

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC**

ANDRÉ DUARTE DE MARINS COSTA

YURI REGATTIERI NASCIMENTO MARTHA

**ORIENTADOR: JONATAS MOTTA QUIRINO
CO - ORIENTADOR: HUMBERTO NOGUEIRA FARNEZE**

**ESTUDO TEÓRICO-EMPÍRICO DA INFLUÊNCIA DA
DUREZA NA CORROSÃO SOB TENSÃO EM UMA
JUNTA SOLDADA DE AÇO ASTM A516 GR70**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

FEVEREIRO DE 2025

ANDRÉ DUARTE DE MARINS COSTA

YURI REGATTIERI NASCIMENTO MARTHA

**ESTUDO TEÓRICO-EMPÍRICO DA INFLUÊNCIA DA
DUREZA NA CORROSÃO SOB TENSÃO EM UMA
JUNTA SOLDADA DE AÇO ASTM A516 GR70**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do DEMEC, do
Centro Federal de Educação Tecnológica
Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Jonatas Motta Quirino
Co-orientador: Humberto Nogueira
Farneze

RIO DE JANEIRO

FEVEREIRO DE 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C837 Costa, André Duarte de Marins
Estudo teórico-empírico da influência da dureza na corrosão sob
tensão em uma junta soldada de Aço ASTM A516 GR70 / André
Duarte de Marins Costa [e] Yuri Regattieri Nascimento Martha –
2025.

108f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 102-108.

Orientador: Jonatas Motta Quirino.

Coorientador: Humberto Nogueira Farneze.

1. Engenharia mecânica. 2. Solda e soldagem. 3. Aço –
Metalurgia. 4. Metais – Fadiga. 5. Aço inoxidável. I. Martha, Yuri
Regattieri Nascimento II. Quirino, Jonatas Motta (Orient.).
III. Farneze, Humberto Nogueira (Coorient.). IV. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e dedicação de diversas pessoas, às quais expressamos a nossa eterna gratidão.

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos dar força, paciência e perseverança ao longo dessa jornada acadêmica.

Aos nossos orientadores, Jonatas Motta Quirino e Humberto Nogueira Farneze, pelas orientações, paciência e compartilhamento de conhecimento, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todo pessoal do INT, dentre eles: Marcelo Beltrão, Christopher Nascimento, David Borba e Javier Alejandro por fornecerem os recursos e infraestrutura necessários para a realização dos ensaios deste estudo.

Ao Hiron Yamada, do LAMAT, e o técnico Luis, ambos do CEFET-RJ/Maracanã, por ajudarem na realização dos ensaios necessários deste estudo.

Ao CEFET, nossa eterna gratidão por proporcionar um ensino de qualidade e por ser um ambiente de crescimento e constante aprendizado.

A todos os nossos amigos que estiveram ao nosso lado durante essa trajetória, dentre eles: Alexsander Pereira, Amanda Barroco, Bruno Magalhães, Caio Lima, Daniel Arruda, Daniel Utsch, Henrique Hohn, Italo Moraes, João Campos, Mateus Cedro, Nicholas Nogueira, Pedro Ribeiro, Thiago Coimbra e Vinicius Borges.

Eu, Yuri Regattieri, dedico esse trabalho a minha mãe, Tânia Regattieri, pelo amor incondicional e apoio constante. Sua dedicação, esforço e, principalmente, sacrifícios foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é tanto meu quanto seu.

Eu, André Duarte, dedico esse trabalho a minha mãe, Maria de Fátima, meu pai Arthur Luiz e meu irmão, Arthur Duarte, que sempre me apoiaram na minha jornada, com amor, dedicação e companheirismo. Dedico esse trabalho ao meu avô Eronil Machado e tia Maria de Oliveira. Enquanto a memória de vocês permanecer comigo, ainda viverão. Agradeço também ao LaBistrô, sem vocês, eu teria enlouquecido.

Por fim, agradecemos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a nossa formação, sendo com palavras de incentivo ou simples gestos de amizade. Nosso muito obrigado!

RESUMO

COSTA, André Duarte de Marins. MARTHA, Yuri Regattieri Nascimento. **ESTUDO TEÓRICO-EMPÍRICO DA INFLUÊNCIA DA DUREZA NA CORROSÃO SOB TENSÃO EM UMA JUNTA SOLDADA DE AÇO ASTM A516 GR70.** 2025. 108 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2025.

Neste trabalho, foi analisado o efeito da corrosão sob tensão (CST) em uma chapa soldada, feita de aço ASTM A516 Gr70. Os resultados preliminares obtidos pelos estudos teóricos indicam que deve haver um aparecimento de trincas por CST em pH ácido na região soldada. Este trabalho considerou por meio da aplicação do ensaio de flexão em quatro pontos em três corpos de prova, estando em um ambiente corrosivo com concentração de 25% de H₂S. Adicionalmente, foram feitos os ensaios metalográficos para análises macroestrutural e microestrutural, microdureza na região da soldagem e análise química do metal de solda, com o objetivo de determinar as especificações da solda e sua influência no experimento. Com a realização do ensaio de CST, os corpos de prova não foram fraturados ao final do teste que se estendeu por 30 dias. Consultando o item 9.1.2 da norma NACE TM0316, foi constatado que as juntas soldadas dos corpos de provas foram aprovadas no ensaio. Com base nos resultados obtidos pelo experimento e por meio dos ensaios adicionais, a CST ocorreu de forma significativa na região mais frágil da junta soldada, que é coincidente com a região da ZTA, provando a teoria de que a dureza influencia negativamente a resistência do material à corrosão sob tensão.

Palavras-chave: ASTM A516 Gr70; soldagem; corrosão sob tensão.

ABSTRACT

In this work, the effect of stress corrosion (SCC) on a welded plate made of ASTM A516 Gr70 steel was analyzed. The preliminary results obtained from theoretical studies indicate that cracks due to SCC should appear in an acidic pH environment in the welded region. This work considered the application of a four-point bending test on three specimens, placed in a corrosive environment with a concentration of 25% H₂S. Additionally, metallographic tests were conducted for macrostructural and microstructural analyses, microhardness in the welding area, and chemical analysis of the weld metal, with the aim of determining the specifications of the weld and its influence on the experiment. With the execution of the SCC test, the specimens were not fractured at the end of the test, which lasted for 30 days. Referring to item 9.1.2 of the NACE TM0316 standard, it was found that the welded joints of the specimens passed the test. Based on the results obtained from the experiment and additional tests, SCC occurred significantly in the hardest area of the weld joint, which coincides with the HAZ (Heat-Affected Zone), proving the theory that hardness negatively influences the material's resistance to stress corrosion.

Keywords: ASTM A516 Gr70. Welding. Stress corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trincas de corrosão sob tensão em uma luva	20
Figura 2 - Infraestrutura existente e em construção de transporte de gás natural no Brasil.....	22
Figura 3 - Corrosão em um aço	24
Figura 4 - Esquema de uma pilha eletroquímica	27
Figura 5 - Trincas de corrosão sob tensão em um vaso de pressão	29
Figura 6 - Falha de um gasoduto por colapso elasto-plástico.....	30
Figura 7 - Esquema generalista do processo de corrosão sob tensão.....	31
Figura 8 - Fatores essenciais para que ocorra corrosão sob tensão.....	32
Figura 9 – Corrosão sob tensão detectado por ensaio visual.....	33
Figura 10 - Incidência de CST como uma função de posição horária em torno da tubulação.....	35
Figura 11 - Seção metalográfica de CST em pH alto.....	36
Figura 12 - Vida útil de dutos até a primeira incidência de CST em ambiente de pH quase neutro.....	36
Figura 13 - Seção metalográfica de CST em pH alto.....	37
Figura 14 - Vida útil de dutos até a primeira incidência de CST em ambiente de alto pH Fonte: Leis et al, 1997.....	37
Figura 15 - Entalhe em V em um corpo de prova	39
Figura 16 – Evidenciamento dos concentradores de tensão (áreas em vermelho) em um componente por meio do software de simulação Ansys	40
Figura 17 - Estado de tensões hidrostáticas.....	41
Figura 18 – Modos de propagação de trincas.....	42
Figura 19 – Tabela de fator de modificador de intensidade de tensão.....	43
Figura 20 - Microestrutura ferrita-perlita de uma chapa de aço ASTM A516 Gr. 70. O constituinte da cor clara representa a ferrita e o constituinte escuro representa a perlita. (Bandeada - aumento de 100x).	48
Figura 21 - Microestrutura perlítica com uma aparência lamelar composta pelas fases cementita (parte escura) e ferrita (parte clara).	48
Figura 22 - Diagrama de Equilíbrio do Ferro Carbono.....	49
Figura 23 - Esquemática dos principais termos da soldagem.....	50
Figura 24 - Diagrama soldagem a arco elétrico para um eletrodo revestido	50

Figura 25 - Metalurgia da Solda.....	51
Figura 26 - Processo por Eletrodo Revestido	52
Figura 27 - Processo por MIG/MAG	53
Figura 28 - Processo TIG.....	54
Figura 29 - Processo por Arco Submerso	55
Figura 30 – Vista de um ensaio de flexão a quatro pontos	56
Figura 31 – Ilustração esquemática de um equipamento de ensaio de flexão a quatro pontos	57
Figura 32 – CPs típicos de ensaio de flexão de 4 pontos:.....	58
Figura 33 - Comprimento de 457,2 mm da chapa	59
Figura 34 - Largura de 152,4 mm da chapa.....	60
Figura 35 - Espessura de 17mm da chapa	60
Figura 36 - Amostra da análise química	61
Figura 37- Posicionamento dos cortes na junta soldada	62
Figura 38 - Amostra antes de ser lixada	63
Figura 39 - Máquina utilizada no ensaio de dureza Vickers.....	64
Figura 40 – Parte da junta soldada que foi utilizada para preparação das amostras	64
Figura 41 - Ilustração com as dimensões dos corpos de prova a serem usados no ensaio de flexão de quatro pontos.....	65
Figura 42 - Início do desbaste da placa na fresadora	66
Figura 43 - Usinagem de uma das amostras após o corte	66
Figura 44 – Amostra montada no dispositivo para o ensaio de flexão.....	68
Figura 45 - Montagem do Strain Gauge antes do ensaio	69
Figura 46 - Deformação de 1151,6 $\mu\text{m}/\text{m}$ no CP 1	70
Figura 47 - Deformação de 1127,8 $\mu\text{m}/\text{m}$ no CP 2	70
Figura 48 - Deformação de 1128,1 $\mu\text{m}/\text{m}$ no CP 3	71
Figura 49 - CP's após ensaio de flexão de 4 pontos.....	71
Figura 50 – Gás inerte e solução de teste	72
Figura 51 - Início do teste de corrosão em H_2S	72
Figura 52 - Recipiente com as três amostras	73
Figura 53 - Amostras ao final do ensaio.....	74
Figura 54 - Recipiente após o ensaio	74
Figura 55 - Amostras limpas após o ensaio	74
Figura 56- Macrografia da amostra.....	75

Figura 57 - Percentual de regiões.....	76
Figura 58 - Medição da ZTA do MS	76
Figura 59 - Aspecto microestrutural do metal de base observado por microscopia ótica. Aumento: 500X. Ataque: Nital 2%	77
Figura 60 - Aspecto microestrutural do metal de base observado por microscopia eletrônica de varredura. Aumento: 1000X. Ataque: Nital 2%	77
Figura 61 - Aspecto microestrutural entre a ZTA e a MS observado por microscopia ótica. Aumento: 500X. Ataque: Nital 2%	78
Figura 62 - Aspecto microestrutural entre a ZTA e a MS.	79
Figura 63 – ZTA com região de granulação fina com perlita (P), ferrita (F) e bainita (B).....	80
Figura 64 - ZTA com região de granulação grosseira com perlita (P), ferrita (F) e bainita (B). Ataque: Nital2%	80
Figura 65 - Região colunar da solda com três fases de ferrita. Ataque: Nital 2%	81
Figura 66 - Aspecto microestrutural da região reaquecida do metal de solda. Ataque: Nital 2%	81
Figura 67 - Microconstituente A-M no topo da solda. Ataque: Nital 2%	82
Figura 68 - Perfil de dureza da junta soldada.	83
Figura 69 - Corpo de prova 1 com zoom 4x.....	84
Figura 70 - Corpo de prova 1 com zoom 7,5x.....	85
Figura 71 - Corpo de prova com zoom 20x.....	85
Figura 72 – Deslocamento de metal de solda.....	86
Figura 73 - Corpo de prova 2 com zoom 4x.....	87
Figura 74 - Corpo de prova 2 com zoom 7,5x.....	87
Figura 75 - Corpo de prova 2 com zoom 20x.....	88
Figura 76 - Corpo de prova 3 com zoom 4x.....	89
Figura 77 - Corpo de prova 3 com zoom 7,5x.....	89
Figura 78 - Corpo de prova 3 com zoom 20x.....	90
Figura 79 - CP após o ensaio e limpeza	91
Figura 80 - Superfície do CP 1	92
Figura 81 - Profundidade de perda de massa do CP 1.....	93
Figura 82 - Relação das alturas do CP1	93
Figura 83 - Superfície do CP 2	94
Figura 84 - Profundidade de perda de massa do CP 2.....	94

Figura 85 - Relação das alturas do CP2.....	95
Figura 86 - Superfície do CP 3	95
Figura 87 - Profundidade de perda de massa do CP 3.....	96
Figura 88 - Relação das alturas CP3.....	97
Figura 89 - Relação de altura dos 3 CP's	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potenciais de Oxidação, ADAPTADA de Gentil (2011).....	25
Tabela 2 - Meios que podem causar CST em ligas	34
Tabela 3 - Listagem de materiais utilizado em tubulações.....	47
Tabela 4 - Dimensões típicas de CP (não mandatório).....	57
Tabela 5 – Composição química do material de base e metal de solda	61
Tabela 6 - Valor de Ra do CP 1.....	67
Tabela 7 - Valor de Ra do CP 2.....	67
Tabela 8 - Valor de Ra do CP 3.....	68

LISTA DE ACRÔNIMOS

API – *American Petroleum Institute*
AWS - *American Welding Society*
CBIE – Centro Brasileiro de Informática na Educação
COPEL – Companhia Petroquímica do Sul
CP – Corpo de Prova
CMI - Caixa de Medição e Interligação
CST – Corrosão Sob Tensão
EEEP – Escola Estadual de Educação Profissional
END - Ensaio Não Destrutivo
EPE – Empresa de pesquisa energética
FA - Ferrita Acircular
FP - Ferrita Primária
FS - Ferrita de Segunda Fase
INT – Instituto Nacional de Tecnologia
IZA - *International Zinc Association*
LAMAT - Laboratório de Materiais
MAG - *Metal Active Gas*
MB – Metal de Base
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG - *Metal Inert Gas*
MS – Metal de Solda
NACE – *National Association of Corrosion Engineers*
NEB – *National Energy Board*
PIB – Produto Interno Bruto
SAE - *Society of Automotive Engineers*
TIG - *Tungsten Inert Gas*
USP – Universidade de São Paulo
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SIMBOLOS

P	máxima pressão permitida na norma
S	limite mínimo de escoamento especificado
t	espessura do duto
D	diâmetro do duto
k_F	fator de projeto
k_E	fator de junta longitudinal
k_T	fator de temperatura
τ	tensão de cisalhamento
V	força de cisalhamento
A	área transversal
σ_z	tensão axial
F	força axial atuante na estrutura
σ_x	tensão de flexão
M	momento fletor
y	distância da aplicação da carga até a linha neutra
I	momento de inércia da secção transversal
σ_{max}	tensão normal máxima
K_t	fator de geométrico de concentração de tensão para a tensão normal
σ_{nom}	tensão normal nominal
τ_{max}	tensão de cisalhamento máxima
K_{ts}	fator de geométrico de concentração de tensão para tensão de cisalhamento
τ_{nom}	tensão de cisalhamento nominal
σ_{av}	tensão média
σ_1	tensão na direção 1
σ_2	tensão na direção 2
σ_3	tensão na direção 3
σ	tensão de engenharia
E	módulo de Young
ϵ	deformação de engenharia

ν	razão de Poisson
u	energia de deformação por unidade de volume
u_v	energia de deformação necessária para produção de mudança de volume
u_d	energia de distorção
S_y	tensão de escoamento
ε_f	deformação até a falha
K_I	fator de intensidade de tensão no modo I
β	fator de modificação da intensidade de tensão
a	comprimento da trinca

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.2 MOTIVAÇÃO.....	20
1.3 OBJETIVO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 CORROSÃO	23
2.2 OXIDAÇÃO E REDUÇÃO NO PROCESSO DE CORROSÃO	24
2.3 TIPOS DE CORROSÃO	27
2.3.1 Corrosão Eletroquímica	27
2.3.2 Corrosão Eletrolítica	27
2.3.3 Corrosão por Pites	28
2.3.4 Corrosão Uniforme.....	28
2.4 CORROSÃO SOB TENSÃO	28
2.4.1 Fissuração por Corrosão Sob Tensão.....	33
2.4.2 Características das Fissuras por Corrosão Sob Tensão	35
2.4.2.1 Trincas por corrosão sob tensão em ambientes com pH quase neutro	36
2.4.2.2 Trincas por corrosão sob tensão em ambientes com pH alto	37
2.5 MECÂNICA DA FRATURA.....	38
2.5.1 Tensões	38
2.5.2 Concentração de Tensão	39
2.5.3 Teoria da Falha	40
2.6 REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS	43
2.6.1 Resistência a Água.....	44
2.6.2 Resistividade Elétrica e Rigidez Dielétrica.....	44

2.6.3 Resistência a Agentes Biológicos e Produtos Químicos.....	44
2.6.4 Resistência ao Deslocamento Catódico	45
2.6.5 Resistência Mecânica	45
2.6.6 Resistência aos Esforços do Solo.....	45
2.6.7 Potencial Redox.....	46
2.7 MATERIAIS DE TUBULAÇÕES.....	46
2.7.1 Aço ASTM A516	47
2.7.2 Composição Química do Aço ASTM A516 Gr70.....	47
2.8 PROCESSO DE SOLDAGEM	49
2.8.1 Metalurgia da Solda	51
2.8.2 Soldagem com Eletrodo Revestido.....	51
2.8.3 Soldagem MIG/MAG.....	52
2.8.4 Soldagem TIG.....	53
2.8.5 Soldagem por Arco Submerso	54
2.8.6 Soldabilidade do Aço ASTM A516 GR70	55
2.9 TEORIA DO ENSAIO DE FLEXÃO DE QUATRO PONTOS.....	56
2.10 NORMA NACE TM0316.....	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 MATERIAL	59
3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	61
3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA.....	63
3.4 ENSAIO DE FLEXÃO DE QUATRO PONTOS	64
3.4.1 Preparação e Usinagem dos Corpos de Prova.....	65
3.4.2 Procedimento do Ensaio.....	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 MACROGRAFIA PRÉ ENSAIO	75
4.2 MICROGRAFIA PRÉ ENSAIO.....	76

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA DO AÇO ASTM A516 Gr70	82
4.4 MACROGRAFIA PÓS ENSAIO	83
4.4.1 Corpo de Prova 1	84
4.4.2 Corpo de Prova 2.....	86
4.4.3 Corpo de Prova 3.....	88
4.5 MICROGRAFIA PÓS ENSAIO.....	91
4.5.1 Corpo de Prova 1	92
4.5.2 Corpo de Prova 2.....	94
4.5.3 Corpo de Prova 3.....	95
5 CONCLUSÃO	99
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	101
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo eletroquímico no qual metais em contato com um eletrólito sofrem degradação devido à formação de pares anodo-cátodo. No caso da corrosão sob tensão (CST), esse fenômeno se intensifica pela presença de tensões residuais ou externas, que facilitam a nucleação e propagação de trincas e pela sensibilidade do metal ao processo de corrosão em si. Aços soldados são particularmente suscetíveis à CST devido à heterogeneidade microestrutural gerada pelo ciclo térmico da soldagem, especialmente na Zona Termicamente Afetada (ZTA), onde ocorrem alterações na dureza, segregações químicas e microestruturais que influenciam a resistência à corrosão. O presente estudo investiga a correlação entre dureza, microestrutura e a formação de trincas por CST em aço ASTM A516 Gr70 exposto a um ambiente de H₂S.

Segundo Pinto (2007), a corrosão interna e/ou externa é uma das maiores causas de falha dos dutos, atrás apenas das falhas causadas essencialmente por fatores externos, como má operação e queda de objetos. De forma gradativa, a corrosão avança por toda a espessura da parede e assim, provoca uma fissura, de onde vaza o gás natural. Todavia, antes mesmo de ocorrer uma completa corrosão já existe uma ameaça, pois, pelo fato de ter uma fraqueza no material no ponto corroído, o material poderá sofrer uma ruptura repentina.

O principal processo de fabricação de estruturas de dutos e vasos de pressão é a soldagem, que, durante o seu processo, fornece energia térmica suficiente para haver mudanças microestruturais, que podem aumentar a dureza na ZTA.

O aço ASTM A516 Gr 70 é o material mais utilizado na fabricação de vasos de pressão e tubulações de alta pressão por ter excelentes propriedades mecânicas como resistência à tração e tenacidade, sendo recomendado para aplicação tanto em temperatura ambiente quanto em baixas temperaturas, tornando-o uma opção de ótimo custo-benefício.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O primeiro caso reconhecido de corrosão por tensão foi registrado em 1965, quando um gasoduto americano se rompeu em Louisiana (LEIS ET. AL, 1996). No

entanto, semelhantes informações metalográficas e fractográficas arquivadas na análise de falhas de dutos em Battelle indicam que, provavelmente, a primeira falha por corrosão sob tensão ocorreu em 1957 (LEIS E EIBER, 1997). Desde então, a falha por corrosão sob tensão tem sido registrada por diversos outros países, como Rússia, Austrália, Iraque, Itália, Paquistão e outros (CHENG, 2013).

Um dos casos mais recentes foi uma falha causada em um gasoduto no estado da Louisiana em 2022, originada de uma trinca de corrosão sob tensão, de acordo como pode ser verificado na Figura 1, o que resultou em um prejuízo milionário para o estado.

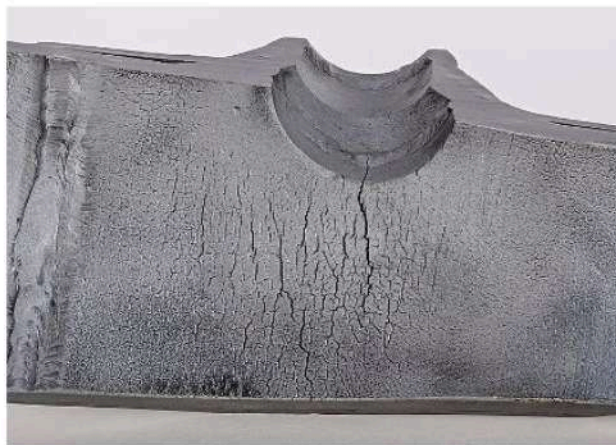


Figura 1 - Trinca de corrosão sob tensão em uma luva
Fonte: Uwe Aranas (2015)

Vasos de pressão, caldeiras, reatores, trocadores de calor e tubulações são alguns dos componentes estáticos mais utilizados nas indústrias de petróleo, química, petroquímica e papel. Tais equipamentos possuem o problema recorrente com trincas, principalmente por serem soldados (PELLICCIONE & DA SILVA, 2024).

1.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com o estudo de 2015 da IZA (*International Zinc Association*), com apoio da USP (Universidade de São Paulo), o impacto da corrosão do aço na economia de um país é equivalente a 1 até 5% do seu PIB, dependendo do grau de industrialização e de outros parâmetros considerados. No caso do Brasil, o estudo indicou que a corrosão custou o equivalente a 4% do PIB, em 2015. Dessa forma, dezenas de bilhões de reais são gastos e perdidos devido à presença de corrosão em

estruturas metálicas e pela falta de proteção e manutenção desses equipamentos de maneira correta.

O estudo dos efeitos da corrosão em estruturas metálicas se torna vital para que esse custo ao PIB dos países seja diminuído, tornando a manutenção, reparo e prevenção processos mais otimizados, eficazes e baratos, já que, de acordo com a NACE Internacional (2019), estima-se que a corrosão custe à economia global cerca de US\$ 2,5 trilhões por ano, equivalente a 3,4% do PIB do globo em 2013. Caso as práticas de controle de corrosão atuais fossem amplamente empregadas, a redução dessa quantia seria entre 15 e 35%.

Um dos componentes industriais mais afetados pela corrosão é justamente o maior meio de transporte de carga utilizado: dutos. Eles escoam líquidos, gases e sólidos por 45 mil km em todo o território brasileiro (CBIE, 2019).

Um dos aços mais utilizados no setor industrial e petroquímico é o aço ASTM A516, por serem aços de baixo carbono com elementos de liga que promovem resistência à corrosão. Esses aços são amplamente utilizados na fabricação de vasos de pressão, maquinário pesado, estruturas de construção e até mesmo tubulações de transporte de fluidos (*Ganpat Industrial Corporation, 2024*). Tais estruturas são muitas vezes solicitadas por cargas de alta intensidade, sendo suscetíveis à formação de trincas por CST.

A motivação desse trabalho é analisar como o aço ASTM A516 Gr70, utilizado em uma junta soldada, principal forma de fabricação de tubulações e vasos de pressão, origina trincas por meio de corrosão sob tensão.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da microestrutura e da dureza na resistência à corrosão sob tensão (CST) de uma junta soldada em aço ASTM A516 Gr70. Para isso, serão analisados os seguintes aspectos: (1) caracterização da microestrutura nas regiões de Metal Base (MB), Metal de Solda (MS) e Zona Termicamente Afetada (ZTA); (2) correlação entre dureza (medida via ensaio de microdureza Vickers) e incidência de trincas; (3) identificação das condições eletroquímicas, metalúrgicas e mecânicas que podem favorecer a nucleação de CST em ambiente ácido contendo H₂S.

$$P = \frac{2St}{D} k_F k_E k_T \quad (1)$$

A escolha do diâmetro do duto é proporcional à sua vazão máxima de transporte de gás desejada. Na Eq. 1, k_F é o fator de projeto relacionado com a classe de locação do duto, que se refere à proximidade do duto a habitações, k_E é o fator de junta longitudinal e k_T é um fator relacionado à temperatura.

O valor de S, está relacionado à resistência do material. Limite de escoamento é definido pela norma ASME B31.8 (2003) como a tensão que causa uma deformação específica permanente no material ou produz um alongamento específico quando o material está sob carregamento. Os valores do limite de escoamento mínimo são apresentados na norma ASME B31.8 (2003) para os aços mais utilizados em dutos e o valor do limite de escoamento de um aço adquirido deve estar presente nas especificações do fabricante.

A norma ASME B31.8 (2003) lista normas de especificações que devem ser utilizadas para a escolha de um material que atenda aos requisitos. O limite de escoamento mínimo S presente na Eq. 1 é uma propriedade do material que deve ser avaliada. Existe uma flexibilidade entre o limite de escoamento mínimo S e a espessura t para atingir a pressão P. Caso não seja possível utilizar um material de maior resistência, é viável aumentar a espessura da parede do duto e utilizar um material de menor resistência. Além da resistência para suportar a pressão especificada, deve ser avaliada a capacidade do material escolhido de resistir às outras condições impostas, como a corrosão. Os dutos de transporte são em sua maioria enterrados, ficando sujeitos à corrosividade do solo.

São diversos os fatores que contribuem para a corrosividade dos solos. Podemos citar o tipo, características estruturais, texturais, permeabilidade, teor de umidade etc. Os fatores mais decisivos para que a corrosão em dutos metálicos ocorra são: grau de aeração, conteúdo de sais solúveis e a acidez do solo.

2.1 CORROSÃO

A corrosão é um processo de degradação do material, alterando assim a função para o que lhe é originalmente designado. GENTIL (2011) define que a

corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associado, ou não, a esforços mecânicos. Pelo fato de a corrosão poder causar danos irreparáveis ao meio industrial, na fase de projeto os mecanismos de proteção deverão ser considerados para minimizar, ao máximo, os eventuais danos.

Segundo GENTIL (2011), a corrosão é um processo espontâneo, eletroquímico e irreversível com a capacidade de destruição completa do material caso não haja uma proteção. AHMAD (2006) afirma que os elétrons liberados pela reação anódica são consumidos na superfície do catodo, que por sua vez, são as reações de redução (reações catódicas).

A Figura 3 ilustra o fenômeno da corrosão em um aço, podendo-se notar os furos localizados no material decorrentes do processo.

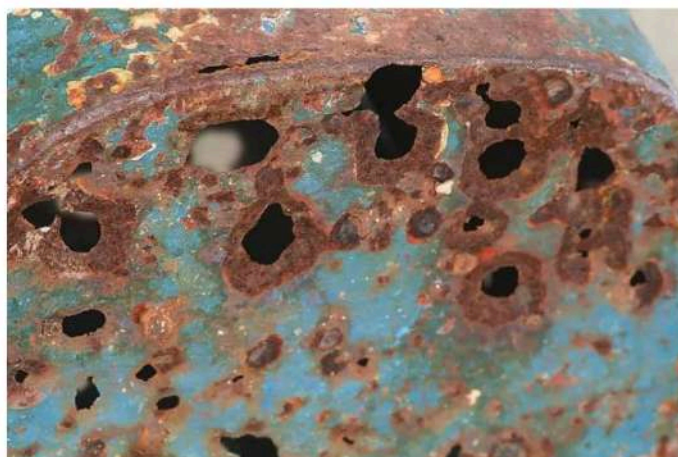


Figura 3 - Corrosão em um aço
Fonte: C-Tank, 2019

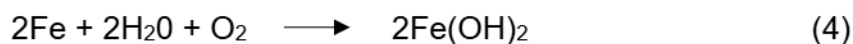
2.2 OXIDAÇÃO E REDUÇÃO NO PROCESSO DE CORROSÃO

A oxidação e redução são fundamentais para a CST ocorrer, já que a reação localizada no material ocorre devido às interações entre reações anódicas e catódicas na presença de eletrólitos. Uma reação de oxidação-redução envolve a transferência de elétrons de um metal para outro, ou seja, perda e ganho de elétrons acarretando a mudança do estado de oxidação dos metais envolvidos. Quando o metal perde elétrons, significa que foi oxidado, atingindo valores positivos de oxidação. De forma

análoga, quando o metal recebe elétrons, refere-se ao fato de que o metal foi reduzido e assim, atingindo os valores mais negativos (Sartori et al., 2008).

O processo de corrosão sob tensão é fortemente influenciado pelas reações de oxidação e redução, pois o desgaste localizado do material resulta da interação entre regiões anódicas e catódicas na presença de eletrólitos. Esses mecanismos favorecem o surgimento de trincas em pontos críticos do aço ASTM A516 Gr70, principalmente em zonas com elevada dureza (ZTA).

O contato do metal com a água e oxigênio pode acarretar a formação de hidróxidos. Deste modo, a Eq. 2, representa a reação de redução, a Eq. 3, representa a reação de oxidação e a Eq. 4, representa a reação de oxirredução.



Quando o metal sofre oxidação, significa que ele está perdendo elétrons. Uns metais são mais propícios a perder elétrons do que os outros metais, isso deve-se ao fato do potencial de oxidação. Sabendo o valor desse potencial, consegue-se determinar a possibilidade de ocorrer o processo corrosivo.

A Tabela 1 indica o potencial de oxidação de cada metal. Quanto maior o valor desse potencial, maior é a tendência de sofrer oxidação. Percebe-se pela tabela, por exemplo, que o Manganês e o Cromo possuem um maior valor do potencial do que o Ferro. Portanto, esses dois metais poderão ser utilizados para proteger o ferro da oxidação, já que ambos têm uma maior tendência a perder elétrons. Esse mecanismo de proteção é conhecido como proteção catódica com anodo de sacrifício.

Tabela 1 – Potenciais de Oxidação, ADAPTADA de Gentil (2011)

Metal	Reação no Eletrodo	Potencial (Volt)
Potássio	$\text{K} \longrightarrow \text{K}^+ + \text{e}$	+2,93
Cálcio	$\text{Ca} \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{e}$	+2,87
Sódio	$\text{Na} \longrightarrow \text{Na}^+ + \text{e}$	+2,71

Metal	Reação no Eletrodo	Potencial (Volt)
Magnésio	$\text{Mg} \longrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}$	+2,37
Berílio	$\text{Be} \longrightarrow \text{Be}^{2+} + 2\text{e}$	+1,85
Alumínio	$\text{Al} \longrightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$	+1,66
Titânio	$\text{Ti} \longrightarrow \text{Ti}^{3+} + 3\text{e}$	+1,63
Zircônio	$\text{Zr} \longrightarrow \text{Zr}^{4+} + 4\text{e}$	+1,53
Manganês	$\text{Mn} \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{e}$	+1,18
Zinco	$\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$	+0,76
Cromo	$\text{Cr} \longrightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}$	+0,74
Ferro	$\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$	+0,44
Cádmio	$\text{Cd} \longrightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}$	+0,40
Cobalto	$\text{Co} \longrightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}$	+0,28
Níquel	$\text{Ni} \longrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}$	+0,25
Chumbo	$\text{Pb} \longrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$	+0,13
Hidrogênio	$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$	+0,00
Cobre	$\text{Cu} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	-0,34
Mercúrio	$2\text{Hg} \longrightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}$	-0,79
Prata	$\text{Ag} \longrightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}$	-0,80
Ouro	$\text{Au} \longrightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}$	-1,50

A pilha eletroquímica ocorre quando dois metais de potenciais diferentes estão em contato na presença de um eletrólito. Logo, o metal com maior potencial sofre a oxidação (anodo), ou seja, os elétrons do metal com maior potencial irão sair em direção ao metal com menor potencial. O metal com menor potencial sofre a redução (catodo), recebendo os elétrons do anodo. O eletrólito é um condutor contendo íons que permite a transferência entre o catodo e o anodo, como o solo por exemplo. Se algum elemento for removido da pilha eletroquímica, a chance de ocorrer o processo de corrosão irá diminuir pois não terá a formação da pilha (GENTIL,2011).

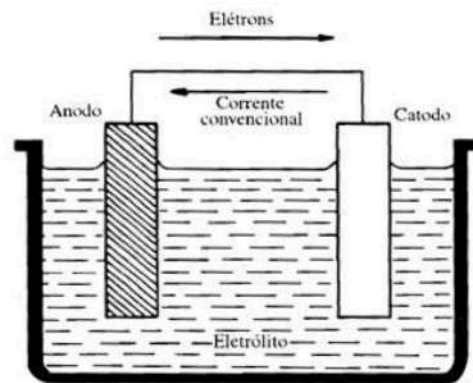


Figura 4 - Esquema de uma pilha eletroquímica
Fonte: Gentil (2011)

2.3 TIPOS DE CORROSÃO

Existem diversos tipos de corrosão que atuam sobre os metais, em diferentes condições físicas, químicas e biológicas.

2.3.1 Corrosão Eletroquímica

É um processo químico em que um metal é corroído por uma reação eletroquímica em presença de um eletrólito. Os ânions e cátions na solução do solo, resultante da umidade inerente do solo, resultam no fechamento de curto-circuito, que é proporcionado pelo meio metálico que é o equipamento metálico. A intensidade dessa reação é quantificada pelo número de cargas de íons que se descarregam no catodo ou pelo número de elétrons que saem do anodo.

2.3.2 Corrosão Eletrolítica

É o processo eletroquímico não espontâneo, que, quando aplicado uma corrente elétrica externa ao sistema, promove a corrosão do metal. Equipamentos que são aterrados de maneira fora da especificação das normas de segurança, quando estão próximos a equipamentos metálicos enterrados, proporcionam o processo de corrosão por meio do fornecimento de correntes de fuga ao metal.

Partes do equipamento metálico possuem diferentes potenciais de corrosão, logo, quando imerso num meio corrosivo (neste caso, o solo) e a corrente de fuga

atinge a superfície, ocorre a transferência de íons e elétrons na própria estrutura metálica, ocorrendo a corrosão.

2.3.3 Corrosão por Pites

Esse fenômeno ocorre em regiões localizadas na superfície do material, sendo por agentes corrosivos, dano no revestimento do material ou com teor de impurezas. Todos esses fatores irão contribuir para a presença dos pites.

2.3.4 Corrosão Uniforme

É o tipo de corrosão que atinge a superfície do material por completo, quando exposto ao meio corrosivo de maneira uniforme. Logo, irá provocar redução da sua espessura.

2.4 CORROSÃO SOB TENSÃO

A corrosão sob tensão é definida como fratura do material, quando a estrutura se encontra em solicitação de cargas ou possui uma tensão residual de um processo de fabricação passada, possibilitando núcleos de corrosão nas micro descontinuidades na sua superfície, como trincas e fissuras. Esse termo de corrosão sob tensão é utilizado apenas nos casos em que for possível detectar um processo de corrosão, e não de outro fenômeno que determine a fragilização do material (GENTIL, 2011).

A corrosão sob tensão acontece em diversos tipos de metais e é um problema crítico em materiais sensíveis a corrosão, que estão expostos a ambientes agressivos, enquanto estão sendo solicitados por tensões externas ou residuais do processo de fabricação. Para o caso do aço ASTM A516 Gr70, a CST é impulsionada pela presença de íons livres de sulfeto (H_2S), que promovem o fenômeno de fragilização por hidrogênio e o processo de nucleação de trincas intergranulares.

Existem estudos que demonstram que a ZTA, especialmente em regiões com granulometria grossa, apresenta maior susceptibilidade à CST, devido ao valor alto de dureza e, em alguns casos, à presença de fases instáveis. O estudo de caso do vaso de pressão 37V02, da COPESUL, ilustra essa ocorrência. (SCHULZ, 2004)

Observou-se que o vaso de pressão tinha a função de armazenar e vaporizar gases para a queima no flare da refinaria. Este equipamento foi construído com aço ASTM A240 TP304L e era isolado termicamente por meio de poliuretano. Contudo, o poliuretano contém agentes de expansão que incorporam cloretos e fluoretos em sua composição. A queima parcial deste material resultou na liberação desses íons, favorecendo a formação de áreas com pH ácido, possibilitando a corrosão sob tensão (SCHULZ, 2004). Como consequência, foram identificadas trincas que alcançavam até 500 mm de comprimento no vaso de pressão, especialmente concentradas na zona termicamente afetada (ZTA) da solda, onde a dureza do material era superior.



Figura 5 - Trincas de corrosão sob tensão em um vaso de pressão
Fonte: SCHULZ, 2004

Um outro estudo de caso relevante é o vazamento de gás natural resultante do rompimento de um trecho do gasoduto GASPAL I, que culminou na explosão deste sistema em 2016. O gasoduto, utilizado para o escoamento de gás natural entre uma estação de compressão e uma refinaria de petróleo, operava sob uma pressão de 62 kgf/cm². Suas especificações técnicas incluíam uma espessura nominal de 6,35 mm e um diâmetro nominal de 22 polegadas, sendo fabricado em aço API 5L X65 e colocado em operação no ano de 1989.



Figura 6 - Falha de um gasoduto por colapso elasto-plástico
Fonte: DE OLIVEIRA et al, 2019

De acordo com DE OLIVEIRA e DE MORAIS (2019), um relatório de análise de falha detectou que ocorreu a catástrofe nesse duto devido a corrosão sob tensão, propiciado por efeitos do solo em pH quase neutro, também conhecido por *Stress Corrosion/Near-Neutral pH*.

Os principais mecanismos de corrosão sob tensão são, de acordo com BALLESTEROS (2009):

1 – Corrosão sob tensão em caminho ativo ou por dissolução anódica

A dissolução do metal durante o processo inicial e intermediário da propagação da trinca é que controla a CST. A tensão aplicada ao material rompe o filme superficial em pontos susceptíveis da microestrutura heterogênea do metal. Com o metal exposto, o meio ataca o material, provocando a dissolução de componentes da liga por caminhos preferenciais, evoluindo de maneira acelerada para uma propagação da trinca.

2 – Corrosão sob tensão pela formação de túneis de corrosão

A ruptura da película passiva do material é proporcionada pelo degrau de deslizamento que emergem para a superfície, formando-se pequenos pites que são formados redes de pequenos túneis que são quebrados por fratura dúctil.

3 – Corrosão sob tensão por adsorção

Os contornos de grão e descontinuidades na superfície podem passar por um processo de corrosão sob tensão por adsorção, onde a adsorção das espécies químicas presentes no meio, nesse caso na superfície do material, promove uma diminuição da resistência da ligação interatômica, facilitando a propagação da fratura por corrosão por tensão.

4 – Corrosão sob tensão por fragilização pelo hidrogênio

A fragilização ocorre quando existem átomos de hidrogênio em solução sólida, ou seja, na estrutura do material. O hidrogênio é absorvido na interface metal/solução e devido ao seu pequeno volume atômico, uma parte do hidrogênio se difunde intersticialmente com facilidade no metal, enquanto o resto vira gás hidrogênio. Os átomos de hidrogênio tendem a se difundir em locais de maior concentração de tensões, como pontas de trinca e pites.

A Figura 7 ilustra o esquema do processo de CST.

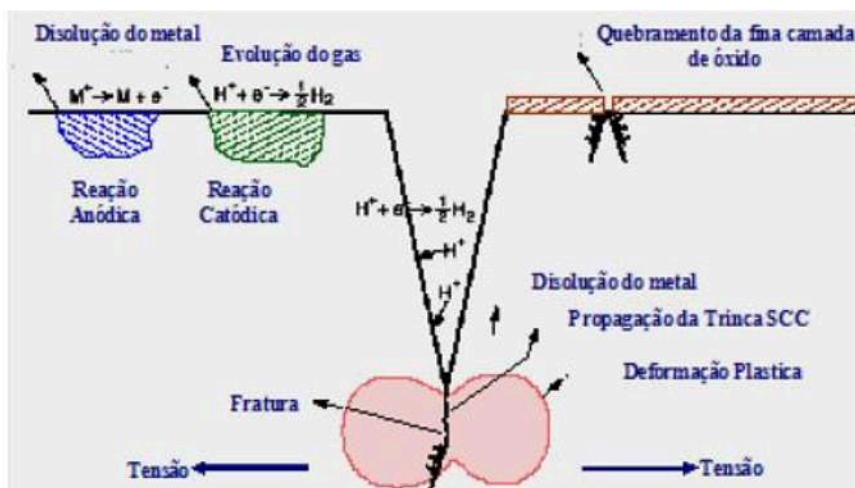


Figura 7 - Esquema generalista do processo de corrosão sob tensão.
Fonte: BALLESTEROS, 2009

As trincas de corrosão sob tensão podem surgir sem uma eventual percepção de corrosão superficial, sendo assim associadas a defeitos pré-existentes do material e aos mecanismos de corrosão sob tensão. Podendo atuar em contornos de grão, pites ou descontinuidades superficiais.

A análise de trinca de corrosão sob tensão possui aparência microscópica, podendo ser dividida em período de propagação da trinca e no período de indução da trinca. O período de indução da trinca, ou período de nucleação, é o período em que terá os primeiros vestígios do surgimento da trinca.

A falha, de acordo com a Figura 8, ocorre na interseção dos três conjuntos. Como a corrosão sob tensão ocorre para cada tipo de meio corrosivo, tipo de material e solicitações mecânicas, alternando essas condições poderá evitar o surgimento da falha.



Figura 8 - Fatores essenciais para que ocorra corrosão sob tensão.
Fonte: adaptado de CHENG (2013).

Devido ao aumento da superfície de contato, a corrosão ocorre de forma facilitada na estrutura, ocasionando uma corrosão superficial nas micro trincas e, conseqüentemente, nas regiões intergranulares e intragranulares. Os contornos de grãos preferidos para a corrosão possuem maior energia do que a energia da matriz. A velocidade de penetração das trincas intergranulares, estando sob ação de tensão, é muito maior do que a penetração puramente química. As fraturas intragranulares, na presença de tensões, irão modificar qualitativamente o processo de corrosão, acarretando um mecanismo de corrosão que não ocorre na ausência de tensão (GENTIL, 2011).



**Figura 9 – Corrosão sob tensão detectada por ensaio visual.
Fonte: OLIVEIRA, 2022**

Os parâmetros experimentais como pH e tensão servem para validar os testes de CST. O pH ácido é delimitado para simular condições realistas de operação em ambientes agressivos, intensificando os mecanismos de fragilização por hidrogênio, permitindo assim, uma avaliação mais precisa da influência da dureza na ZTA. A corrosão pode ser evitada através da alteração do meio corrosivo através do controle do pH e a desaeração. (FRAUCHES, 2014).

Já a tensão no ensaio de flexão de quatro pontos, conforme será abordado no item 2.10, facilita a avaliação da nucleação e propagação de trincas sob condições de carga constante em temperatura ambiente. A corrosão envolve o material e o meio, existindo outra variável importante que é a temperatura (ZEEMANN, 2003).

2.4.1 Fissuração por Corrosão Sob Tensão

A fissura por corrosão sob tensão (CST) é um termo usado para apresentar falhas em materiais da engenharia, acarretando propagação lenta e fissuras induzidas pelo ambiente pelo qual se encontra. A propagação de trincas é o resultado das combinadas interações, reações de corrosão e consonância de tensões mecânicas (Jones, 1994).

A ocorrência da corrosão sob tensão, para um determinado material, depende tanto de uma tensão quanto de um ambiente agressivo, principalmente uma tensão de tração. Os aços das tubulações são expostos a eletrólitos presos entre o material descoberto e o revestimento do tubo nas operações de dutos que ocorrem no campo.

Logo, a solução eletroquímica ou química é desenvolvida para suportar a corrosão sob tensão da tubulação (Fu e Cheng, 2010).

O agente que irá propiciar o mecanismo de corrosão sob tensão é oriundo do meio que o material está inserido. Abaixo, pode-se perceber qual será o elemento que irá promover a corrosão para cada material:

Tabela 2 - Meios que podem causar CST em ligas
Font: AHMAD (2006)

Metal	Meio corrosivo
Ligas de alumínio	Soluções de NaCl
	Água do mar
	Ar ou vapor d'água
Ligas de cobre	Soluções de amônia
	Água ou vapor d'água
Aço carbono	Soluções de NaOH
	Soluções de H ₂ S
	Soluções de HCN
Aços de baixa liga	Soluções de H ₂ S
	Soluções de HCl
Aços inoxidáveis	Soluções de H ₂ S
	Água do mar
	Soluções de NaCl

A tensão acontece com a flutuação de pressão do gás natural, da pressão operacional ou do petróleo líquido (Zheng et al., 1997). Outrossim, as deformações longitudinais induzidas pelo movimento do solo e as tensões privilegiam para que ocorra o início da propagação das fissuras de CST nas tubulações (*Canadian Energy Pipeline Association*, 1998).

A suscetibilidade dos aços carbono a corrosão sob tensão é tanto maior quanto maiores forem o limite de elasticidade, dureza do aço e concentração de H₂S. A probabilidade de corrosão por H₂S varia inversamente com sua dureza, quanto maior a dureza, menor a resistência à corrosão (SILVA TELLES, 2006).

Pequenas quantidades de hidrogênio podem produzir fragilização severa em diversos metais. Metais que possuem estrutura atômica cúbica de corpo centrado e hexagonal compacto são as mais suscetíveis à fragilização pelo hidrogênio, de tal

forma que porcentagens tão pequenas quanto 0,0001% podem causar trincas no aço. O hidrogênio presente em solução sob a forma monoatômica intersticial de tamanho reduzido, à medida que o hidrogênio se difunde para dentro dos poros, ocorrendo um aumento de pressão o que ocasiona a fratura (DIETER, 1988).

Quando aços de alta resistência e aços de baixo carbono estiverem expostos em concentrações superiores a 1ppm de H₂S pressões superiores a 10.000 psi (690 MPa), o risco de falha por CST é significativo. A probabilidade nos aços inox ferríticos aumenta também quando a dureza é superior a 29 Rockwell C (MAINIER, 2007).

2.4.2 Características das Fissuras por Corrosão Sob Tensão

A fissura ocasionada pela CST possui duas modalidades para ser originada: quando o pH do ambiente é quase neutro e quando o pH é alto.

Leis et al (1997) conferiram também que as trincas, de modo geral, apresentam um local de preferência para aparecimento na circunferência do duto, como é demonstrado na Figura 10:

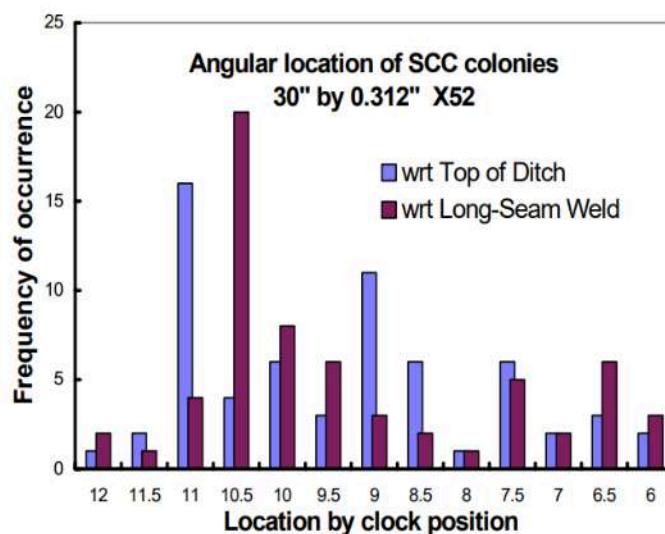


Figura 10 - Incidência de CST como uma função de posição horária em torno da tubulação.

Fonte: Leis et al, 1997

2.4.2.1 Trincas por corrosão sob tensão em ambientes com pH quase neutro

Trincas por corrosão sob tensão com pH quase neutro são principalmente transgranulares. As fissuras são mais largas do que aquelas formadas sob pH alto, além de ficarem cobertas com restos de produtos de corrosão. (Cheng, 2013)

Essas trincas são encontradas em grupos de várias trincas paralelas à direção da maior tensão na superfície externa dos tubos. Suas dimensões variam em profundidade e comprimento, crescendo ao longo da direção da espessura da parede do tubo e ao longo do sentido axial à superfície do tubo, como pode ser verificado na Figura 11. (Cheng, 2013)

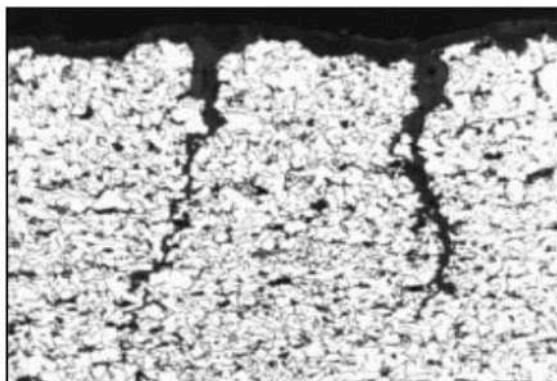


Figura 11 - Seção metalográfica de CST em pH alto
Fonte: NEB, 1996

Em relação a ocorrência, Leis et al (1997) afirmam que o tempo médio para o aparecimento das primeiras trincas causadas por CST em ambientes de pH quase neutro são de 21,3 anos, nos Estados Unidos.

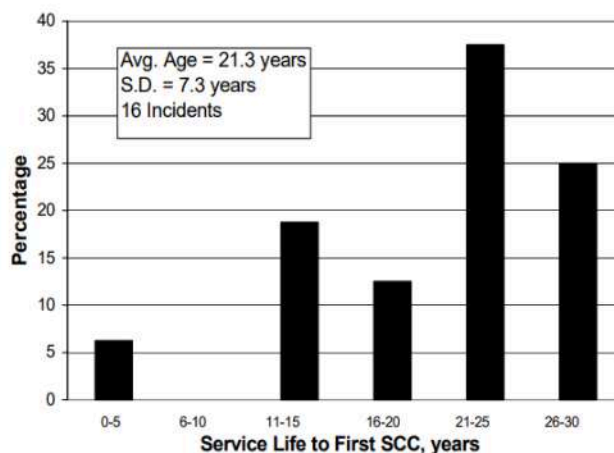


Figura 12 - Vida útil de dutos até a primeira incidência de CST em ambiente de pH quase neutro
Fonte: Leis et al, 1997

2.4.2.2 Trincas por corrosão sob tensão em ambientes com pH alto

O modo de fratura nessas condições tende a ser intergranular, muitas vezes com pequenas ramificações. Geralmente as trincas são pequenas e estanques. Existe extensa fissuração secundária entre grãos, como resultado da natureza ramificada destas falhas (Cheng, 2013).

Essa modalidade de trinca geralmente é axial, com poucos casos de trincas transversais, como pode-se ver na Figura 13.

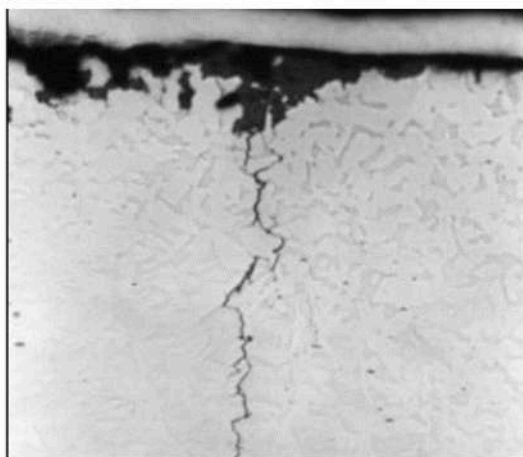


Figura 13 - Seção metalográfica de CST em pH alto
Fonte: NEB, 1996

Quanto a sua ocorrência, Leis et al (1997) afirmam que o tempo médio para o aparecimento das primeiras trincas causadas por CST em ambientes de alto pH são de 22,9 anos nos Estados Unidos, como a Figura 14 indica.

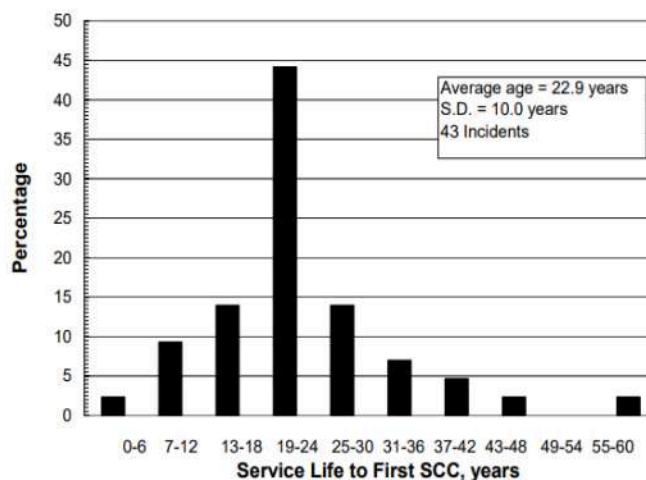


Figura 14 - Vida útil de dutos até a primeira incidência de CST em ambiente de alto pH
Fonte: Leis et al, 1997

2.5 MECÂNICA DA FRATURA

O processo de fabricação, processamento, usinagem e formação de um material pode gerar uma descontinuidade, que poderá ocasionar uma falha futura num componente mecânico. Essas falhas podem ser encontradas tanto na superfície de tais equipamentos quanto no seu interior. A mecânica da fratura é a análise dessas falhas, a fim de discriminar as falhas que não serão propagadas das que irão causar uma falha catastrófica. O estudo da mecânica da fratura é um ramo de estudo relativamente novo, começando a ser estudando por volta de um século atrás (T.L. ANDERSON, 1995), porém é amplamente utilizado no estudo de análise de falhas em juntas soldadas, pois tem proporcionado uma nova visão sobre os problemas de descontinuidade dos materiais, pautados nos conhecimentos da tenacidade à fratura. Desta forma conhecimentos teóricos como fórmulas da mecânica da fratura e experimentais como ensaio de Charpy e de simulação como uso de softwares como o Ansys, podem determinar a criticidade de defeitos em equipamentos sob tensão tais como vasos de pressão e tubulações soldadas e assim possibilitar critérios de substituição reparo e manutenção desses equipamentos (Allenstein, 1986).

A mecânica da fratura é essencial para compreender o surgimento e a propagação de trincas por CST, visto que a geometria da superfície modificada pelo processo de corrosão pode ocasionar em locais de concentração de tensão. Neste estudo, os conceitos de concentração de tensão e modos de propagação de trincas (modo I) foram aplicados para avaliar como a dureza do aço ASTM A516 Gr70 e as condições de soldagem influenciam a nucleação e o crescimento de falhas.

Para se entender como a mecânica da fratura ocorre, é necessário enumerar os agentes e fenômenos que compõem o estudo.

2.5.1 Tensões

São as distribuições de forças que atuam em um ponto da superfície de um corpo (SHIGLEY, 8ª Edição). No caso de uma carga perpendicular à estrutura solicitada, temos que a tensão cisalhante é τ , dada pela Eq. 5:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (5)$$

Enquanto a carga for paralela à estrutura, é denominada tensão axial: σ_z , obtida pela Eq. 6:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Quando a carga for um momento de força aplicado à estrutura, é denominada tensão axial: σ_x , obtida pela Eq. 7:

$$\sigma_x = \frac{My}{I} \quad (7)$$

Em todos os casos, a unidade de medida de acordo com o sistema internacional é N/mm² ou MPa.

2.5.2 Concentração de Tensão

É um local em um corpo onde, devido a condições geométricas, topográficas e metalúrgicas, tensões são concentradas e amplificadas. Se o material for dúctil e a carga estática, a carga considerada no projeto de um componente mecânico pode causar o escoamento em uma posição crítica num entalhe, que pode envolver o processo de redistribuição de tensões, encruamento localizado por deformação do material e deformações plásticas na ponta da trinca. Em tais casos, deverá ser considerado o fator de concentração de tensão geométrico teórico K_t nos cálculos, como a Figura 15 exemplifica um local com um K_t específico e a Figura 16 simula os cálculos de tensão considerando eses fatores.

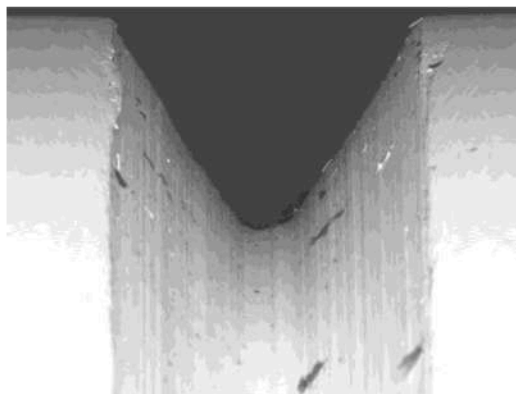


Figura 15 - Entalhe em V em um corpo de prova
Fonte: DOS SANTOS, Célia A. L. 2012

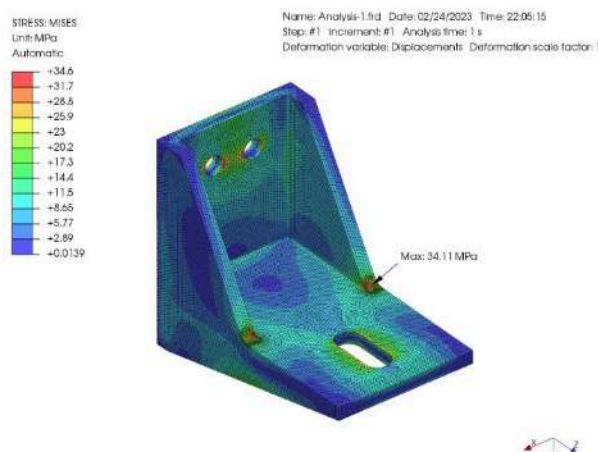


Figura 16 – Evidenciamento dos concentradores de tensão (áreas em vermelho) em um componente por meio do *software* de simulação Ansys
Fonte: FILIPINI, Jean Carlos. 2023

Dependendo da natureza da carga aplicada no corpo, haverá uma tensão normal máxima ou tensão de cisalhamento máxima permitida no material, demonstrado nas Eq. 8 e 9:

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom} \quad (8)$$

$$\tau_{max} = K_{ts} \tau_{nom} \quad (9)$$

Nesses cenários, K_t é o fator geométrico de concentração de tensão para a tensão normal, enquanto o de cisalhamento é K_{ts} (SHIGLEY, 8º EDIÇÃO).

2.5.3 Teoria da Falha

Existem diversas teorias de falhas adotadas para diferentes condições do material. De maneira geral, os materiais são diferenciados entre dúcteis ($\epsilon_f \geq 0,05$ e que possuem uma resistência ao escoamento identificável) e frágeis ($\epsilon_f \leq 0,05$ e que não possuem uma resistência ao escoamento identificável). O aço ASTM A516 Gr70 é um aço de baixo carbono e baixa liga, dessa forma, é configurado um material dúctil.

Nesta análise, será usada a teoria da energia de distorção para materiais dúcteis. De acordo com essa teoria, o escoamento de um material ocorre quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por distorção por unidade de volume no escoamento sob tração ou compressão simples do mesmo material. O estado de tensão mostrado na

Figura 17 é de tensão hidrostática devido a tensões σ_{av} atuando em cada uma das três direções principais. A fórmula para σ_{av} é dada pela Eq. 10:

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (10)$$

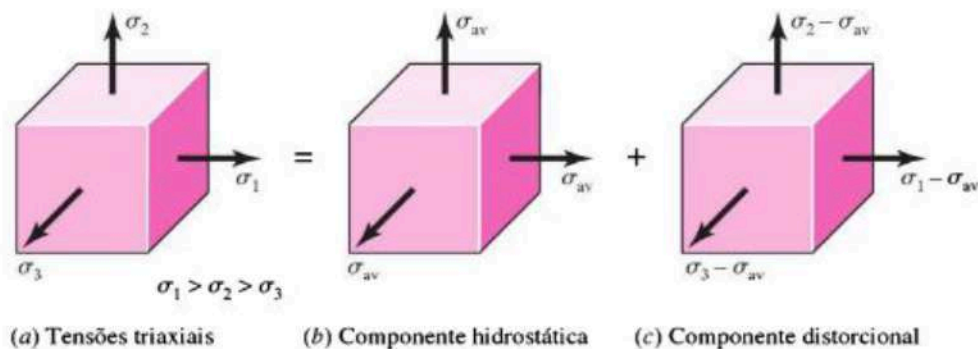


Figura 17 - Estado de tensões hidrostáticas
Fonte: SHIGLEY, 8ª Edição

Sabe-se que a equação de tensão x deformação se dá pela Eq. 11:

$$\sigma = E\epsilon \quad (11)$$

Temos também que a equação de energia de deformação por unidade de volume para tração simples é $u = \frac{1}{2}\epsilon\sigma$, substituindo na equação de tensão por deformação da tensão hidrostática, obtém-se a Eq 12:

$$u = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)) \quad (12)$$

A energia de deformação necessária para produção de mudança de volume apenas, pode ser obtida por substituição de σ_{av} em lugar de σ_1 , σ_2 e σ_3 , obtemos a Eq. 13:

$$u_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E}(1 - 2\nu) \quad (13)$$

Simplificando, temos a Eq. 14:

$$u_v = \frac{(1-2\nu)}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)) \quad (14)$$

A energia de distorção (15) pode ser obtida pela subtração da energia de deformação por unidade de volume (12) pela energia de deformação para mudança de volume (14):

$$u_d = u - u_v \quad (15)$$

Para o ensaio de tração uniaxial, quando do escoamento, $\sigma_1 = S_y$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, a energia de distorção resulta na Eq. 16:

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (16)$$

Existem três modos de propagação de trinca, como mostrado na Figura 18. O modo I indica a fratura originada por tensão de tração, enquanto o modo II é o de deslizamento e o III sendo o de rasgamento.

Nas aplicações práticas, o modo I é o mais comumente achado em equipamentos que apresentam trinca em suas superfícies.

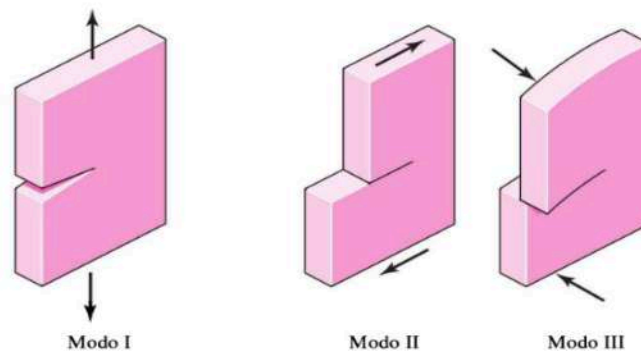


Figura 18 – Modos de propagação de trinca
Fonte: SHIGLEY, 8ª Edição

Para a propagação da trinca no modo I, pode-se descrever a propagação da trinca utilizando a Fórmula 17:

$$K_I = \beta \sigma_z \sqrt{\pi a} \quad (17)$$

Onde o fator modificador da intensidade de tensão é tabelado em função da razão entre o comprimento da trinca e a distância do centro da trinca até a borda da placa, conforme a Figura 19.

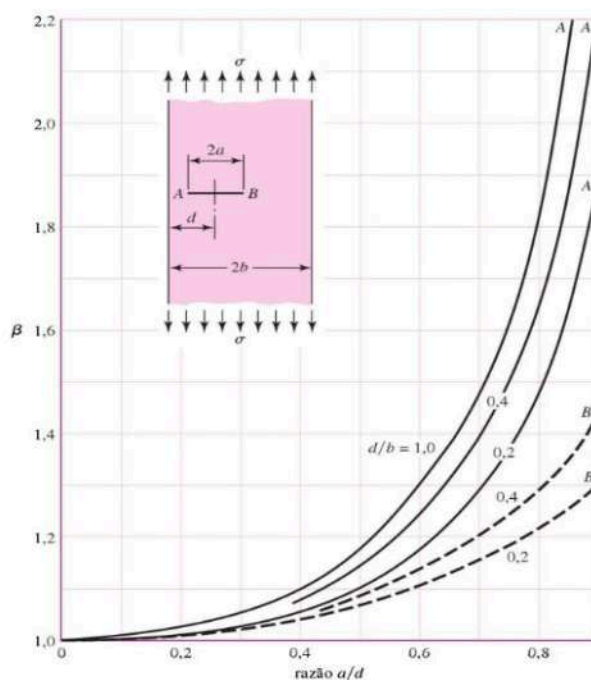


Figura 19 – Tabela de fator de modificador de intensidade de tensão
Fonte: SHIGLEY, 8ª Edição

2.6 REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS

Os revestimentos anticorrosivos, ou protetores, tem por finalidade proteger a tubulação enterrada por meio de uma barreira impermeável entre o material metálico e o eletrólito (solo). Os processos corrosivos ocorrem quando as correntes das pilhas formadas na superfície externa da estrutura vão para o solo, abandonando o material metálico. Ou seja, quando a corrente flui da parte anódica para a parte catódica. É devesas importante considerar a necessidade da complementação da proteção

anticorrosiva com proteção catódica, pois não há revestimentos que consigam proteger por completo o duto (NUNES, 2005).

Esses revestimentos são utilizados para evitar a formação de pilhas eletroquímicas na superfície da estrutura. Teoricamente, o processo cessaria totalmente se fosse possível obter um revestimento totalmente impermeável, com 100% de eficiência. Porém, por mais que o revestimento seja da melhor qualidade possível, sempre há algum ponto da tubulação que não está protegida. De acordo com (NUNES, 2005), um fator importante para a escolha do revestimento é a eficiência, que decreta a cobertura oferecida pelo revestimento em relação a área total a ser protegida contra o processo de corrosão.

Para entregar um desempenho adequado, os revestimentos anticorrosivos deverão apresentar as seguintes características, sendo estas: resistência a água; resistividade elétrica e rigidez dielétrica; resistência a agentes biológicos e produtos químicos; resistência ao deslocamento catódico; resistência mecânica; resistência aos esforços do solo; etc.

2.6.1 Resistência a Água

Formação de uma camada protetiva que deixe uma barreira impermeável, apresentando baixa absorção de umidade e garantindo a capacidade de isolamento elétrico. Também impede a formação de eletrólito (solo) entre o revestimento e o substrato metálico.

2.6.2 Resistividade Elétrica e Rigidez Dielétrica

Impedindo a absorção de umidade e possuindo boas características dielétricas, o revestimento tende a isolar o material metálico do eletrólito (solo), minimizando assim, a passagem de corrosão.

2.6.3 Resistência a Agentes Biológicos e Produtos Químicos

Resistentes a ação de fungos e bactérias presentes no solo e resistentes ao envelhecimento, ou seja, que não percam suas propriedades mecânicas e que tenham condições de manter sua capacidade protetora por mais tempo possível, garantindo assim uma maior vida útil da estrutura.

2.6.4 Resistência ao Deslocamento Catódico

A corrente de proteção catódica, gera uma reação eletroquímica na superfície metálica, produzindo íons de hidroxila (OH^-) e gás hidrogênio (H_2). O pH da superfície aumenta, acarretando um ataque químico ao revestimento e perda de propriedades essenciais, como a adesão e a resistência mecânica.

O gás hidrogênio, também formado na reação eletroquímica, pode causar a perda de aderência do revestimento. Isso permite uma maior penetração de eletrólito (solo) entre o revestimento e a superfície metálica, ou seja, permitindo um maior avanço desse processo. Esse processo também pode ser chamado de superproteção catódica.

2.6.5 Resistência Mecânica

Inclui a resistência dos sistemas de revestimento a danos mecânicos devido a esforços de abrasão, de impacto, de compressão, de penetração etc.

Devido aos impactos que os revestimentos estão sujeitos durante o transporte, manuseio e instalação da estrutura metálica no solo, é necessário que a tubulação seja resistente, evitando assim os danos com mais facilidade e garantindo uma maior vida útil para a estrutura.

2.6.6 Resistência aos Esforços do Solo

As tubulações estão sujeitas a operações com temperaturas elevadas ou ciclos de expansão e contração, causando assim, o cisalhamento sobre o revestimento. Isso acontece a partir do momento que a tubulação está instalada ou enterrada.

As forças de cisalhamento podem causar enrugamentos e descolamentos. Os processos de perfurações horizontais em dutos enterrados, geram esforços mais severos de cisalhamento sobre o revestimento, sendo assim, importante considerar esse processo ao selecionar o sistema de revestimento para cada aplicação.

Todavia, nos tubos enterrados, estes esforços também atuam de forma circunferencial pelo solo sobre o revestimento. Estes esforços, causados pela contração e expansão do solo, são conhecidos como *soil stress*.

CST foi localizado em diversos tipos de solos, de acordo com Leis et al (1997). Foi notado, no entanto, que as trincas originadas por CST ocorrem

primariamente em solos que são alternadamente molhados e secos. Solos argilosos onde possuem drenagem de umidade através ou ao longo da tubulação também são locais onde pode ocorrer essas trincas.

2.6.7 Potencial Redox

O potencial redox corresponde ao potencial de oxidação e redução de um ambiente. Através deste parâmetro é possível estimar se o solo é aeróbio ou anaeróbio e se compostos químicos foram reduzidos ou ainda estão presentes nas suas formas oxidadas. A medida do potencial redox pode ser usada na identificação das condições do solo em relação à presença de bactérias anaeróbias tais como as bactérias redutoras de sulfato (LOUREIRO et al, 2007).

2.7 MATERIAIS DE TUBULAÇÕES

O material da tubulação é vital para o funcionamento de um sistema de transporte eficiente. Composição e reatividade química, processo de fabricação, eletromagnetismo e diversos outros fatores influenciam na seleção do material para ser usado no projeto e aplicação da tubulação.

Tubulações que são implementadas em ambientes agressivos precisam de materiais que sejam resistentes aos íons livres presentes na umidade, atmosfera e na composição do solo.

Existem diversos tipos de materiais disponíveis serem empregados, sendo cada tipo tendo suas aplicações específicas para cada situação, contendo inúmeros exemplos. Os três grupamentos de materiais mais utilizados em tubulações podem ser discriminados na tabela abaixo:

Tabela 3 - Listagem de materiais utilizado em tubulações

Material	Exemplos	Observações
Metais	<ul style="list-style-type: none"> • Ferros e Aços • Ligas de Alumínio • Ligas de Magnésio • Ligas de Níquel • Ligas de Titânio 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações em todas as indústrias. • Possibilidade de adição de elementos de liga, para obtenção de um metal específico para aplicação. • Custo elevado
Cerâmicos	<ul style="list-style-type: none"> • Argila • Barro 	<ul style="list-style-type: none"> • Primeiras tubulações feitas • Atualmente utilizada para aplicações térmicas e estéticas • Baixa resistência mecânica
Polímeros	<ul style="list-style-type: none"> • PET • EPDM • PP • PE • PVC 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação principalmente residencial • Mais leves • Pouca aplicação térmica
Compósitos	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado no setor de saneamento • Baixa manutenção

2.7.1 Aço ASTM A516

A série A dos aços ASTM significa aço para uso de estruturas, mais comumente usados em vasos de pressão soldados e estruturas onde a ductilidade é importante. O aço ASTM A516 possui tamanho de grãos de ferrita e perlitas grossas, granulometria própria para aplicações de baixas ou médias temperaturas de operação dos vasos de pressão (AÇOPORT, 2024).

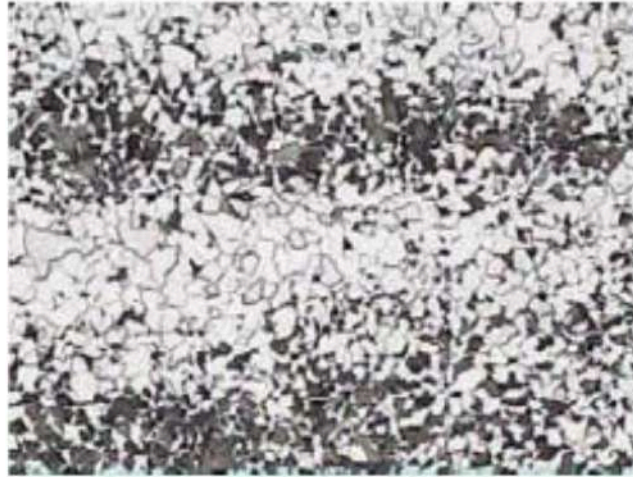
Esse aço possui 4 graus: tipo 55, 60, 65 e 70, em que a numeração significa tensão de tração máxima é de 55, 60, 65 e 70 kpsi, respectivamente (380, 415, 450 e 485 MPa, respectivamente).

2.7.2 Composição Química do Aço ASTM A516 Gr70

O aço ASTM A516 Gr70 pode ser caracterizado com um aço carbono de baixa liga, possuindo manganês, fósforo enxofre e silício na sua composição.

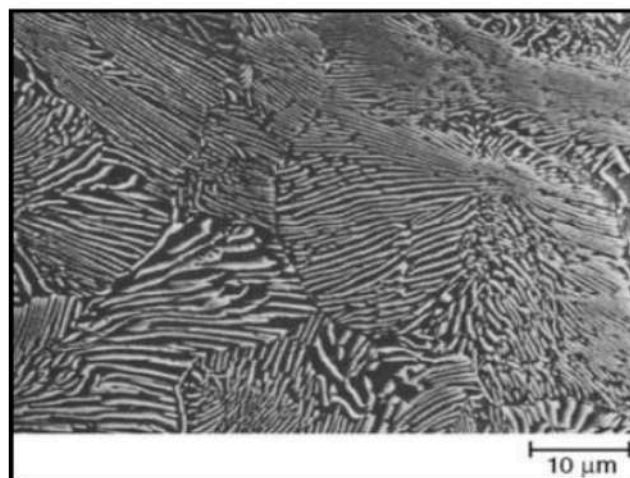
Quanto a sua microestrutura, é um aço hipoeutetóide (menos de 0,77% de carbono) e consiste em perlita e ferrita. A ferrita, conforme Figura 20, é ferro no estado alotrópico α , apresentando uma estrutura de grãos poligonais irregulares, com baixa

dureza e resistência mecânica a tração, mas com elevado alongamento e grande resistência ao choque.



**Figura 20 - Microestrutura ferrita-perlita de uma chapa de aço ASTM A516 Gr. 70. O constituinte da cor clara representa a ferrita e o constituinte escuro representa a perlita. (Bandeada - aumento de 100x).
Fonte: Donato, 2008, p. 2465**

A perlita, conforme a Figura 21, é uma combinação de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita (Fe_3C) em formato de lâminas finas. A cementita contém 6,67% de carbono, sendo muito dura e quebradiça e responsável por elevar a dureza e resistência dos aços carbono, assim como pela sua menor ductilidade. Portanto, pelo fato da perlita ser composta de ferrita e cementita acaba apresentando propriedades mecânicas intermediárias em relação a essas duas fases (CHIAVERINI, 1977).



**Figura 21 - Microestrutura perlítica com uma aparência lamelar composta pelas fases cementita (parte escura) e ferrita (parte clara).
Fonte: ASM Handbook Vol. 9, 2004, p.383**

O diagrama ferro carbono exemplifica com mais clareza a transformação de fase no qual todo aço é baseado. Este diagrama define a composição das regiões de temperatura em que várias fases do aço são estáveis, assim como os limites de equilíbrio entre as fases (KRAUSS, 1994).

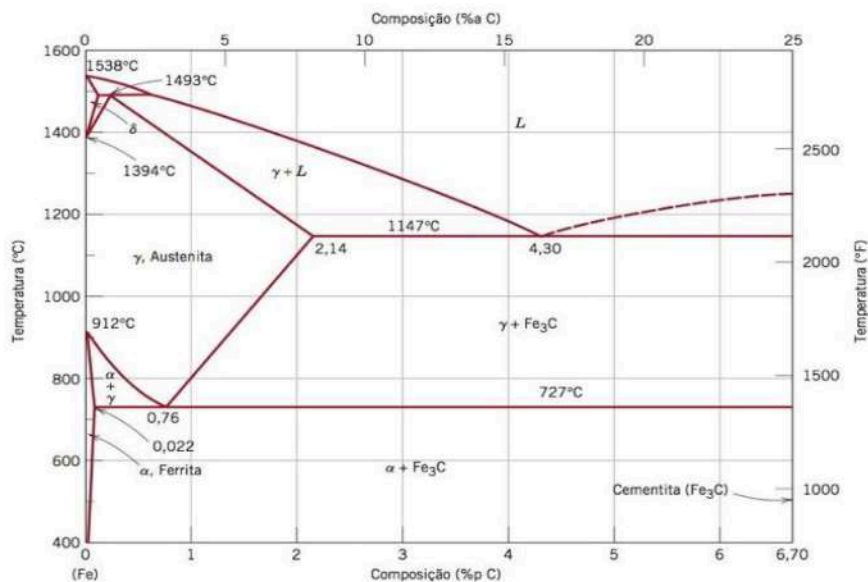


Figura 22 - Diagrama de Equilíbrio do Ferro Carbono
Fonte: Callister, 8ªed

2.8 PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é um dos processos de união de materiais mais utilizados na construção de estruturas do setor petroquímico. Tubos que são fabricados por soldagem são denominados como tubos costurados.

Um dos principais mecanismos da soldagem para a união de materiais é o processo por fusão. Nesse método, a área de soldagem é aquecida por uma fonte concentrada de calor, promovendo a fusão do metal base. Para completar a junção, é necessária a adição de metal de aporte, que se funde e solidifica junto ao metal base, formando a solda.

A Figura 23 ilustra o processo de soldagem por fusão.

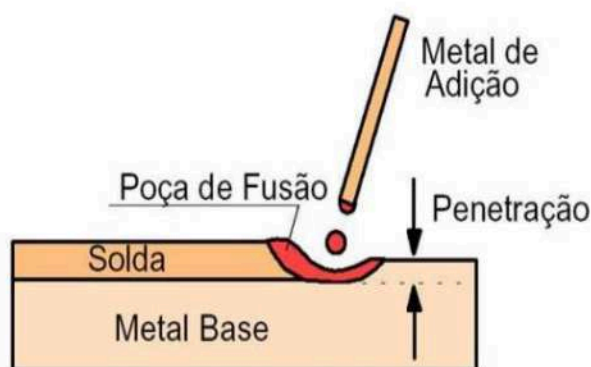
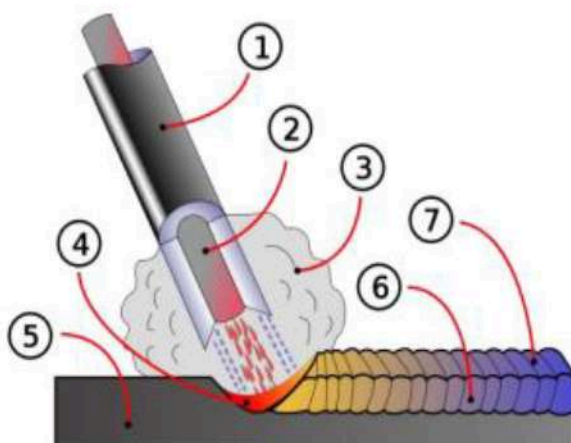


Figura 23 - Esquemática dos principais termos da soldagem
Fonte: EEEP - Ceará

Esse calor é proporcionado pelo curto-circuito entre o metal base e o eletrodo, formando a poça de fusão feita de metal de adição, conforme a Figura 24.



- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1.Revestimento de Fluxo | 2.Vareta (Alma) |
| 3. Gás de proteção(Plasma) | 4.Poça de fusão |
| 5.Metal base | 6.Metal de solda |
| 7.Escória solidificada | |

Figura 24 - Diagrama soldagem a arco elétrico para um eletrodo revestido
Fonte: EEEP - Ceará

Existem diversos métodos de soldagem, tais como: Eletrodos Revestidos, MIG/MAG, TIG, Arco Submerso e por Resistência Elétrica.

Dentre esses, os métodos mais utilizados na fabricação de tubos são: soldagem por Eletrodo Revestido, MIG/MAG, TIG e Arco Submerso.

2.8.1 Metalurgia da Solda

A soldabilidade mútua entre os materiais do processo, garante a existência de uma junta coesa e segura. Na metalurgia da solda, pode-se identificar algumas zonas de acordo com a Figura 25:

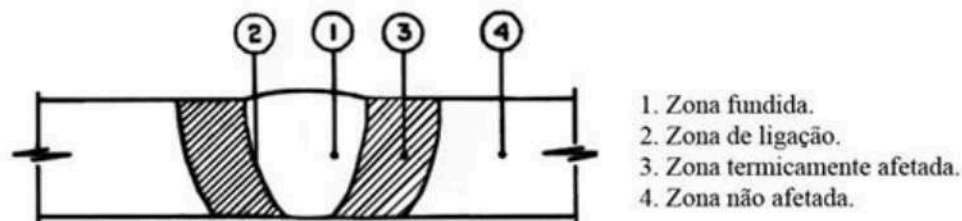


Figura 25 - Metalurgia da Solda
Fonte: Jonas (2009)

Zona 1: camada depositada de metal de adição;

Zona 2: envolve a zona fundida. É a região de transição que, durante a soldagem, foi aquecida entre a fase líquida e sólida;

Zona 3: zona termicamente afetada (ZTA). Região onde o metal original foi superaquecido. O crescimento dos grãos gera uma estrutura denominada Widmanstatten. É a região mais frágil da junta;

Zona 4: refere-se ao metal que não sofreu modificações metalúrgicas. Excluem-se as alterações mecânicas como, por exemplo, as tensões residuais e deformações.

2.8.2 Soldagem com Eletrodo Revestido

Esse processo utiliza eletrodo com revestimento, possuindo uma alma metálica envolta por um revestimento conforme Figura 26 abaixo:

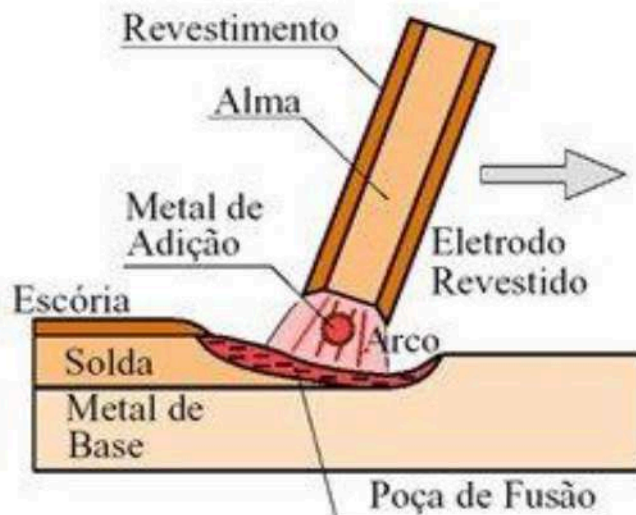


Figura 26 - Processo por Eletrodo Revestido
Fonte: Research Gate

O revestimento tem como função: estabilizar o arco elétrico; proteger a poça de fusão e o metal de solda contra contaminação da atmosfera através da camada de escória e da formação de gases e ajustar a adição de elementos de liga.

As vantagens são: custo relativamente baixo; simplicidade do equipamento necessário e possibilidade de uso em locais de difícil acesso. Já as desvantagens são: baixa produtividade; necessidade de operador experiente e cuidado especial com os eletrodos.

2.8.3 Soldagem MIG/MAG

É o processo em que a união soldada é obtida entre o eletrodo consumível e a peça de trabalho, conforme Figura 27 a seguir:

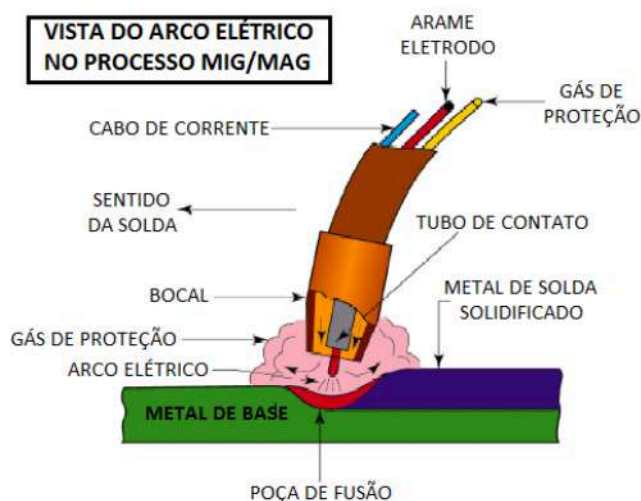


Figura 27 - Processo por MIG/MAG
Fonte: Sumig

A proteção da região da solda é feita por um gás ou mistura de gases, podendo ser inertes ou ativos. MIG (Metal Inerte Gás) é quando a proteção é de um gás inerte ou a mistura deles. MAG (Metal Gás Ativo) é quando a proteção é um gás ativo ou a mistura deles.

O processo é normalmente semiautomático, com o eletrodo consumível em forma de arame sendo continuamente alimentado. Esse processo também pode ser feito por transferência por curto-circuito, globular ou por spray. O processo MAG não permite a utilização de transferência por spray, diferente do processo MIG, que permite todos. Na maioria das vezes, esse processo será trabalhado com corrente contínua de polaridade positiva (CC +).

As principais vantagens são: alta taxa de deposição; não há formação escória e limpeza pois não existe fluxo e exige menor habilidade do operador. Por outro lado, as desvantagens são: maior custo de equipamento e manutenção; menor variedade de eletrodos e maior sensibilidade a variação dos parâmetros elétricos.

2.8.4 Soldagem TIG

Esse processo consiste na utilização de um eletrodo de tungstênio não consumível. A proteção da solda é obtida a partir de um gás inerte, ou mistura de gases inertes (argônio ou hélio, por exemplo) podendo ou não ser realizado com adição de metal. Não se utiliza curto-circuito, pois pode transferir átomos de tungstênio

para a peça. Pode ser realizado com corrente contínua ou alternada, tendo a fonte com saída tipo tensão constante. A Figura 28 ilustra o processo:

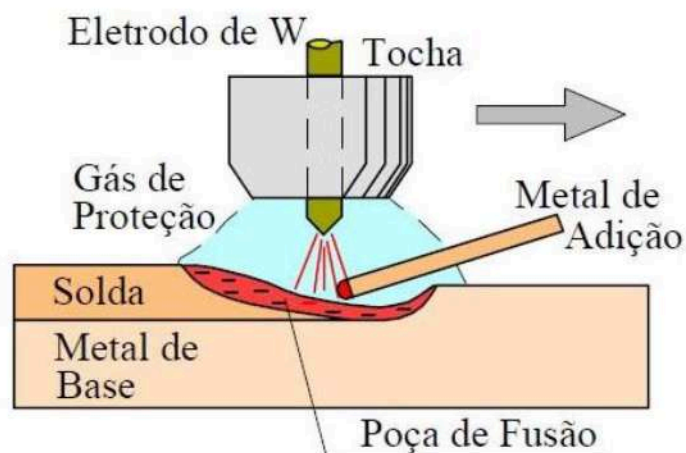


Figura 28 - Processo TIG
Fonte: Infosolda

As principais vantagens desse processo são: excelente controle de energia, sendo útil para peças com espessura pequena; soldagem de materiais de difícil soldabilidade; não há grande geração de fumos e vapores; soldas não exigem limpeza após o processo e solda a maior parte dos metais e ligas. Porém, as principais desvantagens são: baixa produtividade, custo elevado do equipamento e dos consumíveis.

2.8.5 Soldagem por Arco Submerso

Processo no qual a união dos metais é obtida por fusão do arco elétrico, estabelecido entre o eletrodo metálico e a peça de trabalho. Esse arco ocorre sob uma camada de um fluxo (material granular visível) que é colocado sobre a região de solda, protegendo-o da contaminação atmosférica. A adição de metal é obtida do próprio eletrodo e a operação é normalmente mecanizada, podendo também ser semiautomática. Esse processo ocorre em corrente alternada ou corrente contínua, sendo sua fonte com tensão e corrente constantes.

A Figura 29 ilustra o processo:

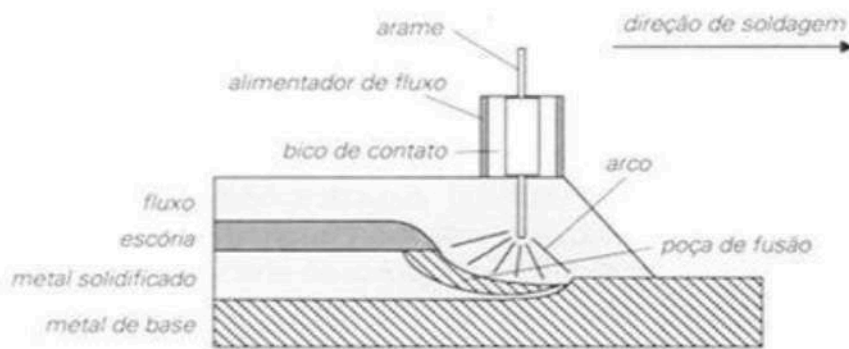


Figura 29 - Processo por Arco Submerso
Fonte: Infosolda

As principais vantagens desse processo são: possibilidade de soldar em alta velocidade com altas taxas de corrente e altas taxas de deposição; alto rendimento de operação e não requer habilidade operacional. Já as principais desvantagens são: alto valor do equipamento; não recomendado para pequenas produções e limitação posicional (somente na posição plana ou horizontal).

2.8.6 Soldabilidade do Aço ASTM A516 GR70

O aço ASTM A516 Gr70, possui boa resistência mecânica e a corrosão atmosférica, assim como ao choque e a fadiga. É maleável e com boa soldabilidade torna seu emprego em diversos setores produtivos viável.

No entanto, deve-se observar que durante a soldagem, ocorrem na ZAC (Zona Afetada pelo Calor) regiões de alta dureza que estão sujeitas a trincas de corrosão sob tensão, quando exposta a um meio ambiente propício (RIBEIRO, 2001).

Durante a soldagem de aços de baixa liga, a ZAC pode sofrer endurecimento, devido a mudança em sua microestrutura, causadas pelos dinâmicos ciclos térmicos que lhe são impostos (OKUMURA E TANIGUCHI, 1982).

É importante notar que o fluxo de energia de soldagem é vital para a proteção do material de trincas por CST, já que em soldagens com 45 kJ/cm, o metal de solda, metal base e ZTA estariam propensos a ter fraturas em ambientes contendo H₂S (HUANG et al, 1994).

2.9 TEORIA DO ENSAIO DE FLEXÃO DE QUATRO PONTOS

O ensaio de flexão de quatro pontos serve para avaliar a resistência à flexão e a capacidade de suportar cargas em diferentes pontos do corpo de prova (BIPODI). Durante o ensaio, o corpo de prova é posicionado entre dois pontos de suporte externo, criando um vão livre entre eles, como pode ser observado na Figura 30. A carga é aplicada em outros dois pontos, dentro do vão. Esse ensaio cria uma distribuição de cargas que resulta numa região de maior tensão no CP (NACE, 2016).

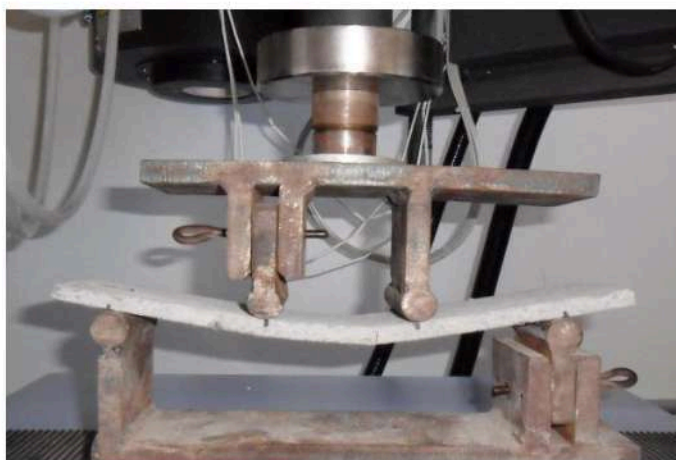


Figura 30 – Vista de um ensaio de flexão a quatro pontos
Fonte: PERRONE et al, 2011

Esse ensaio visa obter as seguintes propriedades: resistência a flexão do material, o módulo de elasticidade, comportamento em regime plástico, tenacidade e comportamento em fratura

2.10 NORMA NACE TM0316

A norma NACE TM3016 é a norma utilizada para padronizar o ensaio de flexão de quatro pontos. Para corpos de prova com a espessura de até 5mm, o posicionamento do equipamento deverá atender os seguintes requisitos:

- Espaçamento entre roletes internos: 40-60 mm;
- Espaçamento entre roletes externos: 90-130 mm;
- Diâmetro dos roletes: 5-10mm.

Espaçamento neste contexto se refere a distância do centro de um rolete até o outro, como pode ser vista conforme Figura 31.

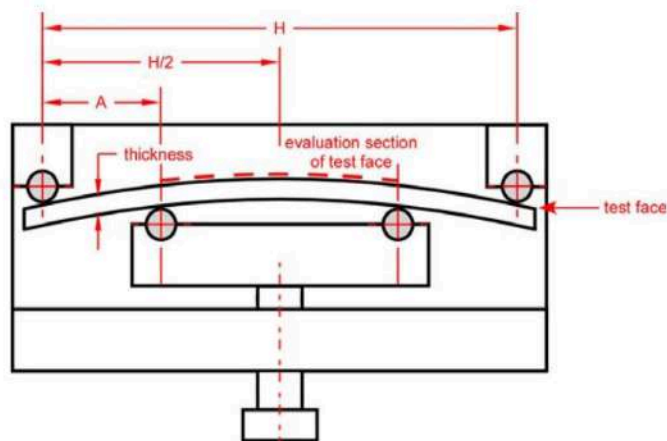


Figura 31 – Ilustração esquemática de um equipamento de ensaio de flexão a quatro pontos
Fonte: NACE TM0316, 2023

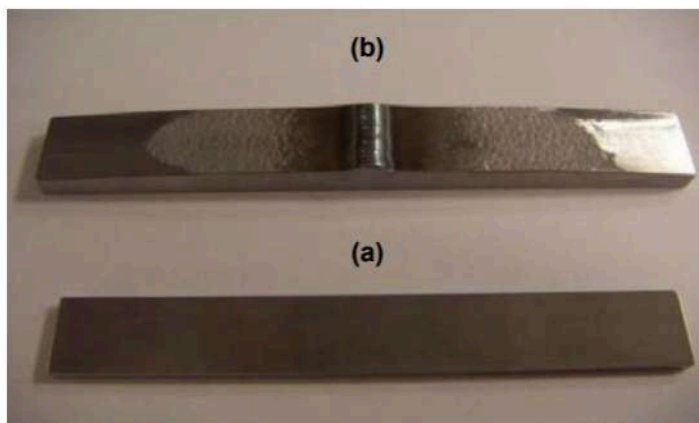
Existem também especificações para as dimensões dos corpos de prova, dependendo de seu acabamento superficial:

Tabela 4 - Dimensões típicas de CP (não mandatório)

Specimen Type	Length	Width	Thickness
Parent Material (Machined or As-received)	102 - 140 mm (4.0 - 5.5 in)	12-20 mm (0.5 - 0.8 in)	4-6 mm (0.16 - 0.24 in)
Machined Weldment	102 - 140 mm (4.0 - 5.5 in)	12-20 mm (0.5 - 0.8 in)	4-6 mm (0.16 - 0.24 in)
As-welded	127 - 152 mm (5.0 - 6.0 in)	15-25 mm (0.6 - 1.0 in)	5-10 mm (0.20 - 0.40 in)*

Fonte: NACE TM0316, 2023

A uniformidade das dimensões em um ou mais CPs deve ser garantida por meio da usinagem, respeitando uma tolerância de largura de $\pm 0,1$ mm e uma tolerância de espessura de $\pm 0,05$ mm para CPs com acabamento usinado. Já os CPs sem acabamento apresentarão variações na espessura.



**Figura 32 – CPs típicos de ensaio de flexão de 4 pontos:
(a) CP usinado e (b) CP sem usinagem de acabamento
Fonte: NACE TM0316, 2023**

Para CPs usinados (soldados ou por fusão), a rugosidade superficial da face a ser testada deverá ser de $0.250 \mu\text{m}$ ou menos, como definido pelo valor Ra na ISO 4287.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados três CP's do aço ASTM A516 Gr70 no ensaio de flexão de quatro pontos submetidos, posteriormente, a uma solução de 25% H₂S + 75% CO₂ obtendo seus dados experimentais.

Também foi analisada a metalografia do material antes e depois do ensaio, com o intuito de verificar a diferença da microestrutura em ambos os casos. Sendo estes: aparecimento de trincas por CST, a influência da dureza na nucleação de tais trincas e como o material reage ao ensaio.

3.1 MATERIAL

Este trabalho utilizou uma junta soldada, utilizando como material de base chapas de aço de classificação ASTM A 516 Gr 70 com a espessura de 17 mm, que foi disponibilizada pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT), sem as informações referentes ao procedimento de soldagem utilizado. As dimensões da chapa do aço ASTM A516 Gr70 são expressas nas Figuras 33, 34 e 35, sendo elas: comprimento, largura e espessura, respectivamente.



Figura 33 - Comprimento de 457,2 mm da chapa
Fonte: Autores



Figura 34 - Largura de 152,4 mm da chapa
Fonte: Autores

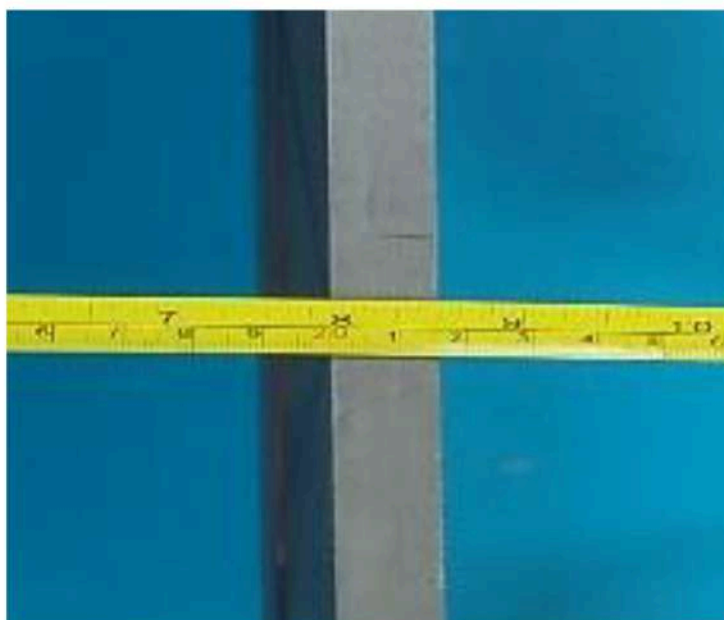


Figura 35 - Espessura de 17mm da chapa
Fonte: Autores

A Tabela 5 apresenta a composição química do material de base e metal de solda conforme a Norma ASTM A516 (2017).

**Tabela 5 – Composição química do material de base e metal de solda
(% em peso) (% Fe em balanço)**

Material	C	Si	Mn	P	S
Metal Base (ASTM A516, 2017)	0,28 máx	0,15 – 0,40	0,85 - 1,20	0,035 máx	0,035 máx
Metal de solda Fonte: Autores	0,116	0,730	1,220	0,014	0,008
Material	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
Metal Base (ASTM A516, 2017)	-	-	-	-	-
Metal de Solda Fonte: Autores	0,063	0,036	0,005	0,003	0,126

Realizou-se uma análise laboratorial para identificar o consumível usado na solda e os respectivos componentes químicos. Essa análise serviu para obter, com a maior precisão possível, as características e qual tipo de solda havia no aço ASTM A516 Gr70.

A Figura 36 ilustra a amostra enviada para análise.



**Figura 36 - Amostra da análise química
Fonte: Autores**

O resultado da análise química da solda pode ser encontrado na Tabela 5.

3.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica permite que as estruturas com características tridimensionais sejam observadas em seções bidimensionais. Esse é um motivo pelo qual a avaliação da micrografia e macrografia seja interessante (COLPAERT, 2018).

Realizou-se a análise metalográfica do metal de base, da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de solda, consistindo em macrografia, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A orientação de corte foi no sentido transversalmente ao cordão de solda, conforme Figura 37. A preparação das amostras consistiu na técnica convencional de lixamento com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, seguido de polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm . Após o polimento realizou-se o ataque químico com reagente de Nital 2%. A Figura 38 ilustra a amostra antes de ser lixada.

Foi realizada a análise quantitativa dos percentuais de região colunar e reaquescida existentes na região central do metal de solda, por microscopia ótica com aumento de 12,5X.

Para análise por microscopia ótica, foi utilizado um microscópio ótico OLYMPUS modelo BX-60M integrado a um sistema de aquisição de imagem Stream Essentials® e as análises por MEV foram realizadas através do microscópio CanScan 3200 LV 40kV, ambos pertencentes ao Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT).



Figura 37- Posicionamento dos cortes na junta soldada

Fonte: Autores



Figura 38 - Amostra antes de ser lixada
Fonte: Autores

3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA

Existem dois tipos de dureza utilizados no ramo da metalurgia: por choque e por penetração. A dureza por penetração é o que possui maior utilização, tais como: Brinell, Vickers, Knopp e Meyer. Utilizou-se a microdureza Vickers pois ela apresenta impressões que não danificam a amostra do estudo, assim como a grande precisão de medida e apenas uma escala de medida (DE SOUZA, 1982).

As medidas de microdureza foram realizadas utilizando um microdurômetro da marca Instron Wilson modelo 422MVD do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, pelo método Vickers, aplicando a carga de 0,5 kgf durante 15 segundos, conforme a norma ASTM E384-1 (2017). Foi obtido um perfil de microdureza da seção transversal das junta soldada (metal de base, ZTA e metal de solda) mantendo-se um intervalo de 1,0 mm de distância entre uma medida e outra.



Figura 39 - Máquina utilizada no ensaio de dureza Vickers
Fonte: Autores

3.4 ENSAIO DE FLEXÃO DE QUATRO PONTOS

O ensaio de flexão de quatro pontos foi utilizado para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão. O ensaio foi conduzido conforme os procedimentos listados nas Normas NACE TM0316 (2023) e NACE TM0177 (2016). Foram utilizados três corpos de prova retirados na extensão da largura da junta soldada para realização do ensaio.

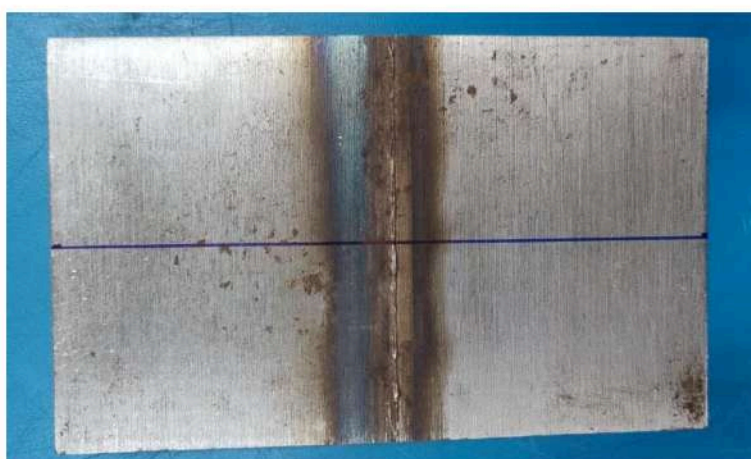


Figura 40 – Parte da junta soldada que foi utilizada para preparação das amostras
Fonte: Autores

3.4.1 Preparação e Usinagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram usinados de acordo com as dimensões padrão especificados na Norma NACE TM0316 (2023), conforme mostrado na Figura 41.

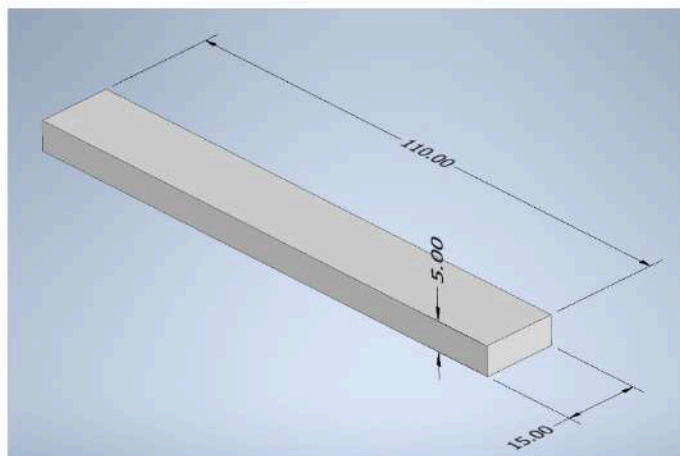


Figura 41 - Ilustração com as dimensões dos corpos de prova a serem usados no ensaio de flexão de quatro pontos

Fonte: Autores

As amostras foram usinadas utilizando uma fresadora convencional e lixamento posterior com as lixas 400, 600, 800, 1000 e 1200. As Figuras 42 e 43 mostram o processo de usinagem dos corpos de prova.



Figura 42 - Início do desbaste da placa na fresadora
Fonte: Autores



Figura 43 - Usinagem de uma das amostras após o corte
Fonte: Autores

Após a fresagem, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento para alcançarem o acabamento superficial com o limite de rugosidade determinado

pela Norma NACE TM0316 (2023). De acordo com esta Norma, a rugosidade média de teste deve ter no máximo 0,25 μm , conforme definido pelo valor de Ra.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram que as medidas de rugosidade após o processo de lixamento ficaram abaixo do valor médio máximo permitido pela norma, validando, desta forma, a realização do ensaio. As medidas foram realizadas no Laboratório de Ensaio de H₂S, CO₂ e Corrosividade (LAH₂S) do Instituto Nacional de Tecnologia (INT)

Tabela 6 - Valor de Ra do CP 1
Fonte: Autores

Surface roughness		
Ra =	0.197	um
Rp =	0.670	um
Rv =	0.672	um
Rz =	1.342	um
Rc =	0.744	um
Rt =	1.621	um
Rq =	0.249	um
Rsk =	0.108	
Rku =	3.169	

Tabela 7 - Valor de Ra do CP 2
Fonte: Autores

Surface roughness		
Ra =	0.138	um
Rp =	0.402	um
Rv =	0.468	um
Rz =	0.869	um
Rc =	0.458	um
Rt =	1.042	um
Rq =	0.170	um
Rsk =	-0.234	
Rku =	2.782	

Tabela 8 - Valor de Ra do CP 3
Fonte: Autores

Surface roughness		
Ra =	0.242	um
Rp =	1.052	um
Rv =	0.820	um
Rz =	1.872	um
Rc =	0.960	um
Rt =	2.941	um
Rq =	0.314	um
Rsk =	0.412	
Rku =	5.682	
RSm =	20.133	um

3.4.2 Procedimento do Ensaio

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de H₂S, CO₂ e Corrosividade (LAH₂S) do Instituto Nacional de Tecnologia (INT). As amostras foram montadas no dispositivo para ensaio de flexão de quatro pontos, conforme mostrado na Figura 44.

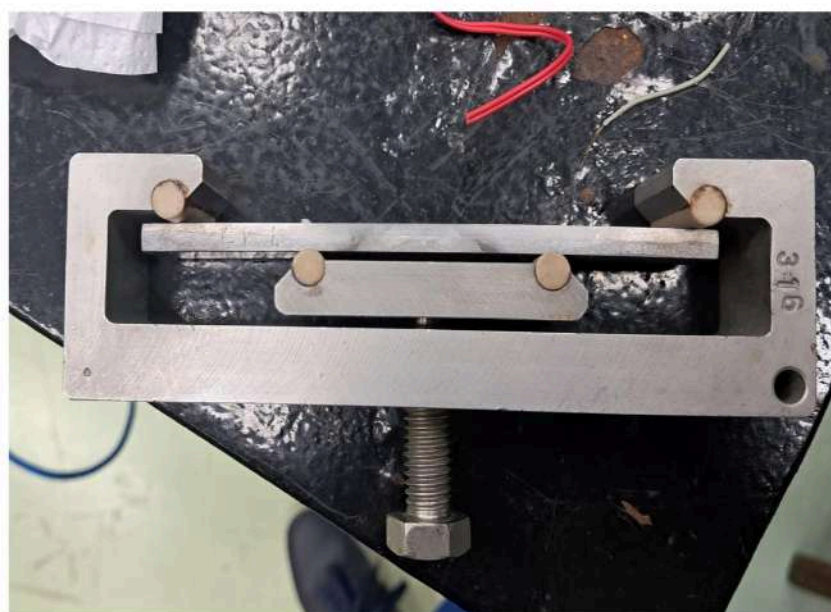


Figura 44 – Amostra montada no dispositivo para o ensaio de flexão
Fonte: Autores

Conforme a prática de experimentos feitos no INT, empregou-se 90% do limite de escoamento medido do aço ASTM A516 Gr70, que é de 260MPa. Portanto, o limite de escoamento utilizado foi de 234MPa.

Utilizando a lei de Hooke para o cálculo da deformação e considerando $E=207\text{GPa}$, temos:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (18)$$

Logo,

$$234 * 10^6 = (207 * 10^9) * \varepsilon$$

$$\varepsilon = 0,001130 \frac{m}{m}$$

Passando para micrômetro por metro, a deformação do aço ASTM A516 Gr70 é:

$$\varepsilon = 1130 \frac{\mu m}{m}$$

Após o cálculo da deformação, colocou-se os Strain Gauges em todos os CP's para o início do ensaio. A Figura 45 ilustra a montagem em um dos CP's.



Figura 45 - Montagem do Strain Gauge antes do ensaio
Fonte: Autores

A Figura 46 mostra o CP 1 com uma deformação de 1151,6 $\mu\text{m/m}$, próximo do calculado:

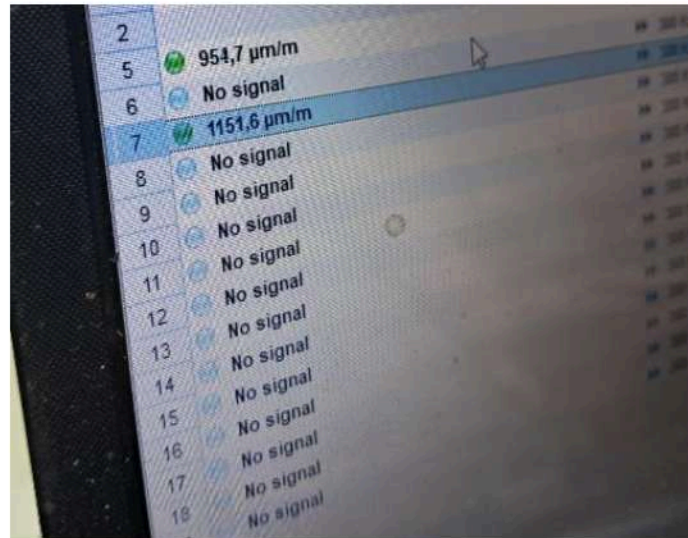


Figura 46 - Deformação de 1151,6 $\mu\text{m/m}$ no CP 1
Fonte: Autores

Repetiu-se o processo para os outros dois CP's, de acordo com as Figuras 47 e 48. O CP 2 e CP 3 possuem os valores de deformação de 1127,8 $\mu\text{m/m}$ e 1128,1 $\mu\text{m/m}$, respectivamente.

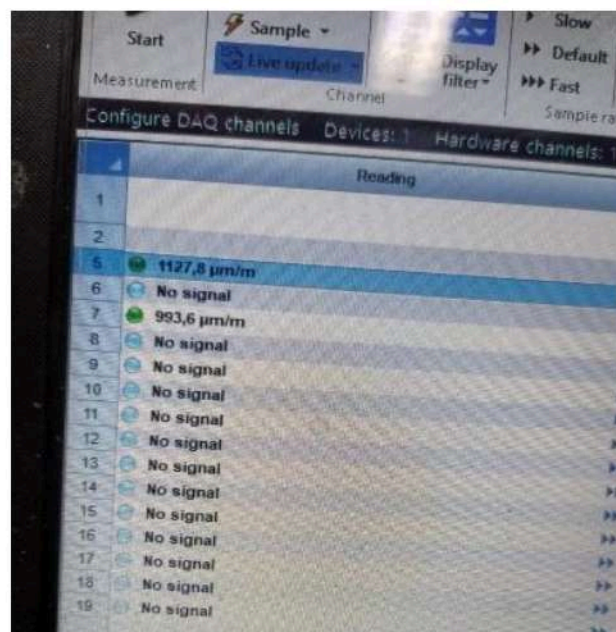


Figura 47 - Deformação de 1127,8 $\mu\text{m/m}$ no CP 2
Fonte: Autores

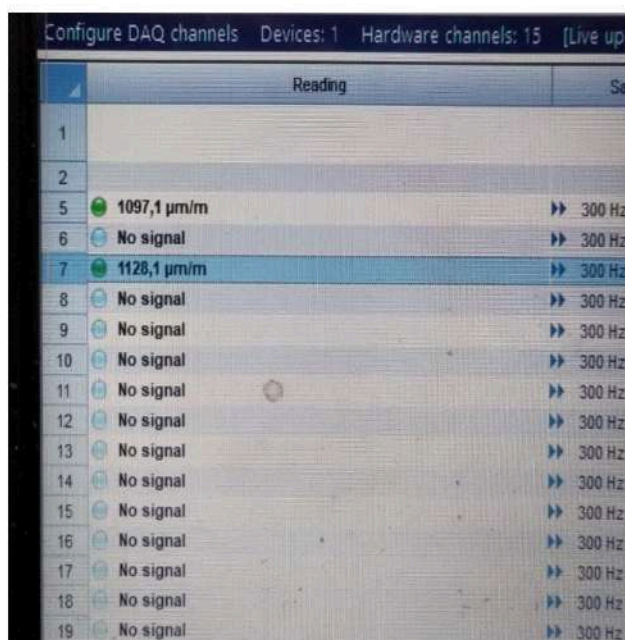


Figura 48 - Deformação de 1128,1 µm/m no CP 3
Fonte: Autores

Após essa etapa, os CP's foram retirados do Strain Gauge e limpos superficialmente, para seguirem para etapa do ensaio de corrosão em H₂S. A Figura 49 ilustra os CP's após esse processo.

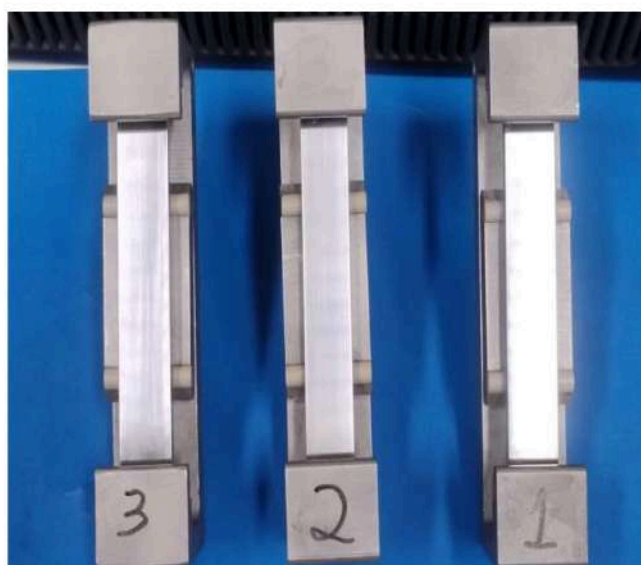


Figura 49 - CP's após ensaio de flexão de 4 pontos
Fonte: Autores

Antes do início do ensaio de corrosão em H₂S, no laboratório LAH₂S do INT, utilizou-se um gás inerte consistindo em solução de nitrogênio e uma solução de teste de NaCl com ácido cético, conforme a solução A da Norma NACE TM0177, com o intuito de desoxigenar o recipiente com as amostras.

A Figura 50 ilustra o recipiente com gás inerte e a solução de teste.



Figura 50 – Gás inerte e solução de teste
Fonte: Autores

Com o término da transferência do gás inerte, necessitou-se montar o seguinte esquemático demonstrado na Figura 51. Iniciou-se o ensaio de corrosão em H_2S , com a solução contendo 25% de H_2S e 75% de CO_2 .

A alta concentração de H_2S foi com o intuito de forçar as amostras, para provocar a fratura.



Figura 51 - Início do teste de corrosão em H_2S
Fonte: Autores

Os CP's foram acomodados dentro do recipiente, sendo conectados ao aparato de remoção de gás oxigênio, para que em seguida fosse adicionado a mistura de gás H₂S e CO₂, conforme pode ser visto na Figura 52.



Figura 52 - Recipiente com as três amostras
Fonte: Autores

O ensaio foi concluído dentro do período máximo estimado de 30 dias. Como nenhuma das três amostras apresentou fratura antes desse prazo, o tempo máximo de exposição foi integralmente utilizado. As Figuras 53 e 54 apresentam o recipiente contendo as amostras ao término do ensaio.

A medição do pH da solução indicou um valor inicial de 2,6. Após a finalização do ensaio, verificou-se um aumento para 4,0, valor limite permitido conforme os critérios estabelecidos para a solução de teste A da norma NACE TM 0177. Dessa forma, a validade do ensaio foi confirmada.

Posteriormente, as amostras foram removidas e submetidas a um processo de limpeza preparatória, com o objetivo de viabilizar análises macrográficas e micrográficas, conforme ilustrado na Figura 55.



Figura 53 - Amostras ao final do ensaio
Fonte: Autores



Figura 54 - Recipiente após o ensaio
Fonte: Autores



Figura 55 - Amostras limpas após o ensaio
Fonte: Autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da solda foi conduzida por meio de análises macrográficas e micrográficas, permitindo a identificação das regiões afetadas termicamente e a avaliação das transformações microestruturais. Além disso, foram realizados ensaios mecânicos e análises químicas para determinar as propriedades da junta soldada. Os dados obtidos possibilitam a comparação entre as diferentes regiões da solda, considerando sua morfologia, dureza e resistência à corrosão sob tensão.

A avaliação detalhada dessas características é essencial para compreender o comportamento do material em condições operacionais. Fatores como a distribuição da zona termicamente afetada (ZTA), a presença de fases microestruturais específicas e a variação da dureza podem influenciar diretamente na integridade da solda. A interpretação desses resultados auxilia na correlação entre o processo de soldagem empregado e a resistência mecânica e química da junta, permitindo inferências sobre sua adequação para aplicações em ambientes críticos.

4.1 MACROGRAFIA PRÉ ENSAIO

A Figura 56 apresenta o aspecto macrográfico da junta soldada, onde se observa o aspecto da soldagem multipasse. A inspeção visual da seção macrográfica não detectou a ocorrência de defeitos como trincas, porosidades, inclusão de escória ou quaisquer outras descontinuidades de natureza metalúrgica e/ou operacional na junta soldada.

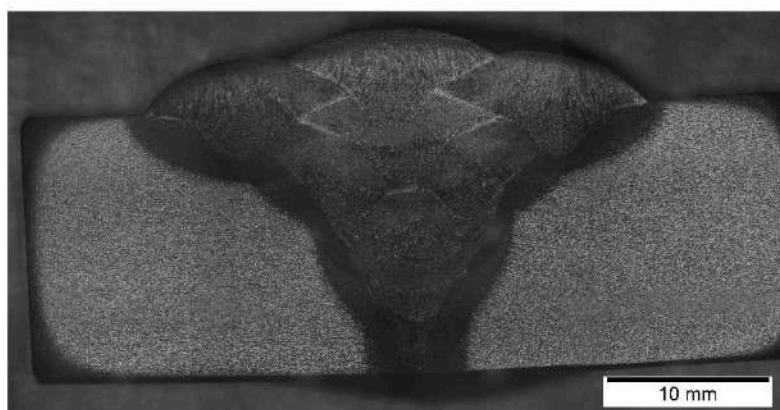


Figura 56- Macrografia da amostra
Fonte: Autores

4.2 MICROGRAFIA PRÉ ENSAIO

A análise quantitativa dos percentuais de região colunar e reaquescida, existentes na região central do metal de solda, revelou que a região reaquescida corresponde a 30,95% quando se considera a altura total (Figura 57). A largura da zona afetada pelo calor (ZTA) é um indicativo de possíveis alterações metalúrgicas que serão analisadas nos ensaios microestruturais e de dureza.

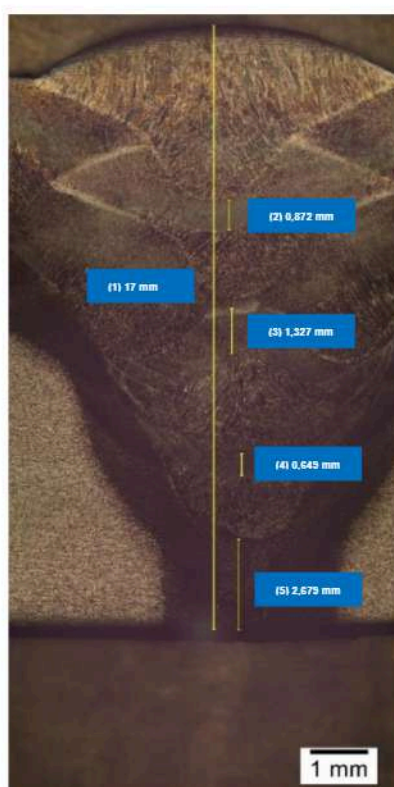
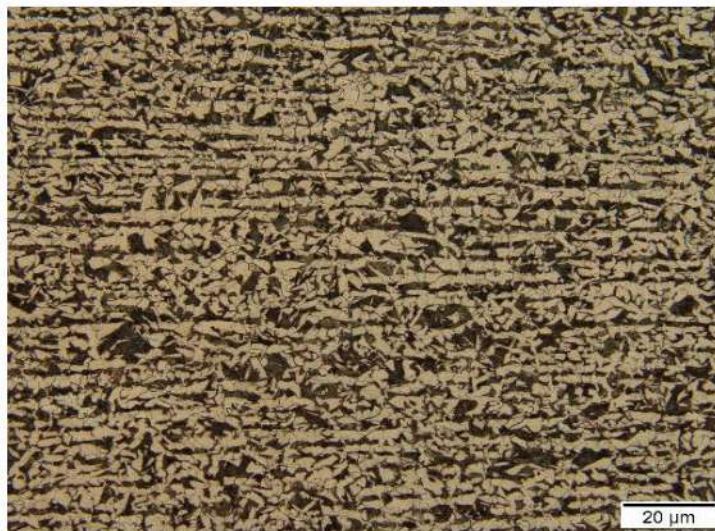


Figura 57 - Percentual de regiões
Fonte: Autores

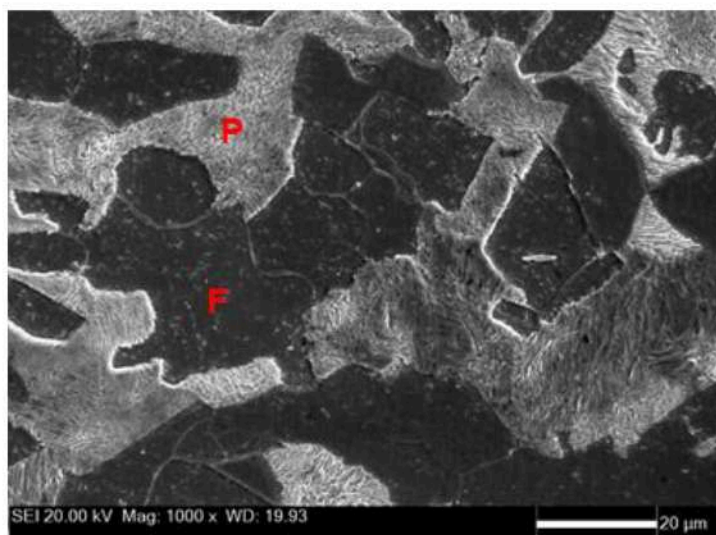


Figura 58 - Medição da ZTA do MS
Fonte: Autores

As Figuras 59 e 60 apresentam o aspecto microestrutural do metal de base, observado por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), respectivamente. Percebeu-se que o material de base possui uma microestrutura composta por ferrita (F) e perlita (P). Os grãos estão alinhados na direção de conformação por laminação, o que são características próprias do aço ASTM A516 Gr70 laminado, utilizado em tubulações de gasodutos e vasos de pressão.



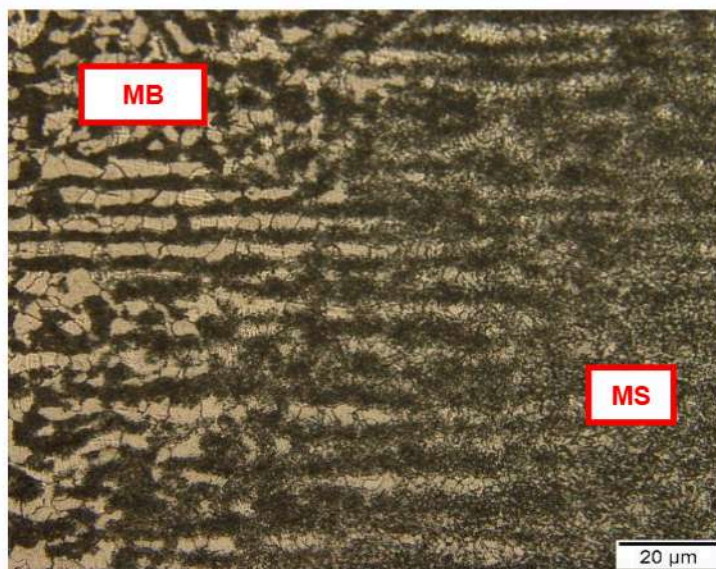
**Figura 59 - Aspecto microestrutural do metal de base observado por microscopia ótica. Aumento: 500X. Ataque: Nital 2%.
Fonte: Autores**



**Figura 60 - Aspecto microestrutural do metal de base observado por microscopia eletrônica de varredura. Aumento: 1000X. Ataque: Nital 2%.
Fonte: Autores**

A Figura 61 mostra a região entre a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de solda (MS). É possível observar, pelo aspecto microestrutural, que a

granulometria do metal de solda é consideravelmente menor do que a do material de base. Essa característica é compatível com processos de resfriamento lento e com a presença de tratamentos térmicos pós-soldagem. Conforme observado por CARDOZO (2003), a presença de grãos maiores, dureza elevada e tipos de microconstituintes podem reduzir a resistência mecânica e aumentar a suscetibilidade à corrosão sob tensão (CST), o que será analisado nas próximas seções.



**Figura 61 - Aspecto microestrutural entre a ZTA e a MS observado por microscopia ótica. Aumento: 500X. Ataque: Nital 2%.
Fonte: Autores**

Em comparação com o estudo de CARDOZO (2003), que analisou uma junta de aço ASTM A516 Gr60 (semelhante ao aço ASTM A516 Gr70) soldada por arco submerso, observa-se que a microestrutura na interface da ZTA, entre o metal de base e o metal de solda, apresenta uma granulometria mais fina no metal de solda em relação ao metal de base, conforme a Figura 62.

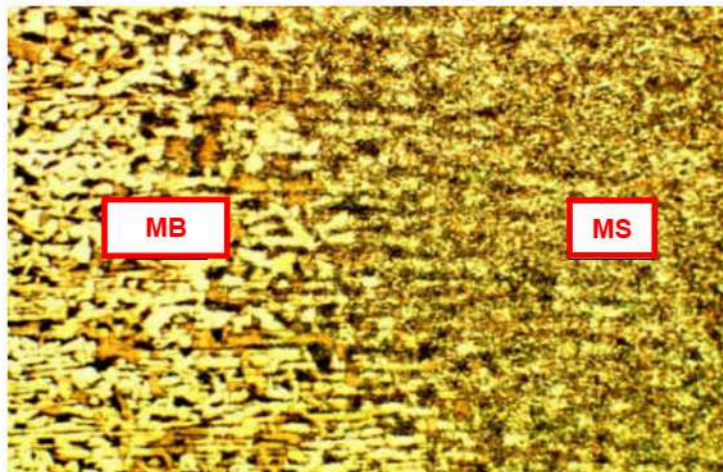


Figura 62 - Aspecto microestrutural entre a ZTA e a MS.
Fonte: CARDOZO, 2003

O consumível do arco submerso utilizado na soldagem possuía elementos refinadores de grão, além de ter sido feito tratamento térmico de alívio de tensões e normalização, o que corroboraram para uma granulometria mais fina do metal de solda. Na solda estudada neste trabalho, sabe-se que o metal de solda possui elementos de liga refinadores de grão, como o manganês e silício (item 3.1), o que pode resultar uma granulometria na região da solda mais fina, comparada ao metal de base.

As Figuras 63 e 64 mostram o aspecto microestrutural observado por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas regiões da ZTA com granulação fina e grosseira, respectivamente. Pôde-se notar que a diferença entre a região da ZTA de granulação fina e grosseira é a maior presença de perlita (P) e bainita (B) na última. Microestruturas compostas por bainita e martensita, rodeadas de ferrita de contorno de grão reduzem tenacidade e aumentam a dureza da estrutura (CARDOZO, 2003). Ainda que não tenha sido observada a formação de martensita, a região de granulação mais grossa vai apresentar maior dureza comparado à fina devido à perlita e bainita, o que resulta em uma região sensível à corrosão sob tensão. Essa região será a mais afetada pela CST durante o experimento, como pode ser verificado nos itens 4.4 e 4.5.

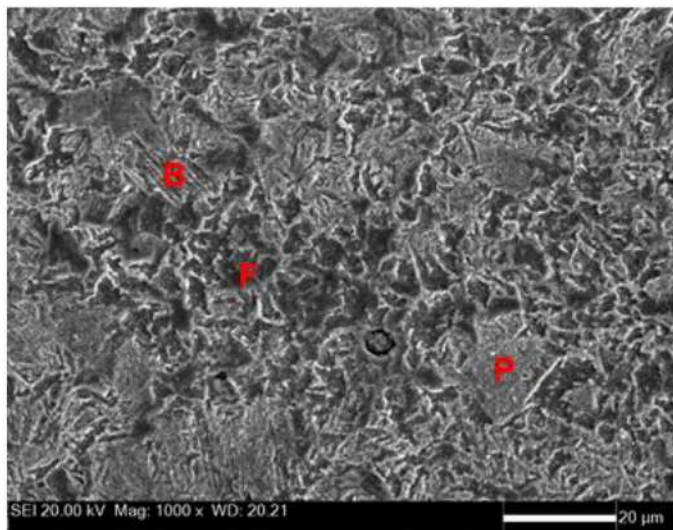


Figura 63 – ZTA com região de granulação fina com perlita (P), ferrita (F) e bainita (B)
Fonte: Autores

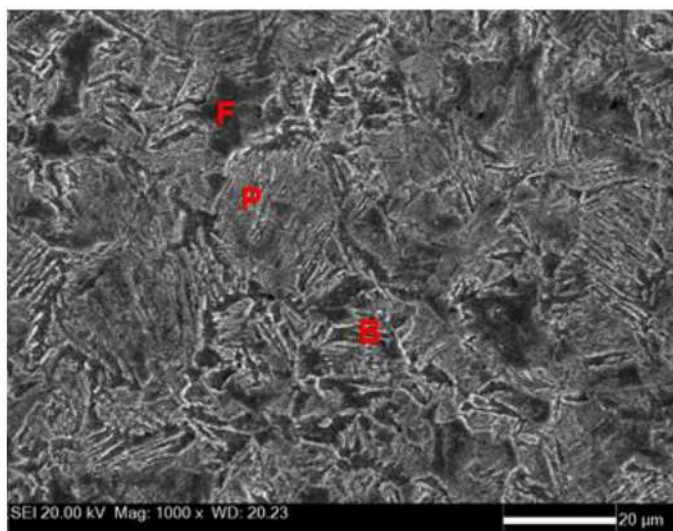
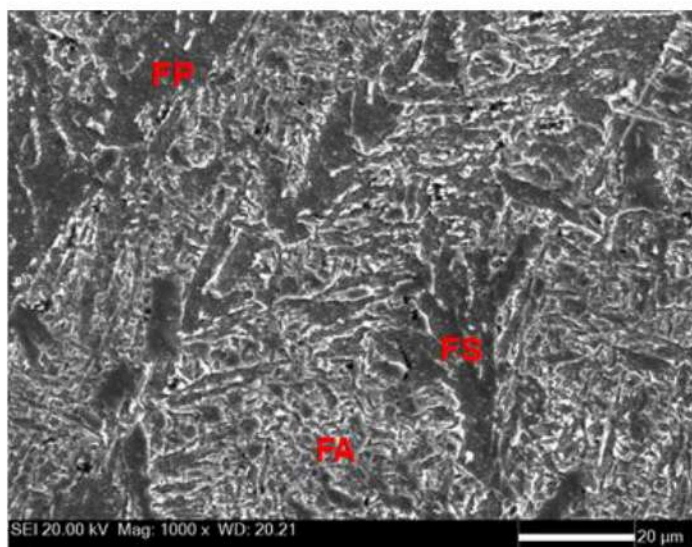
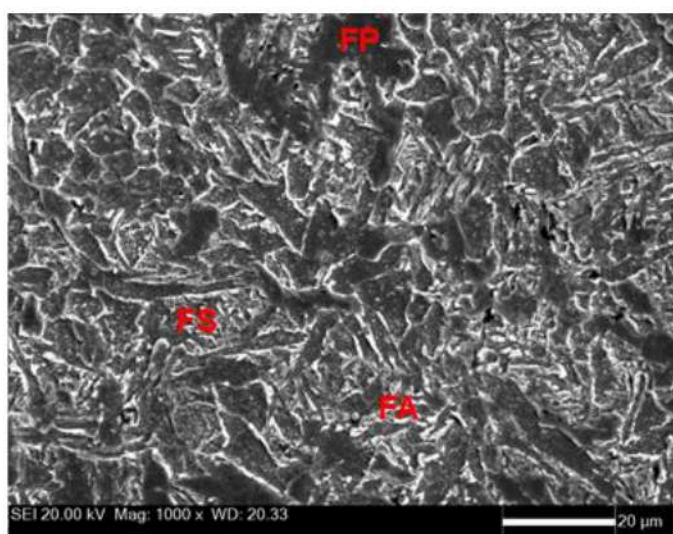


Figura 64 - ZTA com região de granulação grosseira com perlita (P), ferrita (F) e bainita (B). Ataque: Nital2%
Fonte: Autores

As Figuras 65 e 66 apresentam o aspecto microestrutural observado por MEV nas regiões colunar e reaquescida do metal de solda, respectivamente. Na região colunar da solda, percebe-se a presença de ferrita com segunda fase (FS), ferrita primária (FP) e ferrita acicular (FA). A ferrita acicular é uma microestrutura constituída de grãos reduzidos e contornos de alto ângulo, o que dificulta a nucleação e propagação das trincas (CARDOZO, 2003). É possível verificar que a região reaquescida da solda também apresenta a presença dos mesmos constituintes microestruturais encontrados na região colunar.

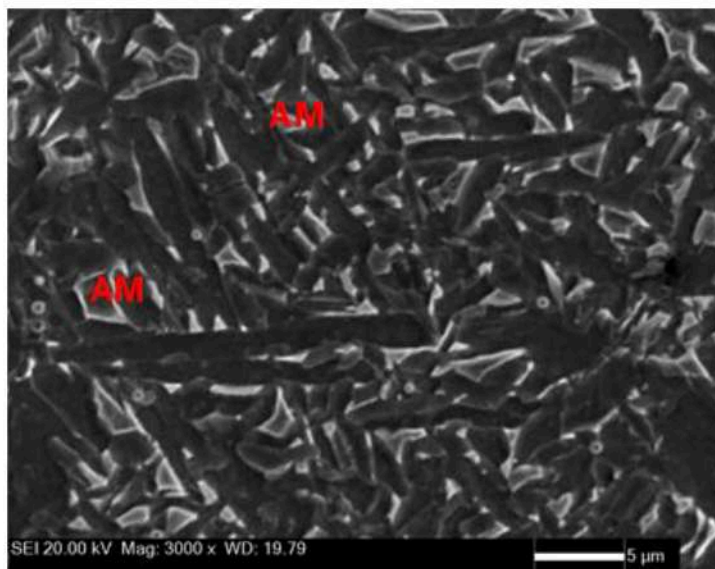


**Figura 65 - Região colunar da solda com três fases de ferrita. Ataque: Nital 2%
Fonte: Autores**



**Figura 66 - Aspecto microestrutural da região reauecida do metal de solda. Ataque: Nital 2%
Fonte: Autores**

Por fim, no topo da solda verificou-se a presença do microconstituente A-M, resultante da transformação incompleta da austenita em martensita, formando ilhas de austenita com martensita conforme a Figura 67. De acordo com BASTOS et al. (2012), o constituinte A-M afeta diretamente a tenacidade e o limite de escoamento do aço, aumentando esses parâmetros e, conseqüentemente, tornando essa região mais resistente à CST.



**Figura 67 - Microconstituente A-M no topo da solda. Ataque: Nital 2%
Fonte: Autores**

Desta forma, levando em consideração os resultados e interpretações da micrografia e imagens obtidas pelo MEV, é de se esperar que o material de base e da solda sofram efeitos da corrosão sob tensão em áreas que possuam maiores durezas. Nesse caso, a interface do metal de base com o de solda, a ZTA será a mais afetada, tanto pela sua granulometria mais grossa, causada pelo processo de soldagem e possivelmente pela falta de tratamentos térmicos após o processo, quanto pelos seus microconstituintes, formados de perlita e bainita.

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA DO AÇO ASTM A516 Gr70

A Figura 68 apresenta o perfil de microdureza da seção transversal das junta soldada (metal de base, ZTA e metal de solda). Percebe-se que os maiores valores de dureza estão na ZTA, pois é a área com maior presença de perlita (P) e bainita (B), conforme Figura 64 do item 4.2.

Outro fator que pode corroborar para o maior valor de dureza são os elementos de liga manganês e silício dissolvidos na ferrita, que aumentam sua dureza e resistência mecânica, mesmo antes de qualquer tratamento térmico. Desta forma, tanto o metal de solda quanto o metal de base, que possuem esses elementos de liga, apresentariam dureza aumentada, diminuindo a resistência à CST nas regiões mais frágeis (CARDOZO, 2003).

As áreas com maior discrepância de valores são justamente as áreas afetadas pelo aquecimento da solda. Tanto a ZTA quanto o MS possuem áreas com diferentes tipos microestrutura, acarretando medições distintas. Apesar da granulometria e os microconstituintes da ZTA e do MS proporcionarem certa ductilidade ao material, a presença de zonas reaquecidas podem ter ocasionado uma diminuição de discordâncias no material, o que elevaria a uma maior dureza. Comparando os microconstituintes e granulometria encontrados no item 4.2 com a dureza encontrada, pôde-se intuir também, que não houve tratamentos térmicos de redução de dureza, como a normalização e o alívio de tensões.

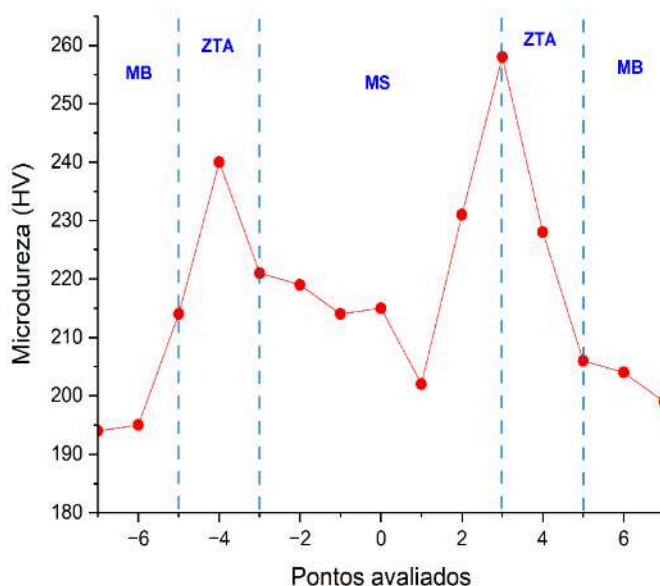


Figura 68 - Perfil de dureza da junta soldada.
Fonte: Autores

4.4 MACROGRAFIA PÓS ENSAIO

Com a realização do ensaio de flexão de quatro pontos em ambiente hostil, foram feitas análises para observar como o material se deteriorou estando tensionado em um ambiente corrosivo por 30 dias (com as três amostras não fraturadas).

Utilizando os resultados obtidos na micrografia, expressos no item 4.5, pôde-se observar uma correlação das regiões apresentando corrosão estarem até 1,5mm de distância do metal de solda, o que coincide com a largura da ZTA, corroborando para a teoria de que a região é mais vulnerável à CST.

Foram analisadas as macrografias dos CP's, após a limpeza, no mesmo laboratório do ensaio de CST do INT. O microscópio óptico utilizado foi do mesmo modelo descrito no item 3.2. A norma NACE TM-0316 dita que a inspeção dos corpos de prova que não apresentaram fratura, devem ser analisados por evidências de ataque de corrosão, trincas superficiais, trincas subsuperficiais e corrosão localizada devem ser avaliadas. A norma indica o uso de inspeção por ensaio não destrutíveis por líquido penetrante e partícula magnética, além de examinação metalúrgica do corpo de prova seccionado.

Com a análise macrográfica e micrográfica após o ensaio, constatou-se que os três CP's não apresentaram trincas superficiais. Notou-se, porém, que houve corrosão em grande quantidade da superfície dos corpos de prova, concentrada na região da ZTA. Percebeu-se também a corrosão uniforme nas amostras, evidenciando a perda de massa.

4.4.1 Corpo de Prova 1

As Figuras 69, 70 e 71 ilustram o comportamento da corrosão na amostra após o ensaio. As áreas marcadas em vermelho indicam regiões com deposição de material resultante do processo de corrosão.

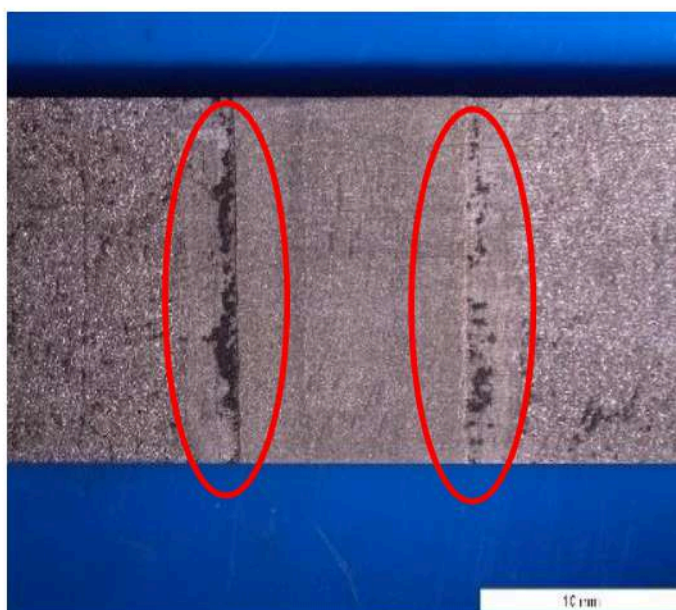


Figura 69 - Corpo de prova 1 com zoom 4x
Fonte: Autores

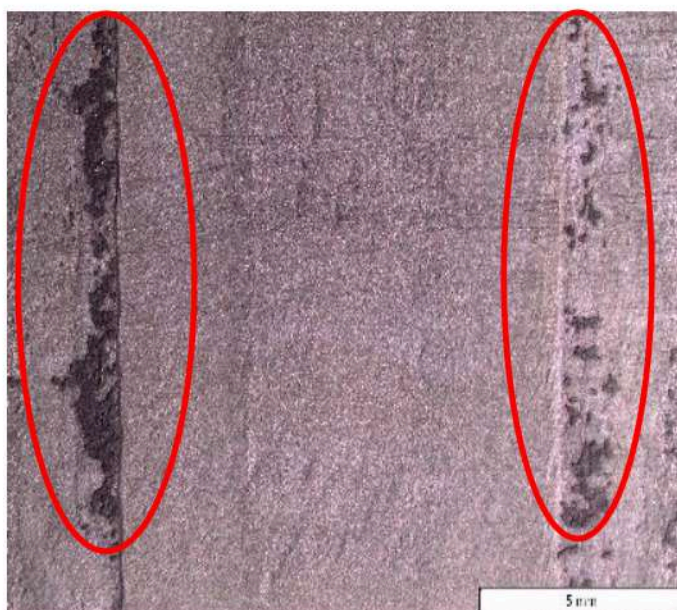


Figura 70 - Corpo de prova 1 com zoom 7,5x
Fonte: Autores

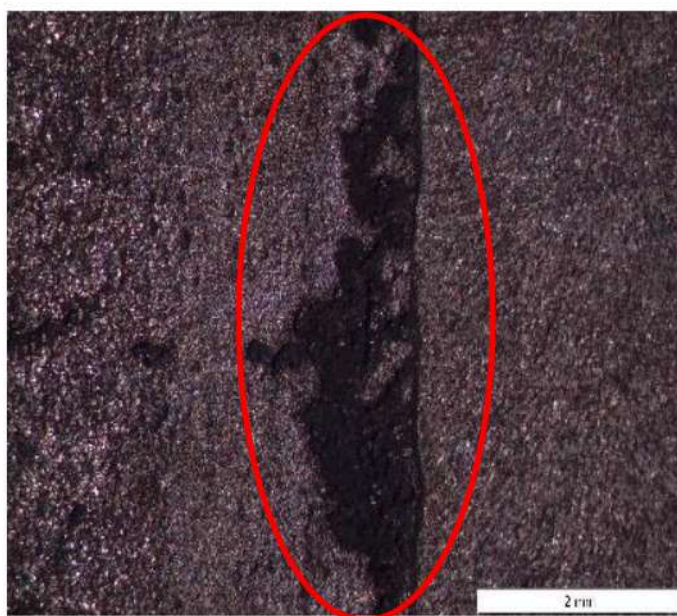


Figura 71 - Corpo de prova com zoom 20x
Fonte: Autores

Como esperado, as áreas mais afetadas pela corrosão foram as duas áreas da ZTA, onde se encontra a maior dureza da solda. Houve a suspeita de que a interface metal base/metal de solda na ZTA estaria deslocando devido a corrosão, como pode ser visto no exemplo expresso na Figura 72, sinalizado com a seta vermelha.



Figura 72 – Deslocamento de metal de solda
Fonte: ZEEMAN, 2003

No entanto, foi feita uma rápida e simples análise do perfil lateral da interface, concluindo-se que a linha de corrosão que cobre a interface em toda a largura do corpo de prova não configura uma trinca ou fratura por deslocamento do metal de solda.

4.4.2 Corpo de Prova 2

De forma análoga ao item 4.4.1, as Figuras 73, 74 e 75 ilustram o comportamento da corrosão na amostra após o ensaio, aonde áreas marcadas em vermelho indicam regiões com deposição de material resultante do processo de corrosão.



Figura 73 - Corpo de prova 2 com zoom 4x
Fonte: Autores

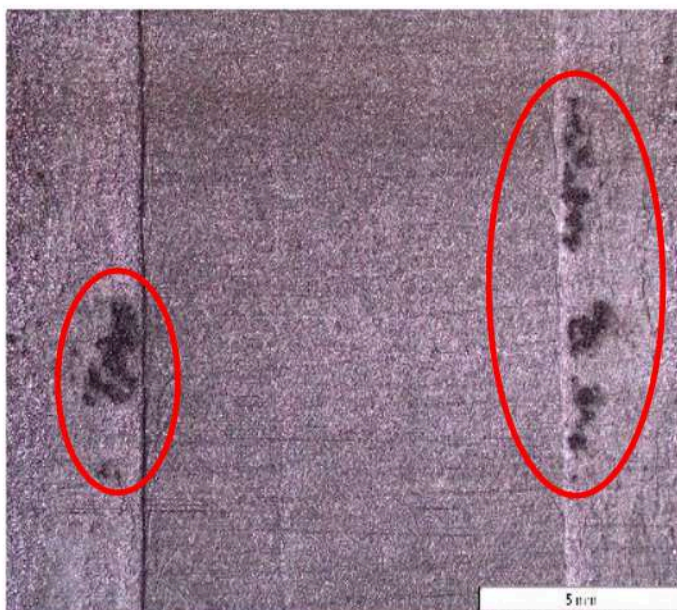


Figura 74 - Corpo de prova 2 com zoom 7,5x
Fonte: Autores



Figura 75 - Corpo de prova 2 com zoom 20x
Fonte: Autores

Da mesma forma que aconteceu no item 4.4.1, a corrosão no segundo corpo de prova aconteceu nas duas regiões da ZTA, compreendendo uma faixa de até 1,5mm de distância do metal de solda. Porém, nessa amostra a corrosão ficou em menor quantidade, em relação ao primeiro corpo de prova.

Notou-se também a linha de corrosão que atravessa toda a largura do corpo de prova, novamente, foi feita a análise do perfil lateral da solda, verificando que não houve deslocamento do metal de solda.

Neste corpo de prova foi observado que houve diferença na quantidade e extensão dos materiais depositados na ZTA da direita e da esquerda. Enquanto na esquerda o material se concentrou em uma pequena extensão, a direita se espalhou em uma área maior, diminuindo a levemente a quantidade.

4.4.3 Corpo de Prova 3

De forma análoga aos itens 4.4.1 e 4.4.2, as Figuras 76, 77 e 78 ilustram o comportamento da corrosão na amostra após o ensaio, aonde áreas marcadas em vermelho indicam regiões com deposição de material resultante do processo de corrosão.

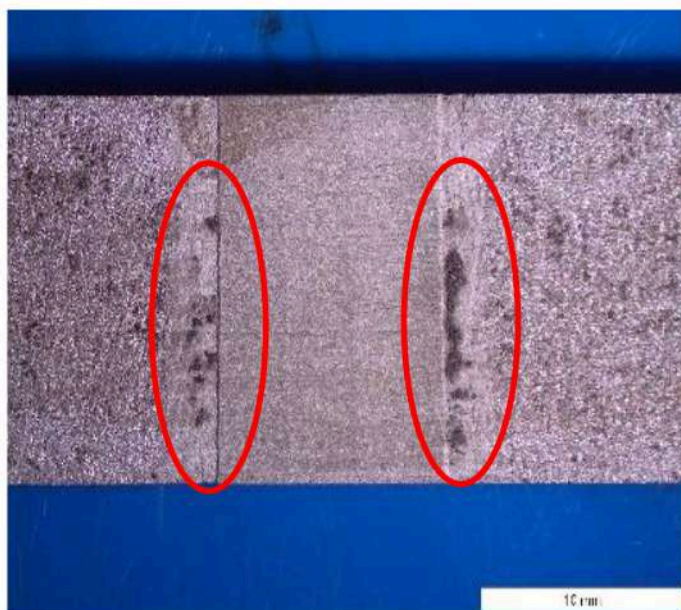


Figura 76 - Corpo de prova 3 com zoom 4x
Fonte: Autores

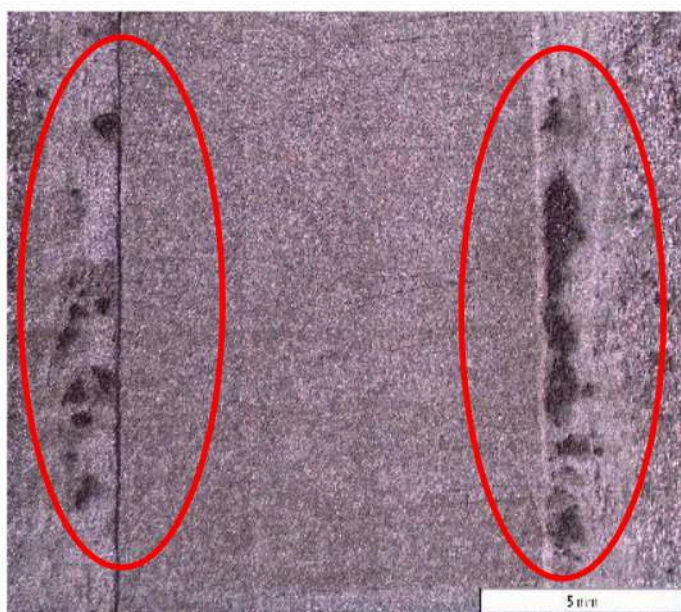


Figura 77 - Corpo de prova 3 com zoom 7,5x
Fonte: Autores

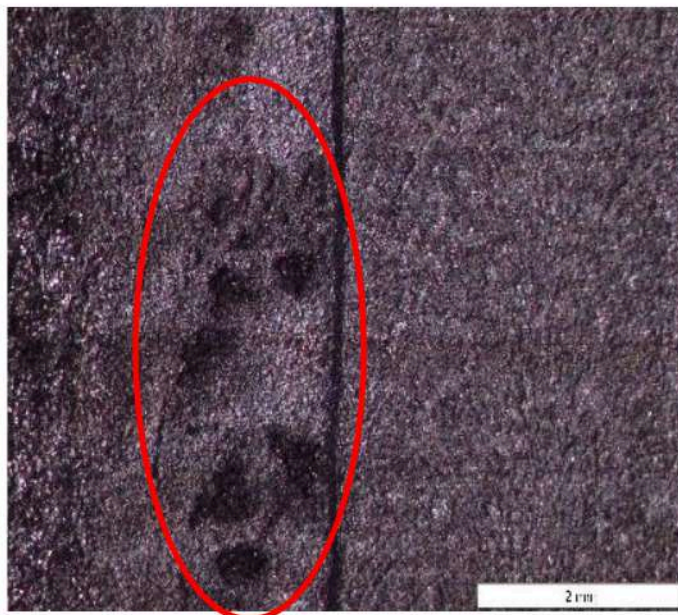


Figura 78 - Corpo de prova 3 com zoom 20x
Fonte: Autores

Da mesma forma que aconteceu nos itens 4.4.1 e 4.4.2, a corrosão no terceiro corpo de prova aconteceu nas duas regiões da ZTA, compreendendo uma faixa de até 1,5mm de distância do metal de solda. Porém, nessa amostra a corrosão ficou em menor quantidade, em relação ao primeiro e segundo corpo de prova.

Notou-se também a linha de corrosão que atravessa toda a largura do corpo de prova, novamente, foi feita a análise do perfil lateral da solda, verificando que não houve deslocamento do metal de solda.

Neste corpo de prova foi observado que houve diferença na quantidade e extensão dos materiais depositados na ZTA da direita e da esquerda. Nas duas ZTA's o material depositado foi espaçado de maneira semelhante. Porém, a ZTA da esquerda apresentou uma quantidade menor comparada a da direita.

A diferença discrepante do material depositado no CP 1 comparado aos outros casos pode ser atribuído à deformação que o CP1 esteve sujeito foi levemente maior se comparado aos CPs 2 e 3. A diferença de 2% na tensão em que o CP 1 esteve sujeito pode ter sido um promotor de maior quantidade de material depositado, seguindo a teoria da CST.

O ensaio de CST tinha como objetivo verificar se o aço ASTM A516 Gr70 iria formar trincas ou não, porém, nenhuma das três amostras apresentaram fratura após os 30 dias de ensaio. A norma NACE TM0316, item 9.1.2, estipula que, caso não haja fratura, enquanto não seja encontrado descontinuidades superficiais com um microscópio de zoom de 10X ou por ENDS, a solda é resistente ao processo de CST.

Essa metodologia foi usada no caso de estudo de MITELA et al (2019), em que foi realizado ensaio de flexão de 3 pontos em um CP de aço API 5L X65M.

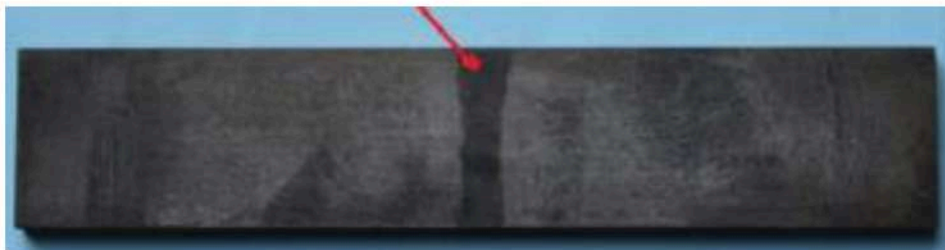


Figura 79 - CP após o ensaio e limpeza
Fonte: Mitela et al (2019)

Após o experimento em condições similares às do trabalho realizado, foi realizada uma inspeção em microscópio com ampliação de 10X, conforme recomendado pela norma de flexão em três pontos (NACE TM-0177). A inspeção constatou que a junta foi aprovada por não apresentar trincas.

Como visto, não foram encontradas trincas superficiais utilizando o microscópio de ampliação de 7,5X e 20X. A norma recomenda também a utilização de ENDS e seccionamento dos CP's para verificar trincas superficiais e subsuperficiais desta forma. Porém, por falta de tempo e de recursos, foi apenas realizado a inspeção visual. Pela norma, portanto, pôde-se constatar que o a solda foi aprovada no ensaio.

4.5 MICROGRAFIA PÓS ENSAIO

Da mesma forma que a macrografia pós ensaio, foram analisadas as micrografias dos CP's, após a limpeza no mesmo laboratório do ensaio de CST do INT. Utilizou-se o microscópio confocal para a análise do ensaio.

O intuito dessa análise foi observar se a microestrutura das amostras possuía trincas, principalmente nas regiões da ZTA, sendo este o objetivo do ensaio de CST. Notou-se que as amostras tiveram perda de massa, por conta da corrosão uniforme durante o ensaio de CST.

4.5.1 Corpo de Prova 1

No primeiro corpo de prova, notou-se a redução de espessura. A Figura 80 ilustra como ficou o desnível da superfície após o ensaio.

A área analisada foi a mesma da Figura 71. Contudo, não foi observado o surgimento de trincas, apenas perda de massa.



Figura 80 - Superfície do CP 1
Fonte: Autores

A Figura 81 ilustra outra análise em 3D do primeiro corpo de prova para evidenciar melhor a profundidade da perda de massa, com a espessura variando entre 0 μm e 175 μm .

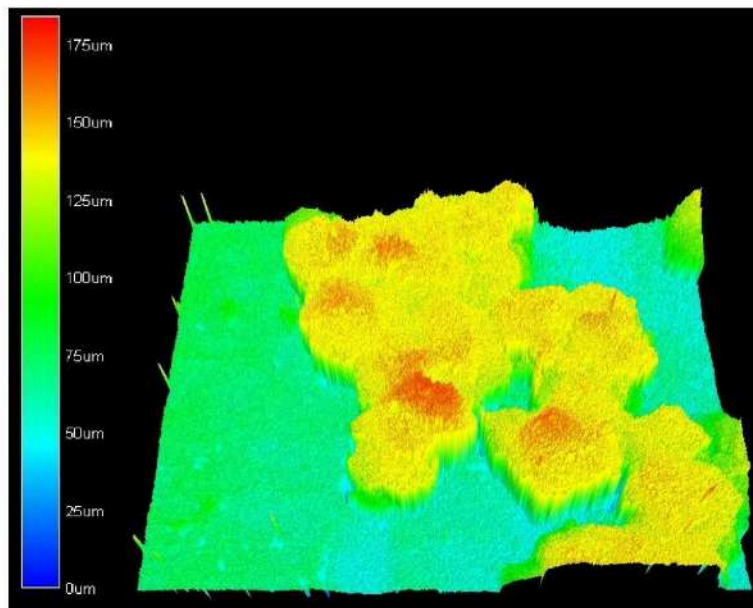


Figura 81 - Profundidade de perda de massa do CP 1
Fonte: Autores

A partir da escala e da comparação com o mapa da superfície obtida, observou-se que a altura média na região de maior remoção de material é de 62,5 μm , enquanto na região de maior deposição é de 137,5 μm . Já a superfície inalterada apresenta uma altura média de 87,5 μm .

Além disso, verificou-se que 28,57% da área analisada está abaixo da superfície original, enquanto 57,14% está acima, conforme ilustrado a seguir.

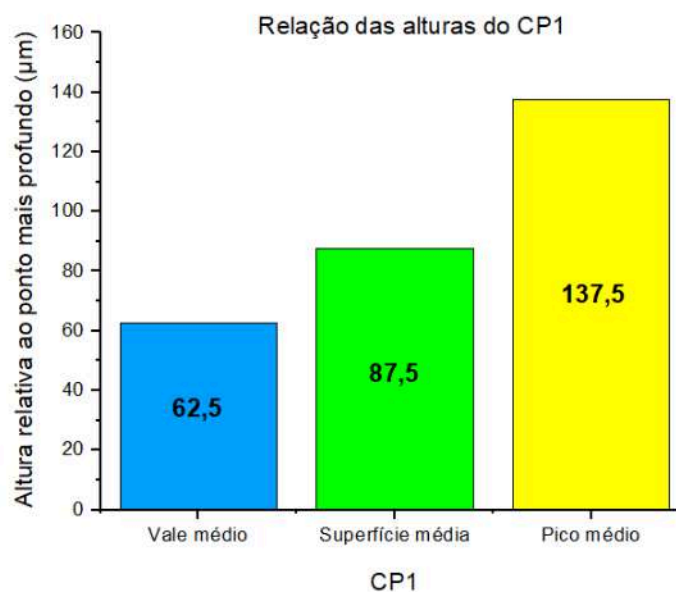


Figura 82 - Relação das alturas do CP1
Fonte: Autores

4.5.2 Corpo de Prova 2

No segundo corpo de prova, notou-se também a redução de espessura. A área analisada foi a mesma da Figura 75.

A Figura 83 ilustra como ficou o desnível da superfície após o ensaio.

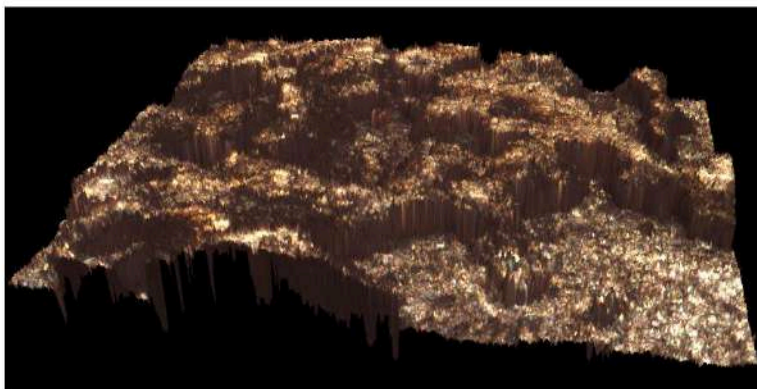


Figura 83 - Superfície do CP 2
Fonte: Autores

Notou-se que a perda de massa foi menor, em comparação ao primeiro corpo de prova. Todavia, também não foi observado o surgimento de trincas, apenas perda de massa.

A Figura 84 ilustra outra análise em 3D do segundo corpo de prova para evidenciar melhor a profundidade da perda de massa, com a espessura variando entre 0 μm e 110 μm .

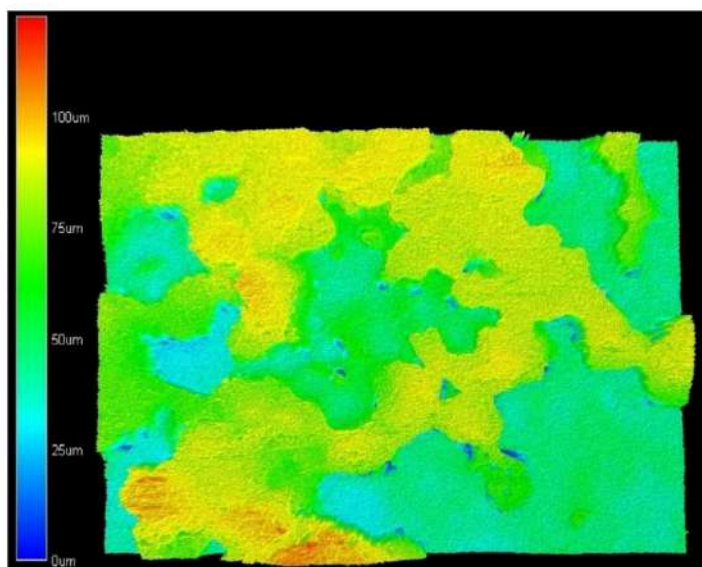


Figura 84 - Profundidade de perda de massa do CP 2
Fonte: Autores

No CP 2, a partir da escala e da comparação com o mapa da superfície obtida, observou-se que a altura média na região de maior remoção de material é de 37,5 μm , enquanto na região de maior deposição é de 87,5 μm . Já a superfície inalterada apresenta uma altura média de 55 μm . Além disso, verificou-se que 31,82% da área analisada está abaixo da superfície original, enquanto 59,09% está acima, conforme evidenciado a seguir.

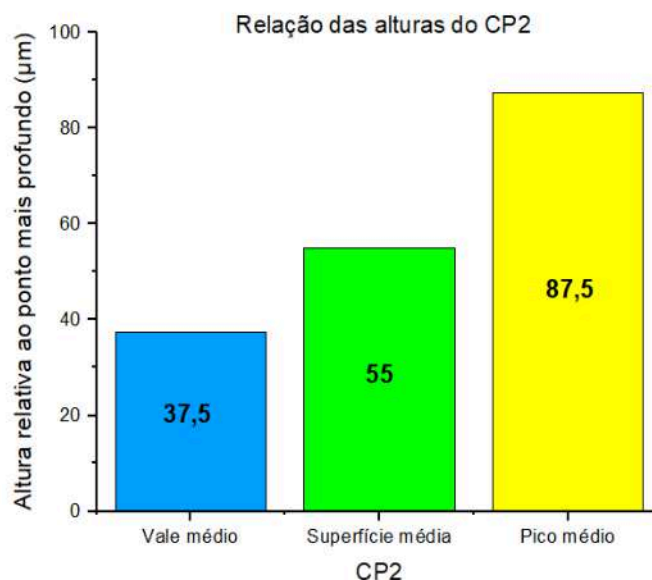


Figura 85 - Relação das alturas do CP2
Fonte: Autores

4.5.3 Corpo de Prova 3

No terceiro corpo de prova, notou-se também a redução de espessura. A área analisada foi a mesma da Figura 78. A Figura 86 ilustra como ficou o desnível da superfície após o ensaio.



Figura 86 - Superfície do CP 3
Fonte: Autores

Percebeu-se que a perda de massa foi menor, em comparação aos outros dois corpos de prova. Entretanto, também não foi observado o surgimento de trincas, apenas perda de massa.

A Figura 87 ilustra outra análise em 3D do terceiro corpo de prova para evidenciar melhor a profundidade da perda de massa, com a espessura variando entre 0 μm e 70 μm .

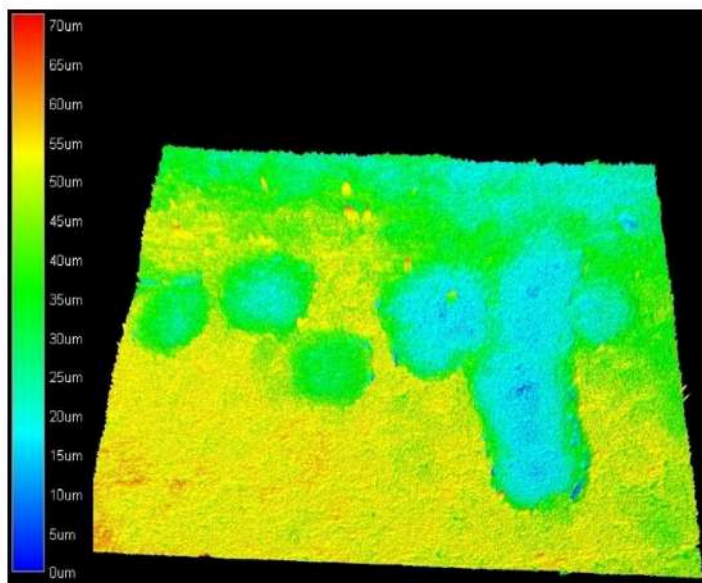


Figura 87 - Profundidade de perda de massa do CP 3
Fonte: Autores

No CP 3, a partir da escala e da comparação com o mapa da superfície obtida, observou-se que a altura média na região de maior remoção de material é de 20 μm , enquanto na região de maior deposição é de 55 μm . Já a superfície inalterada apresenta uma altura média de 35 μm .

Além disso, verificou-se que 57,14% da área analisada está abaixo da superfície original e 57,14% acima, conforme evidenciado a seguir.

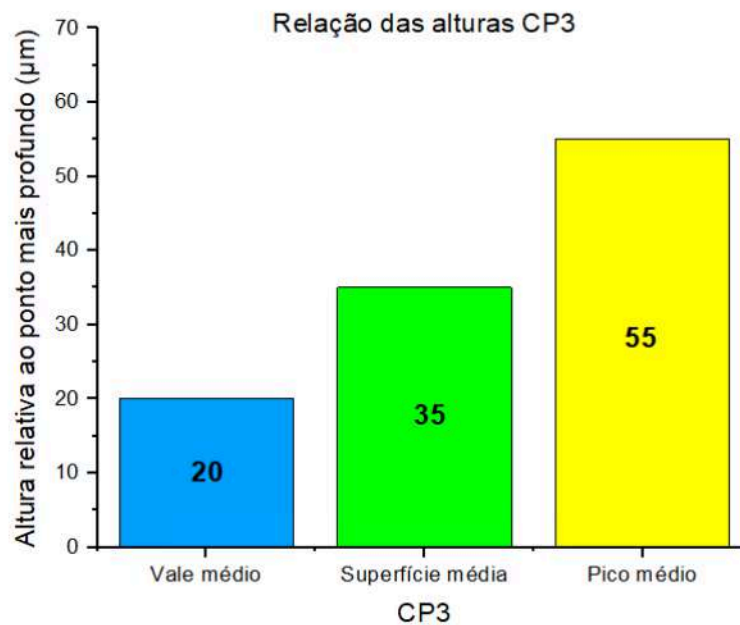


Figura 88 - Relação das alturas CP3
Fonte: Autores

Dentre os três corpos de prova, o CP 1 apresentou uma quantidade de deposição de material e valores de profundidade dos vales maiores comparados aos outros, conforme pode ser visto na Figura 89. Esse resultado não foi esperado, já que os corpos de prova foram fabricados e preparados de maneira semelhante e o ambiente no qual foi feito experimento possuía as mesmas condições para os três corpos de prova.

Um dos possíveis motivos para tal fenômeno pode ser atribuído à deformação submetida ao CP ser levemente acima do que foi estipulado como a desejada antes do experimento, o que configurou um aumento na tensão em aproximadamente de 2%.

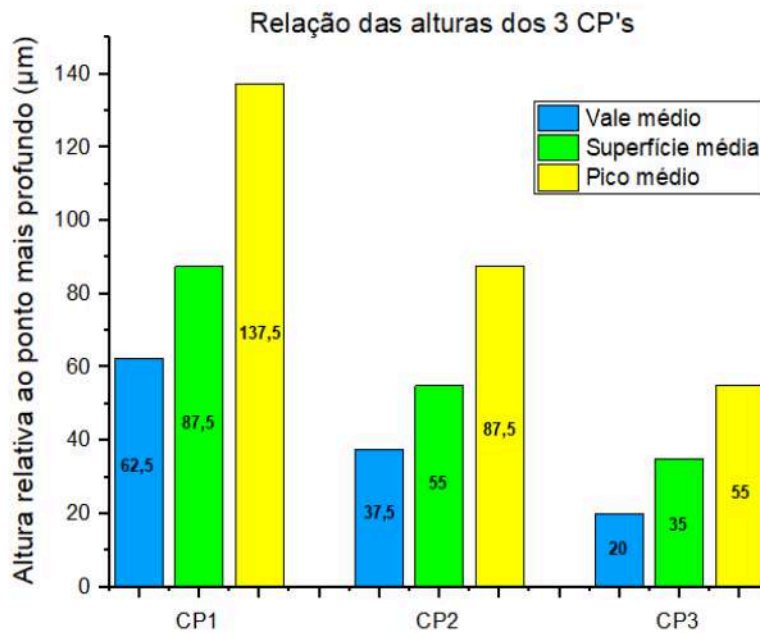


Figura 89 - Relação de altura dos 3 CP's
Fonte: Autores

Apesar dos três corpos de prova terem sido ensaiados sobre as mesmas condições e apresentar resultados do ensaio semelhantes (sem trincas, apenas apresentando corrosão superficial), cada CP obteve seus valores de intervalo de picos e vales diferentes um dos outros. Não é claro qual seria o motivo da discrepância, pois pode ser um fator relacionado a impurezas na superfície dos CP's, posicionamento dos CP's dentro dos recipientes experimentais etc.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho, que teve como objetivo o avaliar a susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão na presença de H₂S em uma junta soldada utilizando como material de base chapas de aço de classificação ASTM A516 Gr 70 aplicando a técnica experimental com ensaios de flexão de quatro pontos, permite as seguintes conclusões:

1. O aspecto microestrutural da região da ZTA de granulação grosseira indica maior presença de perlita (P) e bainita (B) nesta região.
2. A região reaquecida da solda também apresenta os mesmos constituintes microestruturais encontrados na região colunar, com a presença de ferrita com segunda fase (FS), ferrita primária (FP) e ferrita acicular (FA).
3. Após o ensaio de corrosão sob tensão, não foram encontradas trincas superficiais utilizando o microscópio de ampliação de 7,5X e 20X. Desta forma, pôde-se constatar que a solda foi aprovada no ensaio, conforme a indicação da Norma NACE TM-0316.
4. Apesar de não ter sido encontrados trincas, notou-se um surgimento maior de corrosão na região da ZTA, mais especificamente na faixa de até 1,5mm de distância do metal de solda das três amostras, além da corrosão uniforme ao longo das amostras.
5. Apesar de não ter formação de trincas superficiais, conforme itens 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.3, os ensaios realizados ajudaram a comprovar que a região da ZTA foi a mais afetada pela corrosão no aço ASTM A516 Gr70, devido à sua maior dureza causada pela diferença entre as microestruturas, elementos de liga do material e da falta de tratamentos térmicos. Confirmando também a teoria de Cheng (2013), que indica que a fragilidade à corrosão é diretamente proporcional à dureza do material.
6. Embora não tenham sido observadas trincas superficiais nos corpos de prova, a presença de áreas de concentração de tensões indica um potencial risco de nucleação de falhas sob condições de carregamento cíclico prolongado. Esse aspecto merece investigação adicional,

incluindo simulações numéricas e ensaios mecânicos complementares, para avaliar a progressão das tensões e sua influência na integridade estrutural da junta soldada.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com a elaboração desse estudo, foram identificados alguns pontos que são pertinentes para futuras análises relacionadas à área de CST no aço ASTM A516 Gr70. Dito isso, indica-se as sugestões de trabalhos futuros:

1. Realização do estudo de trincas internas dos corpos de prova após o ensaio de flexão de quatro pontos em ambiente corrosivo, a fim de verificar a existência de trincas causadas por CST;
2. Verificação da influência de revestimentos na resistência à corrosão sob tensão;
3. Verificação da influência de tratamentos térmicos pós soldagem sob condições de CST com H₂S;
4. Comparação do desempenho de outras ligas metálicas sob condições de CST com o desempenho do ASTM A516 Gr70;
5. Influência do gás utilizado no processo de soldagem na microestrutura e conseqüentemente na resistência à CST;
6. Análise das variáveis experimentais, como tempo de exposição, temperatura e pH influenciam na nucleação e propagação de trincas no aço ASTM A516 Gr70;
7. Modelagem por elementos finitos da mecânica da fratura de uma trinca originada da remoção e deposição de material causada pelo processo de corrosão no aço ASTM A516 Gr70;
8. Análise de trincas externas e internas dos corpos de provas após o ensaio de CST, utilizando ensaios não destrutivos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOPORT. Conheça - Aço astm a516. Link: <https://www.acosporte.com.br/aco-astm-a516>. Acessado em: 07/09/2024.

AHMAD, Zaki. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier, 2006. 656 p.

ALLENSTEIN, Cesar Lúcio Molitz. Aplicações da mecânica da fratura na inspeção de juntas soldadas. Revista Tecnologia e Humanismo, 1986.

ANDERSON, T.L. Fracture Mechanics: Fundamental and Applications. CRC. 1995.

ARANAS, Uwe. Stress corrosion cracking caused by weld stress. Wikipedia.

ASME. Gas transmission and distribution piping systems: B31.8. 2003.

ASTM INTERNATIONAL. E 384-1: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, 2017.

Avaliação de características visuais e mecânicas de eletrodos E6013 e E7018, soldados em aço ASTM A36, com diferentes condições de armazenamento. Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Desenho-esquemático-de-uma-soldagem-com-eletrodo-revestido_fig1_358862195 [accessed 7 Sept 2024]

BALLESTEROS, Adriana Forero. Avaliação de Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de sulfetos e Susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. PUC-Rio, 2009.

BASTOS, Eduardo D. J. P.; DE SOUZA, Luís F. G. JORGE, Jorge C. F.; BOTT, Ivaní S.; MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA ZTA DE AÇOS API 5L X80 DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES. 67º Congresso ABM, 2012.

BIOPDI. Ensaio de Flexão: Um Guia Completo sobre Testes de Resistência e Propriedades Mecânicas de Materiais. Link: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-flexao/>. Acessado em: 07/09/2024.

BUDYNAS, Richard G. Elementos de máquinas de Shigley, 8° EDIÇÃO, 2011.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: Uma Introdução. 8 Edição. New York: LTC, 2000.

CARDOZO, Francisco Ilo Bezerra. PREVISÃO DA DUREZA EM JUNTA SOLDADA DE UM AÇO ASTM A 516 GRAU 60 SUJEITO À CORROSÃO SOB TENSÃO COM H₂S. UFPE, Recife. 2003.

CANADIAN ENERGY PIPELINE ASSOCIATION. Stress Corrosion Cracking Recommended Practices: Addendum on Circumferential SCC. CEPA, Calgary, Alberta, Canada. 1998.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. Como é feito o transporte de cargas no Brasil? 2020.

CHENG, Y. Frank. Stress corrosion cracking of pipelines. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

CHIAVERI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos. 7° Edição. 2005.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. Abm, 1977.

COLPAERT, Hubertus et al. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher, 2008.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS, 2007.

DE OLIVEIRA, Jose Jefferson Moraes; DE MORAIS, Willy Ank. A Mecânica da Fratura Elasto Plástica Aplicada à Falha de Gasoduto. Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação, v. 3, n. 1, p. 247-251, 2019.

DE SOUZA, Sergio Augusto. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. Editora Blucher, 1982.

DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. SI Metric ed., McGraw-Hill, UK, 1988.

DONATO, Gustavo Henrique. B.; MAGNABOSCO, Rodrigo; RUGGIERI, Claudio. Caracterização dos metais de base e de solda de juntas soldadas de aço estrutural ASTM A516 grau 70, p. 2453-2461. In: 63º Congresso Anual da ABM, Santos - SP, 2008.

DOS SANTOS, Célia A. L. et al. Estudos de corrosão sob tensão do aço API 5L X70 em meio de etanol sob atmosfera de nitrogênio e ar sintético. 2012.

EEEP Ceará. Processos de Soldagem. Link: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mecanica_processos_de_soldagem.pdf

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte, 2019. Estados Unidos: CRC press, 2005. 610 p.

FILIPINI, Jean Carlos. Concentradores de tensões e convergência de malha em FEA. 2023. Link: <https://www.linkedin.com/pulse/concentradores-de-tensões-e-convergência-malha-em-fea-filipini/>

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. A corrosão e os agentes anticorrosivos. Revista virtual de química, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

FU, A.Q. CHENG, Y.F. Electrochemical polarization behavior of X70 steel in thin carbonate/bicarbonate solution layers trapped under a disbonded coating and its implication on pipeline SCC. *Corros. Sci.* 52, 2511–2518. 2010.

GANPAT INDUSTRIAL CORPORATION, The Wide Range of Applications for ASTM A516 Gr 70 Plates – Discover Its Versatility! Link: <https://www.ganpatind.com/blog/the-wide-range-of-applications-for-astm-a516-gr-70-plates-discover-its-versatility/>.

GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 360p.

HANDBOOK, A. S. M. *Metallography and microstructures*. Edited by GF Vander Voort, ASM International, v. 9, 2004.

HUANG, Her-Hsiung et al. Cracking characteristics of A516 steel weldment in H₂S containing environments. *Materials Science and Engineering*, A188 (1994).

IEA (Agência Internacional de Energia). *World Energy Balances: overview*, 2019.

INFOSOLDA. *Soldagem por Arco Submerso*. Livro *Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1a ed.* 1997.

INFOSOLDA. *Trabalho prático: técnica operatória da soldagem GTAW*. Infosolda, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://infosolda.com.br/851-trabalho-pratico-tecnica-operatoria-da-soldagem-gtaw/>.

JONAS. *Metalurgia da Soldagem*. 2009. Disponível em: <https://www.soldasbrasil.com.br/pdf/metalurgia-soldagem-1.pdf>.

JONES, R.H. *Stress Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation*. ASM. Materials Park, OH. 1992.

KRAUSS, G. S. (1994) *Heat treatment and processing principles*. Ohio: ASM International.

LEIS ET AL. Stress-Corrosion Cracking On Gas-Transmission Pipelines: History, Causes, and Mitigation. 1997.

LEIS, B.N. BUBENIK, T.A. NESTLEROTH, J.B. Stress-corrosion cracking in pipelines. Pipeline Gas J. 223, 42–49. 1996.

LEIS, B.N. EIBER, R.J.. Stress-Corrosion Cracking On Gas-Transmission Pipelines: History, Causes, and Mitigation. 1997.

LOUREIRO, A. BRASIL, S. YOKOYAMA, L. Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de Steinrath. 2007.

MAINIER, Fernando B.; SANDRES, Gisele C.; TAVARES, Sérgio Souto Maior. Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H₂S) e suas implicações no meio ambiente e na segurança industrial. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cuzco, Peru. 2007.

MITELA, Ion; SIMIONESCU, Dinu; BORDEASU, Ilare; Susceptibility to Stress Corrosion Cracking in Hydrogen Sulfide Environment of MAG Welded Joints of API 5L x 65M Thermomechanical Treated Steel. Polytechnica University of Timisoara, 2019.

NATIONAL ENERGY BOARD. Report of the Inquiry: Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines. Report of the Inquiry, MH-2-95, NEB, Calgary, Alberta, Canada. 1996.

NUNES, Laerce de P.; GOMES, Luiz Paulo; NUNES, Alessandra de M. External coatings for buried pipelines-a project approach; Revestimento externo para dutos enterrados-uma abordagem de projeto. 2005.

OKUMURA, T. e TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. Rio de Janeiro. Editora Livros Técnicos e Científicos S.A. p. 1982.

OLIVEIRA, Klebison Pinto. Este é um caso de CST (corrosão sob-tensão) detectado por ensaio visual. 2022. Link: <https://www.linkedin.com/pulse/este-é-um-caso-de-cstcorrosão-sob-tensão-detectado-pinto-de-oliveira/>.

PELLICCIONE, André da Silva. DA SILVA, Paulo Sérgio Carvalho Pereira. Análise de falhas: Trincas e fraturas em equipamentos metálicos. Rio de Janeiro, PETROBRAS, 2024.

PAREDES, Ramón S. C. Introdução à Metalurgia da Soldagem.

PEREZ, Nestor. Fracture Mechanics. SECOND EDITION, 2016.

PERRONE, Vitor Cury. et al. Estudo do comportamento à flexão de compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno de alta tenacidade. 2011.

PINTO, Olivier Stephane Xavier. Ruptura de dutos corroídos.; Rio de Janeiro, COPPE. 2007.

RIBEIRO, H.O. Soldagem do aço ASTM A 516 Grau 60 para vaso de pressão sujeito à corrosão sob tensão. 2001. 91p. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

RUIZ-CABAÑAS, F. Javier et al. Corrosion testing device for in-situ corrosion characterization in operational molten salts storage tanks: A516 Gr70 carbon steel performance under molten salts exposure. ELSEVIER, 2016.

SARTORI, Elen Romão; BATISTA, E. F.; FATIBELLO-FILHO, Orlando. Escurecimento e limpeza de objetos de prata-um experimento simples e de fácil execução envolvendo reações de oxidação-redução. Química Nova na Escola, v. 30, p. 61-65, 2008.

SCHULZ, Carlos Henrique. Corrosão sob tensão em aço inoxidável causada por poliuretano. 2004.

SILVA TELLES, P. C. Vasos de Pressão. Editora LTC, 2º ed., Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, Aline Raquel Vieira. Materiais para Vasos de Pressão em Meio com H₂S/H₂ Aplicáveis a Unidades de Hidrotratamento em Refinarias. INTERCORR. ABRACO, 2014. Washington, DC, 2018.

SUMIG. Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG. Sumig, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>.

TANK, C. Como diferenciar e tratar os tipos de corrosão. Disponível em: <https://www.c-tank.com.br/como-diferenciar-e-tratar-os-tipos-de-corrosao/>.

TELLES, P.C.S. Materiais para Equipamentos de Processo. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 225p., 1979.

ZEEMANN, Annelise. Corrosão em juntas soldadas. 2003.

ZHENG et al. Efeitos de testes hidrostáticos no crescimento de fissuras por corrosão sob tensão. International Pipeline Conference, Vol. 1, Calgary, Alberta, Canadá, 1998.