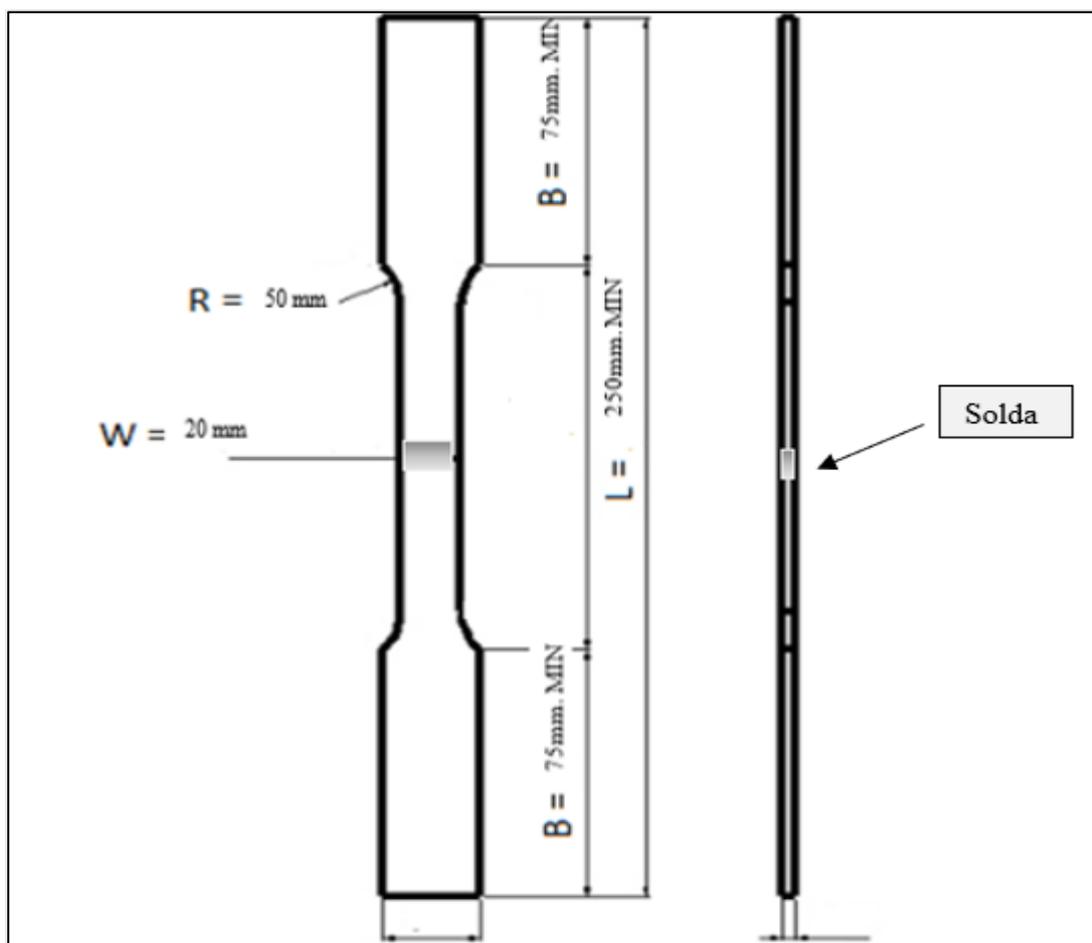
Após o ataque químico, foi feito um leve polimento para clareamento das zonas demasiadamente atacadas limpas novamente com detergente e água corrente, e secas com álcool e um soprador térmico.

3.2.3.2 Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos

A preparação dos corpos de prova para impressões no Microdurômetro Vickers, se deu no mesmo fluxo que a preparação metalográfica, passando pelo corte, embutimento, lixamento e polimento, se diferenciando apenas no ataque químico, que no caso foi realizado com reativo Kalling's.

Já na usinagem dos corpos de prova para ensaio de tração, foi seguida a norma AWS, cujo croqui pertinente está representado esquematicamente abaixo na figura 16.

Figura 16 - Croqui ensaio tração.



Fonte: Autor.

Abaixo na Figura 17, estão representados os corpos de prova após o processo de usinagem, conforme norma AWS D.1.6.

Figura 17: Corpos de prova de tração para cada energia testada.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova de dobramento foram cortados, não havendo alteração na espessura. Aferição dos corpos de prova de dobramento preparados para ensaio, na Figura 18.

Figura 18 - Amostras para o ensaio dobramento.



Fonte: Autor.

3.3 Ensaio e Análises

3.3.1 Análise microscópica

Após a preparação metalográfica, a análise da microestrutura e quantitativo de fases foi realizada mediante a observação e a obtenção das micrografias utilizando microscopia óptica. Para isso, foi utilizado um microscópio óptico modelo DMRM, Marca LEICA, mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Microscópio Óptico.



Fonte: Autor.

Já as análises de fratura foram realizadas via Microscopia eletrônica de varredura (MEV), no laboratório de ensaios do CETEF (Senai Itaúna). O equipamento utilizado é do modelo JEOL – JSM-6510LV, conforme Figura 20.

Figura 20: MEV Senai CETEF.



Fonte: Autor.

A quantificação de fases presentes na ZAC se deu através do software microscópico OmniMet.

Para contagem fases foram estabelecidos os mesmos parâmetros nas três amostras, sendo os mesmos representados na Tabela 5:

Tabela 5 - Parâmetros da quantificação de fases via OmniMet.

Parâmetros de Microscopia – Contagem de Fases			
Fator de Calibração	Ampliação	Área (μm^2)	Amostras
0,2566 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	200x	414149,01	012021
0,2566 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	200x	414149,01	022021
0,2566 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	200x	414149,01	032021

Fonte: Autor.

3.3.2 Análise macroscópica

Assim como a microscopia, após a preparação, foram retiradas as dimensões da face e raiz dos respectivos corpos de prova, sendo 01 de cada energia (três corpos de

Prova). Para isso foi utilizado um microscópio óptico modelo Gx 51, Marca OLYMPUS, mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Microscópio Óptico Olympus.



Fonte: Autor.

3.3.3 Análise das propriedades mecânicas

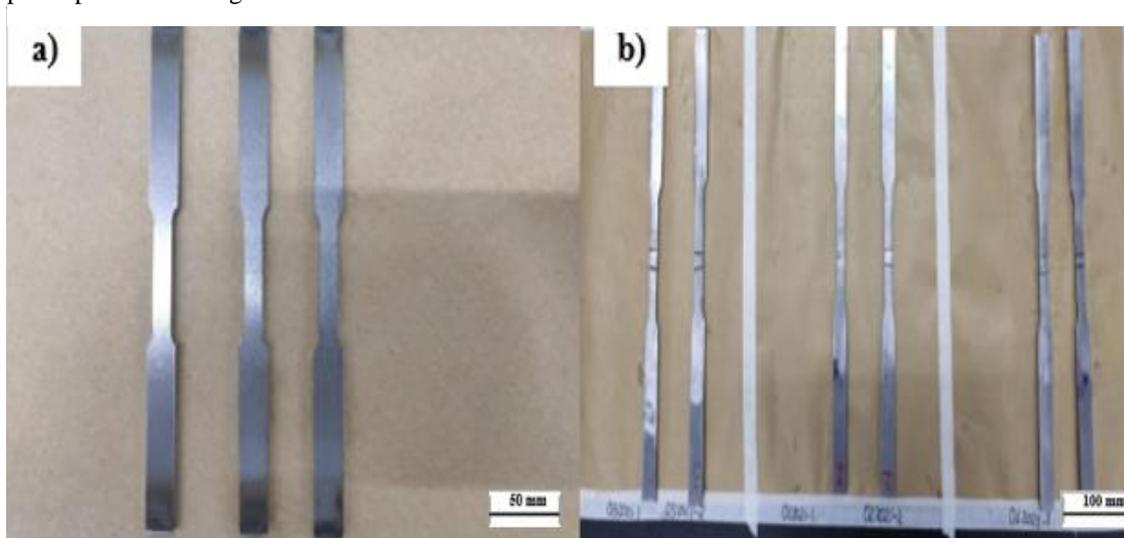
Após a usinagem dos corpos de prova, os mesmos foram medidos para aferir conformidade com as normas pertinentes, para posterior ensaio. O objetivo é conectar os resultados de balanço de fases (Ferrita e Martensita) nas três condições de aporte térmico utilizadas, confrontando dados e verificando a influência da presença destas fases nas propriedades mecânicas do material.

Para esta análise, foram realizados ensaios de tração, dobramento guiado 180° e Microdureza.

3.3.3.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram feitos a partir de nove corpos de prova padronizados sendo dois para cada energia de soldagem e três para o metal de adição. A Figura 22 mostra os corpos de prova referentes ao metal de adição e ao lado corpos de prova soldados sendo dois para cada energia, todos prontos para testagem.

Figura 22 - Corpos de prova de tração a) corpos de prova referentes ao metal de adição, b) corpos de prova para cada energia testada.



Fonte: Autor.

Tanto os ensaios de tração quanto os de dobramento foram realizados na máquina Universal EMIC 600, conforme a Figura 23, devidamente calibrada (célula de 600KN) e aferida. Os ensaios foram realizados conforme a norma AWS e com instrumentos de medidas devidamente calibrados em laboratórios acreditados pela RBC (Rede Brasileira de Calibração).

Figura 23 - Máquina Universal de ensaios EMIC 600.



Fonte: Autor.

3.3.3.2 Ensaio de dobramento

Os seis ensaios de dobramento guiado 180°, assim como os de tração, foram feitos a partir de 6 corpos de prova padronizados sendo dois para cada energia de soldagem.

Os ensaios foram realizados conforme a norma AWS D1.6 – 2017, na máquina universal EMIC 600 (figura 23), e com instrumentos de medidas devidamente calibrados em laboratórios acreditados pela RBC (Rede Brasileira de Calibração).

3.3.3.3 Dureza Vickers

Os ensaios de Microdureza foram realizados em um equipamento Microdurômetro ótico AMSLER OTTO WOLPERT-WERKE GMBH D- 6700, representado na figura 24, cuja norma de referência é a ABNT NBR NM 6507-1:2019.

Figura 24 - Microdurômetro ótico.

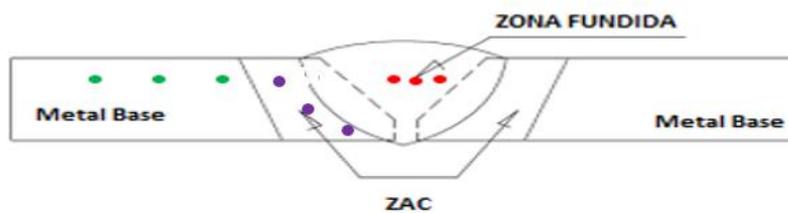


Fonte: Autor.

As penetrações ocorreram em três regiões distintas, metal de base (três impressões), zona afetada pelo calor (três impressões) e zona fundida ou metal de adição (três impressões) respectivamente, conforme Figura 25. Analisadas as três

amostras registradas, sendo uma de cada energia. A força utilizada foi de 98,040 (N) e penetradora pirâmide de diamante com base de geometria quadrada.

Figura 25 - Croqui regiões de impressão – Microdureza Vickers.



Fonte: Autor.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio Metalográficos

4.1.1 Macrografia - Dimensões do cordão de solda

Após a realização das medidas via microscopia, foram obtidos os seguintes valores da face e raiz das três amostras soldadas, conforme mostrado na Tabela 6. Ensaio realizado conforme as normas ASTM E 3:2021 e ASTM E 7:2017.

Tabela 6 - Medidas da face e raiz dos corpos de prova soldados.

Macrografia da Junta Soldada		
Amostra	Medida da Face (mm)	Medida da Raiz (mm)
012021	6,71	2,78
022021	8,24	1,34
032021	10,73	2,73

Fonte: Autor.

A medida da face da solda apresentou aumento proporcional levando em consideração as energias de soldagem baixa 4,1 kJ/cm (012021), média 6,7 kJ/cm (022021) e alta 9,1 kJ/cm (032021). Já as dimensões da raiz na soldagem, de média e alta energia foram equilibradas (2,78 e 2,73 mm), ficando com menor valor apenas a raiz da soldagem de 6,7 kJ/cm (022021), com 1,34 mm.

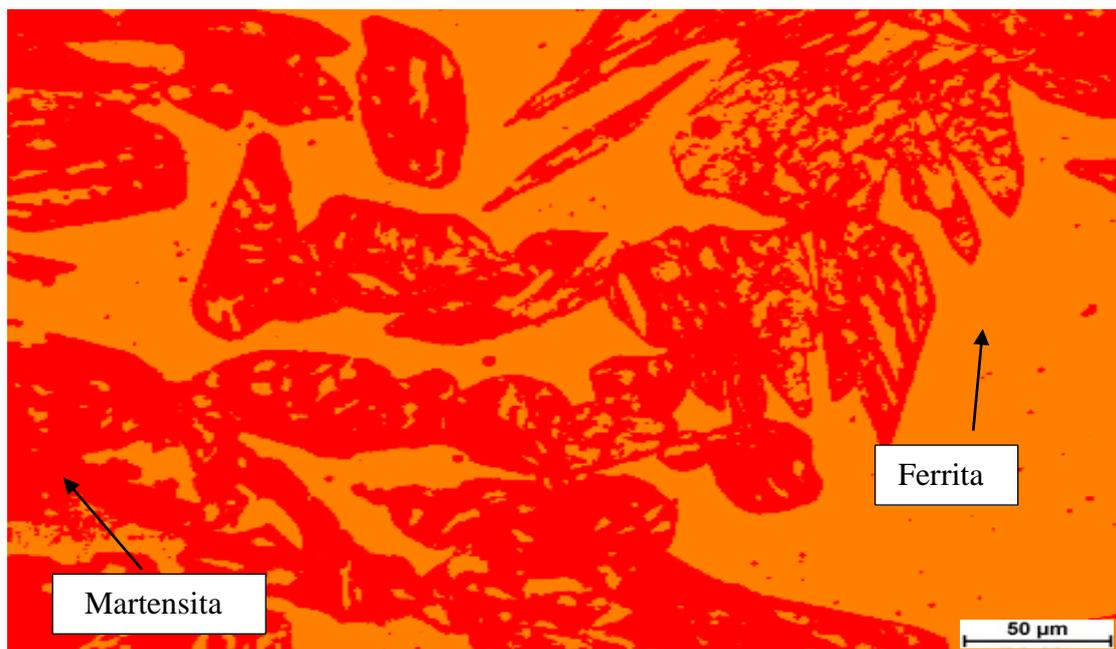
Todos corpos de prova medidos passaram por inspeção e obtiveram penetração total da solda.

4.1.2 Quantificação de Ferrita na ZAC

Para determinação do percentual de ferrita e martensita na Zac do material soldado, foram analisados 03 corpos de prova, o corpo de prova 012021 soldado na energia de 4,2 kJ/cm, o 022021 com energia de 6,7 kJ/cm e o 032021 com 9,1 kJ/cm.

Abaixo na Figura 26, segue a imagem capturada por microscopia ótica através do software OmniMet, apresentando as fases ferrita e martensita. Na mesma estão representadas a detecção das fases, em amarelo (Ferrita) e Laranja (Martensita).

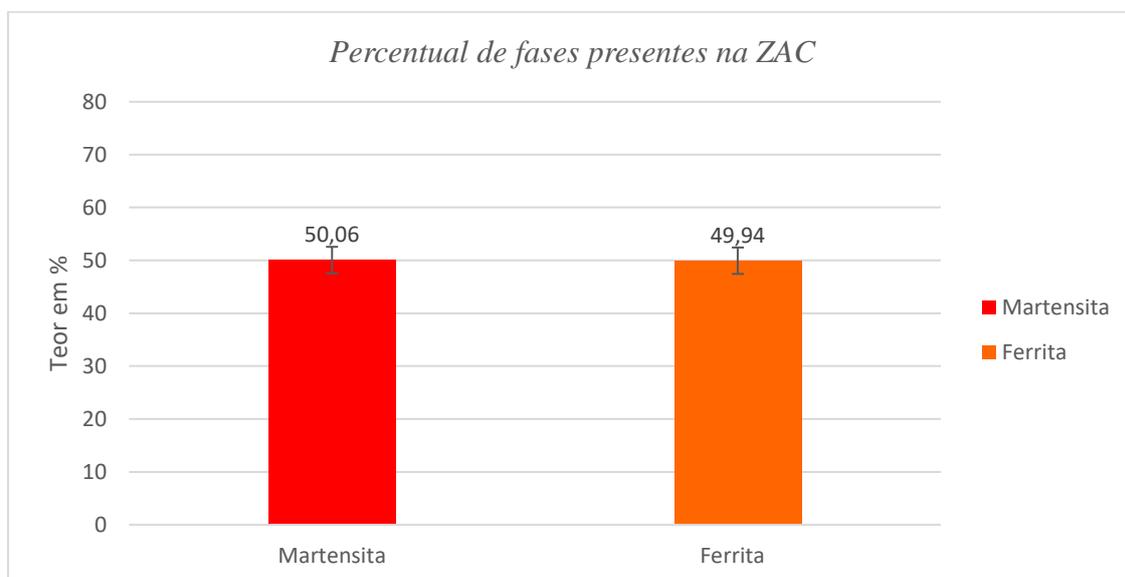
Figura 26 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 4,2 kJ/cm.



Fonte: Autor.

A imagem capturada pelo software demonstra a ZAC da junta soldada com 4,2 kJ/cm. Neste caso, este aporte térmico, proporcionou um equilíbrio na formação de Ferrita e a Martensita. Na Figura 27, exibe-se o percentual de cada fase encontrada na Zona afetada pelo calor, indicando 49,94% de Ferrita e 50,06% de Martensita.

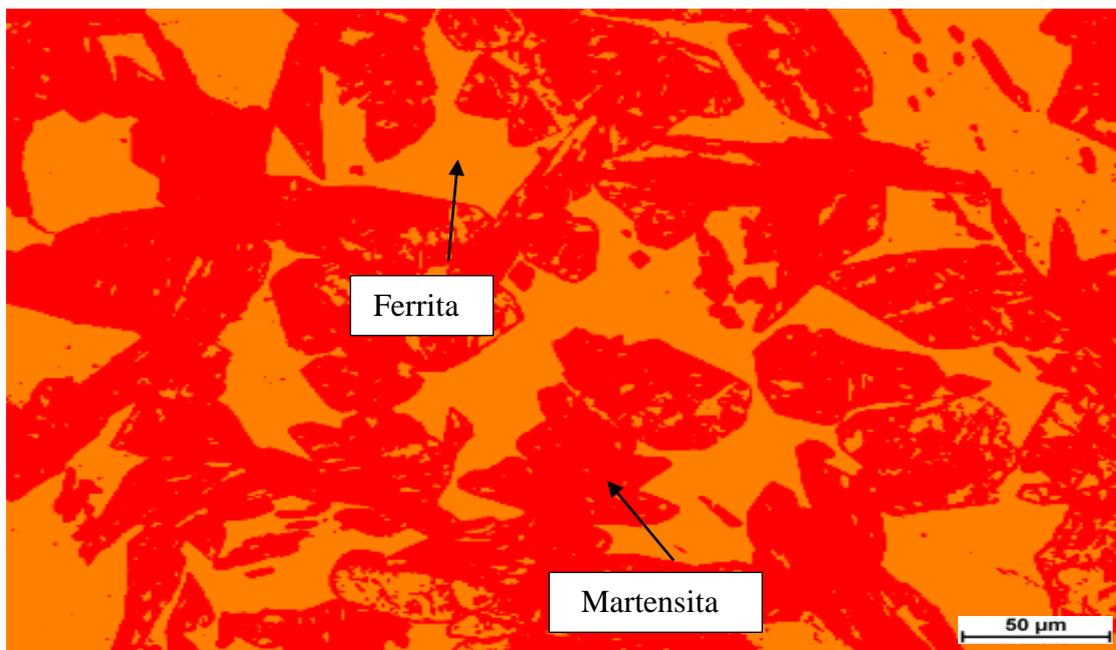
Figura 27 - Gráfico de percentual de fases – Energia de 4,2 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Da mesma forma foi realizada a análise com o corpo de prova de 6,7 kJ/cm e obtidos os resultados conforme abaixo, na Figura 28.

Figura 28 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 6,7 kJ/cm.

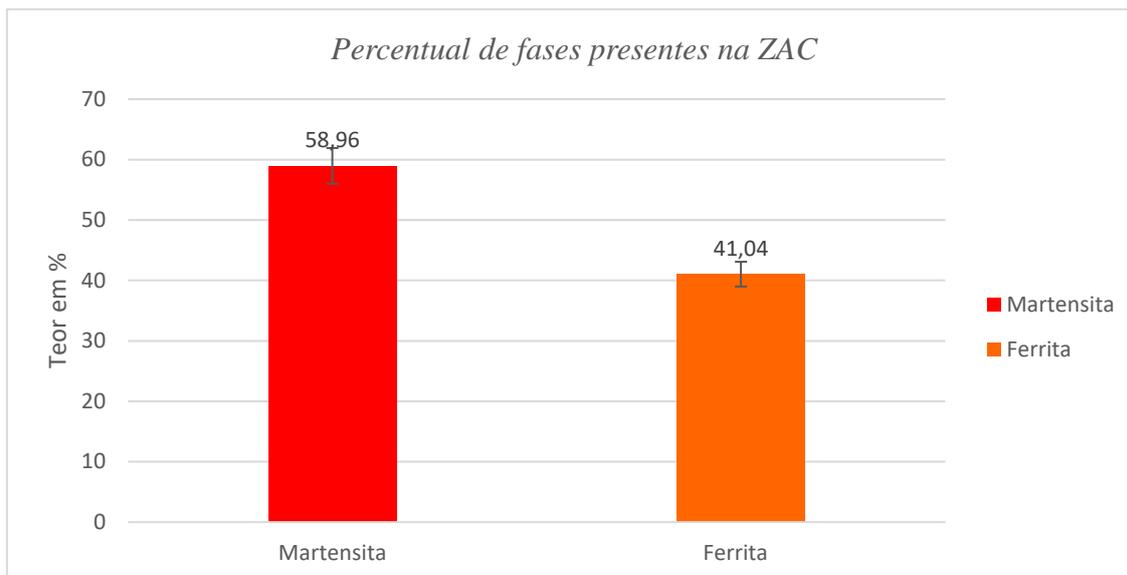


Fonte: Autor.

Pela figura é possível perceber que mesmo com o aumento do aporte térmico de soldagem não ocorreram mudanças significativas no balanço de fases, registrando um leve aumento de 8,9 % de Martensita.

Exibe-se na Figura 29 o gráfico com o percentual de cada fase encontrada na Zona afetada pelo calor, indicando 41,04% de Ferrita e 58,96% de Martensita.

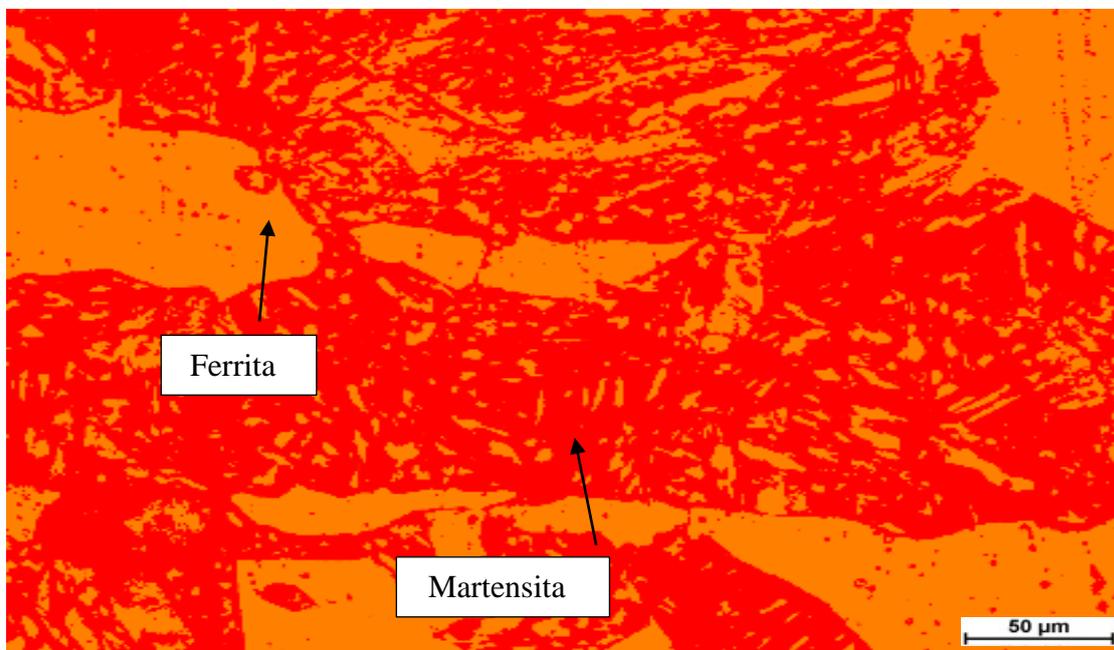
Figura 29 - Gráfico de percentual de fases – Energia de 6,7 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Complementando a análise, foi usada a mesma metodologia para o corpo de prova soldado em maior aporte térmico (9,1 kJ/cm) e obtidos os resultados abaixo, conforme a Figura 30.

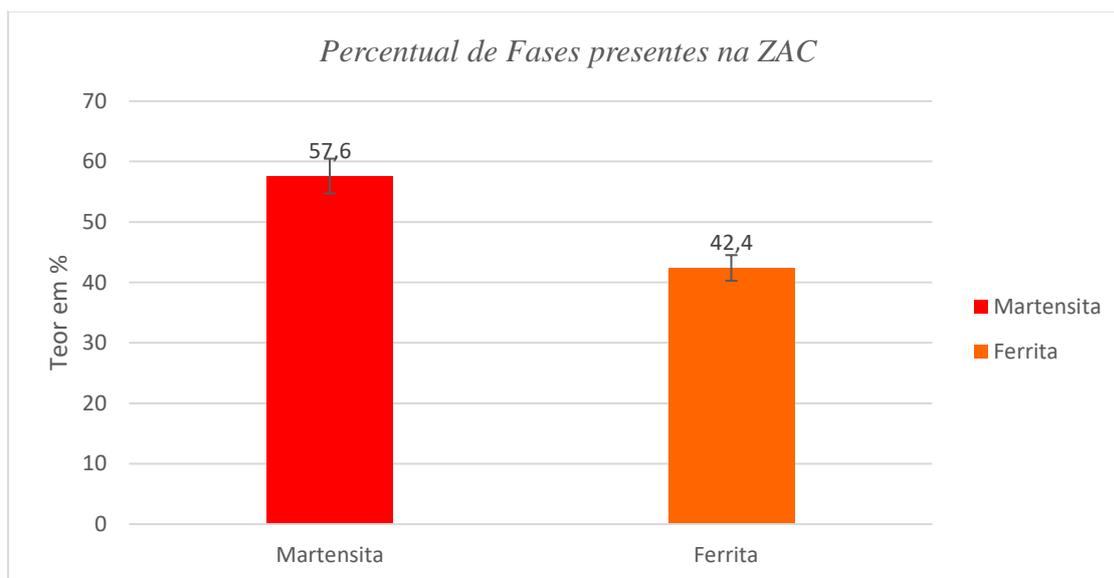
Figura 30 - Ferrita e Martensita via software OmniMet – Energia de 9,1 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Nesta condição (9,1 kJ/cm), nota-se que a proporção de fases encontradas é similar àquela realizada com o aporte de 6,7 kJ/cm, ou seja, demonstrando equilíbrio mesmo com o acréscimo de 2,4 kJ/cm. Abaixo na Figura 31 está a representação gráfica do volume encontrado de cada fase (energia 9,1 kJ/cm).

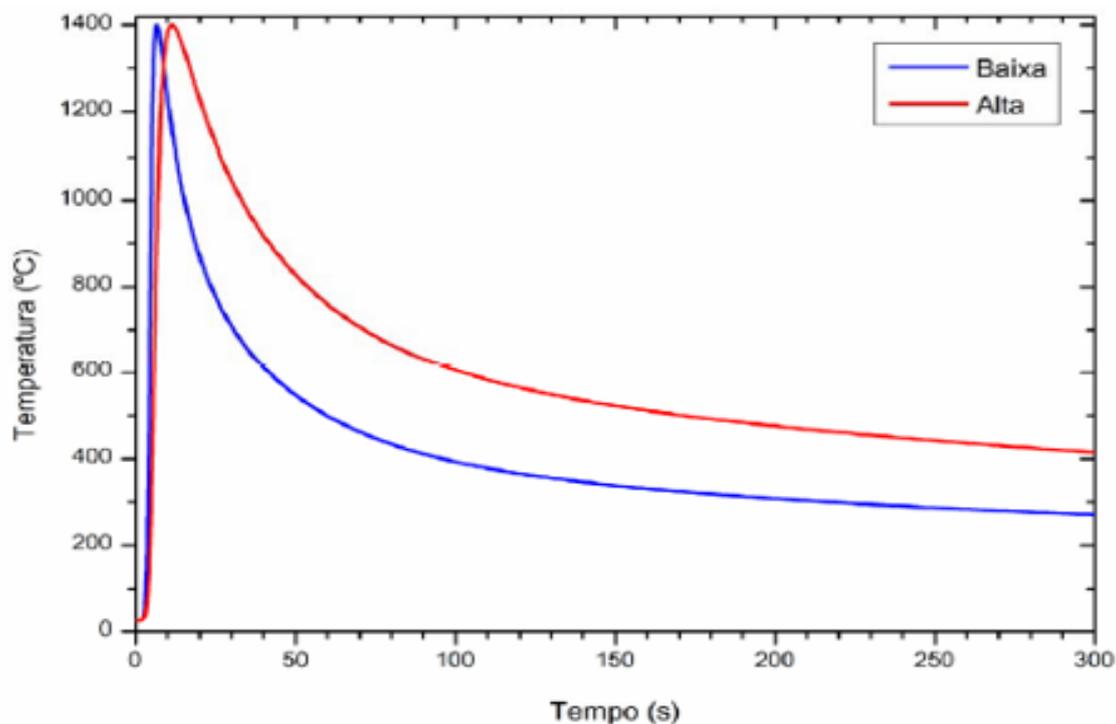
Figura 31 - Gráfico de percentual de Fases – Energia de 9,1 kJ/cm.



Fonte: Autor.

No caso acima, exibe-se o percentual de cada fase encontrada na Zona afetada pelo calor, indicando 42,40% de Ferrita e 57,6% de Martensita.

Segundo estudos realizados por Hibino (2011), observou-se que as soldas de menor energia apresentaram taxas de resfriamento cerca de três vezes menores do que às de alta energia. Assim, as ZACs do aço S41003 tenderiam a formar maior quantidade de austenita nas soldas de alta energia. Conseqüentemente, a quantidade de Martensita presente na ZAC seria superior nas soldas de alta energia. Abaixo na Figura 32, Curvas de ciclo térmico obtidas para soldas de 1,1 kJ/mm (Baixa) e 1,8 kJ/mm (Alta), obtidas no estudo de Hibino (2011).

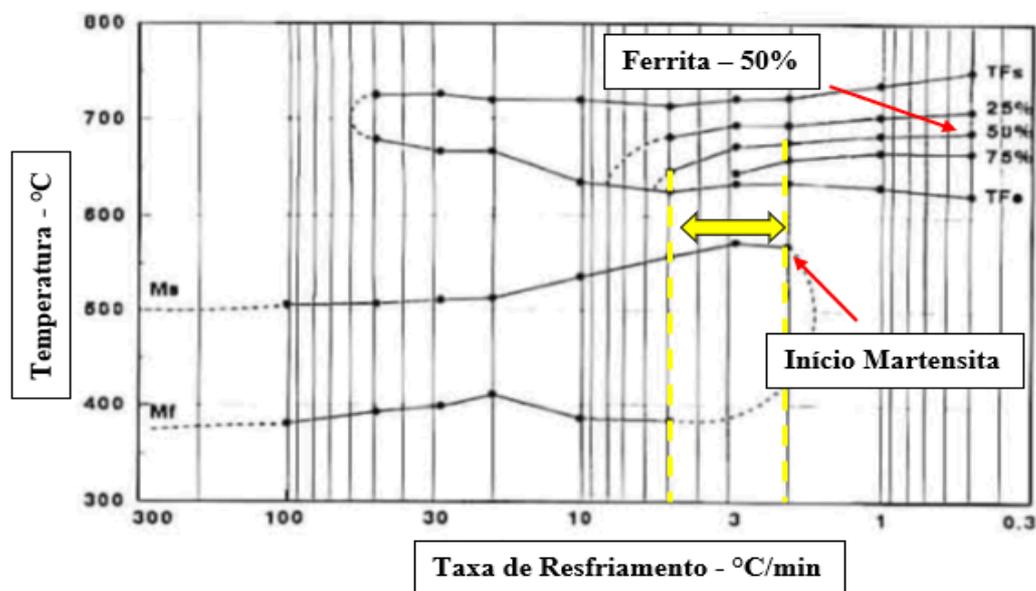


Fonte: Hibino (2011).

Também, estudos realizados por Hewitt (1992), apontam que se a taxa de resfriamento for suficientemente lenta, a austenita pode se transformar completamente em Ferrita + carbonetos, e nenhuma Martensita é formada. Já em taxas de resfriamento mais altas (> 60 °C/min), a austenita no aço se transforma totalmente em Martensita, e o aço é uniformemente duro.

Em taxas de resfriamento intermediárias, forma-se uma mistura de Ferrita + carboneto e Martensita, com conseqüentes propriedades intermediárias, dependendo de quais proporções dessas fases moles e duras estão presentes. Abaixo na Figura 33, é apresentado o diagrama de fases de transformação de resfriamento contínuo CCT, do aço 3CR12 (1.4003) ou UNS S 41003, demonstrando que um resfriamento mais acelerado proporciona uma maior formação de Martensita (à esquerda). Também é sinalizado o ponto de teor médio de Ferrita (50%) e zona de início da Martensita.

Figura 33 - Diagrama CCT – 3CR12 (1.4003) UNS S 41003.



Fonte: Adaptado de Hewitt 1992.

Conforme apresentado na figura acima, o diagrama é composto pelo eixo de Temperatura (em graus celsius) a qual o material será aquecido, e taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), sendo os principais fatores que influenciam a posição dessas curvas: a composição química e o tamanho de grão (aumentando-se o tamanho de grão atrasa-se o começo e o fim da transformação).

Ainda, o diagrama CCT do aço UNS 41003 apresentado por Hewitt (1992), aponta em amarelo, o trecho que corresponde ao volume de fases encontradas na ZAC dos três aportes térmicos testados, onde apresentaram um teor mínimo e máximo de Ferrita de 41,04% e 49,94%, respectivamente. É possível perceber que para uma maior formação de Martensita é necessário um deslocamento dos pontos para esquerda, onde a área pertencente a fase Ferrita reduz gradativamente e a de Martensita se mantém.

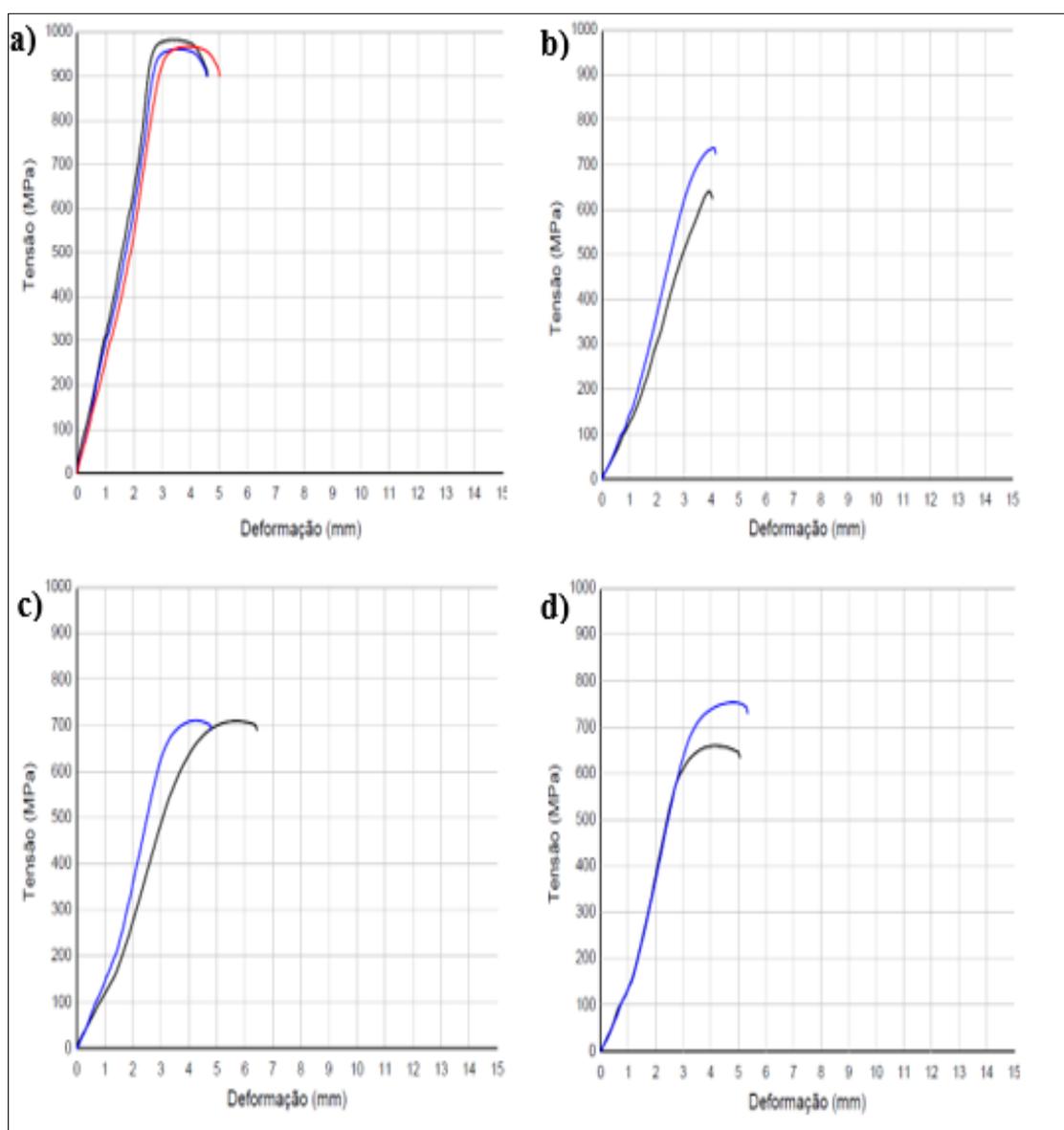
Isso só seria possível através do aumento na taxa de resfriamento do material, que no caso da soldagem ocorreria com um possível pós tratamento.

4.2 Ensaios Mecânicos

4.2.1 Ensaios de tração

Foram realizados ensaios de tração em três amostras no metal de base (Endur 300 sem solda), e em duas amostras para cada aporte analisado, totalizando nove corpos de prova. Após a realização dos ensaios foram obtidos resultados, conforme Figura 34:

Figura 34 - (a) Gráfico de tração 03 amostras de Metal Base sem solda (b) Gráfico de tração amostra soldada com aporte de 4,2 kJ /cm (c) Gráfico de tração amostra soldada com aporte de 6,7 kJ /cm e (d) Gráfico de tração amostra soldada com aporte 9,1 kJ /cm.



Fonte: Autor.

Analisando os gráficos na Figura 34, é possível verificar o alto limite de resistência do aço Endur 300, com média de 970 MPa, seguido dos corpos de prova soldados com aporte térmico de 4,2 kJ/cm obtendo 689 MPa, o de 6,7 kJ /cm com 710 MPa, e 9,1 kJ /cm com 706 MPa. Dentre as energias testadas, a maior taxa de alongamento ocorreu no método de 6,7 kJ /cm, obtendo percentual de 13%. Todos os corpos de prova romperam na zona fundida, o que já era esperado, visto o limite de resistência a tração do aço Endur 300 ser superior ao metal de adição.

Considerando o limite de resistência do metal de adição (ER319 LSi) de 600MPa, todas as amostras demonstraram desempenho mecânico satisfatório. Os resultados também afirmam o potencial de aplicação do Endur 300 em projetos de linha amarela, pois conforme catálogos de produtos do Grupo Arcelor Mittall, os aços destas famílias têm o limite de resistência mínimo variando entre 400 a 500 MPa, como por exemplo o ASTM A242, ASTM A606 e NBR 5921, dentre outras especificações para este fim, nos mais variados graus.

4.2.2 Ensaios de dobramento

Para os ensaios de dobramento realizados, foi adotada a mesma quantificação de corpos de prova, dois para cada energia de soldagem, totalizando seis ensaios. Obteve-se 100% de conformidade com as amostras testadas, não havendo descontinuidades nos cordões de solda. Abaixo na Figura 35, estão demonstrados os corpos de prova dobrados.

Figura 35 - Corpos de prova após ensaio de dobramento guiado 180°. 1 amostras de 4,2 kJ/cm, 2 amostras de 6,7 kJ/cm e 3 amostras de 9,1 kJ/cm.



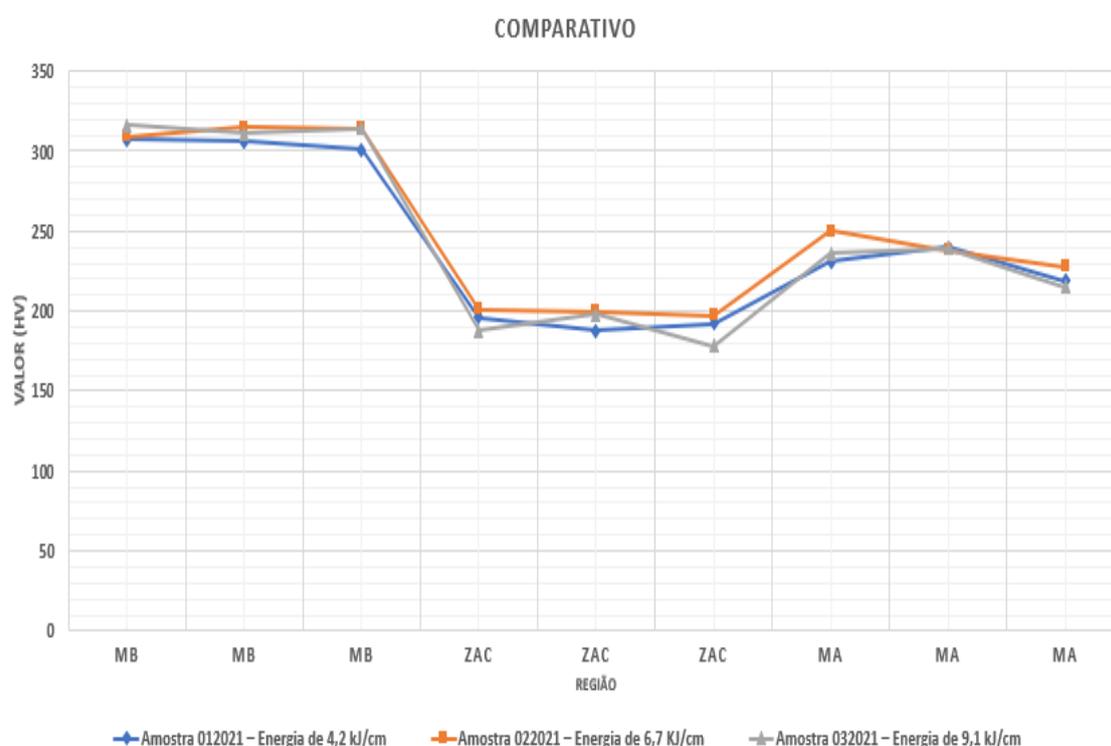
Fonte: Autor.

4.2.3 Ensaios de Microdureza Vickers

A avaliação de microdureza vickers ocorreu em 03 impressões para cada região da amostra soldada, metal de base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de adição (MA). todas as três amostras passaram pelo mesmo ensaio, totalizando 09 impressões por corpo de prova (cada amostra soldada com uma energia diferente).

Foram levantados valores pontuais de Microdureza Vickers, conforme demonstrado abaixo na Figura 36, onde está representado o gráfico com os resultados de dureza obtidos nas três condições, sendo a linha azul refletindo o corpo de prova soldado com aporte de 4,2 kJ/cm, a laranja de 6,7 kJ /cm e cinza de 9,1 kJ /cm.

Figura 36 - Resultado de Microdureza Vickers por condição soldada.



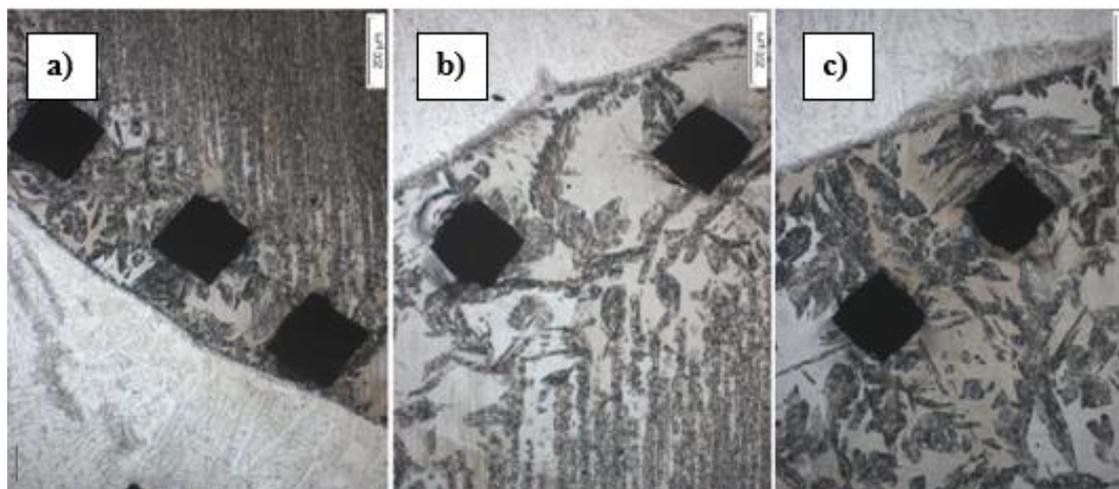
Fonte: Autor.

Os perfis de dureza gerados se comportaram de forma coesa, apresentando a faixa de 301 a 316 Hv na região do metal base (MB), 180 a 201 Hv na região da zona afetada pelo calor (ZAC) e 215 a 250 Hv na região do metal de adição (MA). A faixa de dureza é maior no metal base devido sua maior proporção de Martensita (~85%), a formação de Ferrita promoveu reduções de até 100 Hv na ZAC e percebe-se um aumento de

dureza na região do metal de adição, esta por sua vez também provocada pelo aumento do volume de Martensita na região.

Na Figura 37, estão as imagens das impressões realizadas na zona afetada pelo calor, uma para cada condição testada.

Figura 37 - Impressões realizadas na ZAC (Hv). (a) amostras de 4,2 kJ/cm, (b) amostras de 6,7 kJ/cm e (c) amostras de 9,1 kJ/cm.



Fonte: Autor.

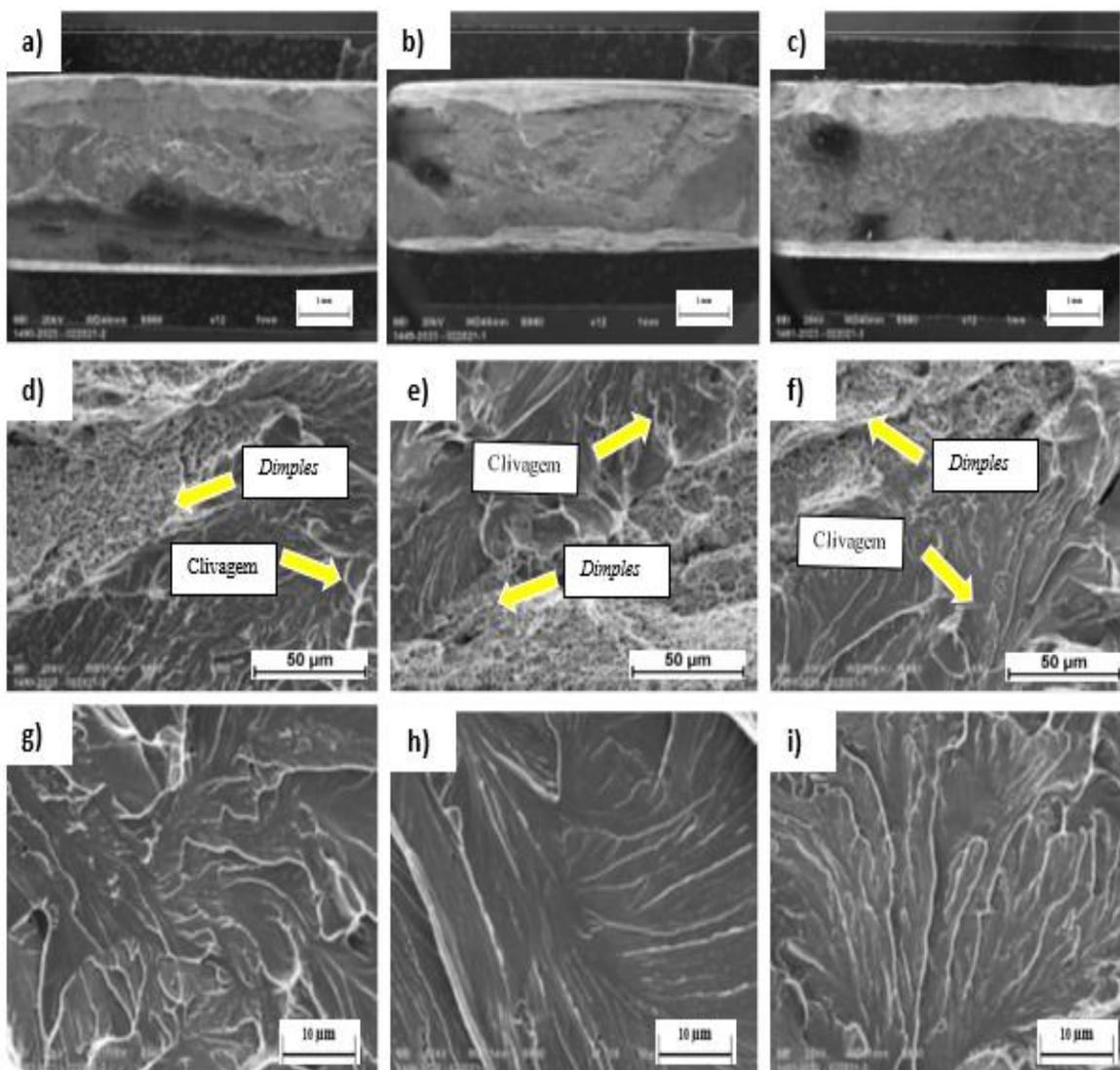
4.3 Análise de Fratura - MEV

Após análises mecânicas realizadas nos corpos de prova de tração, considerando os três aportes térmicos testados, foi realizada a análise da fratura através de Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Na figura 38, é possível perceber os registros da região das fraturas (itens a, b, c) e abaixo (itens d, e, f) estão representadas evidências de fraturas mistas clivagem/*dimples*. Também são expostas as ampliações das clivagens de cada situação (itens g, h, i).

Importante ressaltar que os *dimples* são caracterizados por fraturas dúcteis e as marcas de clivagem por fratura frágil.

Figura 38 - a) Superfície da fratura, aporte 4,2 KJ/Cm (12x), b) Superfície da fratura, aporte 6,7 KJ/Cm (12x), c) Superfície da fratura, aporte 9,1 KJ/Cm (12x), d) Clivagens e *dimples*, 4,2 kJ/cm (850x), e) Clivagens e *dimples*, 6,7 kJ/cm (850x), f) Clivagens e *dimples*, 9,1 kJ/cm (850x), g) Detalhes de clivagens, 4,2 kJ/cm (1100x), h) Detalhes de clivagens, 6,7 kJ/cm (1100x) e i) Detalhes de clivagens, 9,1 kJ/cm (1100x).



Fonte: Autor.

Em análise das fraturas referentes aos três aportes térmicos utilizados na soldagem, pôde-se verificar que as amostras soldadas nas três energias apresentam aspecto semi-frágil (ou dúctil-frágil), devido a presença de planos de clivagem e *dimples*. As fraturas dos corpos de prova de menor e médio aporte térmico 4,2 e 6,7 kJ/cm, apresentaram em proporções semelhantes planos de clivagens e *dimples*. No entanto, a amostra soldada com maior energia, apresentou um leve aumento de planos de clivagem em sua fratura.

Macroscopicamente, a fratura semi-frágil é caracterizada por apresentar zona radial, zona fibrosa e cisalhante. O aspecto microscópico é caracterizado por ruptura de ligações e mobilidade de discordâncias, e a presença de clivagem numa escala bem pequena e em planos não bem definidos. A Fractografia apresenta características intermediárias entre fratura dúctil e frágil, conforme apresentado na figura 38.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram testadas diferentes energias de soldagem com o objetivo de avaliar qual a influência do aporte térmico na microestrutura presente na zona afetada pelo calor do aço comercial Endur 300. A partir da soldagem em três aportes distintos, seguida da extração e análise dos corpos de prova, pode-se perceber o quanto o aporte térmico liberado pode influenciar na formação de fases presentes na zona afetada pelo calor (ZAC), bem como sua resistência mecânica.

Através das análises microscópicas via software, foi possível concluir que a Ferrita apresentou pouca variação volumétrica com a troca de aporte térmico, isto devido as taxas de resfriamento não serem suficientes para mudanças significativas.

Sob perspectiva da resistência mecânica, também não houveram mudanças relevantes nos resultados das análises das juntas soldadas. A microdureza se apresentou equilibrada, os ensaios de dobramento e tração demonstraram resistência mecânica satisfatória, levando em consideração a aplicação em implementos rodoviários.

Logo, é evidente a necessidade da aceleração das taxas de resfriamento pós soldagem, para que haja variações significativas no balanço de fases presentes na ZAC dos aços comerciais Endur 300 (Martensita e Ferrita). No caso, tais mudanças podem ser obtidas através de um pós tratamento do processo de soldagem deste metal, onde a maior aceleração da taxa de resfriamento tende a formar um volume superior de Martensita em relação a Ferrita.

5.1 Trabalhos futuros

O estudo apresentando neste trabalho permite visualizar cenários com potencial de aplicação na soldagem do aço Endur 300. Porém, entende-se que há possibilidades de aperfeiçoamento e necessidade em se avaliar a partir das seguintes abordagens:

- Estudo da soldagem do Endur 300 com aço importado (concorrente).
- Estudo da fadiga do Endur 300 soldado em diferentes energias.
- Estudo da resistência da Solda em baixas temperaturas.
- Estudo da influência da intensidade da taxa de resfriamento pós soldagem, na formação de Martensita na ZAC dos aços Endur 300.

6. Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “**NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers**”, 2019.

ALVES, V.J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para o processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia) - Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 155p, 2009.

ANDERSEN, P. J. 1.3.3B - **Stainless steels**. In: WAGNER, W. R.; SAKIYAMA-ELBERT, S. E.; ZHANG, G.; YASZEMSKI, M. J. (Ed.). Biomaterials Science (Fourth Edition). Fourth edition. Academic Press, 2020. p. 249–255. ISBN 978-0-12-816137-1000192. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012816137>.

APERAM ENDUR 300 .(2021) **Solução inovadora em aço inox da Aperam, otimiza o transporte de cargas no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/endur-300-solucao-inovadora-em-aco-inox-da-aperam-otimiza-o-transporte-de-cargas-no-brasil/>. Acessado em: 18 mar.2022.

APERAM. **Endur: Resistência a corrosão e abrasão. Esse é o aço**. Brasil: Aperam South America, 2019. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/endur/>. Acesso em: 2 mar. 2022.

APERAM ENDUR 300. **DIN WS 1.4003/UNS S41003**. Brasil: Aperam South America, 2015. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/DIN-WS-1.4003UNS-41003-A%C3%A7o-Inoxid%C3%A1vel-Ferr%C3%ADtico-para-placa%C3%A7%C3%B5es-estruturais-e-de-desgaste.pdf>>. Acessado: 12-02-2022.

ARCELORMITTAL. **Catálogo de produtos laminados**. Arcelor Mittal Aços Planos América Latina. 2015. Disponível em <https://C:/Users/Bruno/Downloads/catalogo-acos-planos.pdf>. Acesso em: 16 set. 2022.

ASTM - American Society for Testing and Material, “ASTM Book of Standards - Section 3. **Metals Test Methods and Analytical Procedures**”, 2021.

ASTM - American Society for Testing and Material, “**ASTM Section E 562 - ASTM Book of Standards - Section 3: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point**”, 2019.

ASTM - American Society for Testing and Material, “**Standard Terminology Relating to Metallography. standard by ASTM International**”, 2017.

ASTM - American Society for Testing and Material, “**Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**”, ASTM A370. 2017.

AWS - American Welding Society, “**Structural Welding Code - Stainless Steel**”, D1.6. ed. 2017.

AZEVEDO, D. R.; LEITE, D. N. F.; BARBOSA, M. M.; PALMEIRA, A. A.; JR, H. G. D. **Proposição de método de seleção de materiais metálicos para calha de transporte de efluentes oriundo da limpeza de gases de um alto forno**. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 9, n. 1 (Esp.), p. 95–101, 2017. DOI: 10.47385/cadunifoa. v9.n1 (Esp.).1213. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1213>. Acesso em: 15 jul. 2022.

BARBEDO, Nanci Ducca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2011.

BERMEJO, A. V. **Predictive and measurement methods for ferrite determination in stainless steels**. Weld Journal, 4.ed., v.91, p. 113, 2012.

BUBANI, F. C. (2007) **Estudo dos efeitos da adição de níquel em ligas Fe-Cr através de termodinâmica computacional e análise microestrutural**. 8º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica- Cuzco, Peru, Unicamp, 9p, 2007.

CARROUGE, D. **Study of the Microstructure Developing in the HAZ of a Range of Supermartensitic Stainless Steels**. 2002. Tese, (Doutorado em Philosophy in Natural Sciences). Londres: University of Cambridge, 195p, 2002.

CARVALHO, Vicente da Rocha e MACHADO, Ivan Guerra. **Brasagem de Aços Inoxidáveis Martensíticos Utilizando Pasta à Base de Níquel em Forno a Vácuo**. Soldagem & Inspeção [online]. 2020, v. 25 [Acessado 22 julho 2022], e2508. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.08>>. Epub 11 maio 2020. ISSN 1980-6973. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.08>.

CASHELL, K.; BADDOO, N. **Ferritic stainless steels in structural applications**. Thin-Walled Structures, Elsevier BV, v. 83, p. 169–181, out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.014>.

CHENG X, WANG Y, Li X, DONG C. **Interaction between austenite-ferrite phases on passive performance of 2205 duplex stainless steel**. Journal of Materials Science and Technology, 2018.

CORTIE, M.; du Toit, M. **Stainless steels, ferritic**. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-803581-8. Disponível:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818025017>>.

COSTANZA, Girolamo & Sili, A. & maria elisa, Tata. (2016). **Weldability of austenitic stainless steel by metal arc welding with different shielding gas.** Procedia Structural Integrity. 2. 3508-3514. 10.1016/j.prostr.2016.06.437.

DALCIN. R. L. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares.**2016. Dissertação de Mestrado. - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DALMAU, Alba & Rmili, Wafaa & Joly, Damien & Richard, Caroline & Igual-Muñoz, ANNA.2014. **Tribological Behavior of New Martensitic Stainless Steels Using Scratch and Dry Wear Test.** Tribology Letters.DOI 10.1007/s11249-014-0429-6. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/267376033_Tribological_Behavior_of_New_Martensitic_Stainless_Steels_Using_Scratch_and_Dry_WearTest Acesso em: 30.mar.2022.

DAMIN, Keli Vanessa & Generoso, Daniel & Cavilha Neto, FRANCISCO. (2017). **Aços inoxidáveis duplex: uma breve visão.**2017. Revista Liberato. 18. 113-129. 10.31514/rliberato. 2017.v18.n29.p113.

DELFINO, Gustavo Moreira; PORFÍRIO, Bruno Ribeiro; NOSSA, Tamires de Souza. **Corrosão de aços inoxidáveis duplex em ambiente marinho: uma revisão.** Revista Brasileira de Iniciação Científica, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 34-45, jun. 2019. ISSN2359-232X. Disponível em: <https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1480>.

ESAB - Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget. **Catálogo de consumíveis.**2020. Disponível em:https://www.esab.com.ar/br/pt/support/documentation/upload/1902600_rev15_consumiveis_handbook.pdf. Acesso em: 27.mar.2022.

ESAB - Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget. 2014. **Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)**. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova.pdf. Acesso em 13.mar.2022.

FILHO, E.G.M. **Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) no passe de raiz**. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Belo Horizonte – MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 86p, 2012.

FORTES, C. 2005.**Apostila MIG/MAG**. ESAB - Elektriska Svetsnings Aktiebolaget BR, 135p.

FU, J.; WANG, J.; LI, F.; CUI, K.; DU, X.; WU, Y. **Effect of Nb addition on the microstructure and corrosion resistance of ferritic stainless steel**.2020 Applied Physics A, Springer Science and Business Media LLC, v. 126, n. 3, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3383-1>. Acesso em: 21.abr.2021.

GAO, Q., WANG, C., QU, F., et al., **“Martensite transformation kinetics in 9Cr–1.7W–0.4Mo–Co ferritic steel”**, Journal of Alloys and Compounds, n. 610, p. 322–330, Oct. 2014.

GIRALDO, J. MUÑOZ, D., ARISTIZÁBAI, S., SUÁREZ, J., ARBELÁREZ, A., URIBE, D. 2008. **Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para El processo GMAW**. Dyna,V. 76, n. 157, p. 205-212.

GODEFROID, L.B.; CÂNDIDO, L.C.; de MORAIS, W.A. – **“Curso: Análise de Falhas”**. 2011; p. 533-548.

GROYSMAN A. **Corrosion problems and solutions in oil refining and petrochemical industry**. 32nd ed. Cham: Springer; 2017. 351 p.

HAMZE, Baghjari; SEYED A.A, AKBARI.M. **Effects of pulsed Nd:YAG laser welding parameters and subsequent post-weld heat treatment on microstructure and hardness of AISI 420 stainless steel**. Materials & Design, Iran, v. 43, p. 1-9, 31 jan. 2013.

HENKE, Sérgio L., PAREDES, Ramon S. C. e CAPRA, André R. **Desenvolvimento da Ferrita na solda e ZTA resultante de soldagem plasma pulsada em um aço inoxidável supermartensítico**. Soldagem & Inspeção [online]. 2013, v. 18, n. 1 pp. 57-63. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100008>>. Epub 24 Jan 2013. ISSN 1980-6973. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100008>. Acessado em: 31. Jul.2022

HEWITTT, J. **High-chromium controlled-hardenability steels**. INFACON 6. Proceedings of the 1st International Chromium Steels and Alloys Congress, Cape Town. Volume 2. Johannesburg, SAIMM, 1992. pp. 71—88.

HIBINO, **Alberto Hisashi**. **Estudo de Tenacidade da Zona Termicamente Afetada dos Aços Inoxidáveis Ferríticos UNS S40910 e UNS S41003**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Minas Gerais, 2011.

KAH, P. et al. **Usability of Arc Types in Industrial Welding**. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, v. 9, n. 15, p. 1–12, 2014.

KUNTZ, Maiquel R. K. **Análise coMParativa entre a soldagem com arame sólido e metal cored no processo multipasses**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Trabalho de Conclusão de Curso. Panambi, 2016.

LIBERATO, Frank de Mello. **Soldagem Subaquática de Aço Baixo Carbono com Eletrodo Inoxidável Austenítico**. 2017. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2017. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOSB3DGAA/1/tese_doutorado_2017_abril_2018_final.pdf. Acesso em: 29 nov. 2019.

LIMA, Luciana I.L. **Metodologia da Corrosão da Zona Termicamente Afetada de Aço Inoxidável AISI 439 Soldado**. 2007. - Programa de Pós Graduação- Universidade Federal de Minas Gerais - 2007/ pg.02.

JOPEMAR. **As aplicações do aço inoxidável martensítico**. Tanque de aço inox. 2016. Disponível em. Acesso em 08 nov. 2019.

MACHADO, I. G. **Condução do calor na soldagem: fundamentos & aplicações**. 1 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora LTDA, 2000. 119 p.

MARQUES, Davi Alves. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletroquímicas e comportamento de corrosão do aço inoxidável classe 410 em solução de cloreto**. 2021. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2021.

MARQUES, V.M.; MODENESI, P., J.; BRANCRENSE, A., Q.; **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**, 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

MODENESI, P. J., Paulo Villani Marques, Alexandre QUEIROZ **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MORAES, Flavio Pereira de. **Microestrutura e propriedades de um tubo de aço inoxidável austenítico AISI 316L após 100.700 horas de exposição a 640 °C.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. doi:10.11606/D.3.2020.tde-21012021-114402. Acesso em: 2022-07-22.

MORGANTI, M. P. S. **Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm.** 2013. Especialização em Engenharia de Soldagem – São Caetano do Sul – SP, Escola de Engenharia Mauá, 51p.

OLIVEIRA, G.D. (2016). **A aplicabilidade do uso do aço inoxidável em coberturas de edificações estruturadas em aço – estudos de caso.** Tese (Mestrado Profissional em Construção Metálica) – Ouro Preto – MG, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 112p.

PADILHA, A. F.; PLAUT, R. L.; RIOS, P. R. Chapter 15: **Stainless steels heat treatment.** In: TOTTEN, G. E. Steel Heat Treatment Handbook. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2006. Cap. 15, p. 891-935. Physique. Paris. Vol.1, pp 3-48.

PAPAVINASAM, S. 3 - Materials. In: PAPAVINASAM, S. (Ed.). **Corrosion Control in the Oil and Gas Industry.** Boston: Gulf Professional Publishing, 2014. p. 133–177. ISBN 978-0-12-397022-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123970220000030>.

QUITES, A.M. "**Apostila Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear: Soldagem Soldabilidade**", UFSC: Santa Catarina, 1990.

RAYNOR, G. V. RIVLIN, V. G. **Phase equilibria in iron ternary alloys.** The Institute of Metals, London, 1985.

SANTANA, Ana Luiza Beltrão. **Influência da corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame tubular no desgaste abrasivo de revestimentos depositados pelo processo TIG alimentado arame frio**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. (2008) **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 284 p.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. (2014) **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 288 p.

SILVA, A. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 664p.

SILVA, Rafaela dos Santos et al. **Influência do Aporte Térmico sobre as Características e Propriedades de Cordões de Solda dos Aços AISI 316 e AISI 316L**. Soldagem & Inspeção. 2020, v. 25, e2504. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.04>. Epub 11 maio 2020. ISSN 1980-6973. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.04>. Acessado em: 22. jul.2022.

SOUZA LH, XAVIER CR, MEDEIROS N, MARCELO CJ, MOREIRA LP. **Avaliação da soldagem TIG autógena sobre as características dimensionais da solda do aço AISI 304L**. In: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Anais do 9th Congresso Nacional de Engenharia Mecânica; 2016 agosto 21-25; Fortaleza. Rio de Janeiro: ABCM; 2016.

SOLCI, Arnaldo M. **Soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa**. Apostila. White Martins Gases Industriais S/A, Bauru, 2015. 34p.

SOUZA, C. S. **Avaliação da resistência à corrosão localizada do aço inoxidável Lean duplex UNS S32204 soldado pelos processos SMAW, GMAW e FCAW.** 2012. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TAVARES.S. S. M. J. M. PARDAL.M. R. Silva; OLIVEIRA.C. A. S. **Martensitic transformation induced by cold deformation of lean duplex stainless steel UNS S32304.** 2014. Regular Articles • Mat.Res.17 (2). Abril/2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000157>.

TSAI, M.C., CHIOU, C.S., DU, J.S., YANG, J.R. **“Phase Transformation in AISI 410 stainless steel”.** Materials Science and Engineering A, v. 332, pp. 1-10, 2002. Supl.1.DOI 10.1016/S0921-5093(01)01710-5. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248470243_Phase_transformation_in_AISI_410_stainless_steel. Acesso em: 15.ago.2021.

VILLANI, P., MODENESI, P., BRACARENSE, A. Q. **Fundamentos da soldagem.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 362 p, 2006.

VILELA, L. de B. M., FARIA, G. L. de., ALCÂNTARA, C. M. de., OLIVEIRA, T. R. de., & COTA, A. B. 2019. **Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11 %Cr e baixos teores de intersticiais.** Matéria (Rio De Janeiro), 24(Matéria (Rio J.), 2019 24(1)), e-12280. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0617>.

VICENTE, André.2018. **Modos de Solidificação dos Aços Inoxidáveis - Entendendo o Sistema Fe-Cr-Ni.** 10.13140/RG.2.2.18334.69444.

ZANELLA, Igor G. **Influência da potência de plasma nas características da superfície do aço inoxidável martensítico AISI 420 nitretado a baixa temperatura.** 2018. 99 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018. Disponível em: <https://www.prppg.ufpr.br/signa/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=39980&idprograma=40001016040P5&anobase=2018&idtc=1368>. Acesso em: 20.dec.2021.

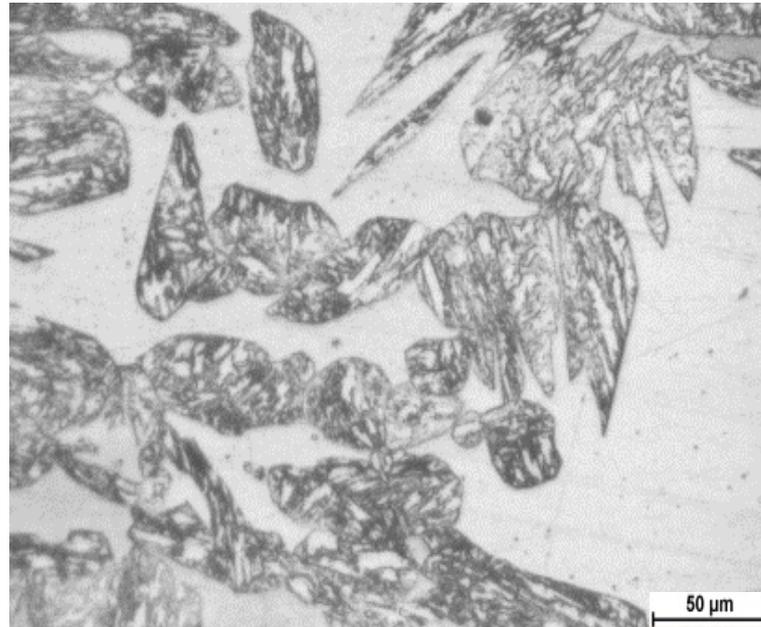
ZHANG, S.; WANG, Q.; YANG, R.; DONG, C. **Composition equivalents of stainless steels understood via gamma stabilizing efficiency.** Scientific Reports, Springer Science and Business Media LLC, v. 11, n. 1, mar. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349889792_Composition_equivalents_of_stainless_steels_understood_via_gamma_stabilizing_efficiency.

ZOU Y, UEJI R, HIDETOSHI Fujii H. **Mechanical properties of advanced active-TIG welded duplex stainless steel and ferrite steel.** Materials Science and Engineering: A. 2015.Supl.1.DOI 10.1016/j.msea.2014.10.006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267515811._Mechanical_properties_of_advanced_active-TIG_welded_duplex_stainless_steel_and_ferrite_steel. Acesso em: 20.fev.2021.

ANEXO A – Micrografias da junta soldada

Ferrita e Martensita presentes na ZAC do aço Endur 300, soldagem feita com 4,2 KJ/cm (Energia).

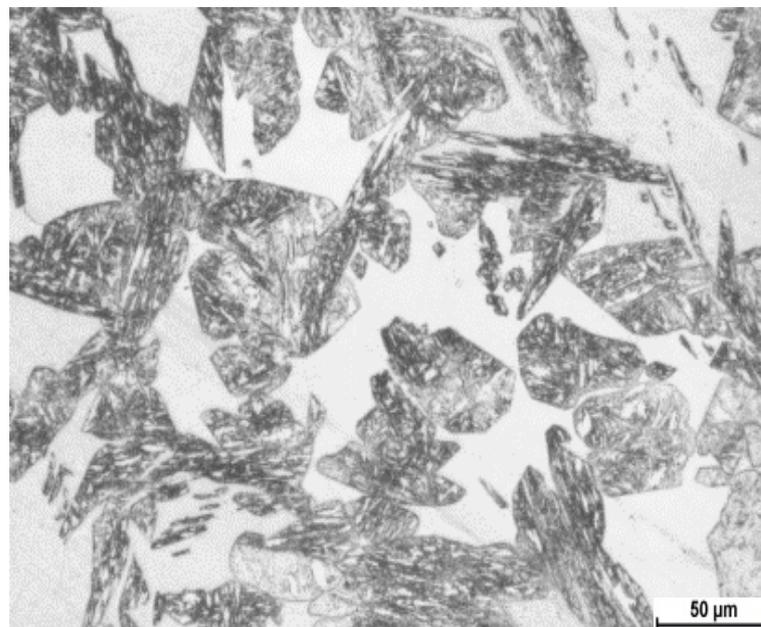
Anexo A. 1 - Micrografia – Ferrita e Martensita em 4,2 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Ferrita e Martensita presentes na ZAC do aço Endur 300, soldagem feita com 6,7 kJ/cm (Energia).

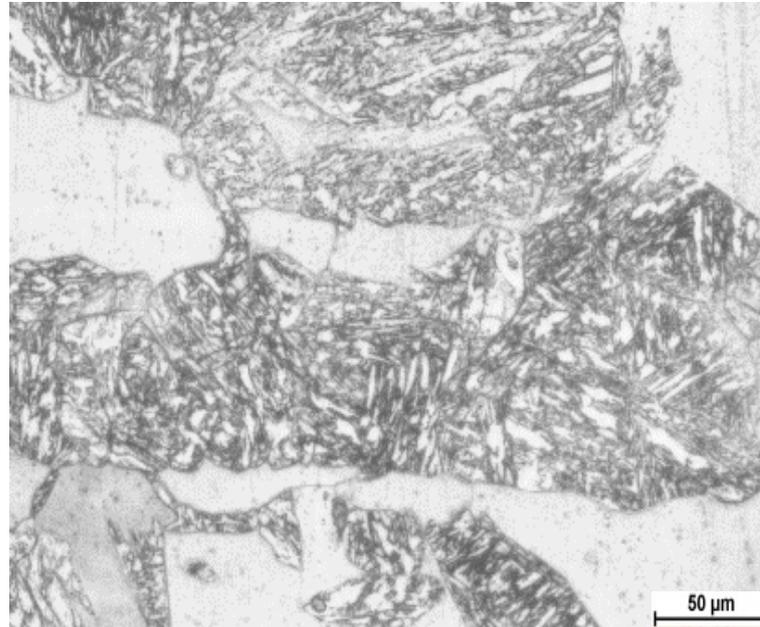
Anexo A. 2 - Micrografia – Ferrita e Martensita em 6,7 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Ferrita e Martensita presentes na ZAC do aço Endur 300, soldagem feita com 9,1 KJ/cm (Energia).

Anexo A. 3 - Micrografia – Ferrita e Martensita em 9,1 kJ/cm.



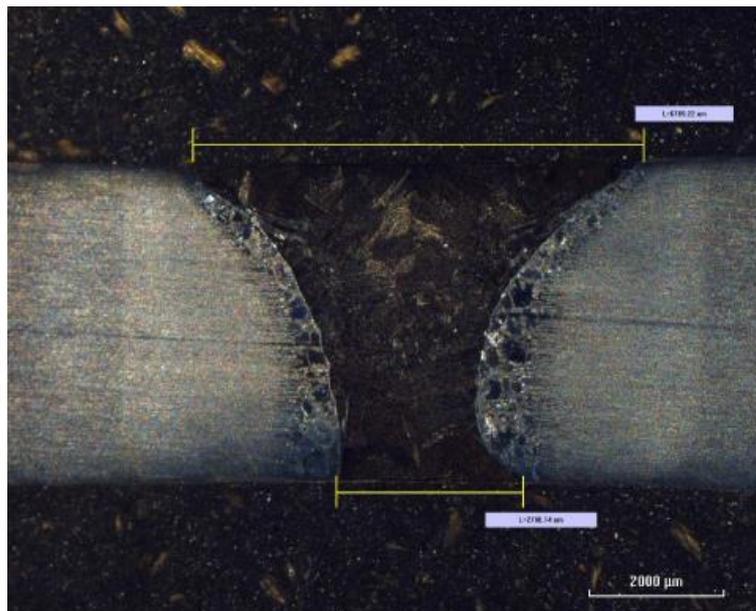
Fonte: Autor.

ANEXO B – Imagens de macrografias da junta soldada

Neste anexo, seguem detalhamento de imagens das macrografias transversais, realizadas a temperatura ambiente, ampliação de 12x, e reativo utilizado Kalling's.

Abaixo macrografia da amostra 012021 (4,2 kJ/cm), com a face medindo 6,71 mm e a raiz 2,78 mm.

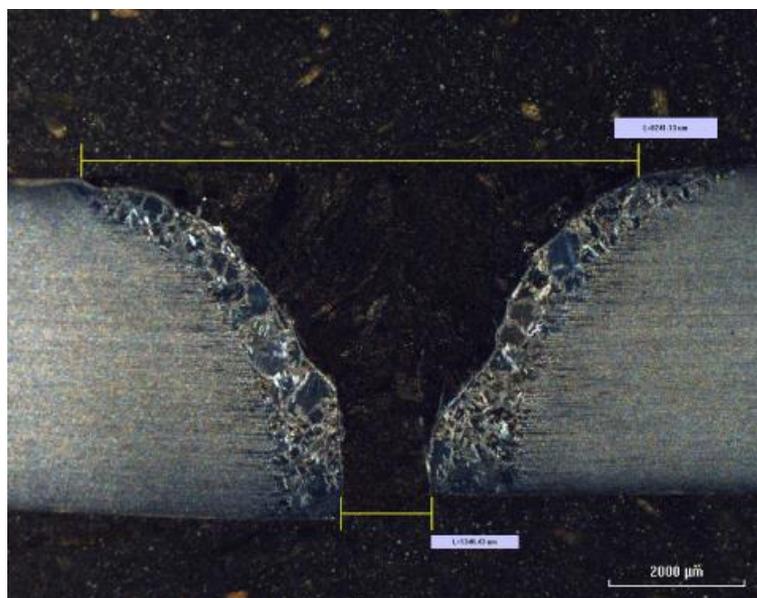
Anexo B. 1- Macrografia Transversal (4,2 kJ/cm).



Fonte: Autor.

No segundo caso a macrografia da amostra 022021 (6,7 kJ/cm), com a face medindo 8,24 mm e a raiz 1,34 mm.

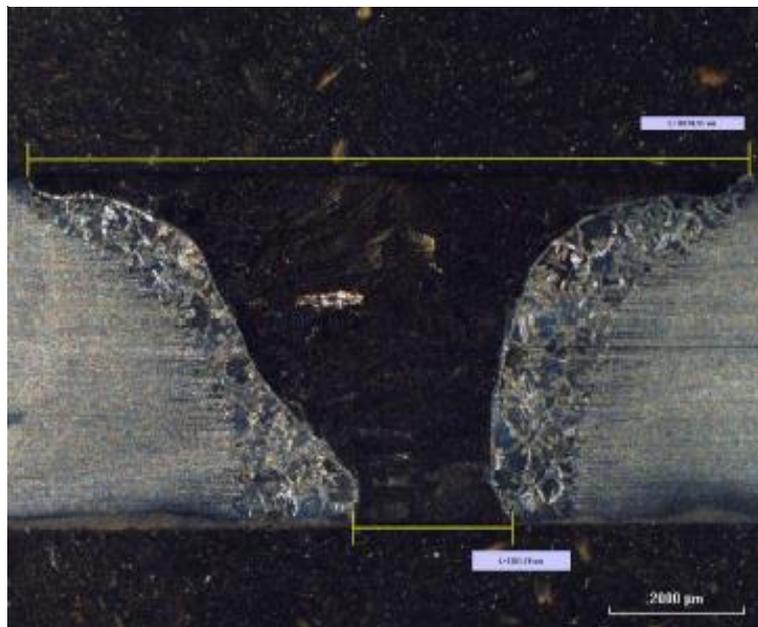
Anexo B. 2 - Macrografia - Transversal (6,7 kJ/cm).



Fonte: Autor.

E na situação de maior energia, a macrografia da amostra 032021 (9,1 kJ/cm), com a face medindo 10,73 mm e a raiz 2,36 mm.

Anexo B. 3 - Macrografia - Transversal (9,1 kJ/cm).

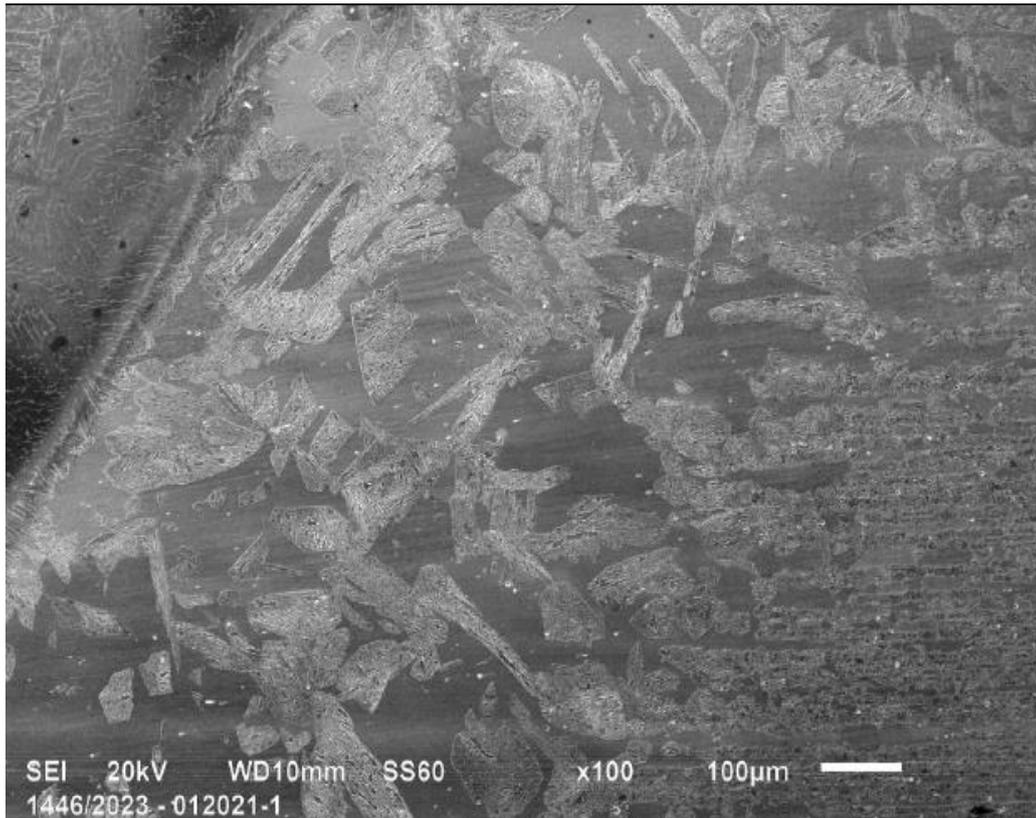


Fonte: Autor.

ANEXO C – Imagens de microscopia eletrônica de varredura

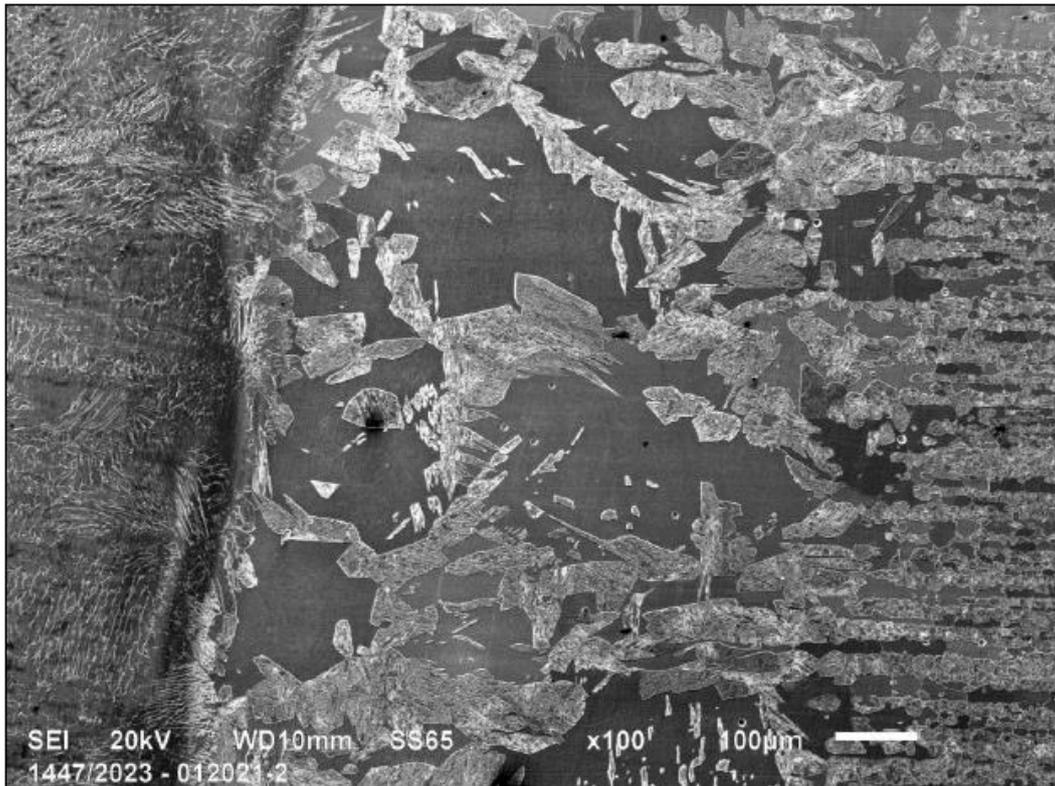
Nas imagens abaixo, segue detalhamento da Martensita e Ferrita (região da ZAC) do aço Endur 300 soldados nos três aportes térmicos., sendo C.1 referente a energia de 4,2kJ/cm, C.2 6,7 kJ/cm e C.3 9,1kJ/cm.

Anexo C. 1 – Metalografia eletrônica de varredura ZAC, 4,2 kJ/cm.



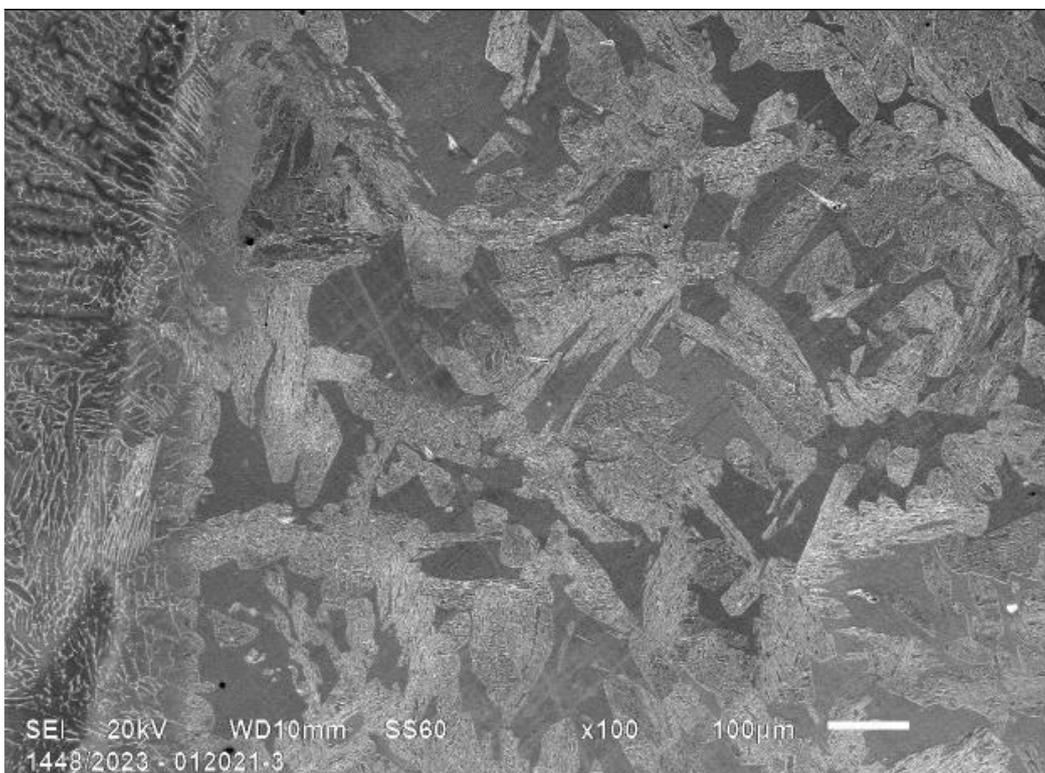
Fonte: Autor.

Anexo C. 2 – Metalografia eletrônica de varredura ZAC, 6,7 kJ/cm.



Fonte: Autor.

Anexo C. 3 – Metalografia eletrônica de varredura ZAC, 9,1 kJ/cm.



Fonte: Autor.