



C A P Í T U L O 4

ANÁLISE DE JUNTAS SOLDADAS DO METAL DE BASE TUBO DE AÇO-CARBONO ASTM A106/A106M-19A GR. B COM METAIS DE ADIÇÃO ER80S-G E ER70S-3 PELO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG (GTAW) UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Marcos Alexandre Rodrigues Pinto

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)

Amauri Hassui

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Professor Doutor de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)

Rodolfo Rossini Perticarrari

Universidade de São Paulo – USP
Engenheiro e Mestre em Engenharia de Materiais e Manufatura, responsável pela análise de falhas e por vários ensaios laboratoriais na empresa WELDING Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda.

ABSTRACT: The carbon steel pipe welding process is used extensively in oil and gas plants for the extraction, refining and transportation of hydrocarbons. It is known that the oil industry generates a high demand for remanufacturing and maintenance of pipes in its networks, due to the corrosiveness of the fluids to which they are exposed. The aim of this study is therefore to analyze the mechanical properties of the welded joint using the following tests: (1) machining by turning the weld bead reinforcement, (2) metallography with interpretation of micrographs and macrographs using optical microscopy, (3) Vickers hardness, and (4) tensile strength of the welded joint in ASTM A106/A106M-19a grade B carbon steel pipe and base metal specimens. The tests carried out were designed to justify the replacement of the filler metal, ER80S-G welding rods, with ER70S-3, using the TIG welding process (GTAW - Gas Tungsten Arc Welding), with a view to significantly reducing the cost of the filler metal (rod) in the welding process and as an alternative similar filler metal. After analyzing the results presented and then comparing them, it is concluded that it was possible to identify satisfactory technical results and propose the replacement of the filler metal, preserving the strength and mechanical properties of the welded joints required for this process, resulting in a cost reduction in the application of these consumables (rods) and guaranteeing precision work in the oil industry, in its plants and construction sites.

KEYWORDS: oil industry; welded joints; filler metals; welding; steel pipes.

INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás é um setor estratégico para a economia brasileira, responsável por cerca de 10% do PIB industrial do país. Em 2023, a produção média anual de petróleo no Brasil atingiu 3,402 milhões de barris/dia, um aumento de 12,57% em relação ao recorde anterior estabelecido em 2022, que foi de 3,022 milhões de barris/dia. Com a produção nacional de petróleo projetada para alcançar 5,2 milhões de barris por dia em 2031, a demanda por materiais e equipamentos resistentes à corrosão e ao desgaste é crescente (ANP, 2023).

Os aços-carbono são amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás, e em oleodutos, para fins de extração e transporte desses combustíveis (Santos; Souza; Bezerra, 2019). Contudo, o aço-carbono possui limitações quanto à sua utilização nesse setor, principalmente devido à sua baixa resistência à corrosão (Melo; Urtiga Filho, 2015).

A montagem e a fabricação de tubulações em refinarias brasileiras ainda exigem grande quantidade de mão de obra especializada. Cerca de 40% do tempo de trabalho necessário para construir uma nova planta petroquímica são gastos em atividades relacionadas à tubulação (Sgobbi, 2015). Nesse sentido, a soldagem é uma técnica utilizada na indústria contemporânea, sendo o método mais importante de união de metais em escala industrial. Sua aplicação é vasta desde a microeletrônica até a construção de navios e estruturas de grande porte. Além de ser usada em estruturas simples, como portas e grades, a soldagem também é empregada em situações de alta complexidade e responsabilidade, como na indústria petrolífera e nuclear (César Neto, 2015).

Para minimizar prejuízos, as empresas petroquímicas têm investido no desenvolvimento de novos materiais similares como a substituição do metal de adição ER80S-G pelo ER70S-3 em juntas soldadas de aço-carbono ASTM A106/A106M-19a Gr. B, utilizando o processo de soldagem TIG.

OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo consistiu em analisar a viabilidade de substituição do metal de adição ER80S-G pelo ER70S-3 em junta soldada, aplicando-se o processo de soldagem TIG no metal base aço-carbono ASTM A106/A106M-19a Gr. B, considerando-se esse processo como uma alternativa favorável no tocante à qualidade e na redução de custo do metal de adição (vareta).

Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

1. Produzir juntas soldadas utilizando ER80S-G e ER70S3 como metais de adição e aço de baixo carbono como metal base, seguindo as diretrizes e parâmetros do processo de soldagem da Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS, normas e certificados de fabricação;
2. Avaliar e comparar as propriedades mecânicas das juntas soldadas, por meio de ensaios de:
 - I usinagem por torneamento do reforço do cordão de solda e, por meio de análise comparativa, verificar a interferência nos resultados dos outros ensaios.
 - I metalografia com análise de micrografias e macrografias por microscopia ótica, para identificar, nas imagens, a presença dos microconstituintes distribuídos pelos pontos da junta soldada, Face (acabamento da zona fundida – ZF), Meio (enchimento da zona fundida – ZF), Transição (da zona de ligação – ZL para zona termicamente afetada – ZTA), Metal base (MB) e raiz.
 - I dureza Vickers, para identificar as variações de dureza pelos pontos distribuídos por toda junta soldada, iniciando pelo Metal base – MB, e transcorrendo pela zona termicamente afetada – ZTA, zona de ligação – ZL até a zona fundida – ZF.
 - I tração de junta soldada, para analisar os resultados e as propriedades mecânicas por meio de: limite de resistência – LR, limite de escoamento – LE e alongamento – AL.
3. Validar o processo em questão com ênfase em manter preservadas as propriedades mecânicas do metal de adição e metal base, para garantir a efetividade da junta soldada e atender às especificações recomendadas pela norma e pelo certificado de fabricação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A preparação e desenvolvimento dos CPs, bem como todos os ensaios, experimentos e utilização de dispositivos, instrumentos e equipamentos em geral foram realizados nos ambientes das oficinas e laboratórios da Escola SENAI de Mogi Guaçu, Faculdade de Tecnologia e Instituto SENAI Nadir Dias de Figueiredo de Osasco-SP e no laboratório WELDING Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda., de Sertãozinho-SP.

A metodologia do artigo baseou-se em elaborar os processos de preparação e planejamento, considerando os seguintes aspectos: especificação e aplicação do metal base e metais de adição, referências técnicas para embasar os procedimentos de execução dos ensaios e experimentos nos corpos de provas e nas juntas soldadas. Sendo assim, as etapas foram realizadas da seguinte forma:

O primeiro passo consistiu em realizar o levantamento bibliográfico sobre os assuntos abordados;

O segundo passo foi pesquisar os custos dos metais de adição (varetas) para comparativo;

O terceiro passo foi desenvolver a parte prática da seguinte forma:

- Preparação dos corpos de prova com a usinagem por torneamento do chanfro (bisel) nas extremidades do tubo;
- Soldagem das juntas utilizando o processo de soldagem TIG e metais de adição ER80S-G e ER70S-3;
- Usinagem por torneamento dos reforços do cordão de solda;
- Corte dos corpos de prova para retirada de amostra para ensaio de dureza e metalografia;
- Lixamento, polimento e ataque químico com reagente para revelação de micro e macrografia nas amostras retiradas;
- Ensaio de micrografia e macrografia por microscopia ótica;
- Ensaio de dureza *Vickers*;
- Montagem de *plugs* nas extremidades dos corpos de prova para ensaio de tração;
- Ensaio de tração considerando-se o limite de resistência LR, limite de escoamento LE, e alongamento AL;

O quarto passo consistiu em analisar os resultados laboratoriais obtidos pelos ensaios mecânicos, acompanhando os requisitos das normas apresentadas no Quadro 1.

Código	Título da Norma
N-76 - PETROBRAS	Materiais de tubulação para instalações de refino e transporte
N-1738 - PETROBRAS	Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados
ASTM A106/A106M-19a	Metal base
ASME B31.3	Tubulação de processos em refinarias de petróleo
ASME B31.4	Tubulações de transporte de líquidos e lamas
ASME B36.10	Tubos de aço soldados e sem costura
ASME IX	Requisitos de qualificação de procedimentos de soldagem, soldadores e ensaio de tração
ASME BPVC Section II Part C	Especificações para varetas de solda, eletrodos e metais de adição
ASTM E3	Guia padrão para preparação de corpos de prova metalográficos
ASTM E384	Método padrão de ensaio de dureza de materiais
NP EN 1090-2	Requisitos técnicos para estruturas de aço

Quadro 1 – Normas consultadas para execução do trabalho

Fonte: produzido pelo autor

Metal base

Como Metal Base – MB, foi utilizado o aço ASTM A106/A106M-19a Gr. B (*Line Pipe*), aço de baixo carbono com boa soldabilidade. Esse material foi elaborado para fabricação de tubos de aço-carbono sem costura (ASME B36.10, 2018), tendo em vista sua aplicação no processo de refino e transporte de óleo, gás, exploração e produção em fornos de refinaria de petróleo, em altas temperaturas. A definição do uso deste material de base é vinculada à exigência das normas (PETROBRAS N-76, 2020) e (ASME B31.3, 2020). A composição química e as propriedades mecânicas desse material estão expressas nas Tabelas 1 e 2, conforme valores obtidos no certificado de fabricação do material.

Composição química (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti
0,20	0,27	0,50	0,01	0,01	0,05	0,06	0,10	0,05	0,01	0,01	0,01

Tabela 1 – Composição química do MB

Fonte: Adaptado de *Peninsula Piping Manufacturing* (2022)

Limite de Escoamento - LE (MPa)	Limite de Resistência - LR (MPa)	Alongamento – AL (%)
281	475	31

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do MB

Fonte: Adaptado de *Peninsula Piping Manufacturing* (2022)

Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

A Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS é um documento fundamental que fornece diretrizes detalhadas aos soldadores e operadores de soldagem. Seu objetivo é garantir a produção de soldas de alta qualidade, segura e conforme aos padrões estabelecidos. Este documento é previsto nas normas técnicas que estabelecem os requisitos para a execução do processo de soldagem em tubulações e equipamentos industriais, garantindo conformidade com os códigos de projeto, fabricação e inspeção, conforme especificado na norma (ASME IX, 2021).

Metal de adição

Metal de adição utilizado para as juntas CPs 70

Para soldagem das juntas dos Corpos de Prova – CPs 70, foi utilizado o metal de adição – MA (ER70S-3), que consiste em uma vareta para soldagem no processo TIG, marca ESAB, descrição OK Tigrod 12.60 2.4 x 1000 mm com a classificação SFA/AWS A5.18. As propriedades química e mecânica estão apresentadas nas tabelas 3 e 4, conforme certificado de fabricação e inspeção.

Composição química (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti+Zr
0,08	0,57	1,03	0,014	0,012	0,06	0,02	0,02	0,06	<0,01	<0,01	0,01

Tabela 3 – Composição química do MA ER70S-3

Fonte: Adaptado de ESAB (2022)

Limite de Escoamento - LE (MPa)	Limite de Resistência - LR (MPa)	Alongamento – AL (%)
420	515	26

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do MA ER70S-3

Fonte: Adaptado de ESAB (2022)

Metal de adição utilizado para as juntas CPs 80

Para soldagem das juntas dos CPs 80, foi utilizado o metal de adição – MA (ER80S-G), que consiste em uma vareta para soldagem no processo TIG, marca *Weld-inox* descrição BARRA WI T1 – 2,40 mm, com a classificação SFA/AWS A5.28. As propriedades química e mecânica estão apresentadas nas tabelas 5 e 6, conforme certificado de fabricação e inspeção.

Composição química (%)								
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0,095	0,997	0,475	0,0111	0,0074	0,4583	0,3337	0,0032	0,4456

Tabela 5 – Composição química do MA ER80S-G

Fonte: Adaptado de *Weld-inox* Soldas Especiais (2023)

Limite de Escoamento – LE (MPa)	Limite de Resistência – LR (MPa)	Alongamento – AL (%)
470	550	19

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do MA ER70S-3

Fonte: Adaptado de *Weld-inox* Soldas Especiais (2023)

Custos dos Metais de adição

Na tabela 7, é possível observar os valores de cotações de três fabricantes de Metais de adição – MAs, e o percentual médio que representa a diminuição do custo entre os consumíveis. O MA ER70S-3 possui uma diminuição de custo de 42% em relação ao ER80S-G.

	ER80S-G	ER70S-3	Diminuição do custo do MA em:
Cotação 1	R\$ 50,00	R\$ 25,00	50%
Cotação 2	R\$ 51,35	R\$ 31,11	39%
Cotação 3	R\$ 21,64	R\$ 13,50	38%
		média	42%

Tabela 7 – Cotações e custos dos MAs em Diadema-SP, Indaiatuba-SP, Campinas-SP, outubro/novembro de 2024

Fonte: produzido pelo autor

Ensaaios

Para facilitar e garantir o planejamento, o controle e a rastreabilidade de cada tipo de ensaio aplicado nos CPs, observa-se na Tabela 8 os tipos de ensaios aplicados para cada um dos Metais de adição – MAs.

CPs	ENSAIOS
CP2-70	USINAGEM DO REFORÇO + TRAÇÃO
CP3-70	USINAGEM DO REFORÇO + DUREZA + METALOGRAFIA
CP4-70	TRAÇÃO
CP5-70	DUREZA + METALOGRAFIA

CP2-80	USINAGEM DO REFORÇO + TRAÇÃO
CP3-80	USINAGEM DO REFORÇO + DUREZA + METALOGRAFIA
CP4-80	TRAÇÃO
CP5-80	DUREZA + METALOGRAFIA

Tabela 8 – Tipo de ensaio aplicado em relação ao MA (2024)

Fonte: produzido pelo autor.

Usinagem por torneamento do reforço do cordão de solda da junta soldada

Para usinagem do reforço do cordão de solda da junta soldada, foi adotada a técnica de torneamento da superfície cilíndrica externa entre pontas, tendo em vista atingir alto grau de concentricidade entre os corpos, placa e contraponto giratório. Essa operação foi realizada no torno mecânico Tormax 30. Após o processo de usinagem, foi realizada a verificação da área usinada com a régua de luz, para analisar a superfície paralela junto ao tubo (MA) – Figura 1.

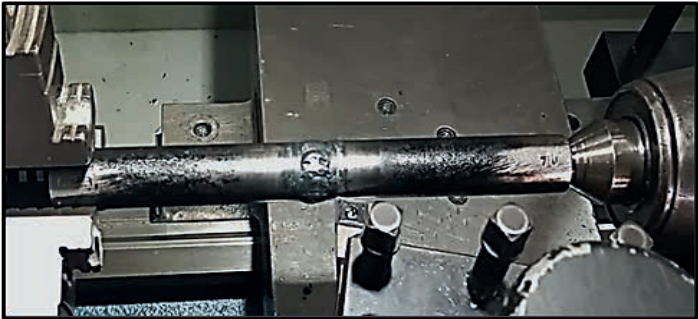


Figura 1 – Torneamento entre pontas do reforço do cordão de solda da junta soldada (2023)

Fonte: produzido pelo autor.

Ensaio de micrografia

Para realizar os ensaios de micrografia, foi utilizado um microscópio óptico OLYMPUS GX41 com computador acoplado, aplicando-se um grau de ampliação de 500X. Foi adotado um método (esquema) para identificar os pontos nos quais foram aplicados os ensaios de micrografias, conforme a Figura 2. Foram adotados 5 pontos distribuídos da seguinte forma:

Ponto 1, na face, no acabamento da ZF com e sem reforço do cordão de solda.

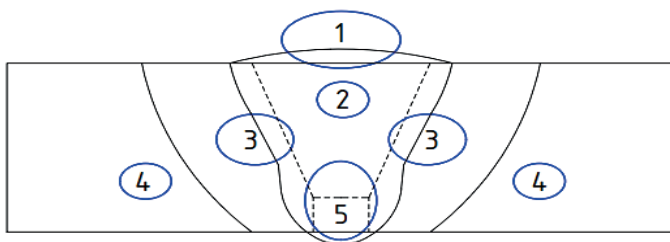
Ponto 2, no meio do enchimento da ZF.

Ponto 3, na transição entre a ZL e ZTA.

Ponto 4, no MB.

Ponto 5, na raiz.

MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA ENSAIO DE MICROGRAFIA



1 - FACE (ACABAMENTO DA ZF)

2 - MEIO (ENCHIMENTO DA ZF)

3 - TRANSIÇÃO (ZL + ZTA)

4 - METAL BASE (MB)

5 - RAIZ

Figura 2 – Método (esquema) distribuição dos pontos para os ensaios de micrografia (2024)

Fonte: produzido pelo autor.

Ensaio de macrografia

Para realizar os ensaios de macrografia, foi utilizado um microscópio óptico OLYMPUS SZ61 com computador acoplado, aplicando-se um grau de ampliação de 10X.

Ensaio de dureza

Para os ensaios de dureza, foi utilizado um microdurômetro digital (HV-Vickers *Hardness Tester*, marca *Future-Tech Corp FM, Tokyo, Japan*), com carga de 500 gf e tempo de permanência de carga de 13 segundos para cada medição, um penetrador piramidal de diamante com base quadrada, conforme prevê a norma (ASTM E384, 2022). A Figura 3 indica, por meio de um esquema, o (método) pelo qual foram aplicados os pontos durante o ensaio e a medição da dureza, que, iniciaram-se no ponto 1 e percorreram aproximadamente 21 mm de comprimento até o ponto 21, transcorrendo pelas regiões de MB, ZTA, ZL, ZF – ZL, ZTA, MB.

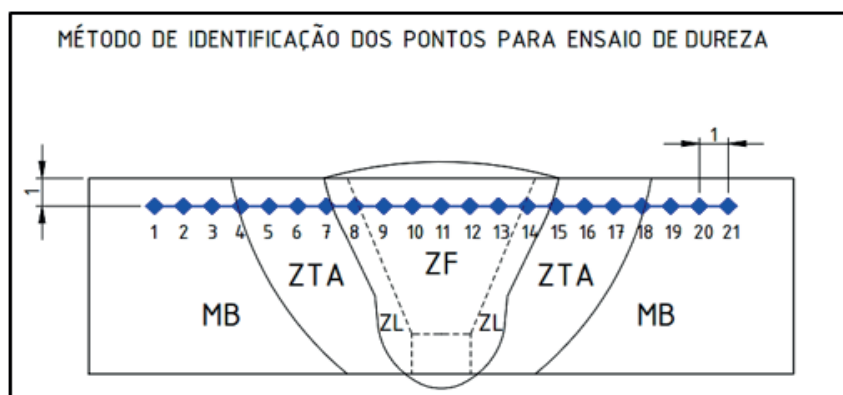


Figura 3 - Esquema (método) de aplicação dos pontos no ensaio de dureza

Fonte: produzido pelo autor.

Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma – (ASME IX, 2021), utilizando-se o equipamento EMIC DL60000 com capacidade de 600 kN. Os dados dos ensaios foram coletados e gerados no computador acoplado, por meio do *software* Tesc versão 3.01.

RESULTADOS

Análise da soldagem

Os procedimentos para preparação e execução da soldagem foram realizados conforme determina a Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS, que é elaborada seguindo as diretrizes da Norma (ASME IX, 2021). Sendo assim, na preparação da junta e soldagem de raiz, enchimento e acabamento tanto para o

MA ER80S-G quanto para o ER70S-3, os resultados obtidos foram satisfatórios e atenderam aos parâmetros adotados para cada etapa descrita na EPS. A variação de amperagem e tensão dos MAs foi coletada durante a execução da soldagem, em que, para cada MA, foram estabelecidos os parâmetros durante o processo de execução da raiz, enchimento e acabamento, considerando um mínimo e máximo para cada processo. Conforme apresentado na Tabela 9, para o MA ER80S-G obteve-se um aumento de 2,3% na raiz, enchimento e acabamento no mínimo e máximo para amperagem, 11,4% na raiz e 12,5% no enchimento e acabamento no mínimo, e 3,5% na raiz no máximo em relação ao MA ER70S-3.

	Amperagem					
	ER70S-3	ER80S-G	Aumento em %	ER70S-3	ER80S-G	Aumento em %
	mínima	mínima		máxima	máxima	
Raiz	85	87	2,3%	87	89	2,3%
Enchimento e Acabamento	85	87	2,3%	87	89	2,3%
	Voltagem					
	ER70S-3	ER80S-G	Aumento em %	ER70S-3	ER80S-G	Aumento em %
	mínima	mínima		máxima	máxima	
Raiz	8,6	9,7	11,4%	11,3	11,7	3,5%
Enchimento e Acabamento	8,4	9,6	12,5%	12,9	12,9	0,0%

Tabela 9 – Comparativo e aumento em % na amperagem e voltagem dos MAs (2024)

Fonte: produzido pelo autor.

Micrografia

As imagens das microestruturas foram constituídas seguindo o esquema e pontos da Figura 2, e apresentadas nas Figuras 4, 5, 6, 7 e 8. Percebe-se maior temperabilidade dos corpos de prova “80”, proporcionada pelo maior teor de carbono e elementos de liga, resultando em uma microestrutura mais refinada e resistente em comparação com os corpos de prova “70”. Nos CPs “80”, observam-se bainita, ferrita acicular (ferrita de *Widmanstätten*) em maior proporção. Em contraste, os CPs “70” apresentam uma microestrutura menos complexa, com grãos de ferrita mais grossos e poligonais e menor quantidade de perlita. A complexidade das diversas morfologias formadas em todas as regiões dos CPs é altamente influenciada por pequenas variações locais de temperatura máxima atingida, taxa de resfriamento e composição química. Essas variações resultam em uma microestrutura heterogênea, na qual cada região da solda reflete as sutis diferenças nas condições térmicas e químicas.

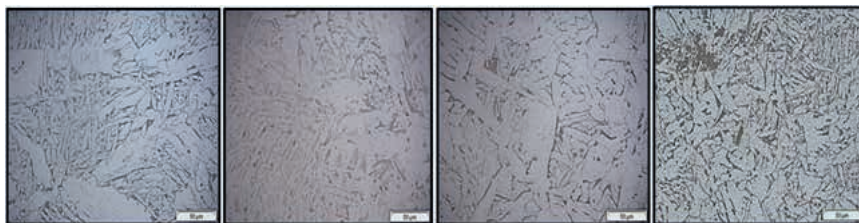


Figura 4 – Micrografias do ponto 1 do esquema – CP3-70, CP3-80, CP5-70 e CP5-80 (50µm)

Fonte: produzido pelo autor.

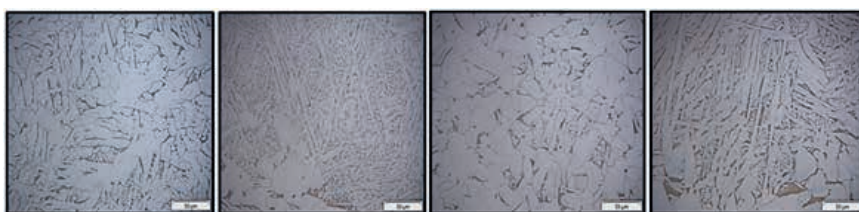


Figura 5 – Micrografias do ponto 2 do esquema – CP3-70, CP3-80, CP5-70 e CP5-80 (50µm)

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 6 – Micrografias do ponto 3 do esquema – CP3-70, CP3-80, CP5-70 e CP5-80 (50µm)

Fonte: produzido pelo autor.

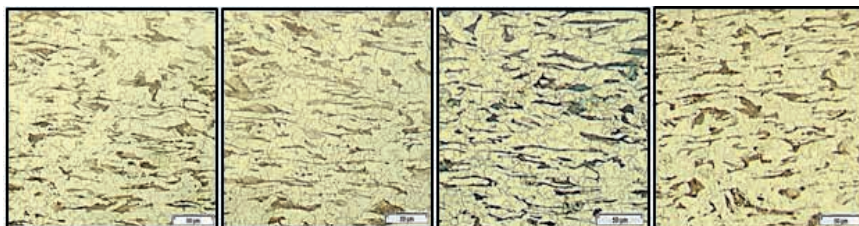


Figura 7 – Micrografias do ponto 4 do esquema – CP3-70, CP3-80, CP5-70 e CP5-80 (50µm)

Fonte: produzido pelo autor.

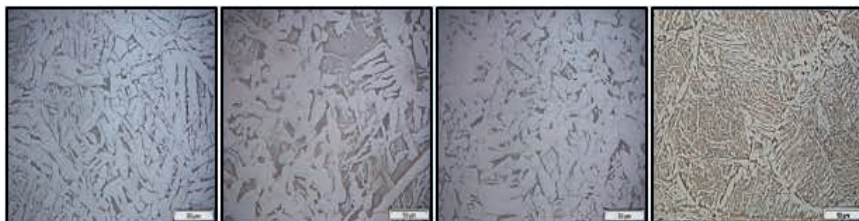


Figura 8 – Micrografias do ponto 5 do esquema – CP3-70, CP3-80, CP5-70 e CP5-80 (50µm)

Fonte: produzido pelo autor

Macrografia

A Figura 9 apresenta as macrografias das juntas soldadas.

CP3 70 – Observa-se uma junta soldada com boa simetria e, na raiz, uma penetração discreta mais alargada e com um bom visual de preenchimento de MA por toda a junta; é possível também identificar a divisão dos passes da raiz com o enchimento e acabamento. Pode-se perceber ainda o reforço do cordão de solda usinado e visualmente isenta de porosidade interna, trincas e mordeduras.

CP3 80 – Na raiz observa-se uma penetração excessiva mais estreita, que também apresenta uma simetria em conformidade, e visualmente sem irregularidades de preenchimento do MA. A junta apresenta discretamente menor quantidade de MA depositado em relação ao CP3 70, e ângulo de bisel preservado em relação à abertura da junta na fusão junto ao MB. Observa-se uma junta mais estreita no total, livre de porosidade interna e trincas. Apresenta ainda pequena mordedura ao lado esquerdo do cordão.

CP5 70 – Observa-se uma junta soldada com reforço do cordão sem ser usinado, simetria com MA ligeiramente mais concentrado ao lado esquerdo e mais afinado ao lado direito. Na raiz, observa-se uma penetração sem excesso e um bom preenchimento de MA por toda junta, a qual apresenta-se visualmente isenta de porosidade interna, trincas e mordeduras, além de uma menor quantidade de MA depositado no seu total e uma menor largura do cordão, em comparação ao CP5 80.

CP5 80 – Observa-se uma junta soldada com morfologia similar ao CP3 70. Apresenta também boa simetria, e na raiz nota-se uma penetração mais excessiva em relação ao CP5 80, mais alargada e com um bom preenchimento de MA. É possível identificar a divisão dos passes da raiz com o enchimento e acabamento. Observa-se reforço do cordão não usinado. Visualmente apresenta-se isenta de porosidade interna e trincas, assim como mordedura bem discreta ao lado direito do cordão. Há uma maior quantidade de MA depositado em relação ao CP5 70 e, conseqüentemente, uma maior largura do cordão e reforço excessivo.

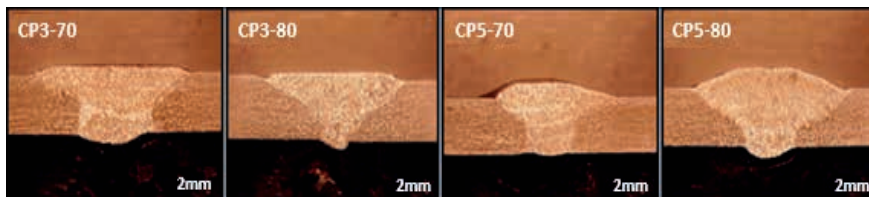


Figura 9 – Macrografias das juntas soldadas (10x)

Fonte: produzido pelo autor.

Ensaio de dureza

Na Figura 10 são observados os resultados dos ensaios de dureza das juntas soldadas.

Nos CP3-70 e CP5-70 há valores aproximados e condições semelhantes entre eles. O CP3-70 passou pelo processo de usinagem do reforço do cordão de solda. Ambos, nas regiões de MB, apresentam valores mais baixos, em função de a região não ser afetada termicamente. Assim, a transformação de estrutura não ocorreu em função do aquecimento, fusão e resfriamento durante processo de soldagem. Nas regiões de ZTA, ZL e ZF, os valores começam a aumentar em relação ao MB, chegando ao ponto máximo na região de ZF. Em função de ser termicamente afetada e com aumento da temperatura, a estrutura inicia-se na ZTA parcialmente transformada, passando pela ZL transformada em granulação fina, chegando até a região da ZF com a granulação grosseira até a fusão e resfriamento. Conforme a temperatura aumenta e recebe o resfriamento rápido, típico de processo de soldagem, os valores de dureza igualmente vão aumentando, partindo dos valores mais baixos que se referem ao MB até a ZF. Essas variações ficam evidentes no gráfico da Figura 10.

CP3-80 e CP5-80 – Apresentam condições, processos aplicados e resultados muito similares aos CPs-70, percebendo-se um aumento dos valores de durezas em relação aos CPs-70, talvez por conta de que o teor de carbono dos CPs-80 seja ligeiramente superior em relação ao CPs-70.

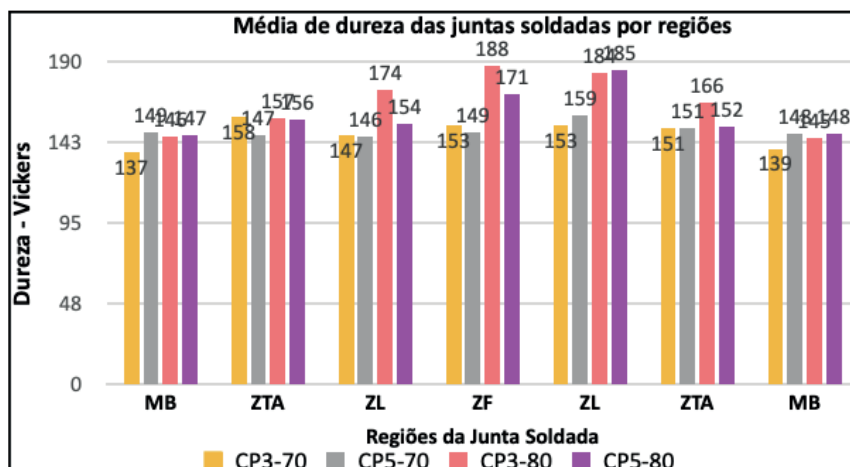


Figura 10 – Gráfico de resultados dos ensaios de dureza

Fonte: produzido pelo autor.

Ensaio de tração

Os ensaios de tração permitiram analisar a influência dos MAs no comportamento da junta soldada, quando submetida ao esforço de tração. Considerando-se a Figura 11, percebe-se, em todos os CPs, que a ruptura aconteceu fora da ZF e ZTA, ou seja, fora do cordão de solda (junta soldada). Todos os CPs romperam-se no Metal Base, caracterizando uma junta soldada e cordão de solda eficaz e com resultado positivo.

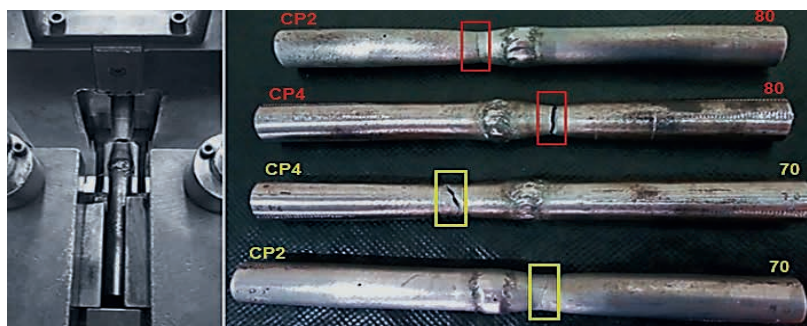


Figura 11 – CPs Tracionados e rompidos fora da ZF e ZTA

Fonte: produzido pelo autor.

Limite de resistência LR

Os, CP2-70 e CP2-80 tiveram o reforço do cordão de solda usinados; o CP2-70 com 1,40 mm de profundidade de corte e o CP2-80 com 1,25 mm. Mesmo com a usinagem do reforço, ambos obtiveram os maiores valores de resistência (519 e 509 MPa) em comparação aos CPs que não foram usinados. Portanto, apresentaram valores satisfatórios de resistência mecânica em comparação ao valor mínimo do MB. Mesmo com esse valor ligeiramente superior, os CP4-70 e CP4-80, com valores iguais (504 MPa) também atenderam ao valor mínimo de 475MPa do MB. No gráfico apresentado da Figura 12, é possível observar os valores obtidos dos CPs em comparação ao valor de fabricação do MB.

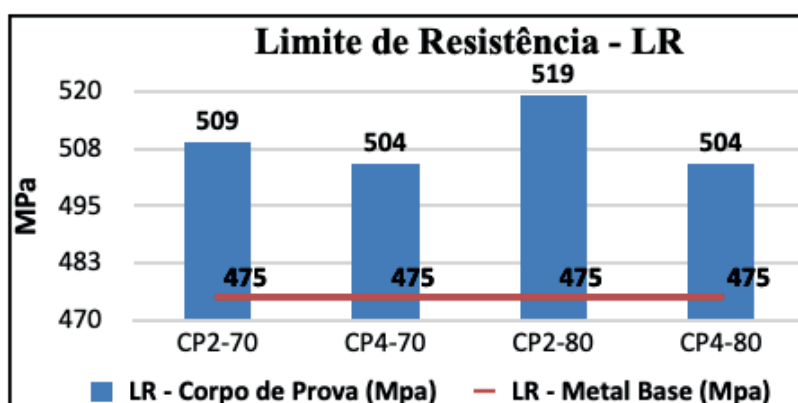


Figura 12 – Gráfico dos resultados dos ensaios de LR x MB

Fonte: produzido pelo autor.

Limite de escoamento LE

Os CPs apresentaram valores de limite de escoamento semelhantes. Mesmo com o ensaio de usinagem do reforço do cordão de solda aplicados nos CP2-70 e CP2-80, os resultados foram satisfatórios considerando todos os CPs. Esses resultados podem evidenciar que o LE não foi influenciado pelos tipos dos MAs. Percebe-se que, pelos procedimentos executados no processo de soldagem das juntas, mesmo não tendo havido o pré e pós-aquecimento, conforme carbono equivalente CE, as temperaturas alcançadas durante a soldagem parecem não ter influenciado na ductibilidade dos materiais soldados. No gráfico da Figura 13, é possível observar os valores obtidos dos CPs em comparação ao valor de fabricação do MB.

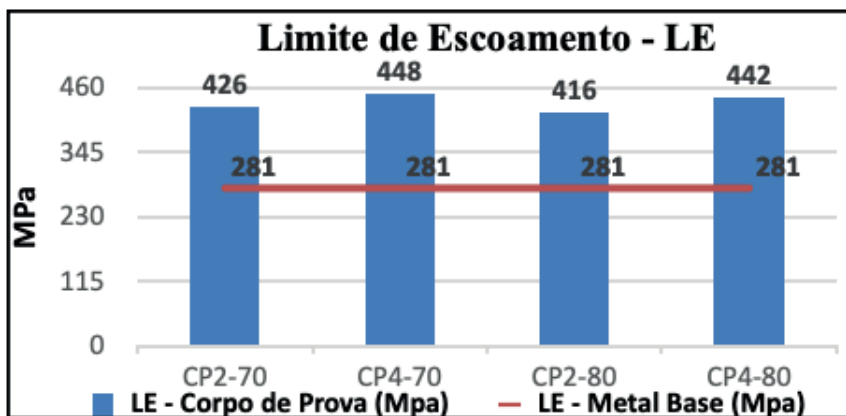


Figura 13 – Gráfico dos resultados de LE x MB

Fonte: produzido pelo autor.

Alongamento AL

Os valores de alongamento foram constituídos conforme apresentam as Figuras 14 e 15. Os CPS 2-70 e 2-80 obtiveram valores maiores – 36 e 34%. Mesmo com o ensaio de usinagem do reforço do cordão de solda, os resultados foram satisfatórios considerando-se todos os CPs, o que evidencia que o AL não foi influenciado pelos tipos dos MAs e pelo ensaio de usinagem. O alongamento percentual do valor de fabricação do MB sem solda é de 31%. Todos os outros CPs dos ensaios possuem valores acima do MB, o que define e evidencia mais uma vez que a ductibilidade dos CPs foi preservada e melhorada. No gráfico da Figura 16, é possível observar os valores obtidos dos CPs em comparação ao valor de fabricação do MB.



Figura 14 – CP com marcação de alongamento inicial (L0)

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 15 – CP com marcação de alongamento final (Lf)

Fonte: produzido pelo autor.

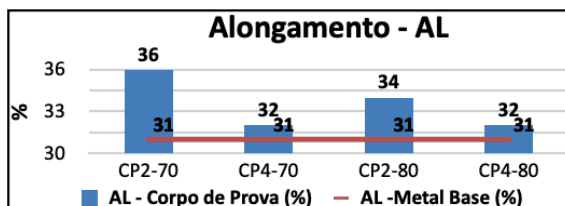


Figura 16 – Gráfico de resultados de LE x MB

Fonte: produzido pelo autor.

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitiram concluir que:

- Após a caracterização das soldas, experimentos e análises realizadas, podemos afirmar que é viável a substituição do metal de adição ER80S-G pelo ER70S-3, utilizando-se o processo de soldagem TIG no metal base aço-carbono ASTM A106/A106M-19a Gr. B para produção de juntas soldadas.
- Foi possível validar que a produção de juntas soldadas utilizando-se o metal de adição ER70S-3 e metal base ASTM A106/A106M-19a Gr. B mostrou-se mecanicamente preservada, considerando as diretrizes e parâmetros estabelecidos pela EPS, normas e certificados de fabricação.
- O metal de adição ER70S-3, apresentou também uma diminuição de custo da vareta de 42% em relação ao ER80S-G, tornando-se uma opção viável e econômica.

Com relação aos resultados dos ensaios mecânicos, podemos concluir que:

- na usinagem por torneamento do reforço do cordão de solda – após a análise comparativa, pode-se afirmar que não houve interferência desse ensaio que pudesse causar impacto no desempenho dos outros ensaios, e sim, em alguns casos apresentaram-se resultados mais expressivos em relação aos CPs que não foram usinados. No ensaio de dureza, o CP3-70 passou pelo processo de usinagem e constatou-se que, nas regiões de MB, foram obtidos valores mais baixos (137 e 139 *Vickers*) em relação aos CPs que não foram usinados (148 e 149 *Vickers*). Isso se dá em função de a região não ser afetada termicamente durante o ensaio de usinagem. No ensaio de tração, no limite de resistência (LR), os CPs 2-70 e 2-80 tiveram o reforço do cordão de solda usinados e, mesmo com a usinagem do reforço, ambos obtiveram os maiores valores de resistência (519 e 509 MPa) em comparação aos CPs que não foram usinados. Para o alongamento (AL), os CP2-70 e CP2-80 obtiveram valores maiores (36 e 34%), evidenciando que não foram influenciados pelo ensaio de usinagem.

- I metalografia com análise de micrografias e macrografias, na:
 - micrografia – observou-se que, nos CPs-80, a bainita e ferrita de *Widmanstätten* apresentaram-se em maior proporção. Os CPs-70 apresentaram uma microestrutura com grãos de ferrita mais grossos e poligonais e menor quantidade de perlita. As morfologias geradas são influenciadas pelas variações de temperatura atingida, taxa de resfriamento e composição química. Isso resultou em uma microestrutura heterogênea, considerando ligeiramente algumas diferenças nas condições térmicas e químicas em cada região da solda. Essas variações não interferiram nos resultados dos ensaios mecânicos, preservando-se as microestruturas distribuídas pelos pontos da junta soldada, Face (acabamento da ZF), Meio (enchimento da ZF), Transição (da ZL para ZTA), Metal base (MB) e raiz.
 - Macrografia – perceberam-se juntas bem definidas, com boa simetria. Apresentou-se algumas descontinuidades, sendo: reforço excessivo, mordeduras e penetração excessiva, mesmo assim, nenhum CP rompeu-se na região da junta soldada no ensaio de tração, caracterizando-se, dessa forma, como uma junta mecanicamente bem produzida, e de acordo com os parâmetros de soldagem descritos e solicitados na EPS. Todos os cordões de solda apresentaram boa penetração total da junta soldada, e a abertura de raiz na medida de 2,0 mm foi suficiente para receber um sobremetal de cordão de solda na parte interna da junta.
- I dureza Vickers – identificaram-se resultados similares pelos pontos de MB, ZTA, ZL e ZF. Os CP3-80 e CP5-80 apresentaram um ligeiro aumento nas regiões ZTA, ZL e ZF, chegando a 188 e 185 *Vickers*, em comparação aos CP3-70 e CP5-70 que atingiram 151 e 159 *Vickers* por conta de que o teor de carbono dos CPs-80 é ligeiramente superior em relação ao CPs-70. Com o aumento da temperatura e resfriamento, rápido os valores de durezas foram aumentando, partindo dos valores do MB até a ZF. Assim sendo, é possível concluir que os resultados atenderam aos requisitos, considerando-se que o certificado de fabricação do MB determina o valor de: ≤ 22 HRC (248 *Vickers*), sendo que os valores gerais, considerando-se que todos os pontos e regiões (MB, ZTA, ZL e ZF) foram de 148 e 150 *Vickers* para os CPs-70, e 159 e 166 *Vickers* para os CPs-80.
- I tração de junta soldada – após análise dos resultados e das propriedades mecânicas dos ensaios de LR, LE e AL, é possível concluir que todos os valores de ensaios atingiram pelo menos 95% do valor de fabricação do MB, o que determina a norma (ASME IX, 2021). Nesse ensaio, foram obtidos os resultados, conforme segue:

- Limite de resistência-LR – os CP2-70 e CP2-80 tiveram o reforço do cordão de solda usinados. Mesmo com a usinagem do reforço, ambos obtiveram os maiores valores de resistência (519 e 509 MPa). Senso assim, os valores foram satisfatórios em comparação ao valor mínimo do MB (475 MPa). Os CP4-70 e CP4-80, com 504 MPa, também atenderam ao valor mínimo do MB. A ruptura ocorreu no metal base MB, região menos resistente, conforme esperado.
- Limite de escoamento-LE – identificaram-se valores de limite de escoamento semelhantes entre os CPs. Percebeu-se que não houve influência dos componentes químicos dos MAs. Mesmo sem o pré e pós-aquecimento, respeitando-se o carbono equivalente CE, as temperaturas não influenciaram na ductibilidade dos materiais.
- Alongamento-AL – foram identificados valores com proximidade, os CP2-70 e CP2-80 obtiveram valores maiores (36 e 34%). O AL não foi influenciado pelos tipos dos MAs e pelo ensaio de usinagem. Todos os CPs apresentaram valores acima do MB (31%), evidenciando uma boa ductibilidade para as fases elásticas, de escoamento, de encruamento e para a fase plástica até o ponto de ruptura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Encarte de consolidação da produção 2023, dez. 2023. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2023/encarte-boletim-dezembro.pdf>. Acesso: 05 out. 2024.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.3**: process piping. New York: ASME, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.4**: pipeline transportation systems for Liquids and Slurries. New York: ASME, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B36.10M**: welded and seamless wrought steel pipe. New York: ASME, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME section IX**: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. 4 ed. New York: ASME, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A106/A106M-19a**: standard specification for seamless carbon steel pipe for high-temperature service. Pennsylvania: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BPVC section II**: part c specifications for welding rods, electrodes, and filler metals. New York: ASME, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3**: standard guide for preparation of metallographic specimens. Pennsylvania: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: standard test method for microindentation hardness of materials. Pennsylvania: ASTM International, 2017.

CÉSAR NETO, Benedito Vieira. **Comparação de junta soldada aço-carbono/aço inox utilizando como metal de adição aço-carbono e aço inox**. 2015. 59 f. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/e41588e4-f93f-4620-ac25-76b8a38812f9/content> Acesso em: 30 set. 2024.

ESAB - Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget. Certificado de Inspeção EC22868444. Sapucaia do Sul, RS, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Panorama geral do setor de petróleo e gás**: uma agenda para o futuro, jan. 2024. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2024/05/panorama-geral-do-setor-de-og-portugues.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

Instituto Português da Qualidade. **NP EN 1090-2**: execução de estruturas de aço e de estruturas de alumínio: Parte 2: requisitos técnicos para estruturas de aço. Caparica: NP Norma Portuguesa/EN Norma Europeia, 2020.

MELO, Felipe Augusto Cordeiro; URTIGA FILHO, Severino Leopoldino. Estudo do processo de corrosão de aço-carbono exposto a misturas de petróleo e águas salinas. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 23, CONGRESSO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 7, ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO ENSINO MÉDIO, 4., 2015, Recife. **Anais [...]**. Recife: UFPE, 2015. P. 35-40. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/616030/926745/Estudo_processo_a%C3%A7o.pdf/2629a050-78ff-4beb-9be8-ed56de972842. Acesso em: 30 set. 2024.

PETROBRAS. **N-76**: REV. J: materiais de tubulação para instalações de refino e transporte. 2020.

PETROBRAS, **N-1738**: descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados. 2011.

SANTOS, Briza Mateus; SOUZA, Rayanna Aguiar de; BEZERRA, Elaine Cristina Macêdo. **Utilização de Aços em Dutos na Indústria do Petróleo**. 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e gás, 2019. Disponível em: http://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais10/repositorio/trabalho/5127071509201_99411.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

PENINSULA PIPING MANUFACTURING SDN. BHD. **Mill Test Certificate EN10204 3.1**. Malaysia, 2022.

SGOBBI, Alexandre Amaral. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas tubulares soldadas em aço API 5L grau B com base na norma Petrobras N-2301**. 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-21072015-104725/publico/2015SgobbiCaracterizacao.pdf>. Acesso em: 22 set 2024.

Weld-inox Soldas Especiais. **Certificado de Qualidade 164388**. São Paulo, 2023.