



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE



CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE
TUBOS DE AÇO ASTM 335 P22 UTILIZADOS EM CALDEIRAS
AQUATUBULARES DO SETOR SUCROALCOOLEIRO

FRANCISCO MENDES DE ABREU

Campina Grande – PB, agosto de 2023

FRANCISCO MENDES DE ABREU

ESTUDO DA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE
TUBOS DE AÇO ASTM 335 P22 UTILIZADOS EM CALDEIRAS
AQUATUBULARES DO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica em
nível de mestrado como
requisito para obtenção do título
de MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

Linha de pesquisa: Processos Mecânicos - Metalúrgicos

Orientador: Dr. Marco Antônio dos Santos

Coorientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo.

Campina Grande/PB – 2023

A162e

Abreu, Francisco Mendes de.

Estudo da qualificação de procedimento de soldagem de tubos de aço ASTM 335 P22 utilizados em caldeiras aquatubulares do setor sucroalcooleiro / Francisco Mendes de Abreu. – Campina Grande, 2023.
77 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Marco Antônio dos Santos, Prof. Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo".

Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Processos Mecânicos e Metalúrgicos.
3. Soldagem – Processos SMAW e GTAW. 4. Aço ASTM 335 P22.
5. Aço para Caldeira. 6. Tenacidade ao Impacto. I. Santos, Marco Antônio dos. II. Melo, Raphael Henrique Falcão de. III. Título.

CDU 621.01(043)

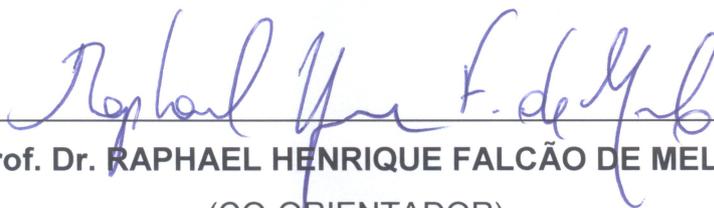
**ESTUDO DA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DE TUBOS
DE AÇO ASTM 335 P22 UTILIZADOS EM CALDEIRAS AQUATUBULARES DO
SETOR SUCROALCOOLEIRO**

FRANCISCO MENDES DE ABREU

Dissertação Aprovada em 31/08/2023 pela Banca Examinadora constituída dos
seguintes membros:



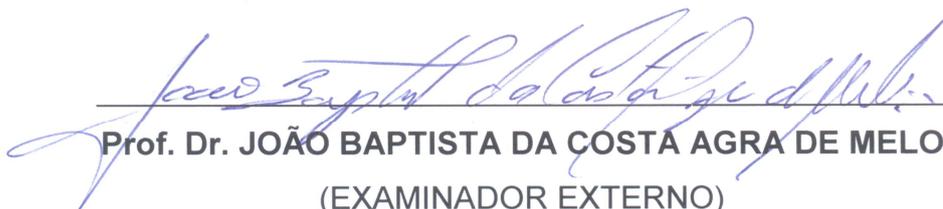
Prof. Dr. MARCO ANTÔNIO DOS SANTOS
(ORIENTADOR)



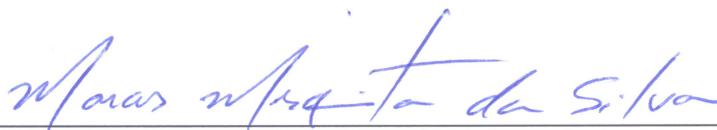
Prof. Dr. RAPHAEL HENRIQUE FALCÃO DE MELO
(CO-ORIENTADOR)



Prof. Dr. RENATO ALEXANDRE COSTA DE SANTANA
(EXAMINADOR INTERNO)



Prof. Dr. JOÃO BAPTISTA DA COSTA AGRA DE MELO
(EXAMINADOR EXTERNO)



Prof. Dr. MARCOS MESQUITA DA SILVA
(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Ana Lúcia, ao meu filho Luis Fernando, a minha mãe Maria Mendes e ao meu pai José Félix (in memoria) pelo incentivo na minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão do meu mestrado. É com imensa gratidão que reconheço cada um de vocês pelo papel fundamental desempenhado em minha jornada acadêmica. Permitam-me expressar meu agradecimento na seguinte ordem:

Primeiramente, agradeço a Deus, pois sem sua orientação, força e bênçãos, nada disso seria possível. Sou grato por sua presença constante em minha vida e por me guiar ao longo dessa trajetória acadêmica.

Gostaria de fazer um agradecimento especial aos meus pais, José Félix (in memoriam) e Maria Mendes. Suas palavras encorajamento, amor incondicional e apoio constante foram essenciais para que eu pudesse alcançar esse marco em minha vida. Sinto-me verdadeiramente abençoado por tê-los como meus pais.

Agradeço também à minha amada esposa, Ana Lúcia de Abreu e ao meu filho, Luis Fernando de Abreu pelo apoio inabalável, paciência e compreensão durante esse período desafiador. Sua presença e incentivo foram fundamentais para que eu me mantivesse focado e determinado a concluir o mestrado. Amo vocês profundamente.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao meu professor orientador, Dr. Marco Antônio dos Santos. Sua expertise, orientação e dedicação foram de inestimável valor para o meu desenvolvimento acadêmico. Sou grato por sua confiança em mim e por me guiar ao longo do meu trabalho de pesquisa.

Agradeço também ao meu coorientador e colega de trabalho, Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo. Sua colaboração, conselhos e contribuições foram cruciais para o sucesso do meu trabalho. Sinto-me privilegiado por ter tido a oportunidade de trabalhar ao seu lado e aprender com você.

Agradeço ao prof. Dr. João Baptista da Costa Agra de Melo pela generosa disponibilização do Laboratório de Metalografia, que foi fundamental para a realização de nossos estudos e pesquisas na área. Sua colaboração e auxílio

foram de imenso valor, proporcionando enriquecedor e uma experiência prática única.

Gostaria de estender minha gratidão ao técnico da Oficina Mecânica e do Laboratório de Propriedades Mecânica da UFCG e colega de mestrado, Cícero de Lima Santos. Sua expertise, auxílio na construção dos experimentos e valiosas discussões foram imprescindíveis para o desenvolvimento do meu projeto. Agradeço pela parceria e amizade.

Agradeço ao técnico do LabSol, José Fernando da Silva, por sua assistência e suporte no uso dos equipamentos. Sua disponibilidade e conhecimento foram fundamentais para a realização dos experimentos e obtenção dos resultados.

Não poderia deixar de agradecer à Daniella Cibele Bezerra, pela sua contribuição essencial no uso do microscópio Eletrônico de Varredura. Sua expertise e habilidades foram indispensáveis para a análise e interpretação dos dados.

Expresso minha gratidão ao meu primo e colega de mestrado, José Wallisson de Abreu Souza, pelo constante incentivo, discussões produtivas e apoio mútuo ao longo dessa jornada. Sua presença foi um grande estímulo para o meu crescimento acadêmico.

Agradeço ao colega de graduação e mestrado, José Galdino da Silva, por sua amizade, troca de conhecimento e colaboração em diversas etapas da minha pesquisa. Sua contribuição foi de grande valor e enriqueceu significativamente meu trabalho.

Gostaria de aproveitar esta oportunidade para agradecer aos colegas de mestrado e viagens, José Wiron Barbosa Procópio e Alan Vinicius de Araújo Batista. Compartilhamos momentos valiosos ao longo dessa jornada acadêmica, desde discussões estimulantes até momentos de descontração.

Expresso minha gratidão ao Engenheiro Mecânico da empresa Impacto Bioenergia de Alagoas, Thiago José Soares Lima e Silva. Sua participação e colaboração foram cruciais para o desenvolvimento do meu trabalho. Agradeço pela disposição em compartilhar seu conhecimento, bem como por fornecer

informações valiosas que contribuíram diretamente para o sucesso da minha pesquisa.

Gostaria de estender meu agradecimento ao professor do IFPB/Campus Cajazeiras, Martiliano Soares Filho. Sua orientação, expertise e apoio foram fundamentais para o avanço do meu projeto de pesquisa. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e por dedicar seu tempo e esforço para me orientar ao longo dessa jornada acadêmica.

Agradeço ao IFPB/Campus Cajazeiras por ceder a estrutura de laboratórios necessária para a realização dos experimentos e pesquisas. Agradeço à Instituição por fornecer um ambiente propício ao aprendizado e por disponibilizar os recursos e suporte técnico necessário para o sucesso do meu trabalho.

ABREU, F. M. Estudo da Qualificação de Procedimento de Soldagem de Tubos de Aço ASTM 335 P22 Utilizados em Caldeiras Aquatubulares do Setor Sucroalcooleiro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2023.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é investigar a relação entre a variação dos parâmetros de soldagem usando os processos SMAW e GTAW, juntamente com o uso de técnicas conexas, e as propriedades das juntas soldadas de aço ARBL, com foco especial na tenacidade e dureza. O intuito é garantir maior segurança nas operações e evitar interrupções repentinas para realização de manutenção em caldeiras do setor sucroalcooleiro. Neste trabalho, utilizou-se um tubo de aço ASTM 335 P22 com diâmetro externo de 73 mm e espessura da parede de 9,53 mm. Foram fabricadas quatro juntas denominadas de junta 01, 02, 03 e 04. As juntas 01 e 02 foram soldadas usando o processo SMAW (raiz + passe quente + enchimento), enquanto que as juntas 03 e 04 foram soldadas usando o processo GTAW no passe de raiz e o processo SMAW no passe quente e no passe de enchimento. Em ambos os processos, houve variação da corrente e conseqüentemente da energia de soldagem. A análise metalográfica revelou que o metal de base das juntas soldadas apresentou uma microestrutura do tipo ferrita – perlita, característica dos aços da família 2,25Cr-1,0Mo. As zonas termicamente afetadas das juntas 01, 02 e 03 apresentaram uma microestrutura composta por ferrita e bainita revenida, enquanto que a zona termicamente afetada da junta 04 apresentou uma microestrutura constituída de ferrita, bainita revenida e regiões contendo martensita. A região do metal de solda das juntas 01, 02 e 03 é constituída de ferrita e bainita revenida, enquanto que a junta 04 apresenta regiões de martensita. Os testes de microdureza Vickers demonstraram que apenas a junta 02 apresentou uma microdureza média abaixo de 250 HV na ZTA e no MS. Os Resultados dos testes de impacto Charpy realizados a -30 °C revelaram um comportamento totalmente frágil de todas as juntas na região do metal de solda.

Palavras-chave: Aço ASTM 335 P22. Aço para caldeira. Soldagem SMAW. Soldagem GTAW. Tenacidade ao impacto.

ABREU, F. M. Study of the Qualification of Welding Procedures for ASTM 335 P22 Steel Pipes Used in Watertube Boilers in the Sugar and Alcoholic Sector. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering). Federal University of Campina Grande. Graduate Program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2023.

ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the relationship between the variation in welding parameters using the SMAW and GTAW processes, along with the use of related techniques, and the properties of welded joints in ARBL steel, with a special focus on toughness and hardness. The aim is to ensure greater safety in operations and prevent sudden interruptions for maintenance in boilers in the sugarcane and alcohol sector. In this study, an ASTM 335 P22 steel pipe with an outer diameter of 73 mm and a wall thickness of 9.53 mm was used. Four joints were fabricated, referred to as joints 01, 02, 03, and 04. Joints 01 and 02 were welded using the SMAW process (root pass + hot pass + filler pass), while joints 03 and 04 were welded using the GTAW process for the root pass and the SMAW process for the hot pass and filler pass. In both processes, there was variation in the current and consequently the Welding energy. Metallographic analysis revealed that the base metal of the welded joints had a ferrite-pearlite microstructure, characteristic of steels in the 2.25Cr-1.0Mo family. The heat-affected zones of joints 01, 02 and 03 exhibited a microstructure composed of ferrite and tempered bainite. Whereas the heat-affected zone of joints 04 showed a microstructure consisting of ferrite, tempered bainite and regions containing martensite. The weld metal region of joints 01, 02 and 03 is composed of ferrite and tempered bainite, while joint 04 exhibits regions of martensite. Vickers microhardness tests showed that only joint 02 exhibits an average microhardness below 250 HV in the HAZ and the weld metal. The results of Charpy impact tests conducted at -30°C revealed a completely brittle behavior in all joints in the weld metal region.

Keywords: ASTM 335 P22 steel. Boiler steel. SMAW welding. GTAW Welding. Impact toughness.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
2.	OBJETIVOS.....	21
2.1.	Objetivo Geral.....	21
2.2.	Objetivos Específicos.....	21
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1.	Matriz Energética Brasileira.....	22
3.2.	Caldeiras.....	23
3.3.	Aços.....	25
3.3.1.	Aço ASTM 335 P22.....	27
3.4.	Soldagem.....	33
3.4.1.	Processo de Soldagem SMAW.....	34
3.4.2.	Processo de Soldagem GTAW.....	36
3.4.3.	Soldabilidade dos Aços.....	38
3.5.	Pré-aquecimento.....	38
3.6.	Temperatura de Interpasse.....	39
3.7.	Tratamento Térmico de Pós-Soldagem.....	40
3.8.	Energia de Soldagem e a Influência dos Ciclos Térmicos.....	41
3.9.	Chanfros.....	43
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1.	Matérias.....	47
4.2.	Métodos.....	48
4.2.1.	Procedimentos de Soldagem e Técnicas Conexas.....	48
4.2.2.	Técnicas de Caracterização.....	50
4.2.2.1.	Análise Metalográfica.....	51
4.2.2.2.	Macrografia.....	51
4.2.2.3.	Ensaio de Microdureza.....	51
4.2.2.4.	Corpos de Prova Charpy.....	52
4.2.2.5.	Caracterização da Superfície de Fratura	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1.	Análise da Macro e Microestrutura.....	55
5.2.	Microdureza.....	60
5.3.	Ensaio de Impacto Charpy.....	62
5.4.	Análise da Superfície de Fratura.....	64

6. CONCLUSÃO.....	66
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química Nominal do Aço ASTM 335 P22.....	29
Tabela 2: Propriedades Mecânica do Aço ASTM 335 P22.....	29
Tabela 3: Valores Típicos para o Fator Adimensional de Rendimentos.....	43
Tabela 4: Especificação da Composição Química Nominal, em Peso do Aço ASTM 335 P22 Quando Fornecido, de Acordo com a Norma ASTM A3M – 19 e ASTM A999M – 18.....	47
Tabela 5: Composição Química Nominal, em Peso do Eletrodo E9018-B3, de Acordo com o Fabricante.....	47
Tabela 6: Composição Química Nominal, em Peso da Vareta ER90S-B3, de Acordo com o Fabricante.....	47
Tabela 7: Energia de Soldagem Bruta em J/cm Para Cada Passe Executado em Cada uma das 4 Juntas Soldadas.....	50
Tabela 8: Durezas Médias e Desvio Padrão para as Diferentes Regiões da Junta Soldada.....	60
Tabela 9: Tenacidade ao Impacto Aferida Via Ensaio Charpy.....	63
Tabela 10: Critérios de Aceitação do Teste de Charpy para Vários Tamanhos de Espécimes.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo dos Parâmetros de Soldagem Empregados.....	49
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Repartição da Oferta Interna de Energia	22
Figura 2: Caldeira Flamotubular.....	24
Figura 3: Caldeira Aquatubular.....	24
Figura 4: Comparação entre Limite de Resistência e Alongamento de Vários Aços.....	26
Figura 5: Efeito dos Teores de Cromo na Resistência à Fluência do Aço Cr - Mo.....	28
Figura 6: Diagrama de Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC) para um Aço Semelhante ao Aço ASTM 335 P22.....	28
Figura 7: Microestrutura de Diferentes Zonas do Aço 2,25Cr-1,0Mo.....	30
Figura 8: Microestrutura do Metal de Base do Aço ASTM 335 P22 em Junta Dissimilar Após TTPS.....	31
Figura 9: Microestrutura da ZTA do Aço ASTM 335 P22 em Junta Dissimilar após TTPS.....	31
Figura 10: Relação entre a Resistência a Tração e a Temperatura de um Aço Original (Virgem) e o Aço Envelhecido.....	33
Figura 11: Soldagem SMAW.....	35
Figura 12: Influência da Polaridade e do Tipo de Corrente na Soldagem SMAW.....	35
Figura 13: Soldagem GTAW.....	36
Figura 14: Efeito da Corrente e da Polaridade na Soldagem GTAW.....	37
Figura 15: Perfil de Temperatura ao Longo de uma Junta Soldada.....	42
Figura 16: Representação Esquemática da Distribuição de Temperatura Máxima na Soldagem e Diagrama de Equilíbrio de Fase Fe-C.....	42
Figura 17: Bisel para Passe de Raiz não GTAW ($3 \text{ mm} \leq e < 22 \text{ mm}$).....	44
Figura 18: Bisel para Passe de Raiz não GTAW ($e > 22 \text{ mm}$).....	45

Figura 19: Bisel para Passe de Raiz GTAW ($3 \text{ mm} \leq e < 10 \text{ mm}$).....	45
Figura 20: Bisel para Passe de Raiz GTAW ($10 \text{ mm} \leq e < 25 \text{ mm}$).....	46
Figura 21: Bisel para Passe de Raiz GTAW ($e \geq 25 \text{ mm}$).....	46
Figura 22: Desenho Detalhando o Chanfro das Juntas de Topo Confeccionadas.....	48
Figura 23: Linhas Horizontais onde Foram Realizadas as Endentações na Seção Transversal do Corpo de Prova Soldado.....	52
Figura 24: Dimensões das Sub-Especimes Charpy.....	53
Figura 25: Dimensões do Corpo de Prova para Ensaio de Tenacidade ao Impacto Charpy.....	54
Figura 26: Macrografia das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04.....	55
Figura 27: Microestrutura do Metal de Base como Recebido.....	56
Figura 28: Microestrutura do Metal de Base das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 após TTPS.....	57
Figura 29: Microestrutura da ZTA das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 após TTPS.....	58
Figura 30: Microestrutura do Metal de Solda das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 Após TTPS.....	59
Figura 31: Perfil de Microdureza da Junta Soldada 01.....	61
Figura 32: Perfil de Microdureza da Junta Soldada 02.....	61
Figura 33: Perfil de Microdureza da Junta Soldada 03.....	62
Figura 34: Perfil de Microdureza da Junta Soldada 04.....	62
Figura 35: Superfície de Fratura das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04.....	65

Lista de Siglas e abreviações

ARBL = Aço de Alta Resistência e Baixa Liga

ASME = American Society of Mechanical Engineers

ASTM = American Society for Testing Materials

API = American Petroleum Institute

CA = Corrente Alternada

CC- = Polaridade Direta

CC+ = Polaridade Inversa

CE = Carbono Equivalente

CGHAZ = Coarse Grain Heat Affected Zone

GMAW = Gas Metal Arc Welding

GTAW = Gas Tungsten Arc Welding

IIW = International Institute of Welding

MB = Metal de Base

MTP = Ministério do Trabalho e Previdência

NPS = Nominal Pipe Size

NR = Norma regulamentadora

PAGB_(S) = Preaustenite Grain Boundaries

SAW = Submerged Arc Welding

SMAW = Shielded Metal Arc Welding

TRC = Transformação em Resfriamento Contínuo

TTPS = Tratamento Térmico de Pós Soldagem

ZF = Zona de Fusão

ZTA = Zona Termicamente Afetada

ZTA – GF = Zona Termicamente Afetada de Grão Fino

ZTA – GG = Zona Termicamente Afetada de Grão Grosso

ZTA – IC = Zona Termicamente Afetada Intercrítica

ZTA – SC = Zona Termicamente Afetada Subcrítica

1.INTRODUÇÃO

Os setores de geração de energia estão em constante busca por alternativas para mitigar os impactos ambientais gerados por suas cadeias produtivas. Nesse contexto, a adoção de processos de geração de energia limpa, como a cogeração a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar em usinas do setor sucroalcooleiro, emerge como uma solução viável para redução desses impactos.

No ano de 2020, entre os meses de janeiro e agosto, o sistema Interligado Nacional recebeu um total de 17.443 GWh de energia proveniente da bioeletricidade, um aumento de 4% em relação ao mesmo período de 2019 e esta produção é equivalente ao consumo de 10,4% da energia elétrica das indústrias brasileira (UNICA, 2020).

O bagaço da cana-de-açúcar vem se tornando uma fonte de matéria-prima para a geração de energia elétrica através da queima em caldeiras. Um dos grandes inconvenientes no uso desse tipo de matéria-prima é a geração de cinzas que causam desgastes dos componentes e acarreta em elevação nos custos de manutenção (CARVALHO et al., 2021). Portanto, quanto menor o número de paradas para manutenção das caldeiras aquatubulares, maior será a sua disponibilidade e conseqüentemente maior geração de energia elétrica.

Uma estratégia eficaz para minimizar as interrupções nas operações das caldeiras envolve o emprego de materiais que ofereçam uma maior resistência ao desgaste e à corrosão nas tubulações de água e pré-ar. Nesse sentido, os aços da família 2,25Cr – 1,0Mo despontam como uma escolha notável. O cromo presente nesses aços melhora consideravelmente a capacidade de resistir à oxidação e à corrosão, ao passo que o molibdênio reforça sua resistência às elevadas temperaturas, conforme destacado por Kumar et al., (2021).

Componentes que operam em temperaturas entre 550 – 620 °C como por exemplo, turbinas, caldeiras e tubulações de vapor, são fabricados principalmente por aço ASTM 335 P91 ou P92. Enquanto que os componentes que operam em temperaturas mais baixas são fabricados com aço ASTM 335 P22. O custo é um dos principais diferenciais na utilização desses materiais, onde o custo de fabricação do ASTM 335 P91 ou P92 é maior que o do ASTM 335

P22 (SIROHI et al., 2022). Aços de baixa liga como o ASTM 335 P22 são largamente utilizados na fabricação de tubos e coletores de usinas termelétricas, onde a temperatura do vapor chega a 540° durante a operação (EREN et al., 2010).

A soldagem do aço ASTM 335 P22 necessita de alguns cuidados como pré-aquecimento, pós-aquecimento e alívio de tensões para garantir que as propriedades mecânicas sejam compatíveis com as especificações do metal de base. Os mais variados processos de soldagens (SMAW, GTAW, GMAW, SAW) são utilizados na união de tubos em caldeiras, em indústrias petroquímicas, indústrias de cimento e mineração visando obter maior produtividade e qualidade das juntas soldadas.

Durante o processo de soldagem por fusão do aço ASTM 335 P22, o calor é aplicado à peça de trabalho por meio do arco elétrico. Isso cria uma região do material sujeita a temperaturas elevadas próxima à zona de fusão. O material nessa região será aquecido até atingir uma temperatura máxima, que depende da sua distância em relação à zona de fusão. Essa temperatura máxima, juntamente com a taxa de resfriamento determina a microestrutura e as propriedades mecânica da junta soldada (KIM, 2005).

2.OBJETIVOS

2.1.Objetivo Geral

Investigar a relação entre a variação dos parâmetros de soldagem usando os processos SMAW e GTAW, juntamente com o uso de técnicas conexas nas propriedades e na microestrutura das juntas soldadas do aço ASTM 335 P22 empregado em caldeiras aquatubulares das indústrias sucroalcooleiras da região Nordeste do Brasil.

2.2.Objetivos Específicos

Realizar uma revisão bibliográfica ampla sobre as propriedades mecânicas e as técnicas de soldagem empregadas em aços ASTM 335 P22, com o objetivo de identificar os principais desafios e oportunidades para a técnica de união de juntas soldadas.

Selecionar parâmetros de soldagem que possibilitem a confecção de juntas soldadas de tubos do aço ASTM 335 P22 empregando os processos GTAW, especificamente no passe de raiz, e SMAW nos passes de enchimento e acabamento, bem como no passe de raiz.

Investigar as propriedades mecânicas de juntas soldadas de tubos do aço ASTM 335 P22 por meio dos ensaios de dureza Vickers e tenacidade ao impacto Charpy e compará-las a valores de referência estabelecidos nas normas Petrobras N-133 e a norma ASME B31.3 - 2016.

Correlacionar a dureza Vickers e tenacidade ao impacto Charpy com a microestrutura das juntas soldadas a fim de verificar a influência desta no comportamento macromecânico das juntas soldadas.

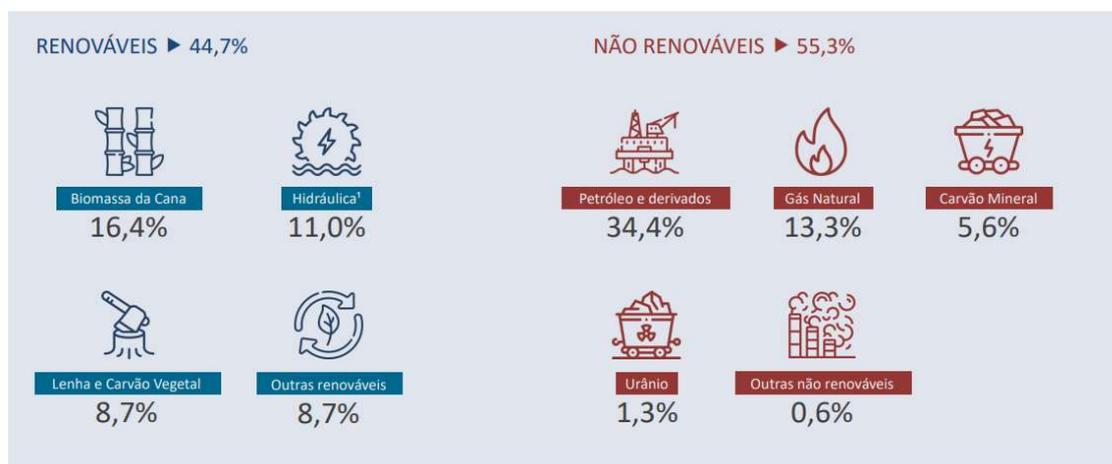
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1.Matriz Energética Brasileira

A produção de energia limpa pelo setor sucroenergético brasileiro é referência no mundo, principalmente com a produção de etanol e bioeletricidade. O setor sucroenergético tem contribuído bastante com o desenvolvimento do país ao longo dos anos, fomentando o desenvolvimento econômico e sustentável. O Brasil responde por 39% da produção mundial de cana-de-açúcar, na produção de açúcar é o maior produtor mundial produzindo cerca de 21% de todo açúcar produzido no mundo. O Brasil também é o segundo maior produtor de etanol, respondendo por 27% da produção global (NEVES; KALAKI, 2020).

A oferta de energia elétrica no Brasil é constituída por 44,7% de energia renovável e 55,3% de energia não renovável. A Figura 1 mostra a distribuição dessas fontes de energia (BEN, 2021).

Figura 1 - Repartição da Oferta Interna de Energia.



Fonte: BEN, 2021.

É possível observar na Figura 1 que a Biomassa da cana-de-açúcar responde por uma quantidade considerável da geração de energia no mercado brasileiro. Em função da grande quantidade produzida e de suas características, o bagaço encontra um enorme campo de aplicação, dentre eles, ração animal, etanol de segunda geração, produção de energia térmica e elétrica.

Para gerar energia elétrica, o bagaço da cana-de-açúcar deve seguir algumas etapas que compreendem desde a produção do bagaço após a extração da calda da cana-de-açúcar, a queima do bagaço nas caldeiras para produzir vapor

numa temperatura entre 723 K e 803 K até a expansão do vapor em turbinas que geram trabalho mecânico para acionar o gerador (PEREIRA et al., 2020).

3.2. Caldeiras

A cogeração que representa a geração de vapor e energia ao mesmo tempo em caldeiras, inicialmente foi utilizado para suprir a demanda interna da usina (VENKATESH; ROY, 2010).

Segundo a Norma regulamentadora nº13 (NR-13) do Ministério do Trabalho e Previdência (MTP), define as caldeiras a vapor como sendo equipamentos com a finalidade de produzir e acumular vapor a uma pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes (MTP, 2022) .

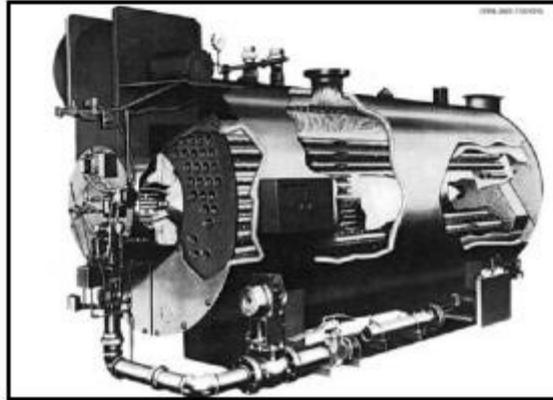
De acordo com a NR-13, as caldeiras são classificadas em:

Caldeiras da categoria A: São caldeiras onde a pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²);

Caldeiras da categoria B: São as caldeiras onde a pressão de operação é maior que 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²).

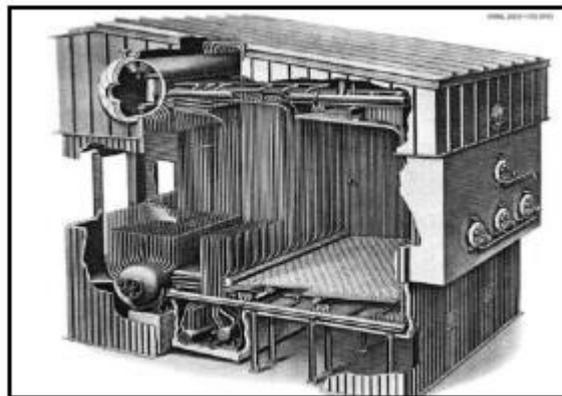
As caldeiras também são classificadas como Aquatubular e Flamotubular. As caldeiras flamotubulares, mostrada na Figura 2, são consideradas de baixa pressão (até 10 kgf/cm²), onde os gases provenientes da combustão circulam no interior da tubulação e a água circula na parte externa dos tubos. As caldeiras aquatubulares, conforme Figura 3, operam em baixa (de 7 a 28 kgf/cm²), média (de 28 a 56 kgf/cm²) e alta pressão (acima de 56 kgf/cm²). Neste tipo de caldeira, os gases resultante da queima de combustíveis circulam na parte externa da tubulação, enquanto a água circula internamente aos tubos (LISAUSKAS, 2017).

Figura 2 – Caldeira Flamotubular.



Fonte: ROCCO, 2011.

Figura 3 – Caldeira Aquatubular.



Fonte: ROCCO, 2011.

Durante a operação de longo prazo do equipamento da caldeira, as empresas devem inspecionar regularmente o vaso de pressão da caldeira para evitar possíveis riscos à segurança.

O problema mais comum da tubulação de pressão da caldeira é a qualidade da solda. Como a caldeira trabalha em um ambiente de alta temperatura por muito tempo, ela possui requisitos de segurança muito altos. Portanto, é necessário garantir que a tubulação de pressão da caldeira seja inspecionada sem destruir a caldeira (QIU; ZHANG, 2021).

Em ambientes de caldeiras, a tensão de ruptura e a temperatura influenciam na vida útil dos tubos de aço. A resistência da tubulação da caldeira dentro da faixa de fluência diminui rapidamente quando a temperatura aumenta. A fluência

envolve uma deformação dependente do tempo, envolvendo deslizamento de grãos e movimento de átomos. Quando uma tensão suficiente se desenvolve nos contornos de grão, surge vazios e microtrincas. Como as caldeiras são submetidas a operações contínuas em altas temperaturas, esses vazios e microtrincas crescem e coalescem para formar trincas cada vez maiores, até que ocorra a falha (ASM, 2002).

A espessura da camada interna de óxido em tubos de superaquecedores e reaquecedores de caldeiras, pode influenciar na vida remanescente do material. Em tubos de aço ASTM 387 Grau 22, uma camada de óxido entre 1300 e 1500 µm pode extinguir a vida dos tubos sob o regime de fluência (CARDOSO et al., 2011).

Através dos tubos dos superaquecedores passa o vapor gerado pelas caldeiras para produzir vapor superaquecido. Esses tubos estão sujeitos a falhas relacionadas à corrosão, logo são fabricados com materiais que prologam a vida útil em temperaturas, pressões e ambientes corrosivos (JAFARIKHORAMI, 2021).

3.3.Aços

Segundo Chiaverini (2005) “Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”.

Quando a liga é constituída basicamente por ferro e carbono, têm-se os aços ao carbono e quando outros elementos de liga participam da composição, têm-se os aços ligados que são subdivididos em aços de baixa, média e alta liga (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

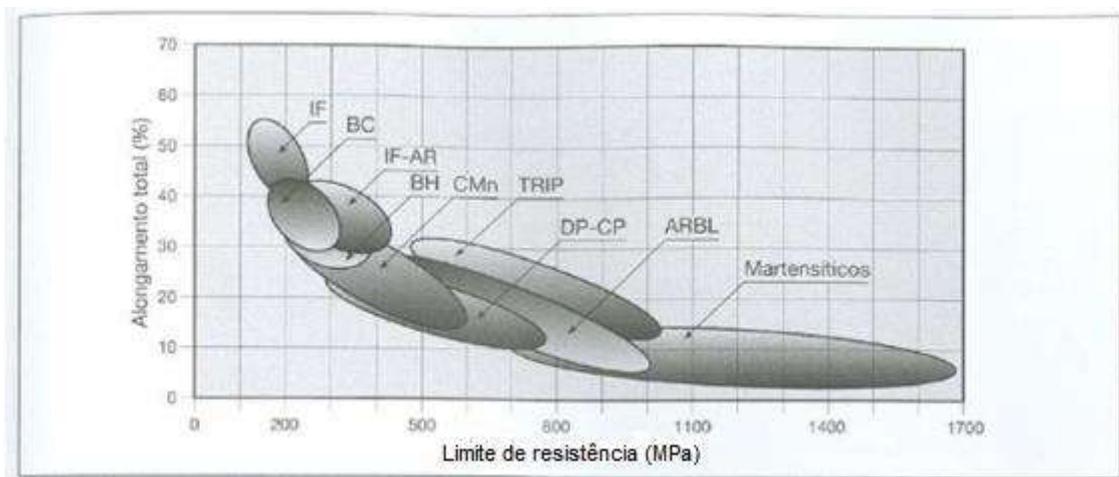
Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou simplesmente aços microligados, proporcionam melhores propriedades mecânicas e/ou maior resistência a corrosão atmosférica do que os aços carbonos convencionais (SKOBIR, 2011).

Os aços podem ser classificados em função de vários critérios, entretanto, essas classificações não são excludentes (SILVA; MEI, 2010).

- ✓ De acordo com suas características: Propriedades mecânicas, composição química, etc.
- ✓ Baseada no seu emprego: Aços para ferramentas, para construção mecânica, etc.

A Figura 4 apresenta uma visão geral dos aços para conformação mecânica aplicados na indústria automobilística, classificados pela resistência mecânica e pelo alongamento no ensaio de tração (COLPAERT, 2008).

Figura 4 – Comparação entre Limite de Resistência e Alongamento de Vários aços.



Fonte: Adaptado de COLPAERT, 2008.

Materiais metálicos como aços carbono e de baixa liga são utilizados na fabricação de componentes de caldeiras através dos processos de soldagem. Os componentes de uma caldeira estão sujeitos a temperaturas elevadas, pressões de vapor e reações químicas que ocorrem internamente ou na parte externa, sendo necessário a utilização de materiais e processos de fabricação que garantam a segurança dos equipamentos.

Quando os aços microligados são soldados por fusão, também é bastante interessante e significativo estudar o crescimento de grãos de austenita e a transformação de fase adicional na ZTA. Partículas grossas de TiN tem efeito negativo na tenacidade à fratura de juntas soldadas, sendo que a presença de ferrita acicular intertravada de grão fino compensa esse efeito negativo. Em casos onde o tamanho do TiN excede certo ponto, o TiN pode levar a uma menor tenacidade, atuando como iniciador de clivagem e desenvolvendo fratura frágil,

especialmente de grandes grãos de ferrita ou pacotes cristalográficos de bainita (ZHANG; KANNENGIESSER, 2014).

A adição de Ni aos depósitos de C-Mn de aços de baixa liga e alta resistência reduz o teor de mangânes mantendo uma boa relação entre as propriedades mecânicas e a tenacidade ao impacto (JORGE et al., 2019).

3.3.1. Aço ASTM 335 P22

Várias combinações de Cromo e Molibdênio são usadas como elementos de ligas para obtenção de uma variedade de aços. Entre essas combinações, destaca-se o aço da família 2,25Cr-1,0Mo usado em caldeiras.

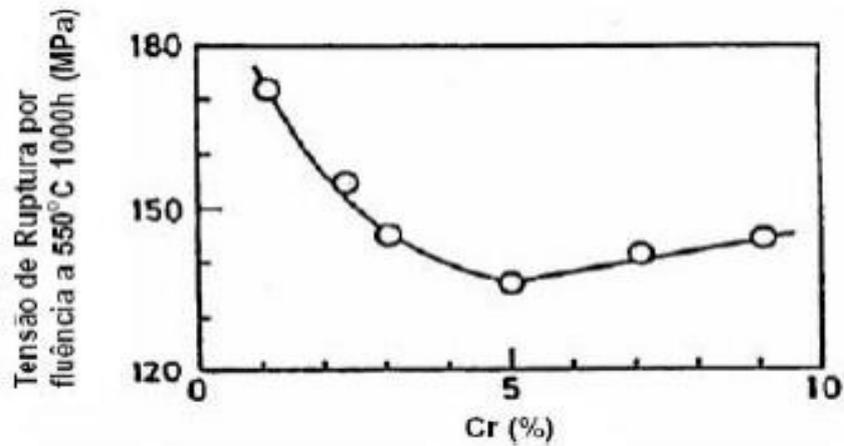
O aço ASTM 335 P22 também conhecido como aço 2,25Cr-1,0Mo, pertence à classe dos aços de baixa liga e alta resistência e são usados em plantas de geração de energia na faixa de temperatura de 350 a 600 °C (ARIVAZHAGAN; VASUDEVAN, 2015). Ainda segundo o autor, esses aços em temperaturas e pressões extremamente elevadas sofrem deterioração microestrutural provocada por precipitação e endurecimento de carbonetos.

A precipitação do carboneto é decorrente de uma sequência múltipla com composição elementar variável que depende da temperatura, onde o controle dos precipitados de carbonetos e as fases microestruturais influenciam o comportamento de fluência desses aços (KRISHINA et al., 2018). Ainda segundo Krishina et al., (2018) em seu trabalho, são relatados seis tipos diferentes de carbonetos (M_3C , $M_{23}C_6$, M_2C , M_7C_3 , MC e M_6C) em aços Cr-Mo de baixa liga.

Abaixo são descritos os papéis do cromo e molibdênio adicionados a liga:

CROMO: O cromo presente na liga é responsável por melhorar a resistência à corrosão e a estabilidade microestrutural formando carbonetos dentro dos grãos, contribuindo para aumentar a temperabilidade da liga. A Figura 5 mostra o efeito do Cromo em função da resistência dos aços da família Cr-Mo, que apresenta um decréscimo até um percentual de 5%Cr (NETO, 2019).

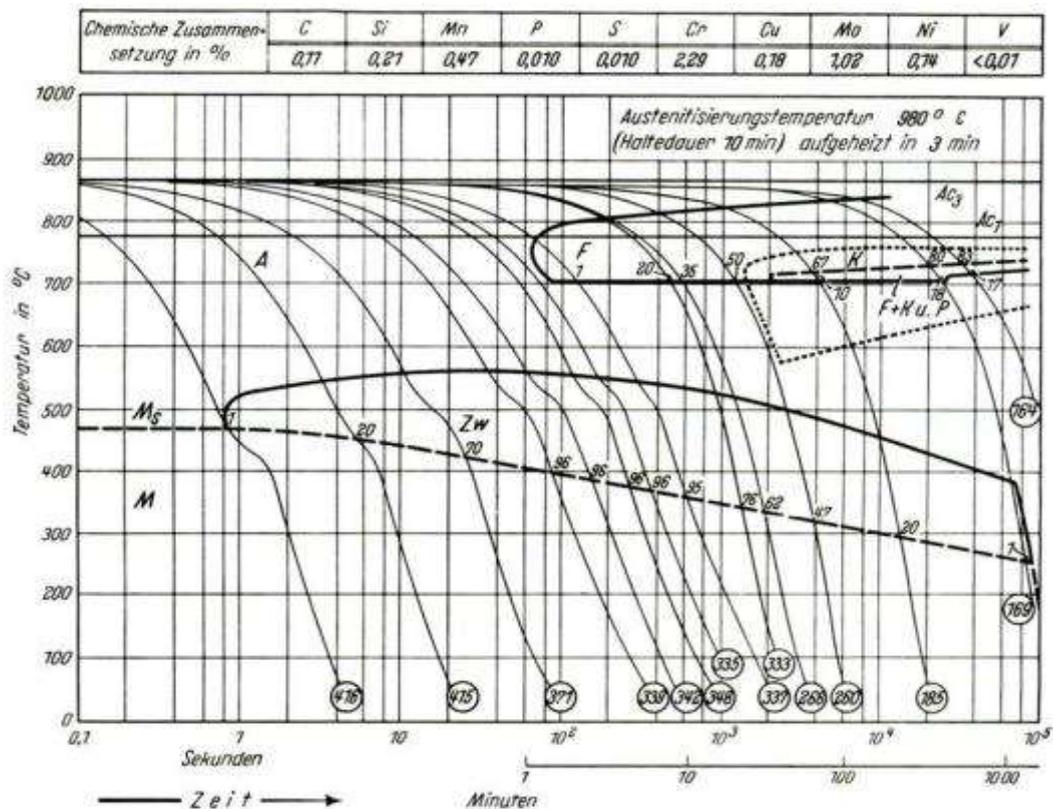
Figura 5 - Efeito dos Teores de Cromo na Resistência à Fluência do Aço Cr-Mo.



Fonte: NETO, 2005.

A Figura 6 mostra o diagrama de Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC) para um aço com composição química semelhante ao aço ASTM 335 P22.

Figura 6 – Diagrama de Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC) para um Aço Semelhante ao Aço ASTM 335 P22.



Fonte: JÚNIOR, 2014.

MOLIBDÊNIO: O molibdênio presente na liga aumenta a resistência à fluência através da formação de Mo_2C , onde os átomos substitucionais de Mo aumentam a força intrínseca da matriz pelo fortalecimento da solução sólida (KING, 2005).

Quando o aço 2,25Cr-1,0Mo passa por um tratamento térmico de normalização e revenimento, o mesmo apresenta uma microestrutura do tipo ferrítico-bainita e a realização do tratamento de recozimento após a normalização e revenimento resulta em uma microestrutura do tipo ferrítico-perlítica (RIGUEIRA et al., 2011).

A tabela 1 mostra a composição química nominal do aço ASTM 335 P22 e a tabela 2, lista as propriedades mecânicas.

Tabela 1 - Composição Química Nominal do Aço ASTM 335 P22.

ASTM	COMPOSIÇÃO (%)						
	C	Mn	S _{máx}	P _{máx}	Si _{máx}	Cr	Mo
335 P22	0,05 -	0,30 -	0,025	0,025	0,50	1,90 -	0,87 -
	0,15	0,60				2,60	1,13

Fonte: ASM, 2005.

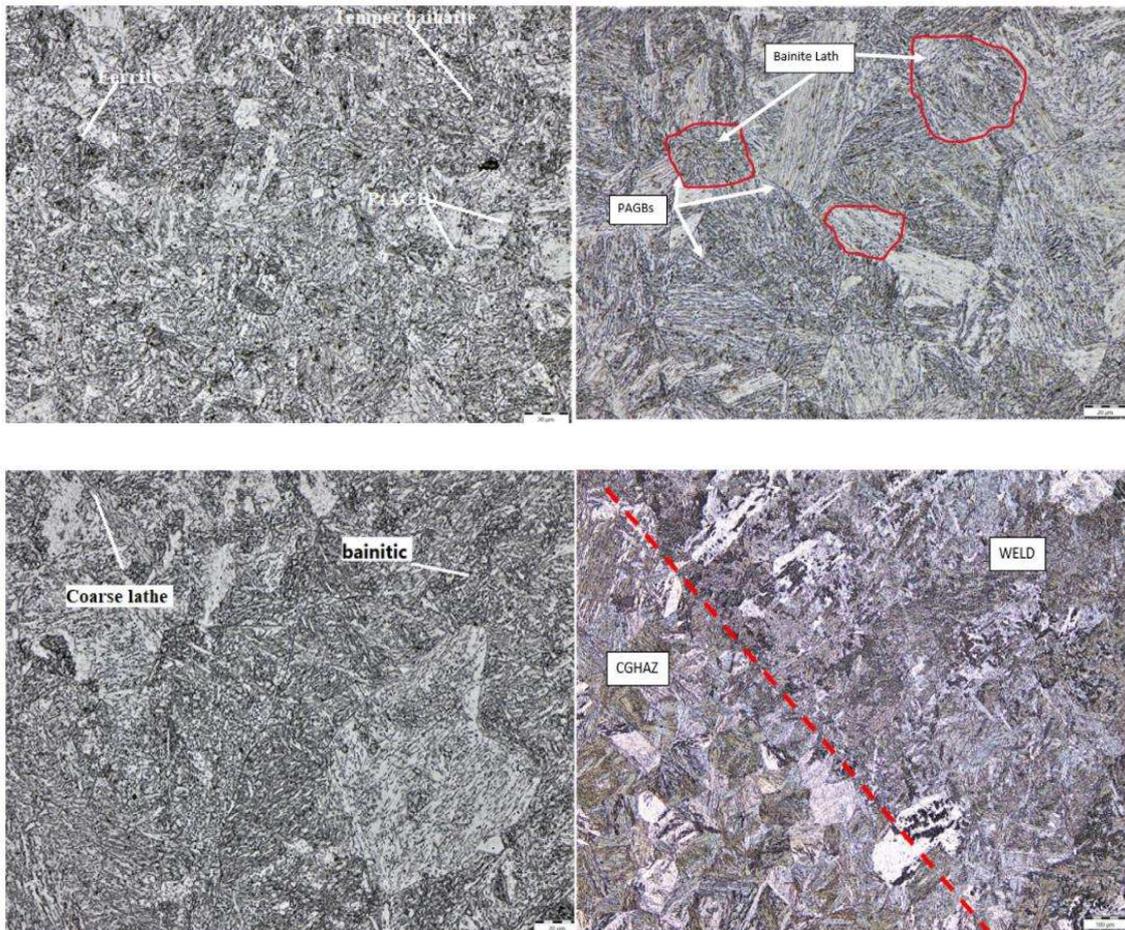
Tabela 2 - Propriedades Mecânica do Aço ASTM 335 P22.

ASTM	335 P22	Limite de Escoamento (min)		Resistência à Tração (min)	
		MPa	ksi	MPa	ksi
		205	30	415	60

Fonte: ASM, 2005.

Na soldagem de tubo de aço 2,25Cr – 1Mo através do processo GTAW usando corrente pulsada a microestrutura do metal de base é constituída por bainita e ferrita com pequenas ilhas de perlita, enquanto na ZTA de grão fino (CGHAZ) foi observado um produto de transição de austenita cercada por bainita revenida (Temper Bainite) e na ZTA de grão grosseiro uma estrutura de bainita normal, conforme mostrado na Figura 7 (PRAKASHAM et al.,2022).

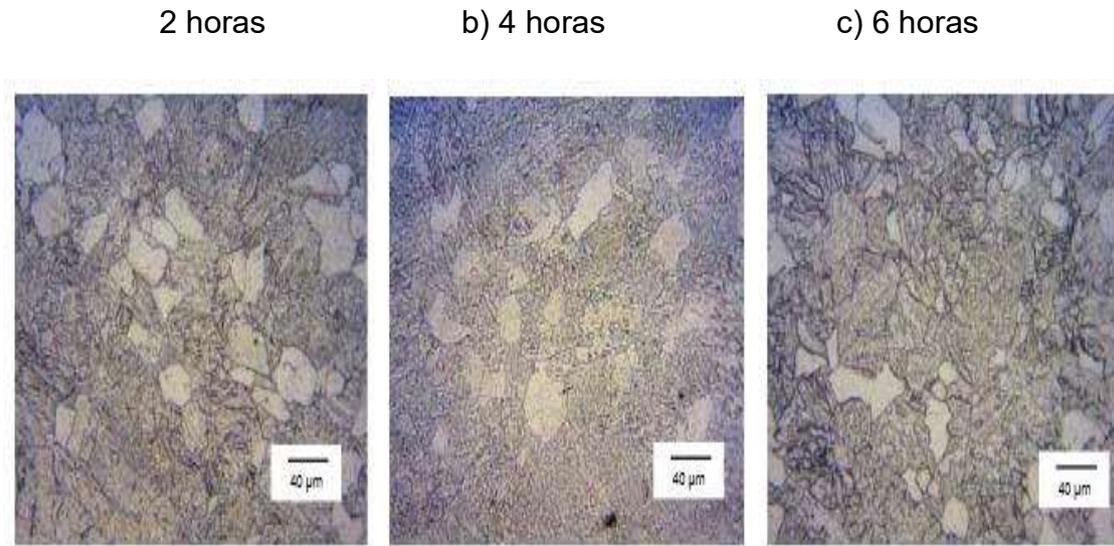
Figura 7 - Microestrutura de Diferentes Zonas do Aço 2,25Cr – 1,0Mo.



Fonte: PRAKASHAM et al., 2022.

Ao realizar a soldagem de uma junta dissimilar entre o aço P22 e o P91 usando o processo GTAW e posteriormente executando um tratamento térmico de pós-soldagem na temperatura de 750°C durante 2, 4 e 6 horas, demonstrou que a microestrutura do metal de base do aço P22 é formada por ferrita e perlita transformada, sendo que nenhum efeito significativo dos diferentes tempos de tratamentos térmicos pós-soldagem foi encontrado, conforme Figura 8 (a) – (c) (TAMMASOPHON; HOMHRAJAI; LOTHONGKUM, 2011).

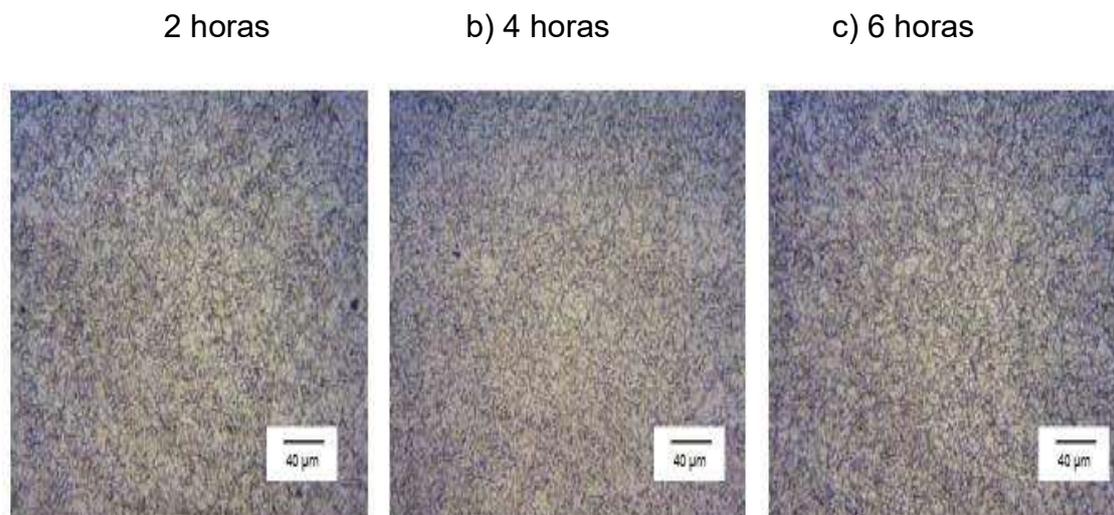
Figura 8 – Microestrutura do Metal de Base do Aço ASTM 335 P22 em Junta Dissimilar Após TTPS.



Fonte: TAMMASOPHON; HOMHRAJAI; LOTHONGKUM, 2011.

Com relação a microestrutura da ZTA do aço P22, Tammason; Homhrajai; Lothongkum (2011), observaram após o TTPS na temperatura de 750 °C por 2, 4 e 6 horas que é muito mais fina do que aquela do MB tratado termicamente após a soldagem, onde foi encontrado grão de ferrita e carbonetos precipitados ao longo dos contornos de grãos, conforme Figura 9.

Figura 9 – Microestrutura da ZTA do Aço ASTM 335 P22 em Junta Dissimilar após TTPS.



Fonte: TAMMASOPHON; HOMHRAJAI; LOTHONGKUM, 2011.

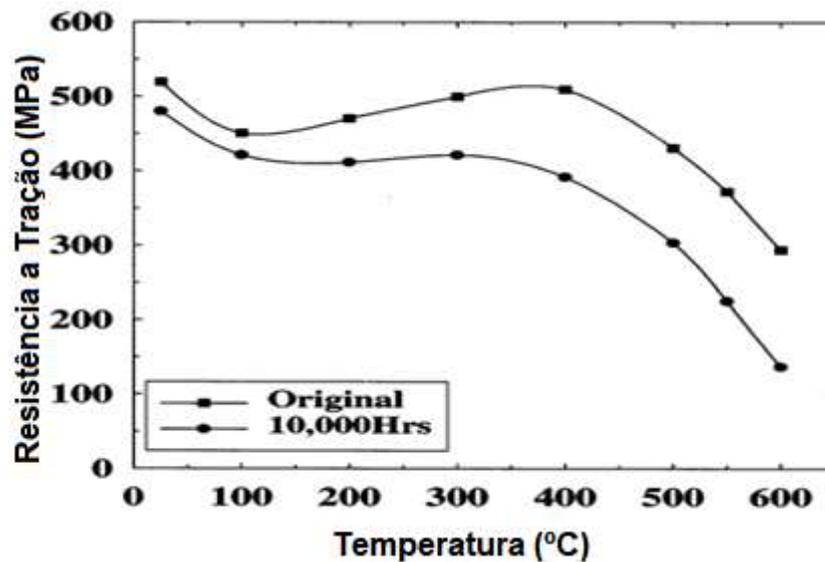
O aço 2,25Cr – 1,0Mo envelhecido, contém fase ferrita e perlita, onde a perlita aumenta de acordo com o aumento do tempo de envelhecimento do aço que possui grãos alongados cristalinos ao longo da direção longitudinal do material e que esses grãos em altas temperaturas e longos períodos de utilização tornam-se esféricos e os carbonetos crescem nos contornos de grãos tornando-se sensíveis à iniciação de trincas, contribuindo para fragilização do material (YANG; KIM, 2001).

Eren et al (2010) demonstrou o efeito da exposição ao serviço (envelhecimento) nas propriedades de resistência à tração e à fratura de uma junta soldada de aço ASTM 335 P22 através da comparação das propriedades do material virgem (205 MPa para a tensão de escoamento e 415 MPa para a resistência a tração). Os testes demonstraram que após 100.000 horas de serviço, a resistência à tração final do material exposto em serviço foi de 266 MPa, bem abaixo de 415 MPa.

Izaki e al., (2009) usando o teste de fluência por punção, avaliou a vida de fluência em tubos de aço 2,25Cr – 1,0 Mo para caldeiras em serviço, confirmando a diminuição da resistência à fluência.

Yang; Kim (2001) investigando a fragilização térmica e as propriedades mecânicas do aço 2,25Cr – 1,0Mo após diferentes condições de envelhecimento, concluiu que a diferença entre a resistência à tração do aço original e o aço envelhecido é maior na temperatura de 530 °C, sendo superior a diferença na temperatura ambiente, correspondendo a um valor de 150 MPa, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Relação entre a Resistência a Tração e a Temperatura de um Aço Original (Virgem) e o Aço Envelhecido.



Fonte: Adaptado de YANG; KIM, 2001.

3.4.Soldagem

A união de metais é conhecida a bastante tempo, porém, até o século XIX predominava a união realizada pela forja dos ferreiros. Com o surgimento da eletricidade, pode-se gerar corrente elétrica suficiente para desenvolver os processos de soldagem por resistência e soldagem a arco (WEMAN, 2003).

O desenvolvimento de novos materiais soldáveis leva a necessidade de aprimoramento dos processos de soldagem a arco, embora as técnicas de modificações tenham sido introduzidas no final do século XIX (KAH; SUORANTA; MARTIKAINEN, 2013).

Soldagem é definida como o processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A manutenção de caldeiras é um processo complicado que envolve custos elevados, contribuindo para que diversos trabalhos enfatizem o efeito da microestrutura da solda na vida útil da tubulação da caldeira, principalmente o efeito da corrosão que tem grande influencia na degradação dos componentes.

O uso de inibidores, controle do tempo de exposição e temperatura, projeto de tratamento térmico e reparo em juntas soldadas, são técnicas para melhoria da vida útil da caldeira. Existem três zonas da solda, a zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) e o metal base (MB), que possuem microestruturas diferentes levando a diferentes comportamentos de corrosão (THONG-ON; BOONRUANG, 2016).

Nos processos de soldagem com eletrodos consumíveis, na zona fundida que é constituída por metal de adição e metal de base, o metal fundido reage com os gases e escórias presentes nessa região, promovendo a absorção de gases, redução de óxidos, transferência para a escória de impurezas ou vice-versa e a evaporação de elementos como o Zn, Cd, Cr e Al (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Ao remover as amostras dos tubos de caldeiras para análise, o efeito do método de remoção deve ser levado em consideração. Esta remoção pode ocorrer de forma mecânica (cortador de tubos, serrar, perfurar) ou através do corte por chamas. O corte mecânico reduz a possibilidade de alteração da microestrutura do material ou as características referentes a incrustação, depósitos ou produtos de corrosão. Porém, este método de remoção é lento e às vezes não pode ser usado por conta do acesso das ferramentas às amostras, restando apenas o corte por chamas. Para reduzir o efeito da chama, as amostras são retiradas com medidas maiores e os cortes devem ser feitos mais distantes do local de interesse (ASM, 2002).

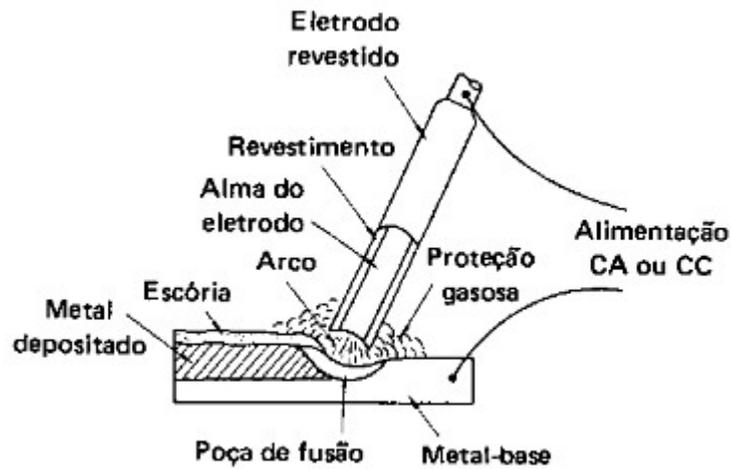
3.4.1. Processo de Soldagem SMAW

O processo SMAW “SHIELDED METAL ARC WELDING” é caracterizado por sua versatilidade, podendo ser usado em todas as posições de soldagem, em locais remotos sem a necessidade de equipamentos sofisticados e em processos produtivos e de manutenção (JÚNIOR, 2019).

A soldagem a arco com eletrodo revestido consiste na união de materiais metálicos utilizando um eletrodo revestido que é fundido através do arco elétrico gerado entre a ponta do eletrodo e o metal a ser fundido, conforme mostrado na Figura 11 (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982). O revestimento do eletrodo pode

fornecer elementos para a poça de fusão, melhorando ou acrescentando alguma propriedade a junta soldada (MARQUES et al., 2016).

Figura 11 – Soldagem SMAW.

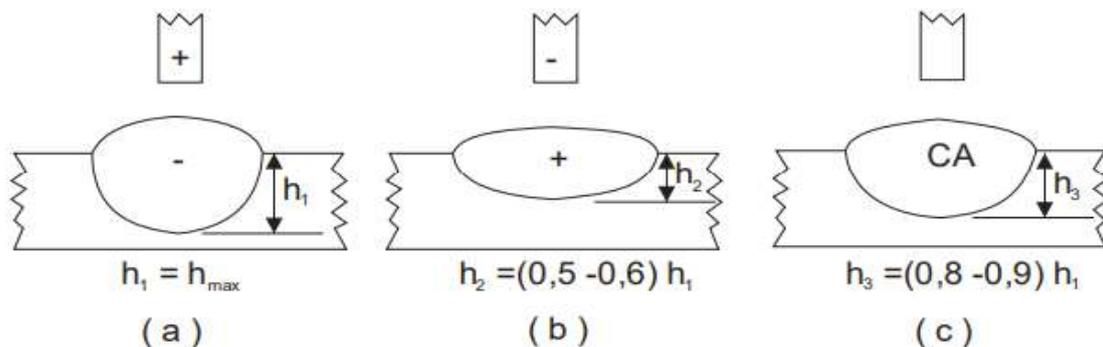


Fonte: OKUMURA; TANIGUCHI, 1982.

Através da fonte de soldagem é possível selecionar o tipo de polaridade que será usada no processo SMAW, portanto, se o eletrodo estiver conectado ao lado positivo da máquina de solda e a peça no negativo, terá uma polaridade inversa, com o eletrodo no polo negativo e a peça no positivo, terá polaridade direta, influenciando diretamente a penetração (GUEDES, 2009).

Segundo Uribe et al., (2017) para obter uma maior penetração na junta soldada e uma menor taxa de fusão usa-se a configuração (CC+), conforme Figura 12.

Figura 12 - Influencia da Polaridade e o Tipo de Corrente na Soldagem SMAW. a) Polaridade inversa (CC+), b) Polaridade direta (CC -), c) Corrente alternada (CA).



Fonte: GUEDES, 2009.

A decomposição do revestimento do eletrodo produz gases que desempenham um papel crucial na proteção das gotas de metal fundido durante a transferência para a poça de fusão, ocorrendo através do arco elétrico. Além disso, durante a solidificação da poça de fusão, a escória atua como uma camada protetora, impedindo a exposição da mesma à atmosfera (JÚNIOR, 2013).

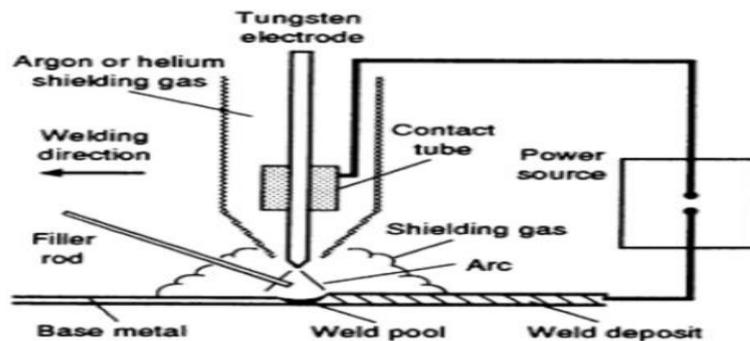
Segundo Marques; Modenesi; Bracarense (2011) existem diversos fabricantes de eletrodos que são produzidos com composição para atender as mais variadas especificações, podendo ser agrupados em 8 classes de revestimentos:

- ✓ Eletrodo celulósico;
- ✓ Eletrodo rutilico;
- ✓ Eletrodo básico;
- ✓ Eletrodo ácido, com pó de ferro;
- ✓ Eletrodo ácido, com alto conteúdo de óxido de ferro;
- ✓ Eletrodo tipo ilmenítico;
- ✓ Eletrodo tipo cal-titânio;

3.4.2. Processo de Soldagem GTAW

O processo de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) foi desenvolvido no final da década de 1930 com a necessidade de soldar magnésio. A soldagem é realizada pela manutenção do arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho, um gás inerte (argônio, dióxido de carbono, hélio ou uma mistura desses gases) sustenta o arco e protege o metal fundido da contaminação atmosférica, conforme representação esquemática na Figura 13 (THAKUR; CHAPGAON, 2016).

Figura 13 – Soldagem GTAW.

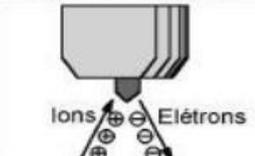
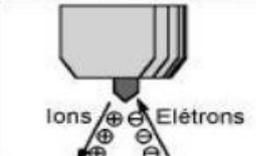


Fonte: THAKUR; CHAPGAON, 2016.

O processo GTAW pode ser realizado com ou sem metal de adição. O metal de adição quando usado é aplicado através de uma vareta que é mergulhada na poça de fusão. Caso não seja usado o metal de adição, a união das partes ocorre pela fusão das bordas que se unem a medida que o metal fundido solidifica (KUTELU et al., 2018). Segundo Jeyaprakash; Haile, Arunprasath (2015) o processo GTAW pode ser usado na soldagem de praticamente todos os materiais ferrosos e não ferrosos, junta similares e dissimilares.

A Figura 14 aborda de forma resumida o efeito da corrente e da polaridade na soldagem GTAW.

Figura 14 - Efeito da Corrente e da Polaridade na Soldagem GTAW.

Tipo de Corrente:	CC-	CC+	CA
Polaridade do eletrodo	Negativa ou direta	Positiva ou inversa	Alternada
Fluxo de elétrons e íons:			
Perfil do cordão:			
Limpeza de óxido:	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
Balanco de calor (aproximado):	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo
Penetração	Estreita e profunda	Rasa e superficial	Intermediária
Aplicações	Aço, Cu, Ag, Aços Inoxidáveis e ligas resistentes ao calor	Al, Mg (somente para baixas correntes e espessuras)	Al, Mg e suas ligas com maiores correntes e espessuras

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

Observando a Figura 14 é possível observar os efeitos da polaridade em função da penetração do cordão de solda. Para a corrente contínua e polaridade direta (eletrodo negativo, CC-) os elétrons se deslocam do eletrodo para a peça. Esse movimento provoca maior aquecimento na peça, formando uma poça de fusão profunda e estreita, enquanto os íons positivos fazem o percurso inverso. Na corrente contínua e polaridade inversa (eletrodo positivo CC+) os elétrons saem da peça em direção ao eletrodo sofrendo um aquecimento maior que a peça, ocasionando uma poça de fusão rasa e larga. Já os íons positivos se deslocam do eletrodo para a peça contribuindo para uma limpeza catódica devido o choque desses íons com a camada de óxido. A utilização da corrente alternada proporciona uma penetração intermediária devido à combinação das correntes CC- e CC+.

O arco elétrico do processo GTAW é estável, produzindo soldas de boa qualidade, apresentando pouca ou nenhuma escória após a operação, credenciando o processo para a realização de passe de raiz em tubos de aço ASTM 335 P22 por conta do acabamento da raiz da solda, embora seja um processo com um custo elevado, lento e com uma taxa de deposição de metal de solda baixo (JÚNIOR, 2014).

3.4.3. Soldabilidade dos Aços

Para um aço ser considerado de boa soldabilidade é necessário que o mesmo tenha um baixo teor de carbono e um carbono equivalente baixo (RIBEIRO, 2016). A baixa soldabilidade dos aços de alto teor de carbono ocorre devido a sensibilidade da microestrutura (formação de martensita após resfriamento da soldagem) à fissura a frio (ODEBIYI et al., 2019). A equação 1 é usada para determinação do carbono equivalente (CE) (BAKER, 2016):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad \text{Equação 1}$$

A equação 1 é conhecida como fórmula para determinação do carbono equivalente do IIW “International Institute of Welding” que considera um aço com boa soldabilidade quando os valores do $CE < 0,45\%$ e acima desse percentual, indica a necessidade de alguns cuidados na soldagem (JÚNIOR; ROCHA; BRANDI, 2013).

Dutra (2017) descreve em seu trabalho uma outra fórmula para determinação do carbono equivalente, chamada de parâmetro de Ito e Bessyo, equação 2, indicada para aços com teor menor que 0,12%C. Geralmente essa equação é usada para aços da norma API, dando maior importância ao boro, enquanto a equação da IIW (Equação 1) é adequada para aços com teor maior que 0,12%C.

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Equação 2}$$

3.5. Pré-aquecimento

O pré-aquecimento da junta a ser soldada tem como objetivo reduzir a taxa de resfriamento do metal, evitando a formação de microestruturas frágeis que podem inviabilizar o projeto da junta soldada, essa temperatura de pré-aquecimento situa-se entre 50 °C e 540 °C, sendo mais usada na faixa de 150 °C a 200 °C (CAMPOS, 2015).

O pré-aquecimento é frequentemente aplicado para diminuir a sensibilidade a fissuração à frio, sendo que o pré-aquecimento aumenta o tempo de resfriamento da junta soldada, proporcionando microestruturas mais macias com maior transporte de hidrogênio devido as taxas de difusividades ocasionadas pelo tempo de permanência do material soldado em temperaturas mais elevadas por um período de tempo maior (WONGPANYA et al., 2008).

A finalidade do pré-aquecimento é diminuir a taxa de resfriamento e manter a ZTA com temperatura acima da transformação inicial da martensita por um tempo maior para que a austenita não se transforme em martensita (SIRIN; SIRIN; KALUC, 2016).

Segundo Fortes (2004) existem diversas técnicas para determinar a temperatura de pré-aquecimento considerando a espessura da junta a ser soldada. Abaixo são descritas as equações 3 e 4 que são as mais usadas.

$$\text{Temperatura de pré – aquecimento } (^{\circ}\text{C}) = 350x\sqrt{CE_{total} - 0,25} \quad \text{Equação 3}$$

$$CE_{total} = CE \times E \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

CE – Carbono equivalente

E – Espessura da junta a ser soldada (mm).

3.6.Temperatura de Interpasse

Funderbuck (1998) define a temperatura de interpasse como sendo a temperatura no material na área de solda imediatamente anterior ao próximo passe e aos passes subsequentes em soldas de multipasse.

Segundo Sirin; Sirin; Kaluc (2016) na soldagem multipasses, assim como no pré-aquecimento da junta a ser soldada, a temperatura entre passes afeta a taxa de resfriamento e quando a temperatura de pré-aquecimento e a de interpasse forem maiores que o necessário, com a taxa de resfriamento excessivamente reduzida, ocorrerá um aumento nas dimensões da ZTA com expansão da zona de granulação grosseira, diminuindo a resistência e a tenacidade ao impacto e ao entalhe.

3.7.Tratamento Térmico de Pós-Soldagem

Os aços ao Cr-Mo são endurecíveis, sendo necessário um tratamento térmico pós soldagem (AHMED; AGARWAL; DANIEL, 2015). O tratamento térmico pós soldagem (TTPS), corresponde a qualquer tratamento térmico realizado após a soldagem de duas ou mais peças objetivando aliviar tensão residual, diminuição da dureza na ZTA, melhorar a ductilidade e a liberação do hidrogênio difusivo (SILVA, 2016).

Os tratamentos térmicos de têmpera seguida por revenimento não são indicados para aços fabricados por “thermo-mechanical controlled processing” (TMCP) porque as propriedades de tração e/ou tenacidade poderão ser deterioradas. Caso o tratamento térmico de alívio de tensão seja requisito de projeto, o mesmo pode ser usado apenas para alívio de tensões residuais e não para modificação das propriedades mecânicas como acontecem nos aços convencionais devido as temperaturas empregadas (COZZA, 2018).

Kumar et. al., (2021) ao realizar a soldagem de uma junta dissimilar entre os aços ASTM 335 P11 e ASTM 335 P22 com processo GMAW constatou-se um aumento na resistência ao impacto da junta soldada após o TTPS. O mesmo autor, verificou que após o TTPS realizado em três temperaturas diferentes (700 °C, 800 °C e 900 °C) durante 2h cada, a resistência ao impacto diminuiu à medida que a temperatura aumentou de 700 °C para 900 °C.

Segundo Sauraw et. al., (2021) em seu trabalho sobre soldagem de uma junta dissimilar entre os aços ASTM 335 P22 e ASTM 335 P91, no processo GTAW ocorre a formação de microestrutura martensítica frágil não temperada, ocasionando baixa tenacidade ao impacto, levando vários pesquisadores a recomendar o TTPS para aumentar a resistência ao impacto através do revenimento da martensita.

A principal desvantagem do TTPS segundo Al-Mazrouee; Raman; Ibrahim (2005) está relacionada com o custo de soldagem devido aos atrasos de tempo e aos equipamentos necessários, podendo ser um problema grave caso o TTPS seja realizado em condições nas quais o controle da temperatura é difícil. Ainda segundo Al-Mazrouee; Raman; Ibrahim (2005), fatores como geometria do componente a ser soldado ou a localização do mesmo podem ser um obstáculo,

assim como componentes próximos podem ser atingidos pelo TTPS exigindo usinagem para reparar as tolerâncias ou substituição do componente, acarretando ainda mais a inatividade dos equipamentos com consequente aumento de custos.

3.8. Energia de Soldagem e a Influência dos Ciclos Térmicos

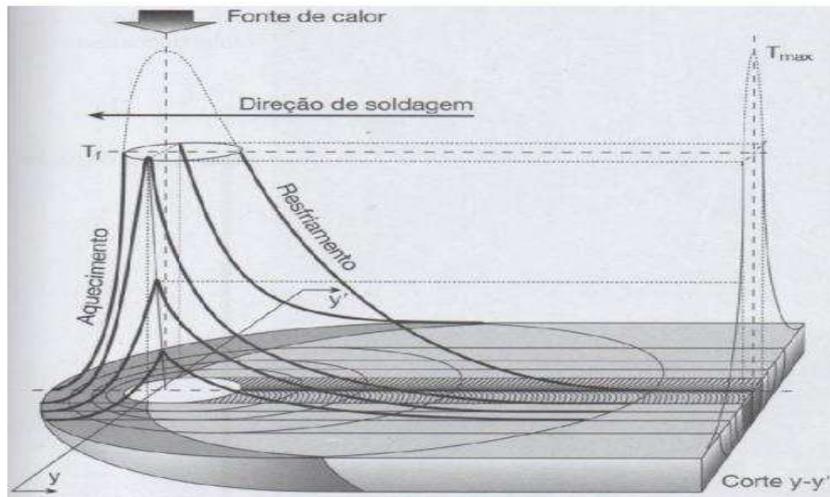
Os efeitos que o calor provoca no processo de soldagem em relação as propriedades mecânicas e na estrutura dos materiais a serem unidos preocupam a comunidade que trabalha com soldagem, por isso, muitos métodos tem sido usados na tentativa de prever os efeitos do ciclo térmico da solda (NILES; JACKSON, 1975).

A qualidade das juntas soldadas de aços ARBL, tanto em relação às trincas por hidrogênio quanto a obtenção da microestrutura visando propriedades mecânicas que satisfaçam as exigências do projeto da junta é garantida através do controle das condições de soldagem (JÚNIOR et. al., 2014).

Através da Figura 15 que representa a solução do modelo matemático para a transferência de calor do eletrodo para a peça proposto por Rosenthal é possível observar a distribuição de temperatura em torno de uma fonte de calor que geram variações de temperaturas que são relacionadas com o tempo em cada ponto da junta soldada (JÚNIOR, 2014).

Na Figura 15, as linhas paralelas ao cordão de solda representam o ciclo térmico e o corte y-y' mostra as temperaturas máximas atingidas em relação a linha central do cordão de solda.

Figura 15 – Perfil de Temperatura ao Longo de uma Junta Soldada.

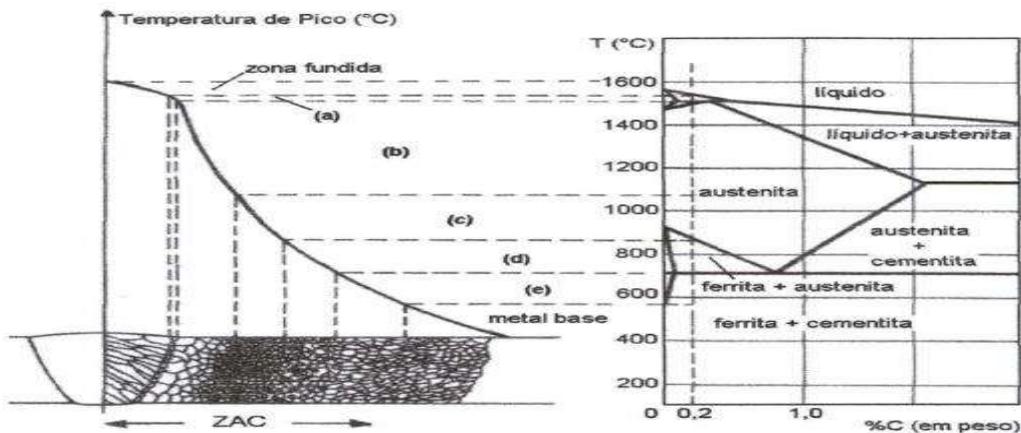


Fonte: JÚNIOR, 2014.

O corte y-y' da Figura 15 pode ser superposto a um diagrama de equilíbrio de fase para representar as sub-regiões da ZTA, Figura 16, numa solda de passe único de um aço com 0,2%C, conforme descrição abaixo (PIMENTA, 2002):

- (a) Região parcialmente fundida: T_p entre a temperatura de liquidus e o patamar peritético;
- (b) Região de grão grosseiro (ZTA-GG): $1100\text{ }^\circ\text{C} < T_p < \text{Patamar peritético}$;
- (c) Região de grão refinados (ZTA-GF): $A_3 < T_p < 1100\text{ }^\circ\text{C}$;
- (d) Região intercrítica (ZTA-IC): $A_1 < T_p < A_3$;
- (e) Região subcrítica (ZTA-SC): T_p ABAIXO DE A_1 .

Figura 16 – Representação Esquemática da Distribuição de Temperatura Máxima na Soldagem e Diagrama de Equilíbrio de Fase Fe-C.



Fonte: PIMENTA, 2002.

Segundo Marques; Modenesi (2014) a energia de soldagem, dada pela quantidade de energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda (Equação 5), descreve a interação entre os aspectos metalúrgicos da soldagem e o material soldado.

$$H = \eta * \frac{V * I}{v} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

H = Energia de soldagem líquida (J/cm);

η = Fator adimensional de rendimento

V = Tensão de soldagem (V);

I = Corrente de soldagem (A);

v = Velocidade de soldagem (cm/s).

A tabela 3 mostra alguns valores para o fator adimensional de rendimentos.

Tabela 3 – Valores Típicos para o Fator Adimensional de Rendimentos.

Processo	η
Eletrodo Revestido	0,65 – 0,85
GMAW	0,65 – 0,85
GTAW (CC+)	0,50 – 0,80
GTAW (CA)	0,20 – 0,50
SAW	0,80 – 0,99
Oxi-gás	0,25 – 0,80

Fonte: MARQUES; MODENESI, 2014.

3.9.Chanfros

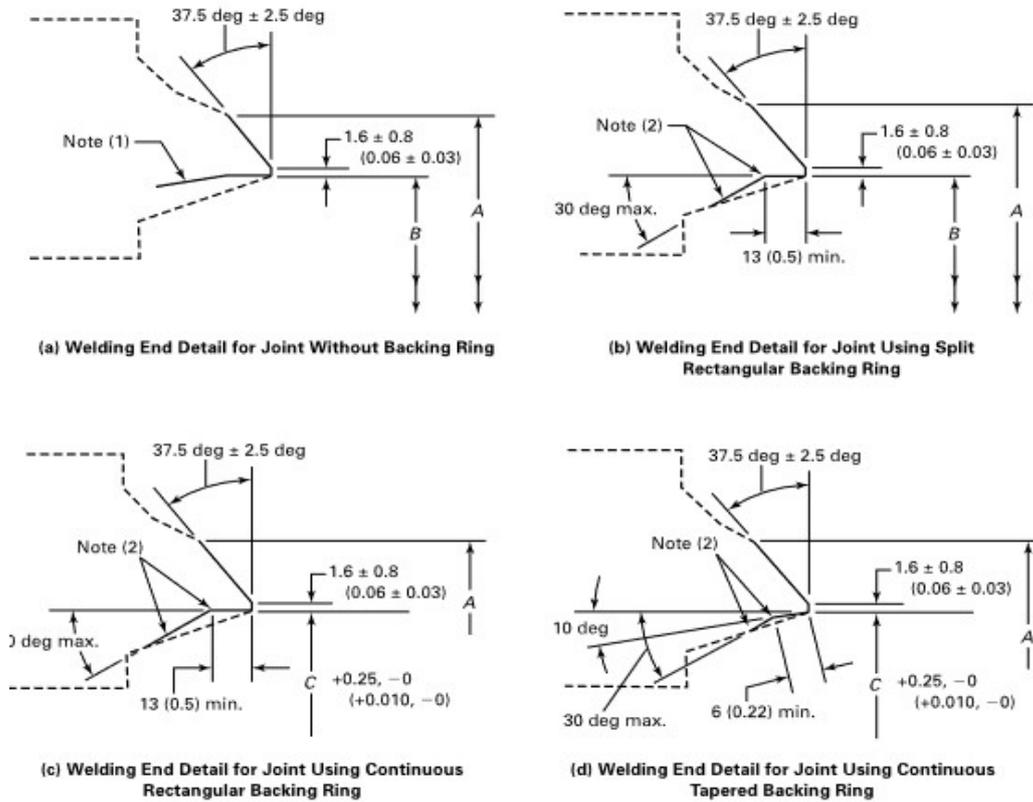
Os chanfros são aberturas entre duas partes que serão soldadas e suas especificações são descritas abaixo, conforme a norma ASME B 16.25 – 2017 (ASME B 16.25, 2017).

Chanfros para outros passes de raiz que não GTAW:

- (a) Para espessura de parede até 3 mm (0,12 pol), as extremidades devem ser cortadas em esquadro ou levemente chanfrada;

(b) Espessura de parede acima de 3 mm (0,12 pol) e inferior a 22 mm (0,88 pol), as extremidades devem ser chanfradas em ângulo único, conforme Figura 17.

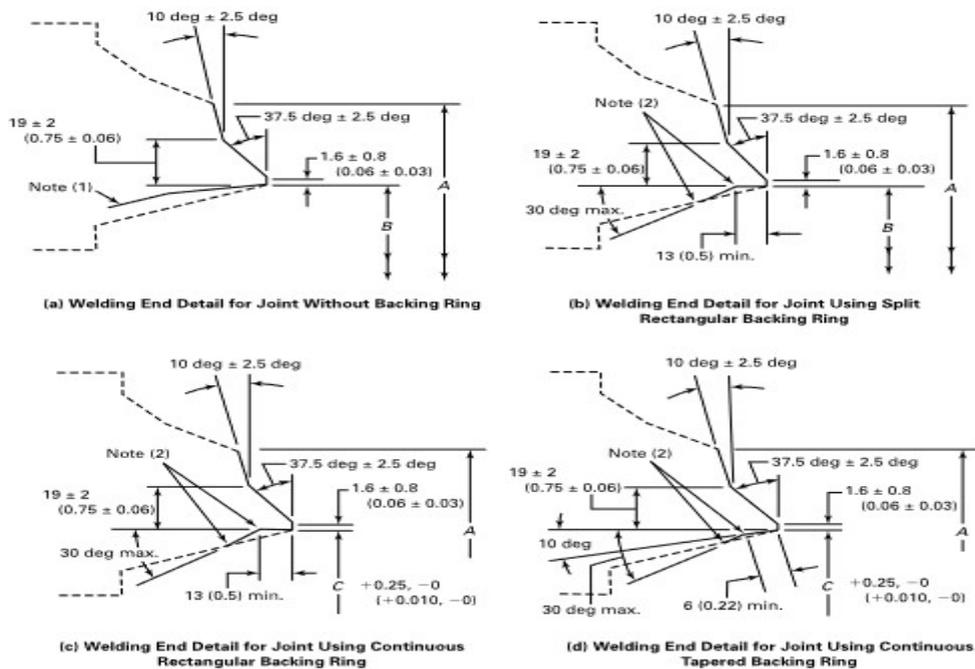
Figura 17 – Bisel para Passe de Raiz não GTAW ($3 \text{ mm} \leq e < 22 \text{ mm}$).



Fonte: ASME B 16.25, 2017.

(c) Espessura de parede superior a 22 mm (0,88 pol), devem ter chanfros compostos, conforme Figura 18.

Figura 18 – Bisel para Passe de Raiz não GTAW ($e > 22$ mm).

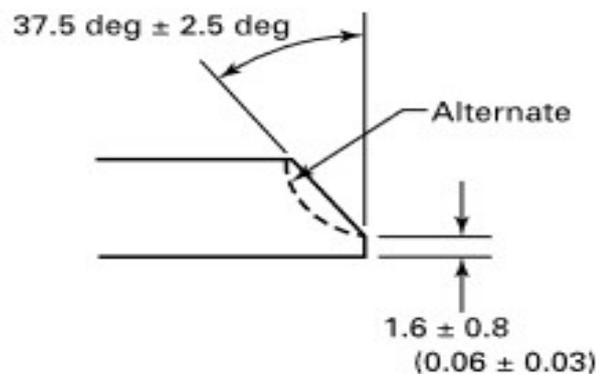


Fonte: ASME B 16.25, 2017.

Chanfros para passes de raiz com GTAW:

- (a) Para espessura de parede até 3 mm (0,12 pol), as extremidades devem ser cortadas em esquadro ou levemente chanfrada;
- (b) Espessura de parede acima de 3 mm (0,12 pol) e inferior a 10 mm (0,38 pol), devem ser chanfradas com ângulo de $37.5^\circ \pm 2.5^\circ$ ou chanfros levemente côncavos, conforme Figura 19.

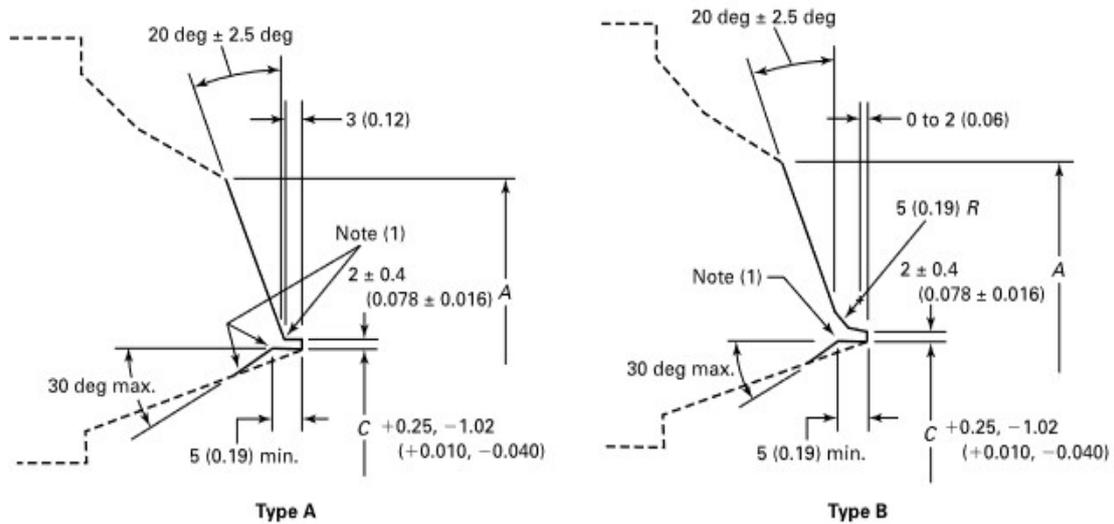
Figura 19 – Bisel para Passe de Raiz GTAW ($3 \text{ mm} \leq e \leq 10 \text{ mm}$).



Fonte: ASME B 16.25, 2017.

(c) Para espessuras acima de 10 mm (0,38 pol) e inferior a 25 mm (1 pol), devem ter chanfro conforme a Figura 20.

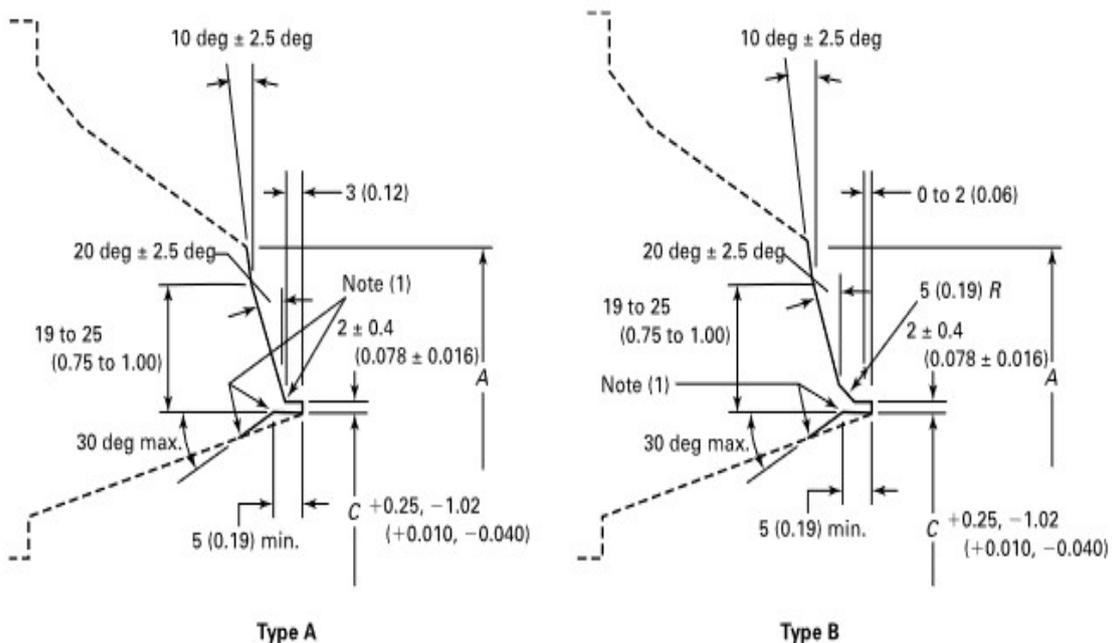
Figura 20 – Bisel para Passe de Raiz GTAW (10 mm < e ≤ 25 mm).



Fonte: ASME B 16.25, 2017.

(d) Espessura superior a 25 mm (1 pol), devem ter chanfro conforme a Figura 21.

Figura 21 – Bisel para Passe de Raiz GTAW (e ≥ 25 mm).



Fonte: ASME B 16.25, 2017.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

O metal de base empregado foi aço ASTM A335 P22 na forma de tubos sem costura. O diâmetro externo do tubo era de 73 mm e a espessura da parede de 9,53 mm (NPS 2 ½” e Schedule 160), de acordo com as especificações informadas pelo fabricante. A Tabela 4 apresenta a especificação nominal da composição química, em peso, do aço ASTM 335 P22 conforme especificação técnica do fornecedor.

Tabela 4 - Especificação da Composição Química Nominal, em Peso do Aço ASTM A335 P22 Quando Fornecido de Acordo com a Normas ASTM A 335M - 19 A e ASTM A 999M – 18.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)
0,010	0,39	0,009	0,002	0,22	1,99	0,91

Fonte: VALLOUREC, 2022.

Os metais de adição empregados foram o eletrodo revestido E9018-B3 e a vareta ER90S-B3, ambos recomendados pela norma Petrobras N-133 Rev. P de 2023. A composição química dos metais de adição pode ser vista nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Composição Química Nominal, em Peso do Eletrodo Revestido E9018-B3, de Acordo com o Fabricante.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	N (%)	Ni (%)	Nb (%)
0,08	0,55	0,76	2,35	0,98	0,01	0,02	0,01	0,01

Fonte: Magma Solda.

Tabela 6 - Composição Química Nominal, em Peso da Vareta ER90S-B3, de Acordo com o Fabricante.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)
0,07- 0,12	0,4-0,7	0,4- 0,7	0,025 (máx)	0,025 (máx)	0,2 (máx)	2,3-2,7	0,9-1,2	0,35 (máx)

Fonte: Techno Alloys.

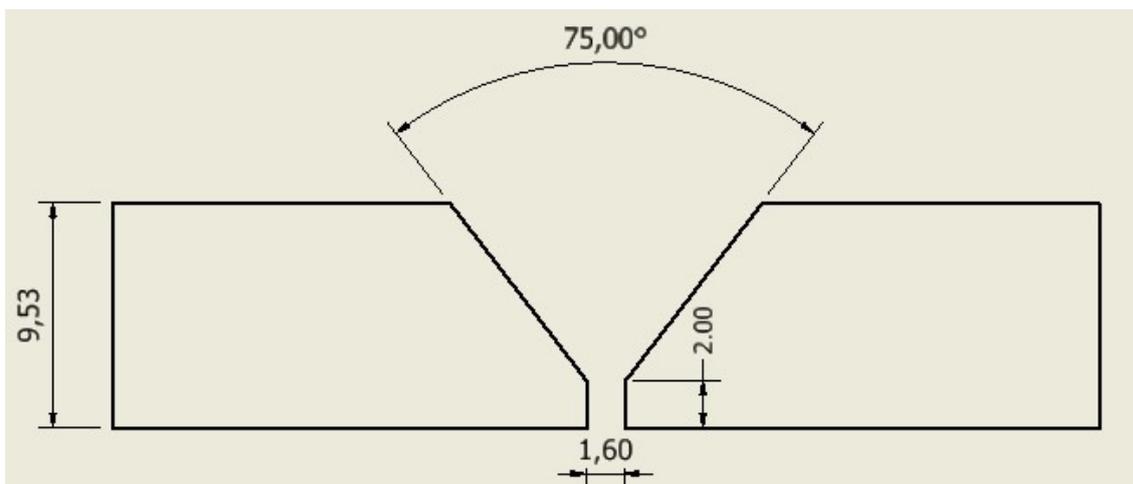
O eletrodo E9018-B3 possui revestimento básico com adição de cromo e molibdênio em teores de 2,25 e 1,0 % em peso, respectivamente. É indicado para a soldagem de aços ligados ao Cr-Mo e similares que possua alta resistência à oxidação e à corrosão em altas temperaturas (550 a 600 °C). O arame ER90S-B3 é o consumível indicado para a soldagem destes aços quando o processo GTAW é empregado na soldagem da raiz da solda.

4.2.Métodos

4.2.1.Procedimentos de Soldagem e Técnicas Conexas

Os tubos foram chanfrados de acordo com a norma ASME B16.25-2017, com ângulo de abertura do chanfro de 75°, abertura da raiz de 1,60 mm e altura nariz do chanfro de 2,00 mm, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Desenho Detalhando o Chanfro das Juntas de Topo Confeccionadas.



Fonte: Adaptado da norma ASME B16.25-2017.

Foram confeccionadas 4 juntas soldadas, de maneira manual e a posição de soldagem adotada foi a 5G com uma fonte de soldagem DigiPlus A7 da IMC soldagem. O Quadro 1 apresenta um resumo dos parâmetros de soldagem empregados na confecção das juntas. Estes parâmetros se basearam em recomendações dos fabricantes dos metais de adição, bem como na já citada norma Petrobras N-133 Rev. P de 2023.

Antes de proceder com o processo de soldagem, as juntas foram cuidadosamente aquecidas em um forno com resistência elétrica até atingirem a

temperatura especificada para o início da soldagem. Essa temperatura, chamada de temperatura de pré-aquecimento foi cuidadosamente verificada por meio de um termômetro.

Quadro 1 - Resumo dos Parâmetros de Soldagem Empregados.

		Junta 1	Junta 2	Junta 3	Junta 4
Processo de soldagem empregado	Passe de Raiz	SMAW	SMAW	GTAW	GTAW
	Passe quente	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW
	Passe de enchimento	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW
Corrente de soldagem (A)	Passe de raiz	80	90	160	120
	Passe quente	80	90	80	90
	Passe de enchimento	80	90	80	90
Temperatura de pré-aquecimento (°C)		160	160	200	200
Temperatura de interpasse (°C)		190	190	190	190

Fonte: Autoria própria.

O emprego destes parâmetros de soldagem e o monitoramento de parâmetros como tensão de soldagem e velocidade de soldagem possibilitou o cálculo da energia bruta de soldagem, apresentada na Tabela 7.

A temperatura de interpasse foi monitorada utilizando um termômetro. Após a conclusão do passe de soldagem (raiz ou passe quente) a temperatura era verificada com um termômetro até que alcançasse o valor da temperatura de interpasse previamente estabelecida.

Após isto os corpos de prova das juntas soldadas foram submetidos a um tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) em um forno a resistência elétrica da marca Jung, onde foram mantidos a uma temperatura de 700 °C por 1 hora, sendo resfriados ao forno, conforme orientações do fabricante do eletrodo revestido e a norma ASTM A335 de 2003.

Tabela 7 - Energia de Soldagem Bruta em J/cm para Cada Passe Executado em Cada uma das 4 Juntas Soldadas.

		Energia de soldagem (J/cm)	de Velocidade de soldagem (cm/s)	Tensão (V)
	Passe de raiz	137,31	10,05	23
Junta 01	Passe quente	229,90	5,74	22
	Passe de enchimento	194,60	7,09	23
	Passe de raiz	165,74	8,96	22
Junta 02	Passe quente	199,06	7,46	23
	Passe de enchimento	196,51	7,90	23
	Passe de raiz	292,50	4,80	13,5
Junta 03	Passe quente	198,50	6,65	22
	Passe de enchimento	201,60	6,25	21
	Passe de raiz	307,00	3,43	13,5
Junta 04	Passe quente	240,68	6,17	22
	Passe de enchimento	226,37	6,56	22

Fonte: Autoria própria.

4.2.2. Técnicas de Caracterização

A partir das juntas soldadas foi possível retirar corpos de prova para realização da caracterização metalográfica, ensaios de microdureza Vickers e ensaio de tenacidade ao impacto Charpy.

4.2.2.1. Análise Metalográfica

As amostras de metalografia/microdureza de cada junta soldada foram embutidas à frio e submetidas a um processo de lixamento, utilizando uma lixadeira da marca Arotec, modelo APL-4. Para o lixamento, foram utilizadas lixas com diferentes granulometrias, foram empregadas lixas 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200. Ao progredir de uma lixa com granulometria diferente para a outra, alternava-se o sentido de lixamento em 90°. Após o lixamento as amostras foram polidas em uma politriz da marca Arotec modelo Arapol com alumina. Após o polimento as amostras foram atacadas com Nital 5% durante 10 segundos, lavadas com água corrente e álcool, para serem secadas com soprador térmico. A caracterização microestrutural foi realizada via microscopia ótica, com a utilização de um Microscópio Olympus BX 51M do Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. As imagens das micrografias foram retiradas entre as linhas 01 e 03 da Figura 23 visando obter a influência da soldagem do passe de raiz e do passe de enchimento.

4.2.2.2. Macrografia

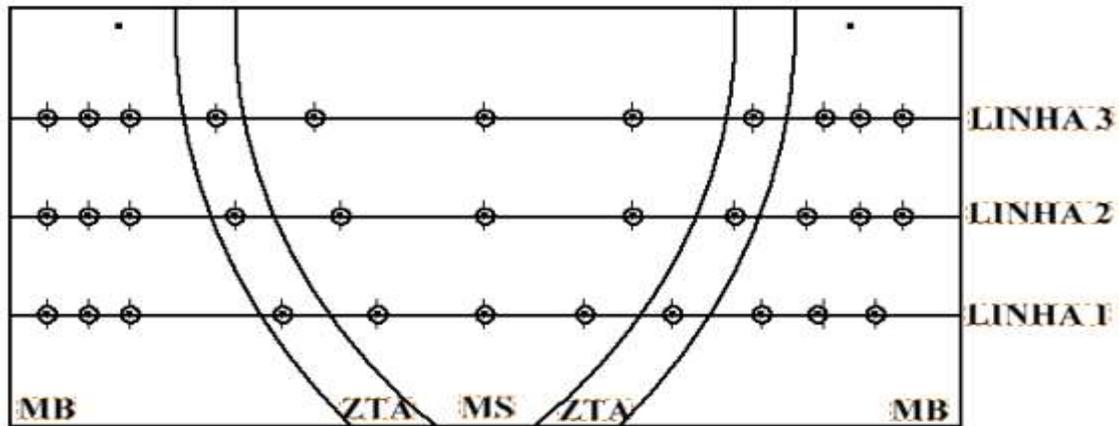
A caracterização macroestrutural foi realizada nos mesmos corpos de prova utilizados para a caracterização da microestrutura e da microdureza.

A preparação desses corpos de prova seguiu o mesmo procedimento dos corpos de prova utilizados para análise microestrutural, porém, o ataque foi realizado com Nital 10% durante 15 segundos. As imagens foram adquiridas com um scanner HP Scanjet 3770.

4.2.2.3. Ensaio de Microdureza

O perfil de microdureza Vickers foi aferido ao longo de três linhas horizontais que cruzavam toda a junta soldada, a fim de caracterizar as regiões do MB, ZTA e MS, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Linhas Horizontais onde Foram Realizadas as Endentações na Seção Transversal do Corpo de Prova Soldado.



Fonte: adaptado da norma N-133 Rev. P da Petrobras de 2023.

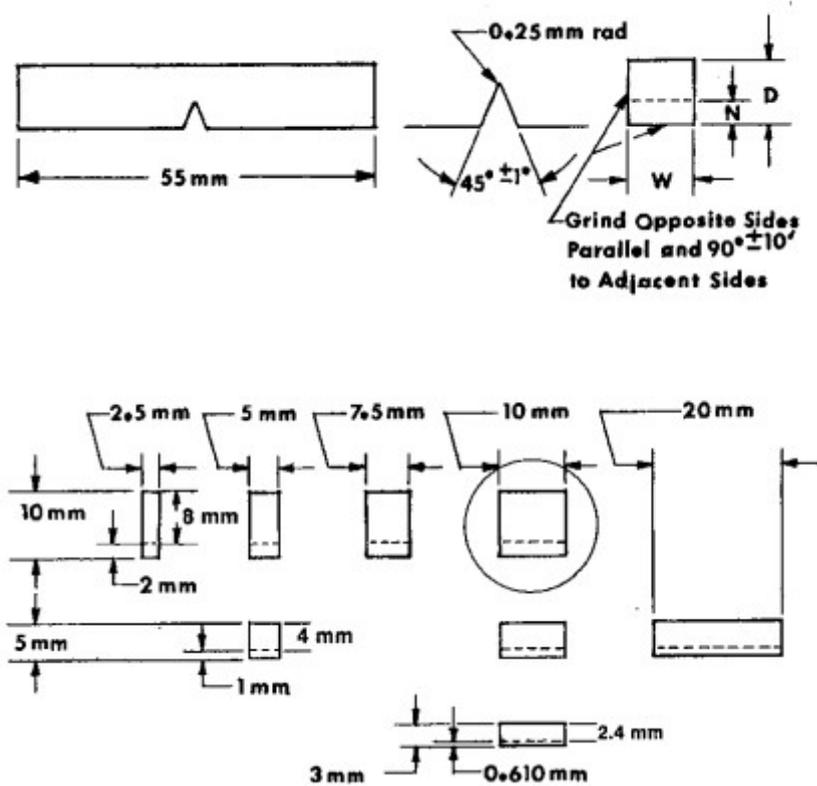
Os ensaios foram realizados com um microdurômetro digital modelo FM-700 da Future Tech com carga de 100 gramas-força (gf) aplicada durante 15 segundos (s), disponível no Laboratório de Metalografia da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG/Campus Campina Grande.

4.2.2.4. Corpos de Prova Charpy

Os corpos de prova Charpy foram usinados no Laboratório de Máquinas Operatrizes do IFPB – Campus Cajazeiras, empregando uma fresadora ferramenteira Deb'Mag e os entalhes foram usinados empregando uma brochadeira do Laboratório de Soldagem da UFCG. Foram confeccionados 9 corpos de prova para cada junta soldada, de maneira que 3 corpos de prova com entalhe no metal de base (MB), 3 com entalhe na zona termicamente afetada (ZTA) e 3 com entalhe no metal de solda (MS).

Segundo a norma ASTM E23 de 2018, quando a quantidade de material disponível não permite a fabricação dos espécimes padrão (10 mm x 10 mm x 55 mm), espécimes menores podem ser usados, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Dimensões das Sub-Espécimes Charpy.



NOTE 1—The circled specimen is the standard specimen (see Fig. 1).

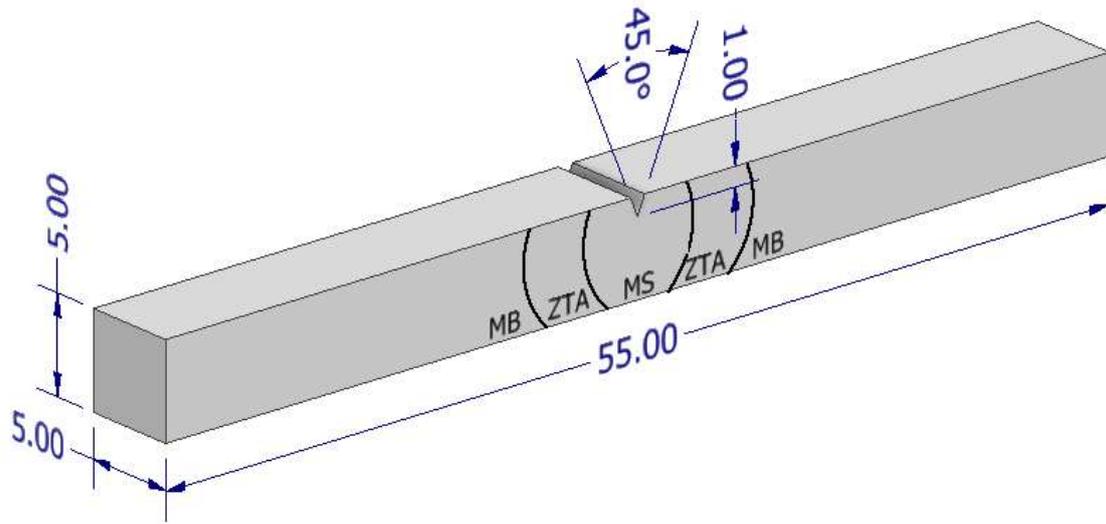
NOTE 2—Permissible variations shall be as follows:

Cross-section dimensions	$\pm 1\%$ or ± 0.075 mm, whichever is smaller
Radius of notch	± 0.025 mm
Ligament length	± 0.025 mm
Finish requirements	$R_a = 2\ \mu\text{m}$ on notched surface and opposite face; $R_a = 4\ \mu\text{m}$ on other two surfaces

Fonte: Norma ASTM E23, 2018.

A Figura 25 mostra as dimensões do corpo de prova usado no ensaio de impacto Charpy. Os ensaios foram conduzidos a temperatura de $-30\ ^\circ\text{C}$, conforme orientação da norma N-133 Rev. P de 2023 da Petrobras e os entalhes posicionados na região da face da solda. A decisão de realizar o ensaio a uma temperatura de $-30\ ^\circ\text{C}$ foi motivada pelo fato de que o material em teste absorve uma considerável quantidade de energia. Assim, de acordo com a capacidade do equipamento disponível para realizar o ensaio em temperatura ambiente, os corpos de prova não teriam ruptura.

Figura 25 - Dimensões do Corpo de Prova para Ensaio de Tenacidade ao Impacto Charpy.



Fonte: Adaptado da norma ASTM E23, 2018.

4.2.2.5. Caracterização da Superfície de Fratura

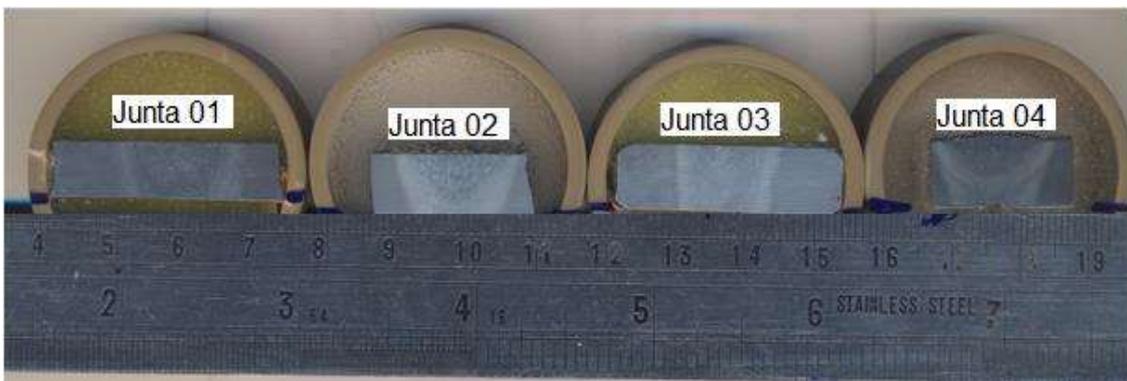
As análises da superfície de fratura do metal de solda de todas as juntas foram realizadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN modelo Vega3 de 20 kV do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFCG/Campina Grande. As imagens foram aquisitadas com aumentos de 1000 vezes.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise da Macro e Microestrutura

A Figura 26 apresenta a macroestrutura das quatro juntas soldadas produzidas, sendo possível distinguir na imagem as diferentes zonas, chamadas de metal de base, zona termicamente afetada e metal de solda. Nessas imagens não foram encontrados defeitos como trincas, falta de fusão ou poros. É possível observar um aspecto diferente na geometria da macrografia da junta 04 em relação as demais juntas, que pode ter ocorrido em função do maior aporte de calor fornecido.

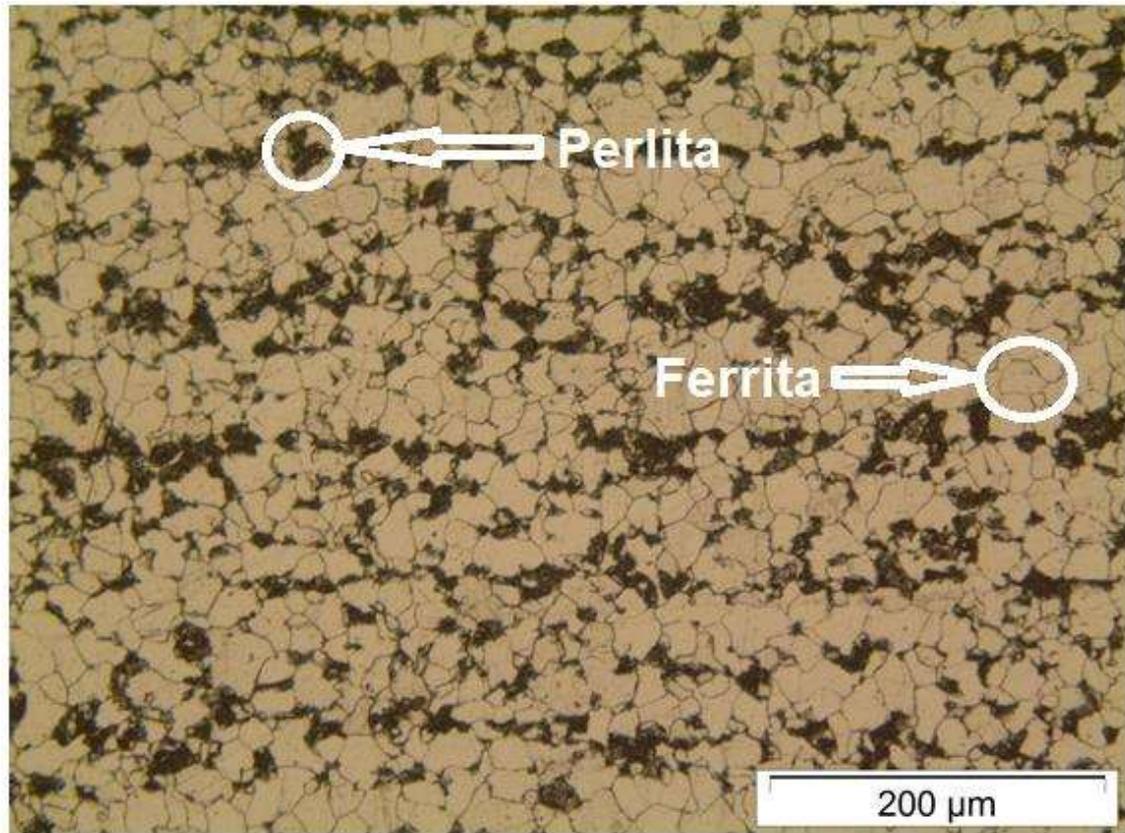
Figura 26 - Macrografia das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04.



Fonte: Autoria própria.

A análise metalográfica do aço ASTM 335 P22 como recebido apresenta uma microestrutura típica dos aços ao Carbono de baixa liga, constituída por uma matriz ferrítica e perlítica, quando resfriados lentamente. Na Figura 27 é possível observar uma predominância de grão equiaxiais de ferrita e uma menor quantidade de grãos do microconstituente perlita, resultado similar foi encontrado por Santos (2022).

Figura 27 – Microestrutura do Metal de Base como Recebido. Ataque com Nital 5% e Aumento de 200 Vezes.

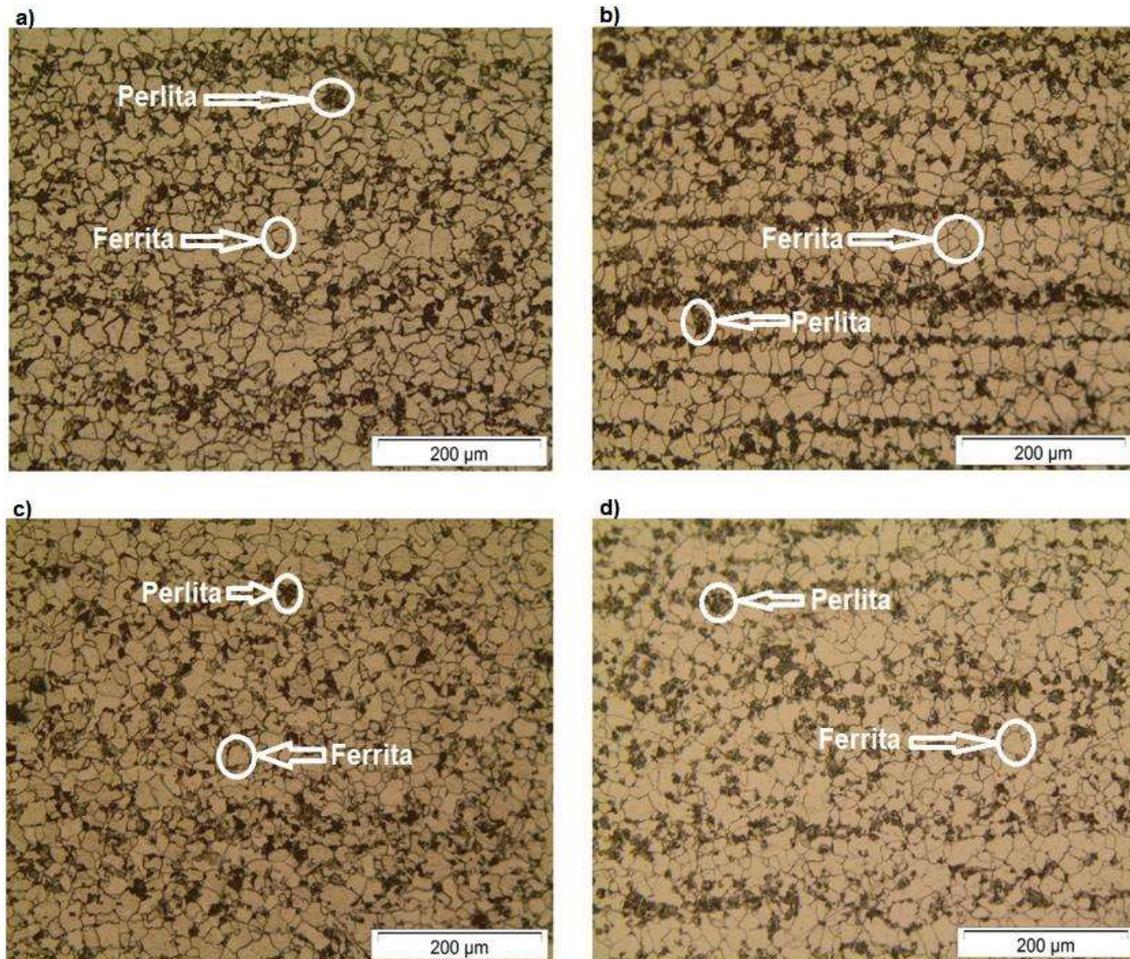


Fonte: Autoria própria.

A seguir, são apresentadas as microestruturas das diferentes regiões das juntas soldadas realizadas após tratamento térmico de pós-soldagem. Todas as micrografias foram adquiridas ao longo da linha 2 apresentada na Figura 23.

Na Figura 28 (a) a (d) é possível observar a microestrutura do MB das juntas 01, 02, 03 e 04 respectivamente após o TTPS. É possível identificar que a matriz é constituída de ferrita e perlita, de maneira análoga ao MB na condição como recebido e apresentado na Figura 27. Notavelmente, essa composição mantém-se quase inalterada.

Figura 28 - Microestrutura do Metal de Base das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 após TTPS. (a) Metal de Base da Junta 01. (b) Metal de Base da Junta 02. (c) Metal de Base da Junta 03. (d) Metal de Base da Junta 04. Ataque com Nital 5% e Aumento de 200 Vezes.



Fonte: Autoria própria.

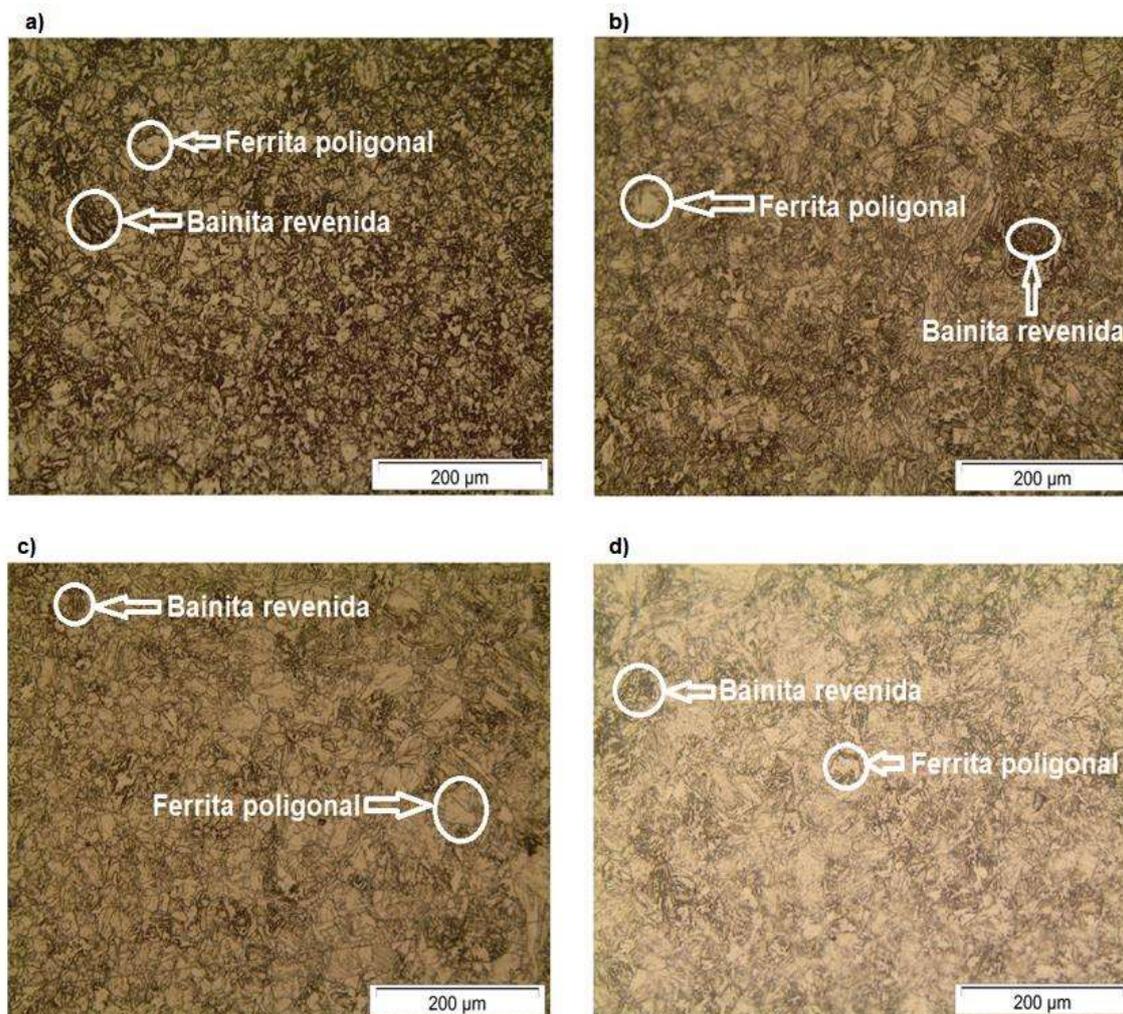
Nas Figuras 29 (a) a (d) é possível observar a microestrutura da ZTA das juntas soldadas 01 a 04, respectivamente. Se comparado ao metal de base é possível observar um grande refino microestrutural na ZTA das 4 juntas soldadas, como era de se esperar.

A microestrutura da ZTA das juntas 01 e 02 é constituída de bainita revenida e ferrita poligonal, que é uma microestrutura típica desse aço quando submetido a tratamento térmico de pós-soldagem. Resultados similares foram observados por Júnior (2014). A ferrita poligonal cresceu durante o resfriamento a partir dos contornos de grão como alotriomorfos, que posteriormente avançaram para o interior dos grãos austeníticos. A similaridade das microestruturas observadas

nestas duas condições de soldagem se deve ao aporte térmico similar, já que uma diferença de 10 A na corrente de soldagem não foi suficiente para promover uma modificação significativa na microestrutura do material quando soldado.

A microestrutura da ZTA das juntas soldadas 03 e 04 são constituídas de bainita revenida e ferrita poligonal, distribuídos aleatoriamente ao longo da matriz. A microestrutura mais grosseira, se comparada à microestrutura das juntas 01 e 02, deve-se ao maior aporte de calor empregado no passe de raiz, uma vez que maiores energias de soldagem resultam em maiores grãos na ZTA. Além disso, na microestrutura da ZTA da junta 04 foram observadas algumas regiões de martensita.

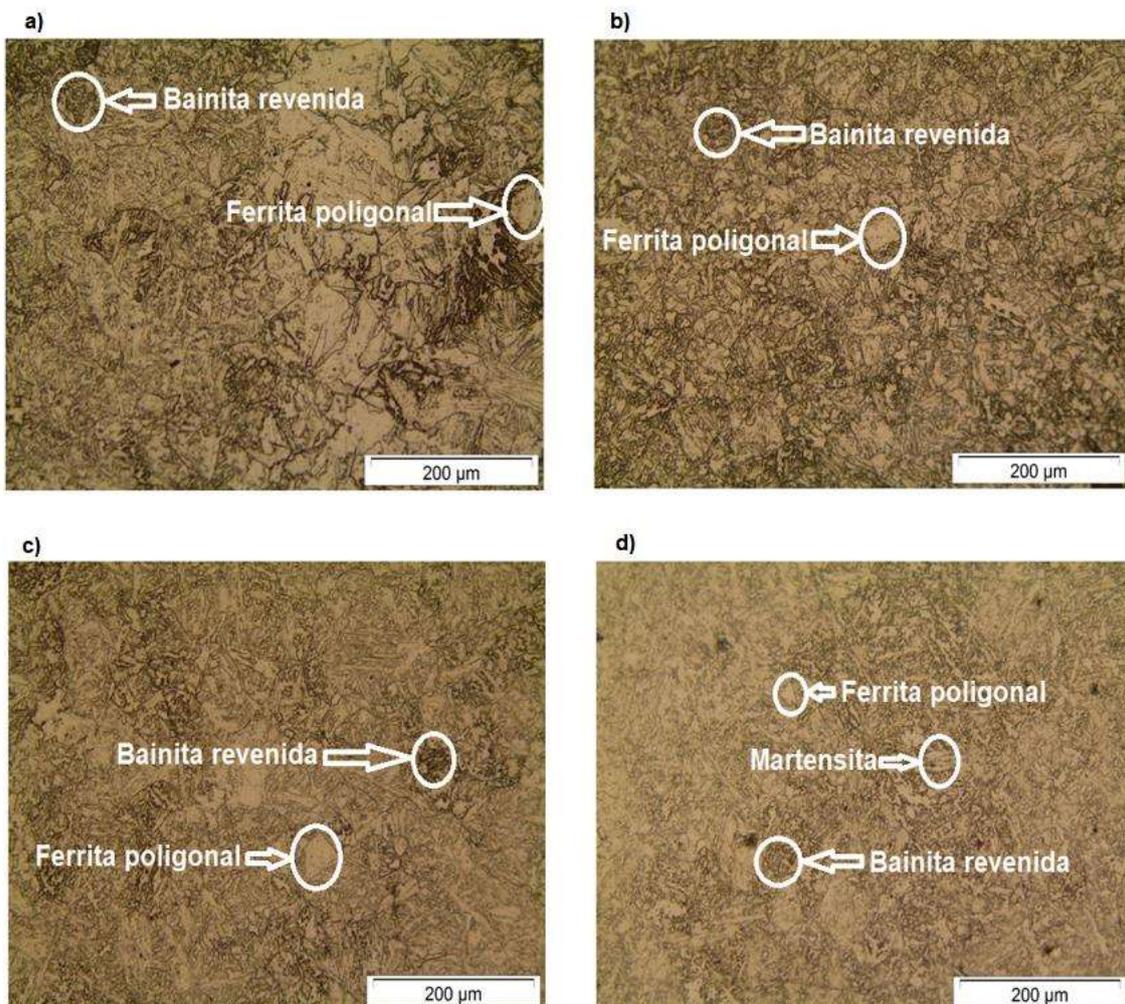
Figura 29 - Microestrutura da ZTA das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 após TTPS. (a) ZTA da Junta 01. (b) ZTA da Junta 02. (c) ZTA da Junta 03. (d) ZTA da Junta 04. Ataque com Nital 5% e Ampliação de 200 Vezes.



Fonte: Autoria própria.

Nas imagens das Figuras 30 (a) a (d) é possível observar a microestrutura do metal de solda, que foi para as juntas 01 a 03 predominantemente de bainita revenida disposta em grãos colunares parcialmente decompostos e ferrita poligonal. Esta microestrutura é característica na soldagem de aços de baixa liga empregando o eletrodo E9018-B3. Na Figura 30 (d) é possível observar na microestrutura do metal de solda da junta 04 a presença de bainita revenida e pequenas regiões de martensita revenida.

Figura 30 – Microestrutura do Metal de Solda das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04 após TTPS. (a) Metal de Solda da Junta 01. (b) Metal de Solda da Junta 02. (c) Metal de Solda da Junta 03. (d) Metal de Solda da Junta 04. Ataque com Nital 5% e Aumento de 200 Vezes.



Fonte: Autoria própria.

5.2. Microdureza

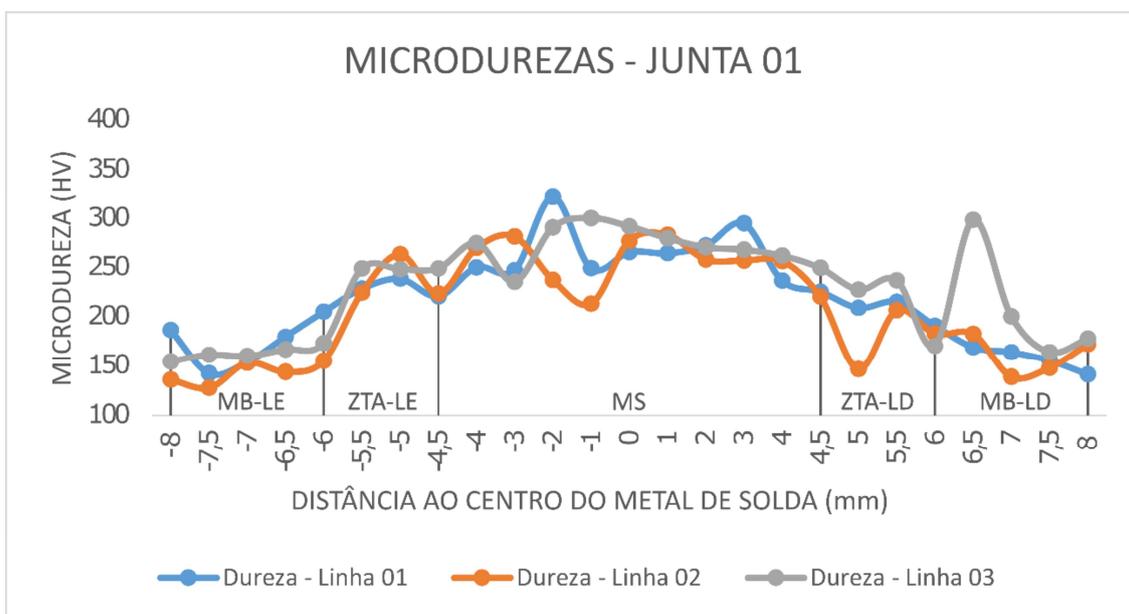
A Tabela 8 apresenta a média da dureza aferida por regiões, onde é possível observar que a dureza no metal de solda apresentou-se superior a dureza observada na zona termicamente afetada e esta apresentou-se superior a do metal de base. De uma maneira geral os valores de dureza observados nas juntas 01 a 03 são semelhantes, mas a junta 04 apresentou dureza bastante superior, tanto no metal de solda quanto na ZTA, se comparado as outras três juntas soldadas, corroborando com a observação da microestrutura martensita no metal de solda e ZTA, tratadas na seção anterior. Os valores aferidos estão de acordo com aqueles observados por Gutierrez et al (2013) após soldar o aço ASTM 335 P91 e submetê-lo a um tratamento térmico de pós-soldagem. Os perfis de microdureza podem ser observados nas Figuras 31 a 34.

Tabela 8 - Durezas Médias e Desvio Padrão para as Diferentes Regiões da Junta Soldada.

		MB - LE	ZTA - LE	MS	ZTA - LD	MB - LD
JUNTA 01	Média	159,8	238,5	267,2	215,3	177,0
	Desvio Padrão	20,2	15,0	23,1	29,1	37,9
JUNTA 02	Média	167,2	219,3	244,4	239,3	169,5
	Desvio Padrão	14,8	34,7	15,1	14,7	15,6
JUNTA 03	Média	180,7	238,2	265,4	231,7	173,4
	Desvio Padrão	14,8	16,6	15,2	21,1	24,7
JUNTA 04	Média	176,6	316,9	350,0	318,7	202,4
	Desvio Padrão	82,7	37,1	18,8	34,5	34,8

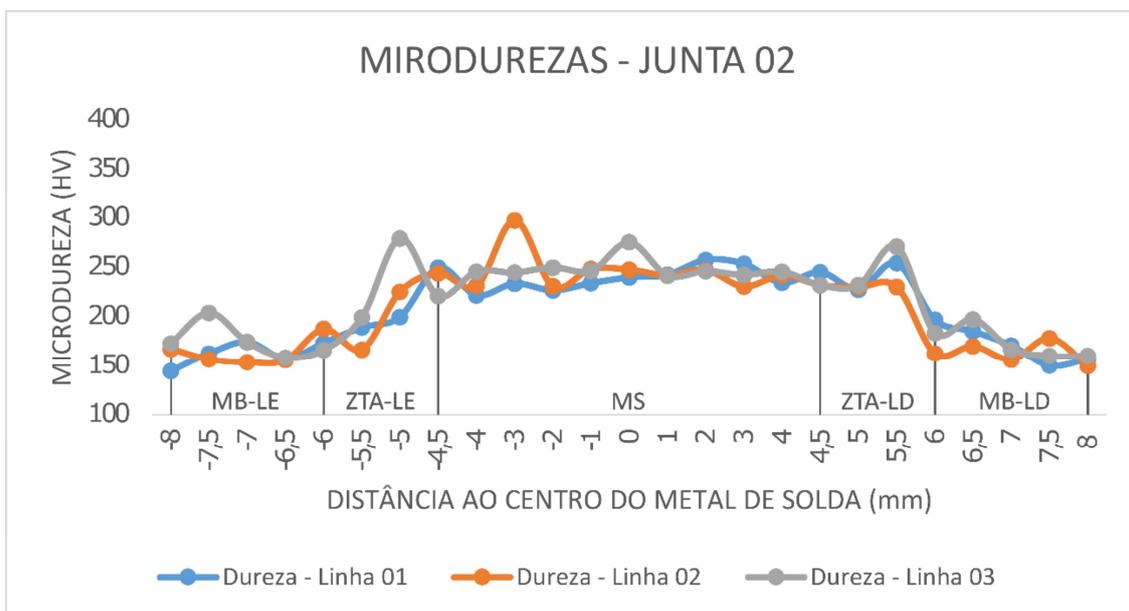
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Perfil de Microdureza da Junta Soldada 01.



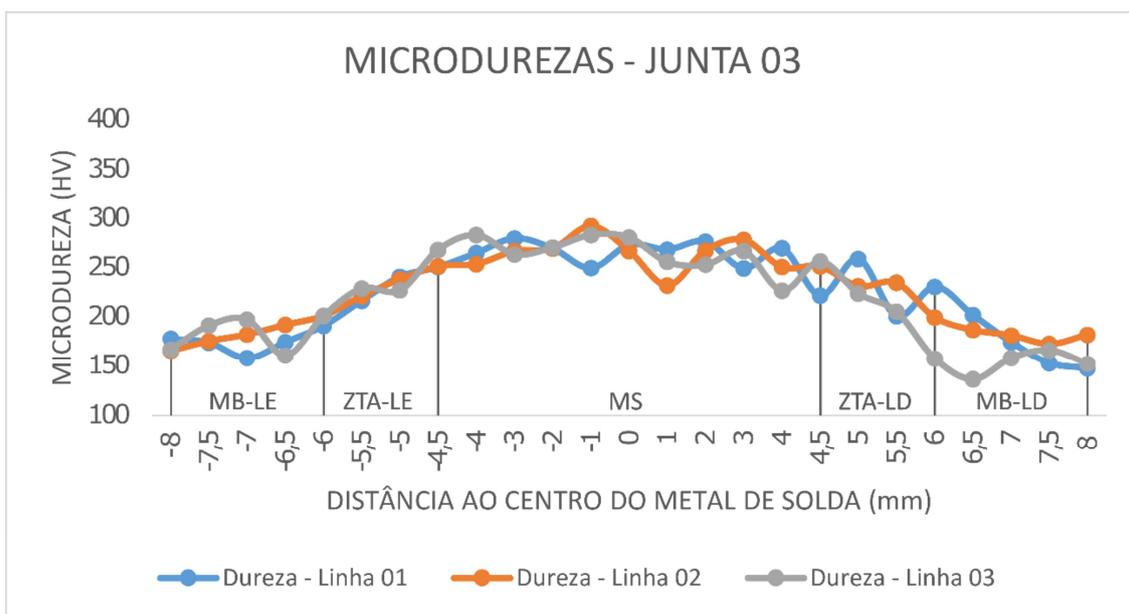
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Perfil de Microdureza da Junta Soldada 02.



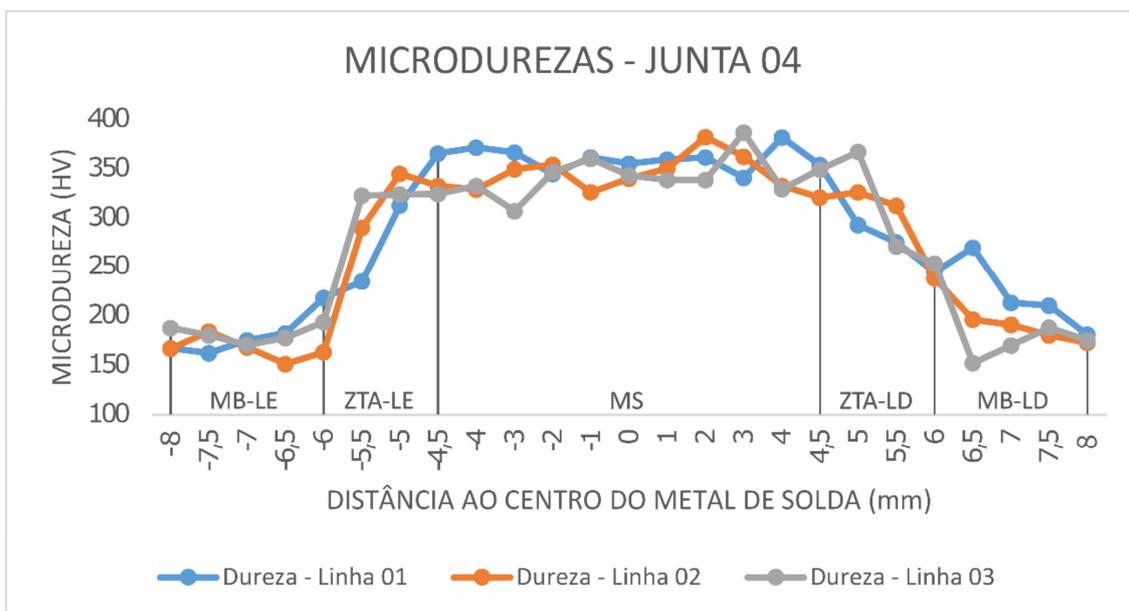
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Perfil de Microdureza da Junta Soldada 03.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Perfil de Microdureza da Junta Soldada 04.



Fonte: Autoria própria.

5.3. Ensaio de Impacto Charpy

Na Tabela 9 é possível observar os valores médios da tenacidade ao impacto Charpy aferida para as juntas soldadas 01 a 04 no metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS) para temperaturas da ordem de -30 °C. A energia absorvida pelo MB foi de cerca de 33 J, enquanto na ZTA

oscilou entre 31 e 46 J, já o metal de solda apresentou comportamento completamente frágil com valores médios de tenacidade ao impacto variando entre 2 e 4 J. Esta queda severa na tenacidade ao impacto no metal de solda também foi observada por Júnior (2014), onde o MB absorvia cerca de 180 J, a ZTA absorvia cerca de 140 J e o MS absorveu entre 12 e 16 J de energia no impacto Charpy.

As variações na energia de soldagem não foram significativas a ponto de resultar em modificações microestruturais que justifiquem a redução na tenacidade ao impacto Charpy dos corpos de prova com entalhes localizados no metal de solda.

Tabela 9 – Tenacidade ao Impacto Aferida Via Ensaio Charpy.

	Metal de Base		Zona Termicamente Afetada		Metal de Solda	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Junta 01	32,50	4,09	38,00	2,00	2,17	1,00
Junta 02	35,67	3,75	31,67	2,08	4,50	1,53
Junta 03	33,00	1,00	46,00	1,00	4,33	1,53
Junta 04	32,33	4,73	38,00	7,00	2,00	1,00

Fonte: Autoria própria.

Segundo Jia et. al., (2022), os resultados dos testes de Charpy são afetados por muitos fatores, como o estado da amostra (tamanho, tipo de entalhe, profundidade do entalhe, etc.), pelo estado da máquina de teste (rigidez), condições de teste (velocidade de impacto, temperatura, etc.) e material da amostra.

Segundo Acarer et al. (2017) a temperatura de transição dúctil-frágil para o aço 2,25Cr – 1,0Mo corresponde a 55 J para temperaturas de -50 °C. No entanto, estes valores não se aplicam as zonas transformadas de uma junta soldada. Além disso, Souza (1982) afirma que não é razoável correlacionar os valores de energia de impacto Charpy para espécimes de tamanhos diferentes, porém, a

norma ASTM A370 - 19 especifica que quando for necessário utilizar sub-espécime os requisitos mínimos de energia devem ser alterados para aproximadamente 14 J na temperatura de -30 °C para corpos de prova com área de seção transversal de 25 mm², como pode ser visto na Tabela 10. Este valor também é corroborado pela norma N-133 Rev. P de 2023 da Petrobras.

Tabela 10 – Critérios de Aceitação do Teste de Charpy para Vários Tamanhos de Espécimes.

Full Size, 10 by 10 mm		¼ Size, 10 by 7.5 mm		⅓ Size, 10 by 6.7 mm		½ Size, 10 by 5 mm		⅝ Size, 10 by 3.3 mm		¾ Size, 10 by 2.5 mm	
ft-lbf	[J]	ft-lbf	[J]	ft-lbf	[J]	ft-lbf	[J]	ft-lbf	[J]	ft-lbf	[J]
75	[102]	56	[76]	50	[68]	38	[52]	25	[34]	19	[26]
70	[95]	53	[72]	47	[64]	35	[48]	23	[31]	18	[24]
65	[88]	49	[67]	44	[60]	33	[45]	21	[29]	16	[22]
60	[82]	45	[61]	40	[54]	30	[41]	20	[27]	15	[20]
55	[75]	41	[56]	37	[50]	28	[38]	18	[24]	14	[19]
50	[68]	38	[52]	34	[46]	25	[34]	17	[23]	13	[18]
45	[61]	34	[46]	30	[41]	23	[31]	15	[20]	11	[15]
40	[54]	30	[41]	27	[37]	20	[27]	13	[18]	10	[14]
35	[48]	26	[35]	23	[31]	18	[24]	12	[16]	9	[12]
30	[41]	22	[30]	20	[27]	15	[20]	10	[14]	8	[11]
25	[34]	19	[26]	17	[23]	12	[16]	8	[11]	6	[8]
20	[27]	15	[20]	13	[18]	10	[14]	7	[10]	5	[7]
16	[22]	12	[16]	11	[15]	8	[11]	5	[7]	4	[5]
15	[20]	11	[15]	10	[14]	8	[11]	5	[7]	4	[5]
13	[18]	10	[14]	9	[12]	6	[8]	4	[5]	3	[4]
12	[16]	9	[12]	8	[11]	6	[8]	4	[5]	3	[4]
10	[14]	8	[11]	7	[10]	5	[7]	3	[4]	2	[3]
7	[10]	5	[7]	5	[7]	4	[5]	2	[3]	2	[3]

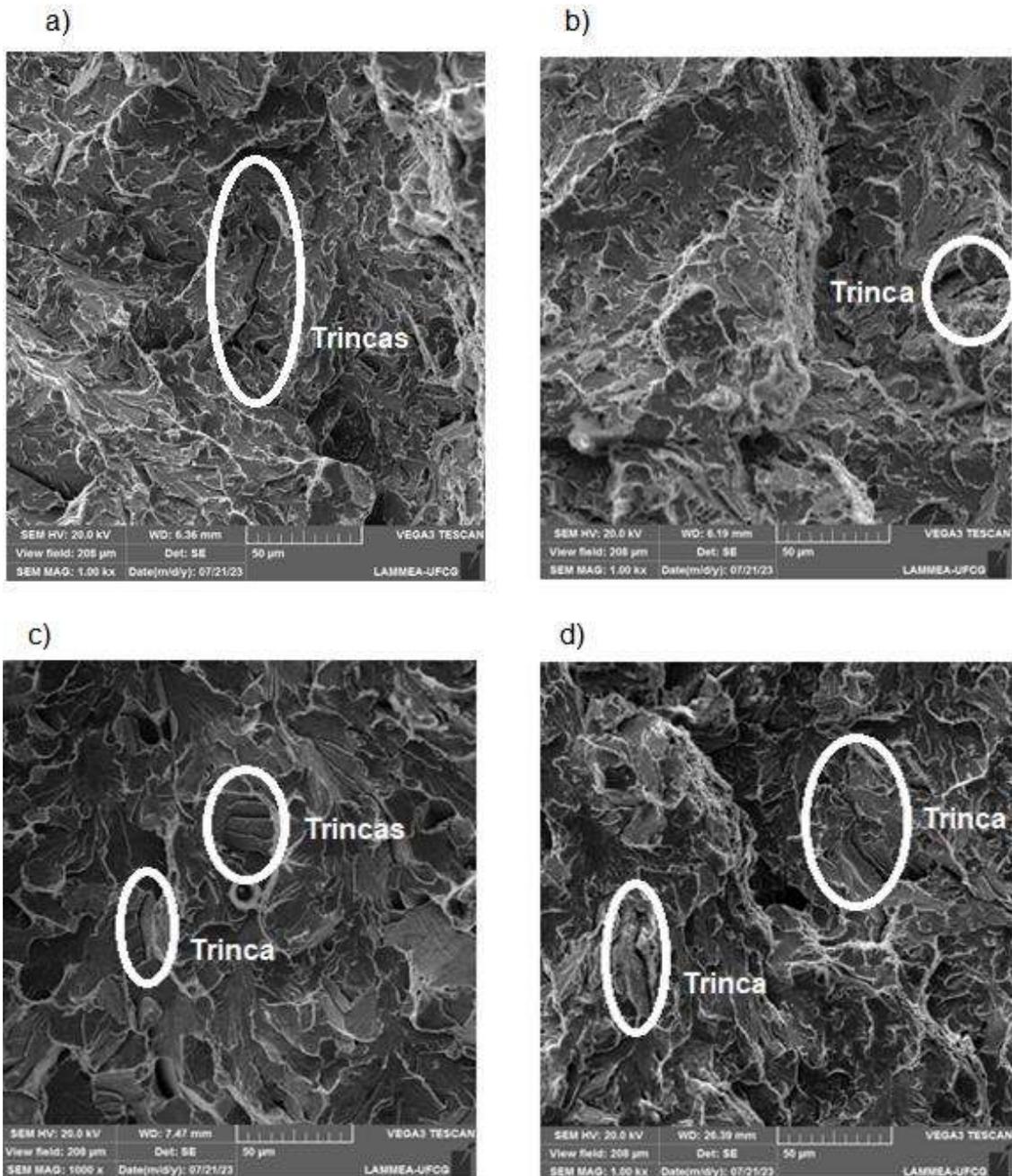
Fonte: Norma ASTM A370, 2019.

5.4. Análise da Superfície de Fratura

Para contribuir com as investigações sobre a tenacidade das juntas soldadas, em especial no metal de solda (MS), foram conduzidas análises da fratura dos corpos de provas ensaiados. A Figura 35 mostra a superfície de fratura na região do metal de solda das juntas soldadas 01 a 04, respectivamente.

O aspecto das superfícies de fratura do metal de solda de todas as juntas soldadas possui aspecto de fratura frágil, com algumas trincas secundárias no plano da fratura. Por fim, na junta 04 foi observado um pequeno resquício de cisalhamento no corpo de prova (marcas brancas na imagem da Figura 35 (d)), mas sem qualquer contribuição para o aumento da tenacidade ao impacto do metal de solda.

Figura 35 – Superfície de Fratura das Juntas Soldadas 01, 02, 03 e 04. (a) Superfície de Fratura do Metal de Solda da Junta 01. (b) Superfície de Fratura do Metal de Solda da Junta 02. (c) Superfície de Fratura do Metal de Solda da Junta 03. (d) Superfície de Fratura do Metal de Solda da Junta 04. Aumento de 1000 vezes.



Fonte: Autoria própria.

6.CONCLUSÃO

Após análise dos resultados, observou-se que a variação nos valores de corrente não teve um impacto significativo na melhoria das propriedades de dureza e tenacidade à fratura do aço ASTM 335 P22.

Por outro lado, constatou-se que as microestruturas encontradas em todas as regiões das juntas 01, 02, 03 e 04 foram compatíveis com as microestruturas previamente descritas na literatura para o aço ASTM 335 P22. Isso indica a eficácia das condições de pré-aquecimento, temperatura de interpasse e tratamento térmico de pós-soldagem, uma vez que essas microestruturas esperadas foram obtidas. Portanto, esses resultados destacam a importância desses parâmetros no controle da microestrutura e, conseqüentemente, na obtenção das propriedades desejadas de dureza e tenacidade à fratura do aço ASTM 335 P22.

Ao analisar os ensaios de microdureza realizados em conformidade com a norma N-133 Rev. P de 2023 da Petrobras, notamos um aumento nos valores de microdureza na ZTA e no MS à medida que a energia de soldagem aumenta nas juntas 01, 03 e 04. De acordo com essa norma, a dureza máxima permitida na ZTA e MS não deve exceder 250 HV, o que sugere que essas juntas não atendem a esse critério. Por outro lado, na junta 02, observa-se que os valores médios de microdureza na ZTA e MS estão abaixo das especificações recomendadas pela Petrobras.

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy evidenciaram distinções significativas no comportamento entre o metal de base, a zona termicamente afetada pelo calor e o metal de solda. A Tenacidade ao impacto Charpy apresentado por todas as juntas na região do metal de solda ficou muito abaixo, evidenciando uma fratura frágil, demonstrando que a seleção do eletrodo revestido e da vareta de soldagem tem papel importantíssimo na resistência da junta soldada. De acordo com os critérios estabelecidos pela norma N-133 Rev. N de 2023 da Petrobras e pela ASME B31.3 de 2016, todas as juntas soldadas que apresentaram o entalhe no metal de solda seriam reprovadas devido à baixa tenacidade ao impacto Charpy absorvida.

As imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura das regiões do metal de solda de todas as juntas apresentaram um aspecto de fratura frágil com trincas que se propagaram na direção normal ao plano de fratura.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Executar a soldagem do aço ASTM 335 P22 utilizando uma variedade mais ampla de configurações de corrente de soldagem para avaliar a tenacidade à fratura através da técnica CTOD.

Realizar um estudo detalhado de juntas soldadas com os consumíveis E9018-B3, ER90S-B3 e as propriedades mecânicas do aço ASTM 335 P22 usado em caldeiras do setor sucroalcooleiro.

REFERÊNCIAS

- ACARER, M.; ARICI, G.; ACAR, F. K.; KESKINKILIC, S.; KABAKCI, F. Toughness of 2,25Cr-1Mo steel and weld metal. AIP Conference Proceedings, v. 1877:09003, 2017.
- AHMED, S. R.; AGARWAL, L. A.; DANIEL, B. S. S. Effect of Different Post Weld Heat Treatments on the Mechanical properties of Cr-Mo Boiler Steel Welded with SMAW Process. Materials Today: Proceedings, v. 2, n. 4–5, p. 1059–1066, 2015.
- AL-MAZROUEE, A.; RAMAN, R. K. S.; IBRAHIM, R. N. Effect of post weld heat treatment on the oxide scaling of Cr-Mo steel weldments. Journal of Materials Processing Technology, v. 164–165, p. 964–970, 2005.
- ARIVAZHAGAN, B.; VASUDEVAN, M. Studies on A-TIG welding of 2.25Cr-1Mo (P22) steel. Journal of Manufacturing Processes, v. 18, p. 55–59, 2015.
- ASM, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys. ASM HANDBOOK, v.1, 2005.
- ASM, Failure Analysis and Prevention. ASM HANDBOOK, v.11, 2002.
- ASME B 16.25. Buttwelding ends. American Society of Mechanical Engineering, 38 p. 2017.
- ASME 31.3. Process Piping. Code for Pressure Piping. American Society of Mechanical Engineering, 2016.
- ASTM A 335/A 335 – 03, Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service. American Society for Testing Materials, 2003.
- ASTM E23 – 18, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. American Society for Testing Materials, New York, 2018.
- ASTM E92 – 03, Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials. American Society for Testing Materials, New York, 2003.
- ASTM E370 – 19, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing Materials, New York, 2019.

AWS A 5.5/A 5.5M, Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. American Welding Society, 2022.

AWS A 5.18/A 5.18M, Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. American Welding Society, 2005.

BAKER, T. N. Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 43, n. 4, p. 264–307, 2016.

BEN. Balanço energético nacional, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>. Acessado em 27/05/2022.

CAMPOS, J. P. M. Estudo dos efeitos dos parâmetros de soldagem nas características metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas de aço carbono soldadas por arco elétrico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santos, Vitória/ES, 2015.

CARDOSO, B. R.; COMELI, F. W.; SANTANA, R. M.; FURTADO, H. C. Previsão de vida em tubos de caldeiras com base na medição da espessura da camada de óxido por ultrassom. *Revista Materia*, v. 16, n. 4, p.819–829, 2011.

CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M.; Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. *Revista Química nova*, v. 44, n. 1, p. 35–40, 2021.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos. 7ª ed. Ampl. e Rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderurgicos comuns. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

COZZA, L. M. Estudo da técnica da dupla camada na soldagem do aço A131 GRAU AH36. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande – Escola de Engenharia, Rio Grande, 2018.

DUTRA, W. T. Soldagem a arco elétrico assistida por aquecimento indutivo localizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2017.

EREN, S. E.; TONTI, A.; PETROVSKI, B.; VENTZKE, V.; KOÇAK, M. Testing and characterization of service exposed P22 welded steel. 63rd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding Istanbul, Turkey, 2010.

FORTES, C. Esab. Metalurgia da soldagem. Brasil: Editado Pelo Autor, 94p. 2004

FUNDERBUCK, R. S. The Importance of Interpass Temperature. Welding Innovation, v. XV, n. 1, p. 31–32, 1998.

GUEDES, R. P. Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

IZAKI, T.; KABAYASHI, T.; KUSUMOTO, J.; KANAYA, A. A creep life assessment method for boiler pipes using small punch creep test. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 86, n. 9, p. 637–642, 2009.

JAFARIKHORAMI, H. Effect of austenitic stainless steel cladding on the high-temperature oxidation resistance of ferritic 2.25Cr-1Mo (Grade 22) steel using the SMAW process. Journal of Composites and Compounds, v. 3, p. 99–105, 2021.

JEYAPRAKASH, N.; HAILE, A.; ARUNPRASATH, M. The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review. The International Journal Of Engineering And Science, v. 4, p. 11-20, 2015.

JIA, W.; PI, A.; ZHAO, Z.; WANG, S.; WEI, C.; JIE, Z.; HUANG, F. Study on Intrinsic Influence Law of Specimen Size and Loading Speed on Charpy Impact Test. Materials, v. 15, n. 11, 2022.

JORGE, J. C. F.; MONTEIRO, J. L. D.; GOMES, A. J. C.; BOTT, I. S.; SOUZA, L. F. G.; MENDES, C. M.; ARAÚJO, L. S.; Influence of welding procedure and

PWHT on HSLA steel weld metals. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 1, p. 561–571, 2019.

JÚNIOR, A. S. L.; COSTA, R. M. C.; SOUZA, L. F. G.; JORGE, C. F. J. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do Aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e GMAW. *Soldagem e Inspecao*, v. 19, n. 3, p. 200–211, 2014.

JÚNIOR, C. R. Z. Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A335 Gr.P22 através do deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD). Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014.

JÚNIOR, D. R. L. Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

JÚNIOR, J. C. S.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S. D. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. *Soldagem e Inspeção*, v. 18, n. 2, p. 176–195, 2013.

JÚNIOR, M. F. S. Avaliação do comportamento do aço ASTM 131AH36 submetido a multipasses de deposição por soldagem SMAW e criogenia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, Rio Grande, 2019.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, p. 655–674, 2013.

KIM, B. Welding and post weld heat treatment of 2,25%Cr – 1%Mo steel. Thesis (Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering). University of Wollongong, 2005.

KING, B. Welding and post weld heat treatment of 2.25%Cr-1%Mo Steel. M. Eng thesis. University of Wollongong – Faculty of Engineering, 2005.

KLAS, W. *Welding processes handbook*, New York: CRC Press Ltd, 2003.

KRISHNA, A.; DUTTA, S.; SUBRAMANIAN, K.; PANDA, A. K.; MURUGAIYAN, P.; ROY, R. K.; Evaluation of Microstructural and Mechanical Behaviours of Tempered 2.25Cr–1Mo Steel Through Electromagnetic Characterization. Transactions of the Indian Institute of Metals, v. 71, p. 2395–2402, 2018.

KUMAR, V.; MITTAL, M.; GOYAL, D.; GOYAL, T.; DANG, R. K.; BAHL, SHASHI. Mechanical and microstructural behaviour of weldment of two low alloy steels using MIG. Materials Today: Proceedings, v. 45, p. 5303–5307, 2021.

KUTELU, B. J.; SEIDU, S. O.; EGHABOR, G. I.; IBITOYE, A. I. Review of GTAW Welding Parameters. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, v. 6, n. 5, p. 541–554, 2018.

LISAUSKAS, J. L. S. Objeto De Aprendizagem Para Apoio Ao Processo Ensino-Aprendizagem De Seleção De Tecnologias Para Tratamento De Água Em Caldeiras. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental). Universidade de Ribeirão Preto – Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Ribeirão Preto, 2017.

MAGMA SOLDAS. Disponível em:<<https://www.magmasoldas.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Magma-catalogo-21x29cm-WEB-180918.pdf>>. Acesso em 20/08/2022.

MARQUES, F. M.; COSTA, R. C.; GALINDRO, G. N.; ROCHA, A. S. Análise de desgaste abrasivo do revestimento duro a base de carbonetos de cromo depositado por SMAW. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 20, n. 2, p. 13–23, 2016.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas Equações Úteis em Soldagem (Some handy equations for welding). Revista Soldagem e Inspecao, v. 19, n. 1, p. 91–102, 2014.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3ª ed. Belorizonte/MG: Editora UFMG, 2011.

Ministério do Trabalho e Previdência. NR-13: Caldeiras, Vasos de pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento, 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-1.846-de-1-de-julho-de-2022-412291966>>.

NETO, I. B. L. Técnicas e Metodologias Para a Análise de Carbetos no Aço Ferrítico 2,25Cr-1,0Mo. Projeto de graduação (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2019.

NEVES, M. F.; KALAKI, R. B. Bioenergy From Sugarcane [Livro eletrônico]. Organização: Marcos Fava Neves e Rafael Bordonal Kalaki. 1ª ed. Guariba/SP: SOCICANA, 2020.

NILES, R. W.; JACKSON, C. E. Weld Thermal Efficiency of the Gtaw Process. *Welding Journal*, v. 54, n. 1, p. 25–32, 1975.

ODEBIYI, O. S.; ADEDAYO, S. M.; TUNJI, L. A.; ONUORAH, M. O. A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes. *Cogent Engineering*, v. 6, n. 1, 2019.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PEREIRA, I. Z.; SANTOS, I. F. S.; SILVA, H. L. C.; BARROS, L. M. Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira Brasil com enfoque no potencial de geração de energia. *Revista Brasileira de Energia*, v. 25, n. 2, p. 111–130, 2020.

PIMENTA, J. S. Soldagem de reparo do aço 9Cr-1Mo Grau 9 sem tratamento térmico posterior. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PRAKASHAM, G.; KRISNA, L. S. R.; KUMAR, A. S.; KANDASAMY, J. Microstructure characterization and mechanical properties of 2.25Cr-1Mo steel pipes using pulsed current GTAW. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 4098–4107, 2022.

QIU, S.; ZHANG, L. Application of nondestructive testing in inspection of boiler and pressure vessel and pressure piping. *Technical Gazette*, v. 28, n. 6, p. 1864–1870, 2021.

RIBEIRO, H. V. Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas a laser em um aço ARBL. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, Lorena/SP, 2016.

RIGUEIRA, G.; FURTADO, H. C.; LISBOA, M. B.; ALMEIDA, L. H. Evolução microestrutural e alteração de dureza na bainita e na perlita em aços 2,25Cr1Mo após tratamento de envelhecimento. *Revista Matéria*, v. 16, n. 4, p. 857–867, 2011.

ROCCO, C. D. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: Um estudo de caso na indústria de alimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Carlos, 2011.

SANTOS, M. R. N. Caracterização de pré-formas de aços 2,25Cr-1,0Mo fabricadas via manufatura aditiva por deposição a arco com e sem resfriamento ativo por quase-imersão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia/MG, 2022.

SAURAW, A.; SHARMA, A. K.; FYDRYCH, D.; SIROHI, S.; GUPTA, A.; SWIERCZYNSKA, A.; PANDEY, C.; ROGALSKI, G. Study on microstructural characterization, mechanical properties and residual stress of GTAW dissimilar joints of p91 and p22 steels. *Materials*, v. 14, p. 6591, 2021.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. Aços e Ligas especiais. 3ª ed. Revisada. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

SILVA, D. F. Influência do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L soldadas pelo processo GTAW. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2017.

SILVA, R. O. DA. Estudo da fragilização pelo hidrogênio no aço 2,25Cr-1Mo-0,25V submetido a tratamentos térmicos de envelhecimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2016.

SIRIN, K.; SIRIN, S. Y.; KALUC, E. Influence of the interpass temperature on $t_{8/5}$ and the mechanical properties of submerged arc welded pipe. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 238, p. 152–159, 2016.

SIROHI, S.; GUPTA, A.; PANDEY, C.; VIDYARTHY, R. S.; GUGULOTH, K.; NATU, H. Investigation of the microstructure and mechanical properties of the laser welded joint of P22 and P91 steel. *Optics and Laser Technology*, v. 147, 2022.

SKOBIR, D. A. High - strength low - alloy (HSLA) steels. *Materials and technology*, v. 45, n. 4, p. 295–301, 2011.

SOUZA, S. A. DE. *Ensaio mecânicos dos materiais metálicos, fundamentos teóricos e práticos*. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

TAMMASOPHON, N.; HOMHRAJAI, W.; LOTHONGKUM, G. Effect of postweld heat treatment on microstructures and hardness of TIG weldment between P22 and P91 steels with Inconel 625 filler metal. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, v. 21, n. 1, p. 93–99, 2011.

Tech-alloys. Disponível em: <[https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/acos-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20CHROM%20903%20R%20\(ER%2090S-B3\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/acos-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20CHROM%20903%20R%20(ER%2090S-B3).pdf)>. Acesso em 20/08/2022.

THAKUR, P. P.; CHAPGAON, A. N. A Review on Effects of GTAW Process Parameters on weld. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, v. 4, p. 136–140, 2016.

THONG-ON, A.; BOONRUANG, C. Design of boiler welding for improvement of lifetime and cost control. *Materials*, v. 9, n. 11, 2016.

União da indústria de cana-de-açúcar – ÚNICA. Boletim “Bioeletricidade em números”, 2020.

URIBE, A. M. M.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; SANTOS, V. R. Influência da polaridade sobre a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido. *Soldagem e Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 429–441, 2017.

VENKATESH, K. S.; ROY, A. S. Development and installation of high pressure boilers for co-generation plant in sugar industries. *Smart Grid and Renewable Energy*, v. 1, p. 51–53, 2010.

WEMAN, K. *Welding Processes Handbook*. Woodhead Publishing, p. 193, 2003.

WONGPANYA, P.; BOELLINGHAUS, T.; LOTHONGKUM, G.; KANNENGIESSER, T. Effects of preheating and interpass temperature on stresses in S 1100 QL multi-pass butt-welds. *Weld World*, v. 52, p. 79–92, 2008.

YANG, H.; KIM, S. A study on the mechanical strength change of 2.25Cr-1Mo steel by thermal aging. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and processing*, Elsevier, 2001.

ZHANG, L.; KANNENGIESSER, T. Austenite grain growth and microstructure control in simulated heat affected zones of microalloyed HSLA steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 613, p. 326–335, 2014.