

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIREÇÃO DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ISABELE PAIVA ASSUNÇÃO

**PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE AÇO: INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO
POR MEIO DE LÍQUIDO PENETRANTE, E ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF EM
LIGAÇÕES SOLDADAS DA OBRA DE REFORMA E AMPLIAÇÃO DO IFS –
CAMPUS ARACAJU**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2022

ISABELE PAIVA ASSUNÇÃO

**PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE AÇO: INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO
POR MEIO DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE, E
ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF EM LIGAÇÕES SOLDADAS DA OBRA DE
REFORMA E AMPLIAÇÃO DO IFS – CAMPUS ARACAJU**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador(a): Professor Me. Marcílio Fabiano Goivinho da Silva

Coorientador(a): Professora Dra. Adriana Virgínia Santana Melo

ARACAJU

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Assunção, Isabele Paiva.

A851p Patologia das estruturas de aço: inspeção visual e avaliação por meio do ensaio não destrutivo de líquido penetrante, e análise numérica via MEF em ligações soldadas da obra de reforma e ampliação do IFS – campus Aracaju. / Isabele Paiva Assunção. – Aracaju, 2022.

131 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Marcilio Fabiano Govinho da Silva.
Co-orientadora: Profª. Drª. Adriana Virgínia Santana Melo.
Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2022.

1. Estrutura metálica. 2. Paralisação de obra. 3. Manifestação patológica. 4. Ensaio não destrutivo. 5. Modelagem e simulação numérica. I. Silva, Marcilio Fabiano Govinho da. II. Melo, Adriana Virgínia Santana. III. Título.

CDU 624.01

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 236

**PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE AÇO: INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO
POR MEIO DE LÍQUIDO PENETRANTE, E ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF EM
LIGAÇÕES SOLDADAS DA OBRA DE REFORMA E AMPLIAÇÃO DO IFS –
CAMPUS ARACAJU**

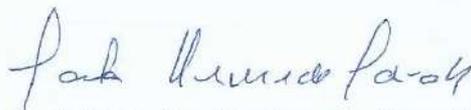
ISABELE PAIVA ASSUNÇÃO

Esta monografia foi apresentada às 19 h 00 do dia 28 de JULHO de 2022 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHARELA EM ENGENHARIA CIVIL. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

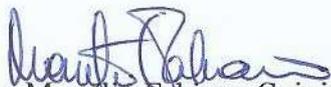
Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof. Dr. José Resende Góes
(IFS – Campus Aracaju)



Prof. Dr. Carlos Henrique de Carvalho
(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Marcilio Fabiano Goivinho da
Silva

(IFS – Campus Aracaju)
Orientador

Prof.^a Dr.^a 

Documento assinado digitalmente
ADRIANA VIRGINIA SANTANA MELO
Data: 05/08/2022 15:27:09-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

(IFS – Campus Aracaju)
Coorientadora



Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Este trabalho é dedicado aos meus avós (*in memoriam*): Euclides, Doraci, Tereza e Manoel, que sempre serão grandes exemplos de dignidade e caráter para mim.

AGRADECIMENTOS

Apesar de não de ser uma pessoa muito religiosa, sempre busquei me apegar a algo que fizesse algum sentido para mim e que me transmitisse paz e segurança. Dessa forma, primeiramente, agradeço a Deus por atender todas as minhas súplicas, a Nossa Senhora Aparecida por interceder por mim e a ambos por me oferecerem sabedoria nos instantes obscuros.

Desde criança, quando comecei a entender um pouco mais sobre o sentido da vida e galgar fases, percursos e obstáculos, ouço a seguinte frase: “Se você ainda não desistiu, é porque você sabe que vale a pena lutar”. Com essa frase, agradeço aos meus pais, Carlos e Silvania, por toda paciência, apoio e investimento, pela força nas horas difíceis, por não me permitirem abaixar a cabeça e, principalmente, por me darem muito amor. Sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui.

Clarice Lispector, em algum de seus momentos de engenhosidade, disse: “Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado, com certeza vai mais longe”. Assim, agradeço, também, aos meus amigos, colegas de trabalho e familiares, em especial minha tia Diva, por me apoiarem nos momentos mais sofridos. Todos nós sabemos o quão difícil é conciliar trabalho e estudos.

O agradecimento agora é recheado de gratidão, pois, desde que o mundo é mundo, o professor é o único profissional que forma todas as outras profissões e até hoje não conheci missão maior e mais nobre. Logo, agradeço a todos os professores que passaram por minha vida e que tornaram a minha formação acadêmica possível. Em especial, agradeço ao professor Elber Gama por ter me ajudado e acreditado em meu potencial desde a infância. Ao meu orientador, Marcílio, e a minha coorientadora, Adriana, por me guiarem, cortarem minhas asas quando necessário e por me incentivarem a voar bem mais alto do que eu acharia que seria capaz.

Por fim, agradeço, também, ao Instituto Federal de Sergipe e aos seus colaboradores que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse sonho.

Sim, a Engenharia Civil também é para mim!

“Não tenho medo de nada. Temos que ensinar o medo a ter medo de nós.”

(Elza Soares)

RESUMO

ASSUNÇÃO, I. P. **PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS DE AÇO: INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO POR MEIO DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE, E ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF EM LIGAÇÕES SOLDADAS DA OBRA DE REFORMA E AMPLIAÇÃO DO IFS – CAMPUS ARACAJU**. 131 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2022.

A utilização do aço, como parte das obras ou como principal solução estrutural, vem crescendo no Brasil devido à sua flexibilidade de projeto, à sua elevada produtividade em comparação com outros métodos construtivos convencionais, entre outros fatores. Porém, a sua aplicabilidade depende de cuidados especiais devido à sua vulnerabilidade às ações corrosivas. Por conseguinte, quando um empreendimento é paralisado, controlar essas ações se torna uma tarefa complexa, pois as manutenções preventivas e corretivas são onerosas. Assim, surgem as manifestações patológicas que afetam toda a estrutura. Destarte, o presente trabalho tem como objetivo principal identificar as manifestações patológicas e inconformidades técnicas nas ligações soldadas de uma estrutura metálica por meio de ensaios não destrutivos de Inspeção Visual e Líquido Penetrante (LP), baseados nos critérios das normas ABNT NBR NM 315:2017, ABNT NBR NM 334:2012, AWS D1.1:2020 e ASME BPVC.VIII.1:2019, investigar as causas, inferir as consequências, sugerir soluções de intervenção e estudá-las, fazendo-se, inclusive, uso da modelagem e simulação numérica, comparando uma ligação saudável com uma manifestada patologicamente, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), com auxílio do software *ABAQUS*. Após a realização dos ensaios, comprovou-se que algumas regiões dessa estrutura estão em um estado de degradação avançado, devido às condições dessas exposições. Posteriormente à realização da modelagem e simulação numérica, comparou-se os resultados obtidos e constatou-se que, apesar da ligação analisada estar comprovadamente manifestada patologicamente, seu desempenho não foi afetado, diante dos esforços aplicados.

Palavras-chave: Estrutura metálica; Paralisação de obra; Manifestações patológicas; Ensaios não destrutivos; Modelagem e simulação numérica.

ABSTRACT

ASSUNÇÃO, I. P. **PATHOLOGY OF STEEL STRUCTURES: VISUAL INSPECTION AND EVALUATION THROUGH THE NON-DESTRUCTIVE LIQUID PENETRANT TEST, AND NUMERICAL ANALYSIS VIA FEM IN WELDED CONNECTIONS OF THE RENOVATION AND EXPANSION WORK OF IFS - CAMPUS ARACAJU.** 131 p. Monograph (Bachelor in Civil Engineering) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - Campus Aracaju. 2022.

The use of steel, as part of the works or as the main structural solution, has been growing in Brazil due to its design flexibility, its high productivity compared to other conventional construction methods, among other factors. However, its applicability depends on special care due to its vulnerability to corrosive actions. Therefore, when an enterprise is paralysed, controlling these actions becomes a complex task, as preventive and corrective maintenance is costly. Thus, the pathological manifestations that affect the whole structure arise. Thus, the present work has as main objective to identify the pathological manifestations and technical nonconformities in the welded connections of a metallic structure through non-destructive tests of Visual Inspection and Liquid Penetrant (LP), based on the criteria of the standards ABNT NBR NM 315:2017, ABNT NBR NM 334:2012, AWS D1.1:2020 and ASME BPVC.VIII.1 :2019, investigate the causes, infer the consequences, suggest intervention solutions and study them, also making use of numerical modelling and simulation, comparing a healthy connection with one manifested pathologically, through the Finite Element Method (FEM), with the aid of ABAQUS software. After performing the tests, it was proven that some regions of this structure are in an advanced state of degradation, due to the conditions of these exposures. After the modelling and numerical simulation, the results were compared and it was found that, although the analysed connection was pathologically manifested, its performance was not affected by the applied loads.

Keywords: Steel structure; Work stoppage; Pathological manifestations; Non-destructive testing; Modeling and numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de calor dos percentuais de obras paralisadas em cada ente federativo.....	24
Figura 2 - Motivos para paralisação das obras brasileiras	24
Figura 3 - Exemplos de ligação em estruturas de aço	33
Figura 4 - Exemplos de elementos e meios de ligação	34
Figura 5 - Tipos de solda.....	36
Figura 6 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono	37
Figura 7 - Simbologia de solda de estruturas metálicas.....	41
Figura 8 - Parafuso com porca sextavada e arruelas.....	43
Figura 9 - Parafuso de alta resistência por atrito.....	44
Figura 10 - Parafuso de alta resistência por contato (Normal)	45
Figura 11 - Parafuso de alta resistência por contato (Excluded).....	45
Figura 12 - Fluxograma da abordagem da patologia das estruturas de aço	48
Figura 13 - Formas de corrosão	50
Figura 14 - Índice de Corrosividade de Brooks	55
Figura 15 - Mapa de corrosividade atmosférica	56
Figura 16 - Flambagem da alma (Deformações Excessivas).....	58
Figura 17 - Falha por fadiga em parafuso	59
Figura 18 - (a) Curva de aquecimento do forno segundo o “incêndio-padrão”, descrito pela NBR 5628 e (b) Decréscimo da resistência do aço estrutural em função da temperatura	61
Figura 19 – Lei da evolução de custos ou Lei de Sitter.....	63
Figura 20 - Exemplos de alguns dos principais defeitos de soldas	65
Figura 21 - Representação em fluxograma do funcionamento do ABAQUS.....	72
Figura 22 - Fluxograma para reparo das ligações.....	74

Figura 23 - Fachada do projeto de reforma e ampliação do IFS – Campus Aracaju	77
Figura 24 - Imagem área do IFS – Campus Aracaju	77
Figura 25 - (a) Paquímetro fixado em 1 mm e (b) Exemplo de medição utilizando o AUTOCAD 2D	80
Figura 26 - Fluxograma para análise das porosidades superficiais	81
Figura 27 - Fluxograma para análise das indicações	83
Figura 28 - (a) Diâmetro da moeda e (b) Exemplo de medição utilizando o AUTOCAD 2D	84
Figura 29 - Procedimento de ensaio de LP	85
Figura 30 - Geometria esquemática	87
Figura 31 – (a) Modelo idealizado para simulação e (b) Modelo espelhado	87
Figura 32 - Fluxograma da modelagem e simulação numérica utilizando o software ABAQUS	88
Figura 33 - Exemplo da aplicação do módulo ASSEMBLY	89
Figura 34 - Exemplo da aplicação do módulo INTERACTION	89
Figura 35 - Exemplo da aplicação do módulo LOAD	90
Figura 36 - Exemplo da aplicação do módulo MESH	90
Figura 37 - (a) Ligações expostas às ações dos ventos e (b) Ligação menos exposta às ações dos ventos	91
Figura 38 – (a) Solda realizada na ligação L ₁ e (b) Face contrária à da realização da solda	92
Figura 39 - (a) Solda realizada na ligação L ₂ e (b) Localização da ligação	93
Figura 40 – (a) Solda realizada no lado direito da ligação L ₃ e (b) Solda realizada no lado esquerdo da ligação L ₃	93
Figura 41 – (a) Solda realizada na ligação L ₄ e (b) Foto aproximada da solda realizada na ligação L ₄	94
Figura 42 - (a) Porosidades da solda da ligação L ₁ e (b) Porosidades da solda da ligação L ₂	96

Figura 43 - (a) Porosidades da solda da ligação L ₃ e (b) Porosidades da solda da ligação L ₄	96
Figura 44 – (a) Registro das maiores porosidades da ligação L ₁ (em mm) e (b) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L ₂ (em mm)	97
Figura 45 - (a) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L ₃ (em mm) e (b) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L ₄ (em mm)	97
Figura 46 - (a) Mordeduras da solda da ligação L ₂ e (b) Mordeduras da solda da ligação L ₃	99
Figura 47 - Mordeduras da solda da ligação L ₄	99
Figura 48 - (a) Sobreposição de solda da ligação L ₂ e (b) Sobreposição de solda da ligação L ₃	100
Figura 49 - Reforço excessivo na solda da ligação L ₃	101
Figura 50 - Carepas de soldagem nas ligações L ₁ , L ₂ , L ₃ e L ₄	102
Figura 51 - (a) Ligação L ₂ e (b) Ligação L ₃	103
Figura 52 - (a) Lado direito da ligação L ₃ e (b) Lado esquerdo da ligação L ₃ evidenciando a incompatibilidade das furações	104
Figura 53 - (a) Ligação L ₃ e (b) Ligação L ₄	106
Figura 54 – (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L ₁ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda	107
Figura 55 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L ₂ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda	107
Figura 56 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L ₃ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda	108
Figura 57 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L ₄ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda	108

Figura 58 - (a) Ligação L ₂ modelada no <i>ABAQUS</i> com os defeitos na solda e (b) Ligação L ₂	110
Figura 59 - Deslocamento da viga da ligação L ₂ saudável em um regime elastoplástico	110
Figura 60 - Deslocamento da viga da ligação L ₂ saudável em um regime elástico.	111
Figura 61 - Deslocamento da viga da ligação L ₂ com patologia em um regime elastoplástico.....	111
Figura 62 - Tensões na ligação L ₂ saudável em um regime elastoplástico	112
Figura 63 – Tensões na ligação L ₂ saudável em um regime elástico.....	112
Figura 64 – Tensões na ligação L ₂ com patologia em um regime elastoplástico	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Símbolos básicos de solda.....	41
Quadro 2 - Símbolos suplementares.....	41
Quadro 3 - Compatibilidade do metal base e do metal da solda.....	42
Quadro 4 - Definições e nomenclaturas para o estudo da patologia das construções	48
Quadro 5 - Aplicação dos Ensaio Não Destrutivos.....	67
Quadro 6 – Principais normas sobre END para ligações parafusadas e soldadas ...	68
Quadro 7 - Resultado da inspeção visual em relação à porosidade superficial	98
Quadro 8 - Ligações existentes na obra.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagens máximas de elementos adicionais na composição do aço carbono e classificação de acordo com o teor de carbono	30
Tabela 2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.....	32
Tabela 3 - Propriedades mínimas das soldas	40
Tabela 4 - Corrosão de ferro acoplado a outros metais para um mesmo tempo de referência	52
Tabela 5 - Corrosividade dos ambientes para o aço-carbono, segundo a ISO 12944-2	54
Tabela 6 - Classificação em termos de tempo de superfície úmida	57
Tabela 7 - Coeficientes de dilatação linear de alguns metais.....	58
Tabela 8 - Características geométricas dos perfis	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico Tensão x Deformação	40
Gráfico 2 - Comparativo de deslocamento verticais em mm entre as análises	111
Gráfico 3 - Comparativo de tensões entre as análises ao longo do vão	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABENDI	Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
CC	Corrente Contínua
CNI	Confederação Nacional da Indústria
END	Ensaio Não Destrutivos
ESAB	<i>Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget</i>
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
GAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
IFS	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LP	Líquido Penetrante
MEF	Método dos Elementos Finitos
MICAT	Mapa Ibero-americano de Corrosão Atmosférica
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento

PDA	<i>Pile Driving Analyzer</i>
PIT	<i>Pile Integrity Test</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TCU	Tribunal de Contas da União
VUP	Vida Útil de Projeto
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Altura do perfil
h	Altura interna
d'	Altura livre da alma
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
\emptyset	Diâmetro
t_f	Espessura da aba
t_w	Espessura da alma
b_f	Largura da aba do perfil
f_y	Resistência ao escoamento do aço à tensão normal
r	Raio de concordância
f_u	Resistência de ruptura do aço à tração
f_w	Resistência mínima à tração do metal da solda
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA da pesquisa	26
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	 Gerais	27
1.2.2	 Específicos	27
2	REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1	ESTRUTURAS METÁLICAS	28
2.1.1	 Tipos de aços estruturais	29
2.1.1.1	Aços carbono	29
2.1.1.2	Aços de baixa liga	30
2.1.1.3	Aços com tratamento térmico	30
2.1.2	 Tipos de produtos estruturais	31
2.1.3	 Ligações em estruturas metálicas	33
2.1.3.1	Ligações soldadas	35
2.1.3.1.1	<i>Tipos de solda</i>	<i>35</i>
2.1.3.1.2	<i>Principais processos de soldagem</i>	<i>36</i>
2.1.3.1.3	<i>Eletrodos revestidos para a soldagem de aços carbono</i>	<i>37</i>
2.1.3.1.4	<i>Principais usos dos tipos de eletrodos de acordo com sua classificação</i>	<i>38</i>
2.1.3.1.5	<i>Resistência de juntas soldadas</i>	<i>39</i>
2.1.3.1.6	<i>Simbologia de solda</i>	<i>40</i>
2.1.3.1.7	<i>Compatibilidade entre metais para soldagem</i>	<i>42</i>
2.1.3.2	Ligações parafusadas	43
2.1.3.2.1	<i>Parafusos comuns (baixo carbono)</i>	<i>43</i>
2.1.3.2.2	<i>Parafusos de alta resistência</i>	<i>44</i>

2.2	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS METÁLICAS	47
2.2.1	Mecanismos de deterioração	49
2.2.1.1	Mecanismos químicos	49
2.2.1.2	Mecanismos físicos	57
2.2.1.3	Mecanismos biológicos	59
2.2.1.4	Mecanismos mecânicos	60
2.2.2	Manifestações patológicas nas ligações	64
2.2.2.1	Manifestações patológicas nas ligações soldadas	64
2.2.2.2	Manifestações patológicas nas ligações parafusadas.....	66
2.2.3	Ensaio Não Destrutivo (END)	66
2.2.4	END em estruturas metálicas	68
2.2.4.1	Inspeção visual.....	69
2.2.4.2	Líquido penetrante.....	70
2.2.4.3	Ultrassom	70
2.2.4.4	Radiografia	70
2.2.4.5	Partícula magnética.....	70
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF	71
2.3.1	ABAQUS	71
2.4	RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS	73
2.4.2	Recuperação das ligações em estruturas metálicas.....	73
3	METODOLOGIA	75
3.1	ESTUDO DE CASO	76
3.2	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS SELECIONADOS PARA A PESQUISA	78
3.2.1	Inspeção visual.....	78
3.2.2	Líquido penetrante	81
3.3	INCONFORMIDADES NORMATIVAS	86

3.4	LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A PESQUISA.....	86
3.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O SOFTWARE ABAQUS.....	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
4.1	IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO COM ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR INSPEÇÃO VISUAL DE SOLDA.....	92
4.1.1	Corrosão em torno do cordão de solda.....	94
4.1.2	Porosidades superficiais.....	95
4.1.3	Mordeduras.....	98
4.1.4	Sobreposições de solda.....	100
4.1.5	Reforços excessivos.....	101
4.1.6	Carepas de soldagem.....	101
4.1.7	Falhas no detalhamento de projeto e no gabarito da furação.....	103
4.1.8	Inconformidade normativa em relação às pernas dos cordões de solda	105
4.2	IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO COM ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LP.....	106
4.2.1	Porosidade da solda.....	109
4.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA LIGAÇÃO SOLDADA EM ESTUDO.....	109
4.4	POSSÍVEIS CONSEQUÊNCIAS DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICADAS.....	113
4.5	SUGESTÕES DE SOLUÇÕES PARA AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICADAS.....	114
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
5.1	CONCLUSÕES.....	115
5.2	SUGESTÕES.....	116
	REFERÊNCIAS.....	117

APÊNDICE A – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR INSPEÇÃO VISUAL DE SOLDA.....	122
APÊNDICE B.1 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE	123
APÊNDICE B.2 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE	124
APÊNDICE B.3 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE	125
APÊNDICE B.4 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE	126
ANEXO A.1 – CRITÉRIO PARA ACEITAÇÃO DE SOLDAS, SEGUNDO AWS D1.1	127
ANEXO A.2 – CRITÉRIO PARA ACEITAÇÃO DE SOLDAS, SEGUNDO AWS D1.1	128
ANEXO B - CROQUI EXECUÇÃO ESTRUTURA METÁLICA (DISPONIBILIZADA PELO IFS) - LAJE TÉCNICA (SEM ESCALA).....	129
ANEXO C.1 – LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (SEM ESCALA)	130
ANEXO C.2 – LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (SEM ESCALA)	131

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pinheiro (2005), as estruturas metálicas começaram a ser utilizadas, em escala industrial, a partir de 1750. No Brasil, a sua fabricação iniciou-se em 1812, trazendo avanço a fabricação de perfis em larga escala, com a implantação das grandes indústrias siderúrgicas. A utilização do aço tornou-se mais frequente no mercado brasileiro, de forma mais expressiva nas construções comerciais e industriais, pois o tempo de execução possui relação direta com o retorno do investimento (CHAN; FONTANINI, 2017).

Com a produção do aço sofrendo um aumento de 25,6%, comparando 2019 a 2018, segundo o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2020), e com o auxílio legislativo advindo da Lei nº 11080 de 2004, que dá autonomia à Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), as obras públicas também começaram a utilizar a estrutura metálica como principal sistema construtivo, quando viável. Como qualquer outro sistema, estruturas de aço possuem vantagens e desvantagens, dentre estas, estão as aparições de manifestações patológicas na estrutura, principalmente em obras paralisadas, devido à ausência de qualquer prevenção aos agentes deteriorantes durante o período de paralisação.

No cenário brasileiro, essa realidade é frequente e está aliado a paralisação das obras que traz inúmeros prejuízos à sociedade, à própria estrutura e aos cofres públicos. Segundo o Tribunal de Contas da União (TCU, 2019), há mais de trinta e oito mil contratos referentes a obras públicas federais atuais e, dentre eles, mais de catorze mil estão paralisados. Na Figura 1, as regiões mais escuras representam os estados com o maior percentual de obras paralisadas.

Ainda na Figura 1, o estado do Amapá tem mais da metade dos empreendimentos paralisados, sendo esse o maior percentual encontrado no Brasil, 51%. Em Sergipe, o percentual é de 40%, colocando-o entre os quatro estados do Nordeste com o maior número de obras paralisadas.

Uma obra paralisada, sem a manutenção periódica adequada, apresenta manifestações patológicas, que podem comprometer a vida útil da estrutura, suas funções e, conseqüentemente, colocar em risco a segurança das pessoas. De acordo com Sacchi e Souza (2016), as manifestações patológicas devido ao tempo de exposição a agentes ambientais agressores resultam na corrosão das estruturas metálicas, sendo possível detectar outras manifestações que podem estar relacionadas ao projeto, à execução, aos materiais, ao uso inadequado, entre outros.

A ausência de manutenção pode ser considerada como um agravante para as manifestações patológicas e, com isso, acaba-se optando, na maioria das vezes, por uma recuperação, pois a estrutura apresenta um nível de deterioração no qual a manutenção em si não faria mais efeito.

Quando uma obra encontra-se paralisada, faz-se necessário realizar um estudo antes de sua retomada. Nesse estudo, é possível identificar as manifestações patológicas presentes em alguns pontos da estrutura e, com isso, verificar o que é executável para devolver à estrutura as características originais.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Segundo Santos (2012), os gastos governamentais com recuperação de estruturas de obras públicas, devido às ações corrosivas, chegam a custar aproximadamente R\$800 milhões por ano aos cofres brasileiros. Além dos custos excessivos com recuperações, em vez de realizar manutenções periódicas que, segundo a NBR 5674 (ABNT, 2012), variam entre 1% e 2% do seu custo inicial, o Brasil possui gastos com obras paradas de infraestrutura que somam R\$ 10,7 bilhões, conforme Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018).

As manutenções se fazem necessárias, pois uma edificação deve oferecer segurança, conforto e boas condições de utilização. Qualquer situação incomum, que possa decorrer em algum prejuízo para a estrutura e para os seus usuários, deve ser imediatamente identificada, quantificada, qualificada e propostas soluções para resolução do problema. Os ensaios não destrutivos são os mais indicados para estruturas acabadas, pois não comprometem a estrutura e podem ser feitos em qualquer lugar, a depender do ensaio. Com eles é possível identificar a existência de manifestações.

Para a retomada de uma obra paralisada, é necessário realizar um estudo característico e criterioso para verificar a real situação do empreendimento. Os ensaios que podem ser realizados para essa verificação são simples e de fácil execução, porém pode demorar devido à quantidade de locais de estudos. Pela complexidade de estudo do tema, tempo limitado e recursos escassos, onde vários aspectos devem ser considerados, no presente trabalho, procurar-se-á focar nos ensaios não destrutivos de inspeção visual com avaliação por meio de líquido penetrante, e uma análise numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Gerais

Identificar as manifestações patológicas e inconformidades normativas nas ligações soldadas de uma estrutura metálica por meio de ensaios não destrutivos e estudá-las, fazendo-se uso da modelagem e simulação numérica.

1.2.2 Específicos

- a) Selecionar no projeto estrutural as ligações para o estudo, com base no estado de deterioração, entre os componentes estruturais executados na obra;
- b) Realizar ensaios não destrutivos de inspeção visual e Líquido Penetrante (LP) nas ligações soldadas selecionadas, baseados nos critérios das normas ABNT NBR NM 315:2017, ABNT NBR NM 334:2012, AWS D1.1:2020 e ASME BPVC.VIII.1:2019;
- c) Investigar as causas e inferir as consequências das manifestações patológicas encontradas nas ligações soldadas da estrutura metálica da obra do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS) – Campus Aracaju;
- d) Estudar o comportamento de uma ligação soldada entre duas vigas, supondo as soldas saudáveis e manifestadas patologicamente, diante esforços mecânicos, com o auxílio do software *ABAQUS*;
- e) Sugerir alternativas para tratar as manifestações patológicas detectadas;

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo tem por objetivo conceituar os elementos que são estudados neste trabalho. Alguns conceitos sobre o aço são apresentados, como sistema construtivo e os elementos de ligação desse sistema, assim como as manifestações patológicas que podem acometer essa estrutura e, conseqüentemente, as principais manifestações que afetam as ligações. Também é apresentada uma abordagem geral de como identificar essas manifestações, utilizando ensaios não destrutivos, os quais também são conceituados. Além disso, há uma breve explanação sobre os Métodos de Elementos Finitos (MEF), citando também algumas funcionalidades do software *ABAQUS*. Por fim, completa-se este capítulo com possíveis soluções que podem ser aplicadas às ligações metálicas.

2.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

O aço é uma liga metálica formada, principalmente, de ferro (Fe) e carbono (C), segundo Pfeil (2009), tornando-se um material de interesse comercial para diversos segmentos industriais. Atualmente, o aço está sendo largamente utilizado na construção civil, podendo estar presente como parte das obras ou como principal solução estrutural.

Os sistemas estruturais metálicos trazem liberdade de projeto e conseqüentemente, maior flexibilidade, compatibilidade com outros materiais, maiores probabilidades de garantia de qualidade, melhor utilização da área útil, prazos de execução inferiores, melhor aplicação de materiais e processos, redução de carga nas fundações, maior organização e melhor precisão construtiva se comparado com outros métodos construtivos convencionais, como alvenaria estrutural, concreto pré-moldado ou concreto moldado *in loco*. (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008)

A sua aplicabilidade é muito variada e como exemplos têm-se: edifícios industriais e comerciais, escadas, guindastes, hangares, indústria naval, mezaninos, passarelas, pontes e viadutos, pontes rolantes e equipamentos de transporte, postes, reservatórios, residências, telhados, torres, entre outros (PINHEIRO, 2005).

“Os principais elementos estruturais metálicos são os elementos lineares alongados, denominados hastes ou barras e os elementos bidimensionais, geralmente denominados elementos planos, constituídos por placas ou chapas.” (PFEIL, 2009, p.25).

Os aços estruturais possuem características mecânicas apreciáveis e isso faz com que eles sejam aproveitados para diferentes tipos de aplicações. Essas propriedades são, segundo Pinheiro (2005):

- a) Ductibilidade: capacidade do material de se deformar plasticamente sob a ação de cargas;
- b) Fragilidade: oposto da ductibilidade. Os aços podem ter características de elementos frágeis em baixas temperaturas ambientes;
- c) Resiliência: capacidade do material de absorver energia mecânica em regime elástico;
- d) Tenacidade: capacidade do material de absorver energia mecânica com deformações elásticas e plásticas.
- e) Dureza: resistência ao risco ou abrasão;
- f) Fadiga: resistência a carregamentos repetitivos.

2.1.1 Tipos de aços estruturais

De acordo com Pfeil (2009), os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços carbono e aços de baixa liga, segundo sua composição química. Além disso, ambos podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas.

2.1.1.1 Aços carbono

Apesar do ferro-fundido possuir maior resistência que o aço-carbono, esse último é utilizado em aplicações mais práticas, como na construção civil, pois possuem melhor soldabilidade e são mais dúcteis, segundo Pfeil (2009). Esse aumento de resistência é produzido, principalmente, pelo carbono e pelo manganês, em quantidade menor. A Tabela 1 traz as porcentagens máximas de elementos adicionais, que podem compor os aços carbono, e o teor de carbono, classificando o aço carbono em três categorias.

Tabela 1 - Porcentagens máximas de elementos adicionais na composição do aço carbono e classificação de acordo com o teor de carbono

Elemento	Porcentagem
carbono	2,0%
manganês	1,65%
silício	0,60%
cobre	0,35%

Categoria	Teor de carbono
Baixo carbono	$C < 0,29\%$
Médio carbono	$0,30\% < C < 0,59\%$
Alto carbono	$0,60\% < C < 2,0\%$

Fonte: Adaptado de PFEIL (2009)

O aumento do teor de carbono eleva a resistência do aço, porém, deve-se considerar que esse aumento reduz a ductibilidade e, com isso, uma maior probabilidade de ocorrer problemas na soldagem.

2.1.1.2 Aços de baixa liga

Para melhorar algumas propriedades mecânicas, acrescenta-se elementos de liga (cromo, colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, zircônio) aos aços carbono, fazendo surgir os aços de baixa liga. Alguns desses elementos conseguem aumentar a resistência do aço, modificando a microestrutura para grãos finos. Altas resistências podem ser obtidas com um teor de carbono em torno de 0,20% e isso permite a soldagem dos aços sem preocupações específicas, pois baixos teores de carbono resultam em aços com melhor soldabilidade (PFEIL, 2009).

2.1.1.3 Aços com tratamento térmico

Os aços carbono e aços baixa liga podem ter suas resistências elevadas pelo tratamento térmico. Como exemplo, têm-se os parafusos de alta resistência, utilizados como conectores, que são fabricados com aço de médio carbono sujeito a tratamento térmico e os aços de baixa liga que são empregados na fabricação de barras de aço para protensão e também de parafusos de alta resistência (PFEIL, 2009).

Como exemplo de tratamento térmico, têm-se a têmpera e o revenimento, que são dois tratamentos distintos e que se complementam, possuindo como objetivo

aumentar a resistência do aço. Pinedo (2021) afirma que uma vez que a peça tenha sido temperada, ela deve obrigatoriamente sofrer o tratamento de revenimento. Isso acontece porque o processo de têmpera eleva a resistência do material, obtendo o máximo endurecimento do aço e isso, conseqüentemente, aumenta a sua fragilidade. Para gerar o equilíbrio entre essas propriedades, o revenimento é realizado logo após a têmpera, tendo por objetivo reduzir as tensões internas residuais provocadas pela têmpera.

2.1.2 Tipos de produtos estruturais

De acordo com Pfeil (2009), para utilização estrutural, as indústrias siderúrgicas produzem aços sob diferentes formas: chapas, barras e perfis laminados (fabricados em laminadores), fios trefilados (obtidos pelo estiramento de uma barra de aço a frio), cordoalhas e cabos (formados por associação de fios). Ainda podem ser fabricados perfis estruturais por dobramento de chapas (perfis de chapa dobrada) e por associação de chapas através de solda (perfis soldados).

As peças metálicas estruturais possuem uma certa limitação de dimensões em sua fabricação, pois comprimentos excessivos geram alguns transtornos, como o transporte. Por isso, as estruturas de aço precisam ser formadas por associação de peças ligadas entre si, chamadas de ligações. Na Tabela 2, estão as propriedades mecânicas dos aços estruturais mais utilizados, seguindo o padrão American Society for Testing and Materials (ASTM):

Tabela 2 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a,b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	42	290	415
				50	345	450
				55	380	485
			1 e 2	60	415	520
		65		450	550	
		Chapas e barras ^{c)}	$t \leq 150$ mm	42	290	415
			$t \leq 100$ mm	50	345	450
			$t \leq 50$ mm	55	380	485
	$t \leq 31,5$ mm		60	415	520	
				65	450	550
	A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	-	345 a 450	450
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A242	Perfis	1	-	345	485
			2	-	315	460
			3	-	290	435
		Chapas e barras ^{c)}	$t \leq 19$ mm	-	345	480
			$19 \text{ mm} < t \leq 37,5$ mm	-	315	460
			$37,5 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	-	290	435
	A588	Chapas e barras ^c	1 e 2	-	345	485
			$t \leq 100$ mm	-	345	480
			$100 \text{ mm} < t \leq 125$ mm	-	315	460
				-	290	435
Aços de baixa liga temperados e auto-revenidos	A913	Perfis	1 e 2	50	345	450
				60	415	520
				65	450	550

^a Grupos de perfis laminados para efeito de propriedades mecânicas:

- Grupo 1: Perfis com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm;
- Grupo 2: Perfis com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm;
- Grupo 3: Perfis com espessura de mesa superior a 50 mm;
- Grupo 4: Perfis tubulares.

^b t corresponde à menor dimensão ou ao diâmetro da seção transversal da barra.

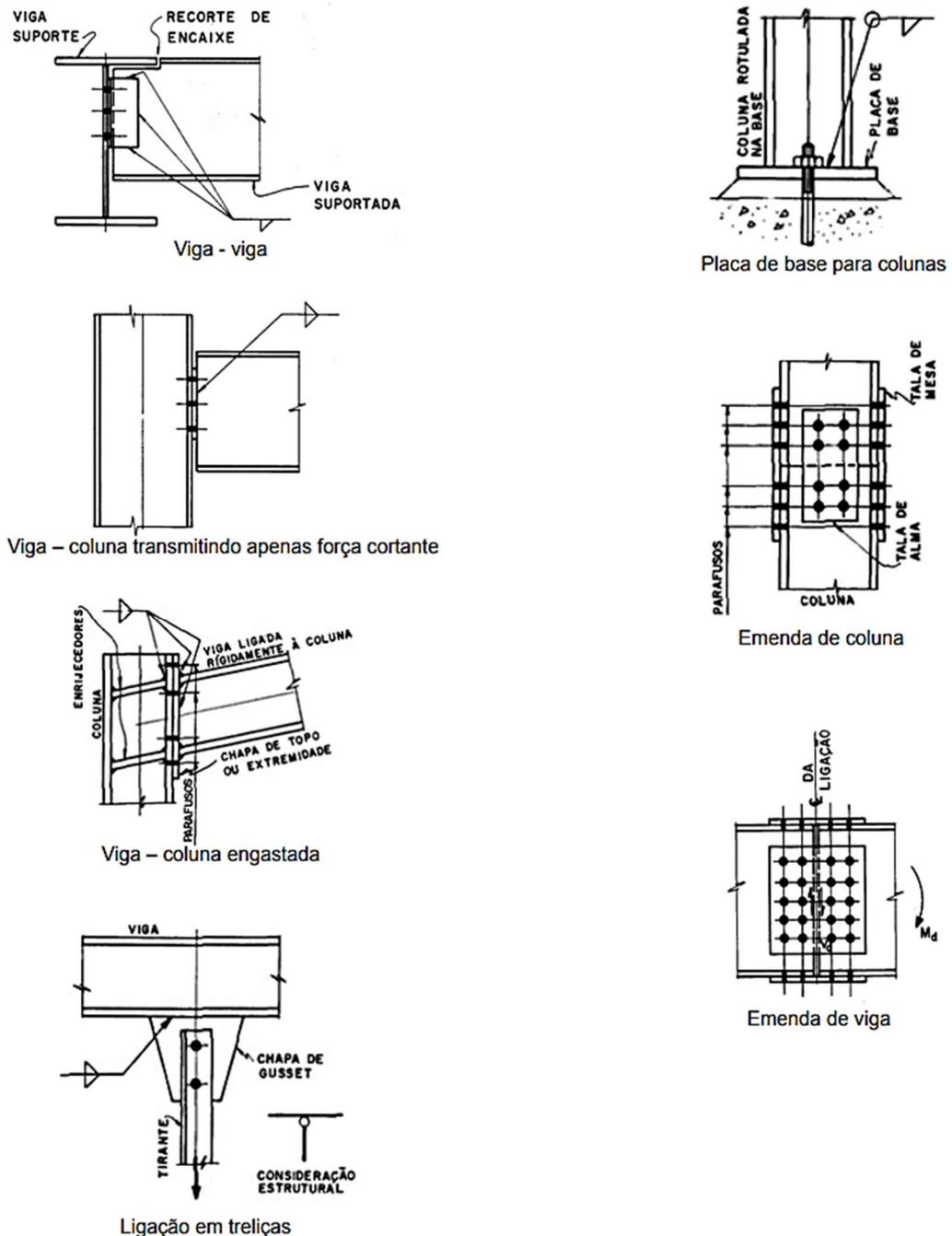
^c Barras redondas, quadradas e chatas.

^d A relação f_u/f_y não pode ser inferior a 1,18.

2.1.3 Ligações em estruturas metálicas

De acordo com Vasconcellos (2017), todos os detalhes construtivos que possibilitem a união de partes da estrutura, entre si ou com elementos externos a ela, como fundação, são chamados de ligação. A Figura 3 traz alguns exemplos dos principais tipos de ligação em estrutura de aço.

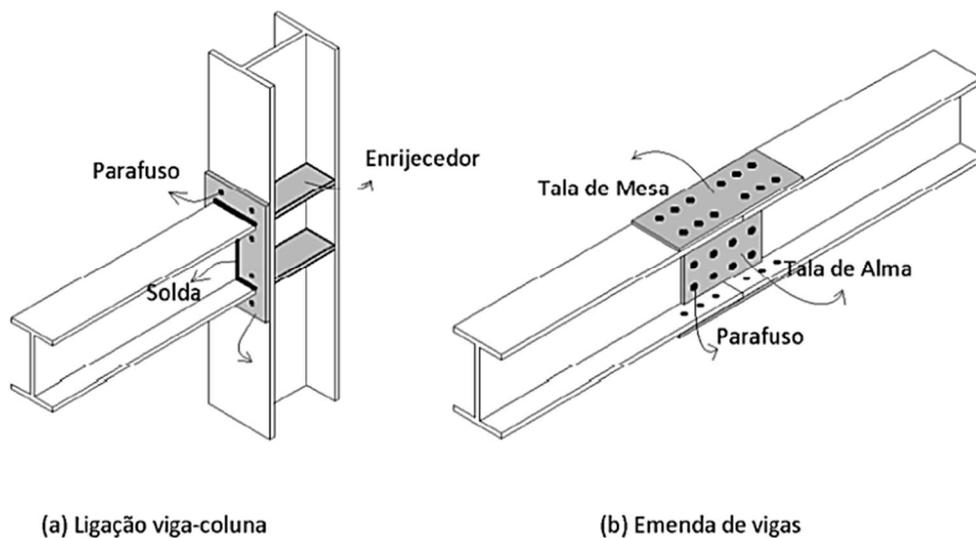
Figura 3 - Exemplos de ligação em estruturas de aço



Fonte: VASCONCELLOS (2017)

A composição das ligações é feita por elementos de ligação e dos meios de ligação. Esses elementos de ligação são responsáveis por permitir ou facilitar a transmissão dos esforços, como enrijecedores, chapas de ligação, placas de base, cantoneiras, consolos, talas de emenda e parte das peças ligadas envolvidas localmente na ligação. Já os meios de ligação são os componentes que promovem a união entre as partes da estrutura para formar a ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos (VASCONCELLOS, 2017). A Figura 4 traz alguns exemplos desses elementos e meios de ligação:

Figura 4 - Exemplos de elementos e meios de ligação



Fonte: QUEIROZ e VILELA (2012)

De acordo com Elhadj (2004), *apud* Crasto (2005), a escolha de um tipo específico de ligação ou fixação depende dos seguintes fatores:

- Condições de carregamento;
- Tipo e espessura dos materiais conectados;
- Resistência necessária da conexão;
- Configuração do material;
- Disponibilidade de ferramentas e fixações;
- Local de montagem, se é no canteiro ou em uma fábrica/oficina;
- Custo e experiência de mão de obra;
- Normativas.

Cada projeto possui sua especificidade, suas características e, para cada caso, usa-se um tipo de ligação diferente. Segundo Vasconcellos (2017), os tipos de ligação mais utilizados são as parafusadas e as soldadas. Apesar de até a década de 60 as ligações de rebite terem sido bastante utilizadas, hoje elas entraram em desuso devido à baixa resistência mecânica, à necessidade de mão de obra especializada e às dificuldades nos procedimentos de inspeção, manutenção e controle.

2.1.3.1 Ligações soldadas

A solda é a união de componentes metálicos que pode ser feita por meio da fusão de origem elétrica, química, óptica ou mecânica. Na indústria da construção, as soldas mais utilizadas são as elétricas. Essas soldas produzem um arco voltaico que produz calor e este é, geralmente, o responsável pela fusão do aço. Usualmente, esse arco se dá entre um eletrodo metálico e o aço a soldar. Devido às altas temperaturas, os componentes ao serem ligados também são fundidos parcialmente e após o resfriamento, o metal base e o metal do eletrodo passam a constituir uma única peça (PFEIL, 2009; PINHEIRO, 2005).

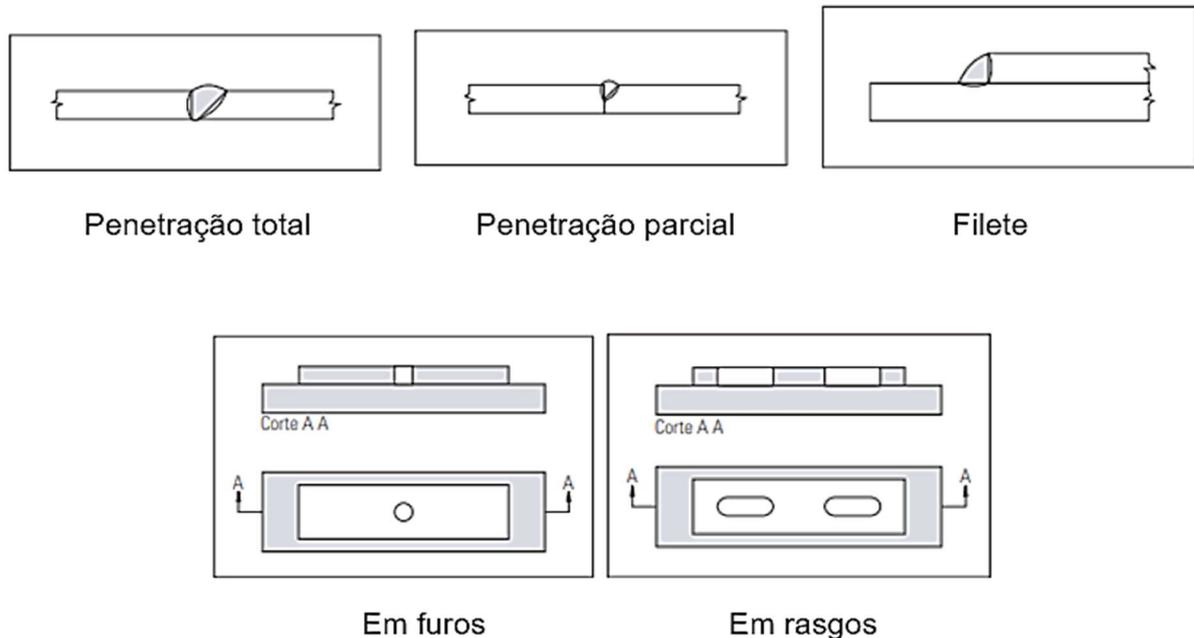
De acordo com Modenesi (2006), a solda pode ser considerada como um dos melhores dispositivos quando se trata de ligação, pois ela proporciona economia nas ligações executadas na fábrica e traz um melhor aproveitamento de material, consegue garantir uma redução significativa de peso em aço e dos elementos de ligações, trazendo uma maior rigidez estrutural na fabricação e montagem.

2.1.3.1.1 Tipos de solda

De acordo com Pinheiro (2005), pode-se ter os seguintes tipos de solda (Figura 5):

- Entalhe (penetração total e penetração parcial);
- Filete;
- Tampão (em furos e em rasgos).

Figura 5 - Tipos de solda



Fonte: Adaptado de PINHEIRO (2005)

2.1.3.1.2 Principais processos de soldagem

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), os principais processos de soldagem são:

a) *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) – Solda ao arco elétrico com eletrodo revestido: neste método, gases desprendem-se do revestimento do eletrodo e a finalidade deles é de criar uma atmosfera inerte de proteção para evitar a fragilidade, a porosidade e trazer uma maior estabilidade ao arco, resultando numa maior penetração da solda. É o mais largamente empregado dos vários processos de soldagem, de acordo com Fortes (2005).

b) *Submerged Arc Welding* (SAW) – Solda ao arco submerso: neste método, um tubo de fluxo com material granuloso, que funciona como isolante térmico, e um eletrodo “nu” são utilizados. Esse material granuloso funde-se parcialmente, formando uma camada líquida que depois é solidificada. Possui uma penetração grande e veloz.

c) *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) – Solda ao arco elétrico com proteção gasosa: é um tipo de solda que pode ser utilizada em diversas posições e permite um melhor controle visual. O gás a ser utilizado pode ser o CO₂, mas também pode utilizar gases inertes ou ativos, ou ainda misturas deles.

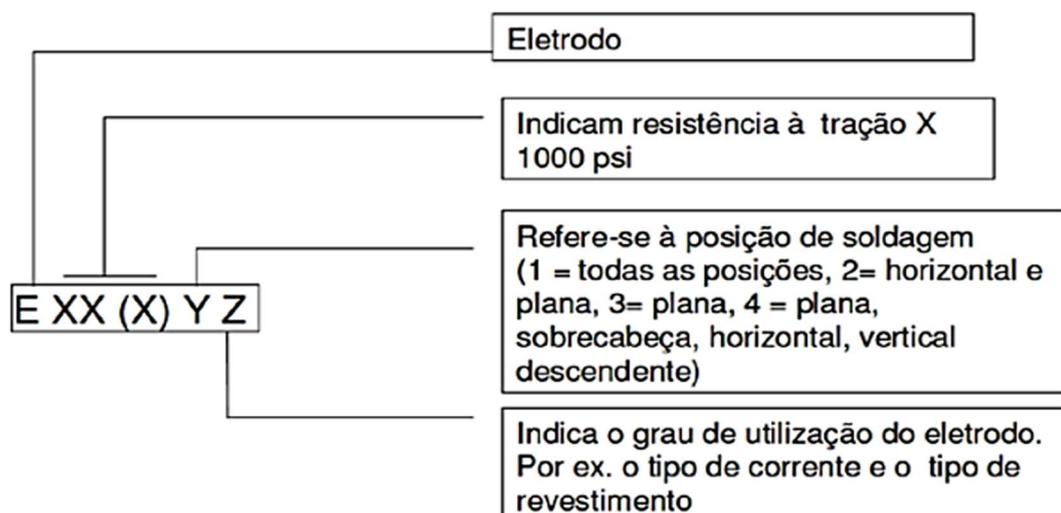
d) *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) – Solda ao arco elétrico com fluxo no núcleo: é um método muito semelhante ao GMAW, porém o eletrodo é tubular, com isso, o gás vem internamente ao eletrodo.

2.1.3.1.3 Eletrodos revestidos para a soldagem de aços carbono

Fortes (2005) afirma que os eletrodos revestidos para aço carbono trazem em sua composição basicamente dois elementos principais: a alma metálica (geralmente feito de aço de baixo carbono) e o revestimento. A alma metálica pode conter alguns outros elementos residuais, como fósforo e enxofre, porém, para evitar a fragilização do metal de solda, esses teores devem ser muito baixos.

Para se evitar tendências nas especificações, foi desenvolvida por um comitê composto de membros que representam os fabricantes de consumíveis, como a *Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget* (ESAB), membros independentes de universidades e laboratórios e usuários da indústria de soldagem, uma especificação da *American Welding Society* (AWS), a especificação AWS A5.1. Conforme a especificação citada, os eletrodos para aços carbono são classificados de acordo com as propriedades mecânicas do metal de solda, o tipo de revestimento, a posição de soldagem, e o tipo de corrente (Corrente Alternada – CA ou Corrente Contínua – CC), segundo Fortes (2005). O significado das designações da AWS está ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono



2.1.3.1.4 Principais usos dos tipos de eletrodos de acordo com sua classificação

De acordo com a AWS 5.1 (*American National Standards Institute – ANSI, 2012*) e com Fortes (2005), os eletrodos se classificam da seguinte forma:

a) Eletrodos E6010 e E6011: preferencialmente, são utilizados na soldagem de juntas de aço doce (aço com baixo teor de carbono e sem elementos de liga) na posição vertical com abertura de raiz. Se apenas a alimentação CA (transformador) estiver disponível, deve-se escolher o eletrodo E6011, considerando que esse elimina o sopro magnético.

b) Eletrodos E6012: apesar de ser pouco usado atualmente, geralmente, são utilizados na soldagem de estruturas menos críticas. Sua aplicação pode ser feita em aços carbono que apresentam alguma oxidação e no fechamento de grandes aberturas.

c) Eletrodos E6013: com o objetivo de realizar soldagem em chapas finas, esses eletrodos foram desenvolvidos para apresentar baixa penetração e cordões de solda planos. Ele substitui o E6012 por possuir um arco mais suave e, com isso, reduz os respingos, deixando, conseqüentemente, o cordão de solda mais uniforme.

d) Eletrodos E7014: a aplicação desse eletrodo é semelhante à do eletrodo E6013, porém, o revestimento de sua alma é mais espesso e em sua composição é adicionado pó de ferro. Esse acréscimo faz com que esse eletrodo possa ser soldado sob altas correntes, decorrendo assim em uma alta taxa de deposição.

e) Eletrodos E7015: utilizados para soldar a estrutura dos materiais do ferro ou da tubulação do ferro. De uma maneira geral, não estão mais disponíveis no mercado, pois foram substituídos pelos tipos E7016 e E7018.

f) Eletrodos E7016: são básicos de baixo hidrogênio. Essa característica permite que esse eletrodo seja utilizado para soldagem de alguns aços de maior teor de carbono e também alguns aços de baixa liga. Em comparação com o eletrodo E7018, o E7016 tem sido menos consumido por ter uma taxa de deposição mais baixa e menor eficiência.

g) Eletrodos E7018: são de baixo hidrogênio com adição de pó de ferro. Esses eletrodos são escolhidos como os favoritos dos soldadores porque possuem um arco mais leve e, com isso, a soldagem se torna mais fácil. Além disso, apresentam taxas eficientes de deposição e na soldagem de aços de baixo carbono depositam o

metal de solda de melhor qualidade. São mais aplicados em soldagens pesada, como: rolamento, eixo, máquina industrial etc.

h) Eletrodos E6020: composto, principalmente, por óxido de ferro, compostos de manganês e sílica. Esses eletrodos produzem um arco do tipo “spray” e uma escória pesada, que acaba proporcionando uma proteção extra ao metal de solda fundido. Com isso, o seu uso se torna limitado às juntas em ângulo nas posições plana ou horizontal.

i) Eletrodos E6022: são utilizados em soldagens de chapas finas sob altas correntes e altas velocidades de soldagem. Esse tipo de eletrodo está bem escasso no mercado, segundo Fortes (2005).

j) Eletrodos E7024: possui grande quantidade de pó de ferro em seu revestimento (na faixa dos 50%). Dessa forma, acaba resultando em uma taxa alta e eficiente de deposição. Há uma limitação na posição da soldagem, sendo plana ou horizontal em ângulo.

k) Eletrodos E6027: as correntes podem ser CA, CC+ ou CC-. Com uma alta deposição e penetração média, os cordões de solda possuem uma leve concavidade e uma boa fusão nas paredes laterais do chanfro.

l) Eletrodos E7028: são parecidos com os eletrodos E7018, exceto pelo seu revestimento que é mais pesado e contém cerca de 50% de pó de ferro. À vista disso, possuem uma deposição muito alta. São adequados para soldagens em posições plana e horizontal em ângulo.

m) Eletrodos E7048: também são bem semelhantes aos eletrodos E7018, mas foram desenvolvidos para condições de soldagem excepcionalmente boas na progressão vertical descendente (soldadura em descida).

2.1.3.1.5 Resistência de juntas soldadas

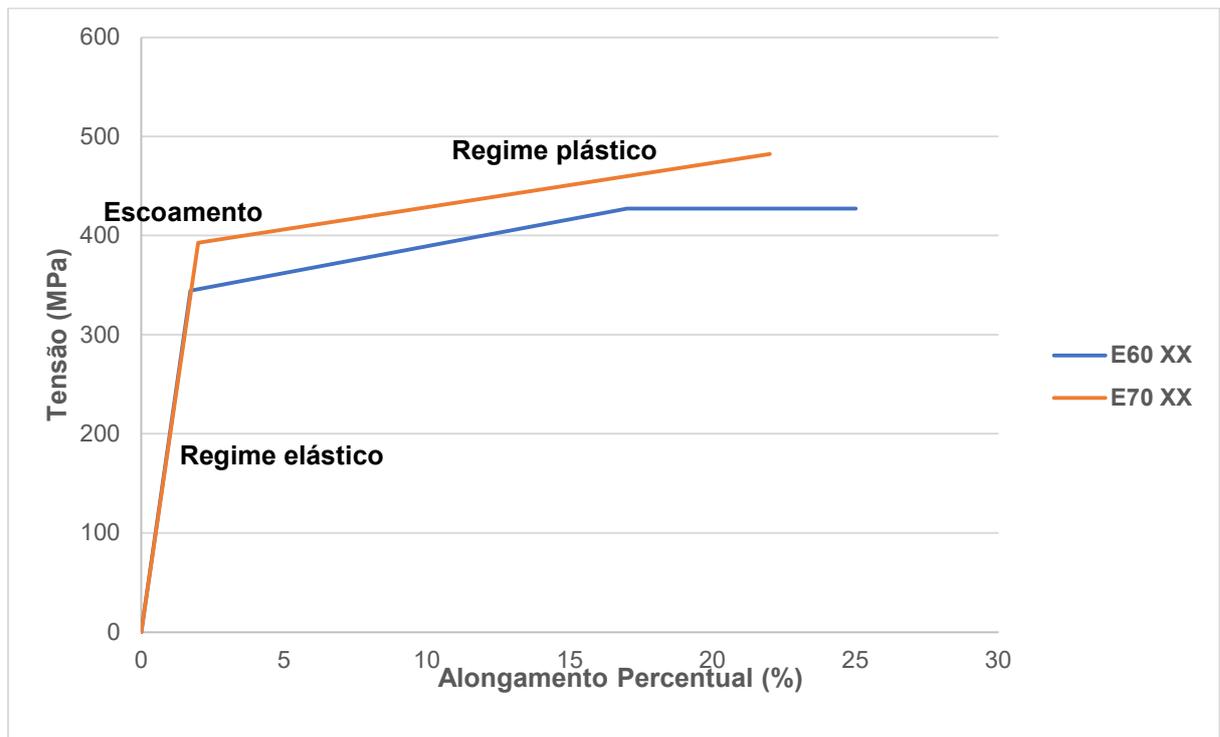
As propriedades dos eletrodos variam consideravelmente, porém, segundo Shigley (1984), a competência do operador, a velocidade da soldagem, que possui uma grande influência na geometria do cordão de solda, acabam se tornando mais consideráveis que as próprias propriedades. A Tabela 3 traz algumas propriedades para classes de eletrodos citados no item 2.1.3.1.4.

Tabela 3 - Propriedades mínimas das soldas

Número AWS 5.1 do Eletrodo	Resistência à tração MPa	Tensão de Escoamento MPa	Alongamento Percentual
E60 XX	427,20	344,52	17-25
E70 XX	482,33	392,75	22

Fonte: Adaptado de SHIGLEY (1984)

Com o conhecimento desses dados, é possível obter o gráfico de tensão x deformação (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Gráfico Tensão x Deformação

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

2.1.3.1.6 Simbologia de solda

As ligações soldadas são especificadas seguindo uma simbologia normatizada pela AWS, considerando que a leitura deve ser feita da esquerda para a direita, independente da seta que apenas aponta o lado de execução do trabalho (vide Quadro 1, Quadro 2 e Figura 7):

Quadro 1 - Símbolos básicos de solda

Trazeira	Filete	Tampão	Chanfro e topo						
			Topo	em V	Bisel	em U	em J	Curva V	Curva bisel

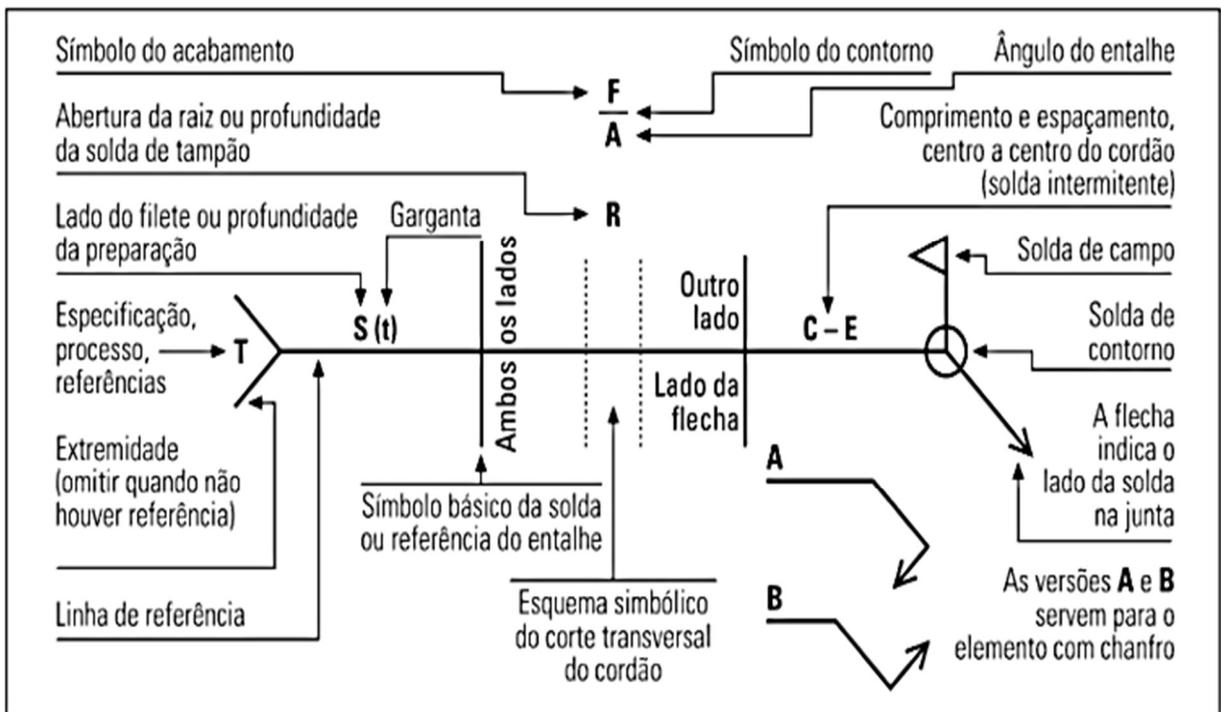
Fonte: PINHEIRO (2005)

Quadro 2 - Símbolos suplementares

Backing	Espaçador	Contorno	De montagem	Contorno	
				Reto	Convexo

Fonte: PINHEIRO (2005)

Figura 7 - Simbologia de solda de estruturas metálicas



Fonte: PINHEIRO (2005)

2.1.3.1.7 Compatibilidade entre metais para soldagem

Boa parte dos aços destinados à construção de edifícios podem ser soldados sem cuidados ou procedimentos especiais. O Quadro 3, extraído da NBR 8800 (ABNT, 2008), traz alguns metais-base e tipos de eletrodo para diferentes procedimentos de soldagem por arco elétrico e por tipo de aço.

Quadro 3 - Compatibilidade do metal base e do metal da solda

	Metal-base		Metal da solda compatível			
	ABNT	ASTM	Arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)	Arco submerso (SAW)	Arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)	Arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)
Grupo I	NBR 6648 (CG-26 - $t \leq 20$ mm) NBR 6649 (CF-26) NBR 6650 (CF-26) NBR 7007 (MR 250 - $t \leq 19$ mm)	A36 ($t \leq 19$ mm) A500 Grau A A500 Grau B	AWS A5.1 - E60XX, E70XX AWS A5.5 ^e - E70XX-X	AWS A5.17 - F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23 ^e - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28 ^e - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm) AWS A5.29 ^e - E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM
Grupo II	NBR 5000 (G-30) NBR 5000 (G-35) NBR 5004 (F-32/Q-32) NBR 5004 (F-35/Q-35) NBR 5004 (Q-40) NBR 5008 (CGR 400) ^d NBR 5008 (CGR 500) ^d NBR 5008 (CGR 500A) ^d NBR 5920 (CFR 500) ^d NBR 5921 (CFR 400) ^d NBR 5921 (CFR 500) ^d NBR 6648 (CG-26 - $t > 19$ mm) NBR 6648 (CG-28) NBR 6649 (CF-28) NBR 6650 (CF-28) NBR 6650 (CF-30) NBR 7007 (MR 250 - $t > 19$ mm) NBR 7007 (AR-350) NBR 7007 (AR-350 COR) NBR 8261 (Graus B e C)	A36 ($t > 19$ mm) A242 ^d A572 Grau 42 A572 Grau 50 A572 Grau 55 A992 A588 ^d	AWS A5.1 - E7015, E7016, E7018, E7028 AWS A5.5 ^e - E7015-X, E7016-X, E7018-X	AWS A5.17 - F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23 ^e - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28 ^e - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm) AWS A5.29 ^e - E7XTX-X, E7XTX-XM
Grupo III	NBR 5000 (G-42) NBR 5000 (G-45) NBR 5004 (Q-42) NBR 5004 (Q-45) NBR 7007 (AR-415)	A572 Grau 60 A572 Grau 65 A913 ^c	AWS A5.5 ^e - E8015-X, E8016-X, E8018-X	AWS A5.23 ^e - F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX	AWS A5.28 ^e - ER80S-XXX, E80C-XXX	AWS A5.29 ^e - E8XTX-X, E8XTX-XM

^a Em juntas constituídas de metais-base de grupos diferentes, podem ser usados metais da solda compatíveis com o metal-base de maior resistência ou de menor resistência, devendo-se usar eletrodos de baixo hidrogênio para a segunda opção. O preaquecimento deve ser baseado no grupo de maior resistência.

^b Quando for feito alívio de tensões nas soldas, o metal da solda não pode conter mais de 0,05 % de vanádio.

^c As limitações da AWS D1.1 relativas à entrada de calor não se aplicam ao ASTM A913, graus 60 e 65.

^d Podem ser necessários processos e materiais de soldagem especiais (por exemplo: eletrodos de baixa liga E80XX-X) para atender às características de resistência à corrosão atmosférica e de resistência ao choque do metal-base - ver AWS D1.1.

^e Metais de solda dos grupos B3, B3L, B4, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, B9, ou qualquer grau BXH, na AWS A5.5, A5.23, A5.28 e A5.29, não são pré-qualificados.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.1.3.2 Ligações parafusadas

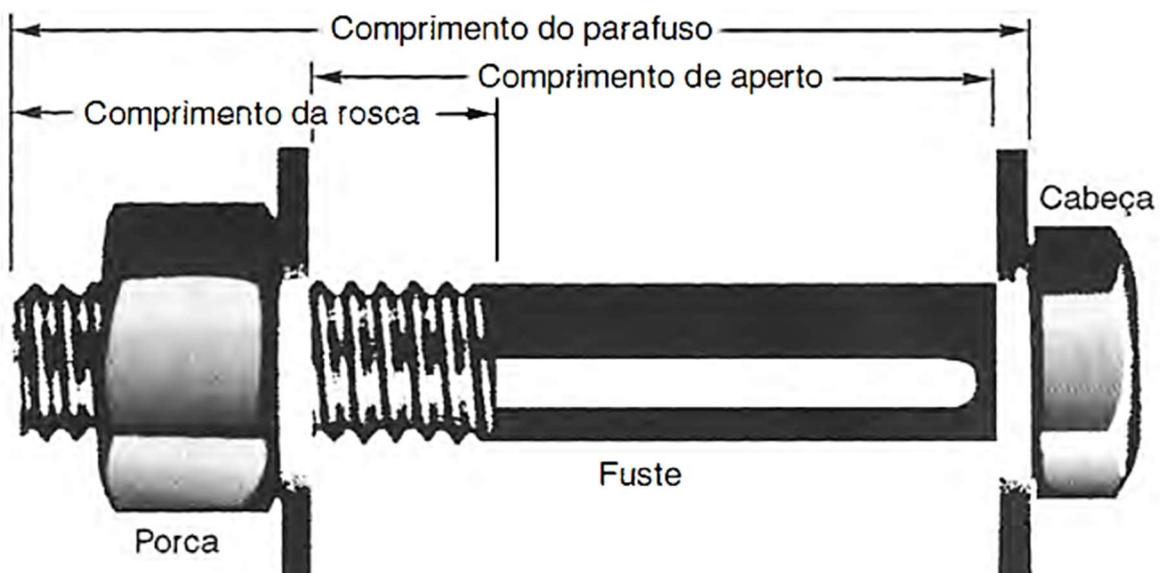
As ligações parafusadas são amplamente usadas na montagem final da estrutura *in loco*, pois possui uma grande flexibilidade em sua utilização. Porém, esse tipo de ligação necessita de cuidados especiais na execução para que seja possível garantir que a estrutura se aproxime ao máximo das previsões de projeto, pois pequenos desvios acabam levando a adoção de improvisos inadequados que podem reduzir a vida útil de projeto (VUP).

Para as obras de estruturas metálicas podem ser utilizados parafusos comuns (baixo carbono) e/ou parafusos de alta resistência, dependendo da especificação do projeto e sua necessidade.

2.1.3.2.1 Parafusos comuns (baixo carbono)

De acordo com Pfeil (2009), geralmente, os parafusos comuns são forjados com aços carbono de baixo teor de carbono, segundo a especificação ASTM A307 ou *International Organization for Standardization* (ISO) 898-1 Classe 4.6. Esses parafusos possuem em uma extremidade uma cabeça quadrada ou sextavada e em outra uma rosca com porca, conforme ilustra a Figura 8. Apesar de o tipo padronizado ser a rosca métrica, no Brasil, utiliza-se frequentemente a rosca do tipo americano.

Figura 8 - Parafuso com porca sextavada e arruelas



Fonte: PFEIL (2009)

Os parafusos comuns possuem um baixo custo, porém também têm baixa resistência. A conexão presente nessa ligação é a do tipo por contato, onde os parafusos são instalados sem aperto controlado (protensão). São empregados onde as cargas são de pequenas intensidades e de natureza estática, como plataformas simples, terças, estruturas leves etc.

2.1.3.2.2 Parafusos de alta resistência

Os parafusos produzidos com aços tratados termicamente chamam-se parafusos de alta resistência. De acordo com NBR 8800 (ABNT, 2008), os parafusos de alta resistência devem satisfazer a ASTM A325 ou a ISO 4016 Classe 8.8. Já os parafusos de aço-liga temperado e revenido devem satisfazer a ASTM A490 ou a ISO 4016 Classe 10.9.

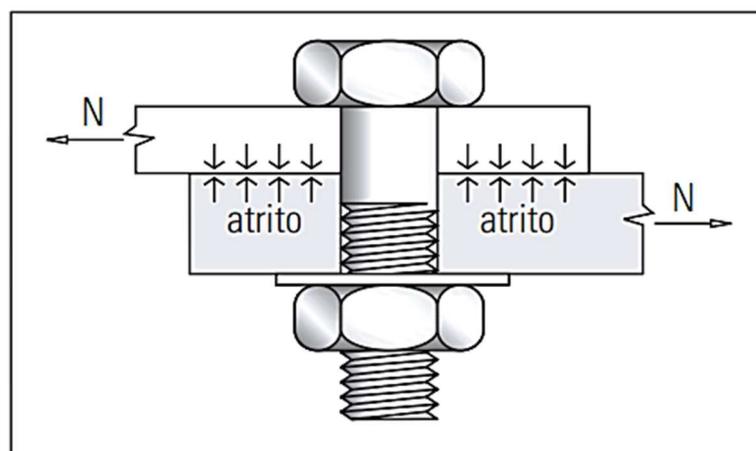
Essa tipologia de parafusos é dividida em parafusos de alta resistência por atrito e parafusos de alta resistência por contato, segundo Pinheiro (2005):

a) Por atrito:

A325-F e A490-F (F - Friction)

Essa tipologia possui uma protensão no parafuso que faz com que as chapas, ao serem ligadas, obtenham uma maior resistência ao deslizamento, como é ilustrado na Figura 9, e essa protensão é medida pelo torque dado na porca.

Figura 9 - Parafuso de alta resistência por atrito



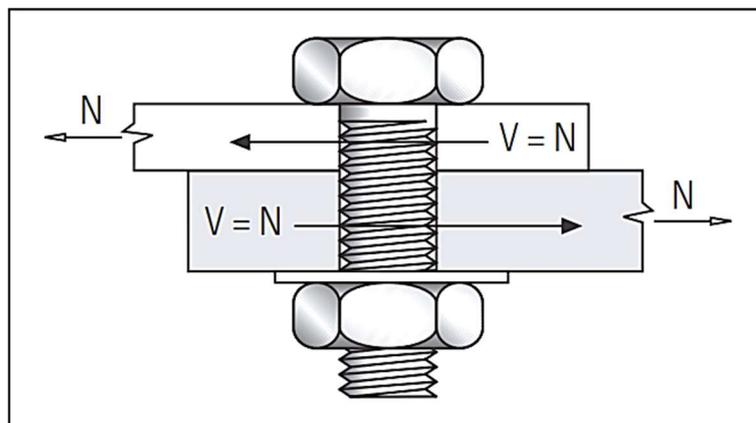
Fonte: PINHEIRO (2005)

b) Por contato:

- A325-N e A490-N (N - **N**ormal)

Neste tipo de parafuso (N), a rosca está no plano de cisalhamento do parafuso, como é mostrado na Figura 10. Por causa disso, sua resistência acaba sendo menor, quando comparada com o parafuso tipo (X), pois a sua área de seção transversal na região da rosca é menor que a área do corpo.

Figura 10 - Parafuso de alta resistência por contato (Normal)

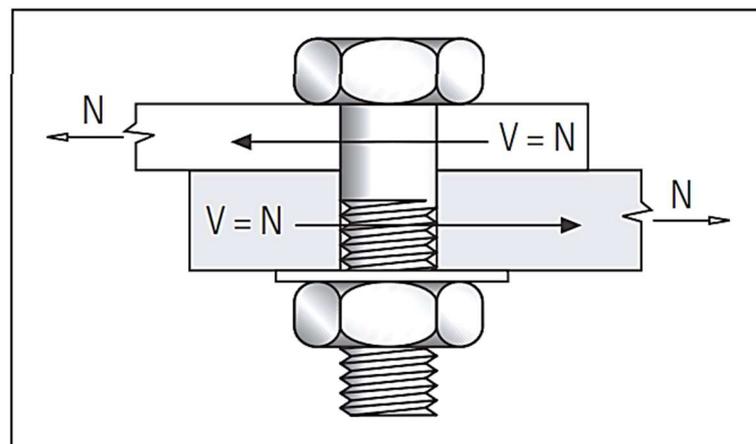


Fonte: PINHEIRO (2005)

- A325-X e A490-X (X - e**X**cluded)

A rosca deste tipo parafuso (X) está fora do plano de cisalhamento do corpo, conforme ilustrado na Figura 11, com isso possui uma resistência maior que o tipo (N).

Figura 11 - Parafuso de alta resistência por contato (Excluded)



Fonte: PINHEIRO (2005)

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), os parafusos de alta resistência com protensão inicial em ligações por contato ou por atrito são indicados nos seguintes casos:

- a) Emendas de pilares nas estruturas de andares múltiplos com mais de 40m de altura;
- b) Ligações de vigas com pilares e com quaisquer outras vigas das quais depende o sistema de contraventamento, nas estruturas com mais de 40m de altura;
- c) Ligações e emendas de treliças de cobertura, ligações de treliças com pilares, emendas de pilares, ligações de contraventamentos de pilares, ligações de mãos francesas ou mísulas usadas para reforço de pórticos e ligações de peças-suportes de pontes rolantes, nas estruturas com pontes rolantes de capacidade superior a 50kN;
- d) Ligações de peças sujeitas a ações que produzam impactos ou tensões reversas.

2.2 PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

Patologia é uma ciência que estuda a origem, os sintomas, a natureza das doenças e como elas se comportam. Dessa forma, essa ciência pode ser entendida como o estudo daquilo que sai de um padrão ou de uma condição normal, ou seja, uma anormalidade que entra em conflito com a integridade do elemento ou com o comportamento habitual (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

Na engenharia, o termo patologia pode ser interpretado como o processo responsável pela degradação dos materiais que compõem o sistema estrutural e todos os outros complementares, como exemplo, as instalações hidrossanitárias, elétricas, de esgoto, entre outros (SOUZA; RIPPER, 1998).

Embora apresente diversas vantagens, como citadas no item 2.1, o aço, como sistema construtivo, ainda não é a solução mais comum no Brasil, segundo Teixeira e Simplício (2018). Como qualquer outro sistema estrutural, o aço possui algumas desvantagens, incluindo sua vulnerabilidade às agressões ambientais, o que afeta sua vida útil e, portanto, seu desempenho.

Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), mecanismos de deterioração químicos, físicos e biológicos podem ser desenvolvidos no aço, sendo a corrosão a mais conhecida, pois esse fenômeno é muito comum nessas estruturas. Sacchi e Souza (2016) afirmam que é importante a implantação rígida e eficiente de um controle de qualidade em todas as etapas: detalhamento, fabricação e montagem das estruturas. Com isso, é possível garantir uma redução de possíveis falhas e/ou possíveis intervenções futuras.

A proposta a ser seguida pelo profissional para prevenir, interpretar e intervir na anomalia, quando se trata de patologia das estruturas metálicas, é a apresentada na Figura 12:

Figura 12 - Fluxograma da abordagem da patologia das estruturas de aço



Fonte: Adaptado de BOLINA, TUTIKIAN e HELENE (2019)

Na origem, são discutidas as causas dessas manifestações, o processo de deterioração da estrutura metálica, como ocorre e como esses mecanismos se manifestam ao longo do tempo. Em suma, verifica-se a natureza do problema. No diagnóstico, os equipamentos e a gama de ensaios necessários para identificar as anormalidades são apresentados. Na recuperação, são apresentados alguns métodos de recuperação e correção do problema diagnosticado, ou seja, sugestões como solução para o (s) problema (s).

Na patologia de estruturas, vários conceitos e termos são usados, por isso, é importante estabelecer algumas definições e essas estão expostas no Quadro 4.

Quadro 4 - Definições e nomenclaturas para o estudo da patologia das construções

Nomenclatura	Definição
Anomalia	É tudo aquilo que é considerado anormal, trata-se da particularidade ou condição do que é anômalo, fora do comum.
Patologia das construções	É a ciência que estuda o defeito e as falhas em edificações e construções em geral.
Vida útil de projeto (VUP)	Vida útil prevista e demonstrada no projeto executivo, com manutenção realizada de acordo com o estabelecido no manual de uso, operação e manutenção.

continua

Quadro 4 - Definições e nomenclaturas para o estudo da patologia das construções

Manifestação patológica	São os defeitos, falhas e danos observados nas construções.
Ensaio não e semidestrutivo	Os ensaios não destrutivos não causam qualquer dano ao objeto de estudo, como no caso de uma esclerometria ou ultrassom. Já os ensaios semidestrutivos causam alguma perturbação, como quando se extrai um corpo de prova de concreto para averiguar a resistência do elemento.
Diagnóstico	É a busca por se entender o que aconteceu. Qual o fenômeno instalado, porque aconteceu, quais as consequências: deve explicar os sintomas as origens e o mecanismo dos fenômenos envolvidos.
Prognóstico	É o que irá ocorrer com a edificação enferma caso nada seja feito para corrigir ou estancar o problema.
Terapia	É a correção dos danos. Pode ser um reforço, reparo, restauro, <i>retrofit</i> , entre outras opções.

Fonte: Adaptado de BOLINA, TUTIKIAN e HELENE (2019)

2.2.1 Mecanismos de deterioração

2.2.1.1 Mecanismos químicos

O mecanismo químico mais comum das estruturas do aço é a corrosão, definido como um processo espontâneo causado pela interação química do metal com o meio ambiente, que promove alterações químicas ao mesmo tempo que se perde propriedades mecânicas, como tratado por Filho *et al* (2018). Esse mecanismo pode ser caracterizado também como um processo de deterioração físico-químico, pois os produtos da corrosão provocam alterações na geometria das peças, que se devem à dissolução dos metais por reações químicas (via seca, por gases) ou eletroquímicas (via úmida, por eletrólitos).

De acordo com Gentil (2017), os tipos de corrosão podem ser classificados de diversas formas, entre elas, segundo a morfologia e as causas ou mecanismos. A caracterização segundo a morfologia consegue esclarecer o mecanismo químico e, conseqüentemente, as medidas adequadas de proteção. Dentre as formas de corrosão, a Figura 13 apresenta as seguintes:

Figura 13 - Formas de corrosão



Uniforme



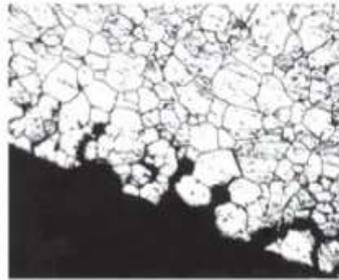
Em placas



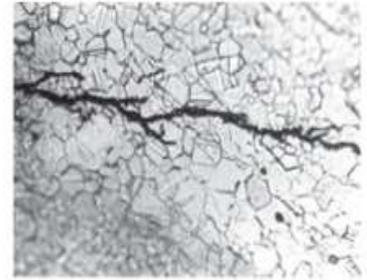
Alveolar



Puntiforme (pite)



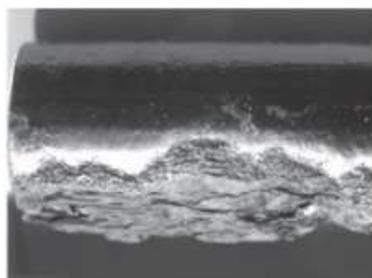
Intergranular



Transgranular



Filiforme



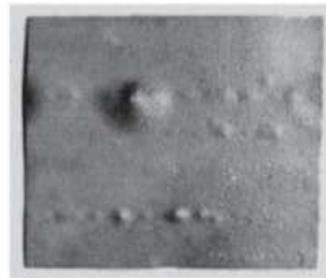
Por esfoliação



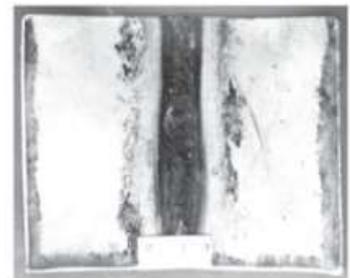
Grafítica



Dezincificação



Empolamento pelo hidrogênio



Em torno de solda

Fonte: GENTIL (2017)

- a) uniforme: acontece em toda a extensão da superfície, de maneira uniforme, ocorrendo perda de espessura;
- b) por placas: acontece em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com leve profundidade;
- c) alveolar: acontece na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo levemente arredondado e profundidade, na maioria das vezes, menor que o seu diâmetro;
- d) puntiforme ou por pite: acontece em pontos da superfície metálica, produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade, na maioria das vezes, maior do que o seu diâmetro;
- e) intergranular (ou intercristalina): acontece entre os grãos da rede cristalina do material metálico. Com isso, o aço perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a corrosão sob tensão fraturante (CTF) (Stress Corrosion Cracking — SCC);
- f) intragranular (ou transgranular ou transcristalina): acontece nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar à menor solicitação mecânica, tendo-se também corrosão sob tensão fraturante, muito se aproximando do tipo intercristalina;
- g) filiforme: acontece sob a forma de finos filamentos, não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam, pois admite-se que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresenta carga positiva, por isso a repulsão. Ocorre, normalmente, em superfícies metálicas revestidas com tintas ou com metais, ocasionando o deslocamento do revestimento;
- h) por esfoliação: acontece de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, criando condições para que inclusões ou segregações, presentes no material, sejam transformadas, devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas;
- i) grafítica: acontece no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente sendo o ferro metálico convertido em produtos de corrosão, restando a grafite intacta;
- j) dezincificação: ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), observando-se o aparecimento de regiões com coloração avermelhada contrastando com a característica coloração amarela dos latões. A dezincificação e a corrosão grafítica

são exemplos de corrosão seletiva, pois se tem a corrosão preferencial de zinco e ferro, respectivamente;

k) empolamento pelo hidrogênio: o hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente e, em regiões com descontinuidades, como inclusões e vazios, ele se transforma em hidrogênio molecular, H_2 , exercendo pressão e originando a formação de bolhas, daí o nome de empolamento;

l) em torno de cordão de solda: forma de corrosão que se observa em torno de cordão de solda, na chamada Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Quanto aos mecanismos de corrosão, o de maior relevância é a corrosão galvânica. Essa forma de corrosão se desenvolve quando dois metais diferentes são postos em uma solução contendo íons. De acordo com Gentil (2017), quando materiais metálicos de potenciais elétricos diferentes entram em contato, a corrosão do metal que funciona como anodo é muito mais evidente que a corrosão isolada desse mesmo metal sob a ação de meio corrosivo igual.

A corrosão galvânica trata-se também de uma solução para a engenharia, visto que pode ser utilizada de forma benéfica nas construções em aço, mediante a técnica no anodo de sacrifício (ou proteção catódica). Além de conseguir proteger o elemento estrutural da corrosão em ambientes agressivos, consegue aumentar a durabilidade das obras de aço. Na Tabela 4, é mostrado o quanto o ferro corrói quando está acoplado a outros metais (acoplados e totalmente imersos em solução aquosa de cloreto de sódio a 1%), indicando, assim, como funciona a corrosão galvânica.

Tabela 4 - Corrosão de ferro acoplado a outros metais para um mesmo tempo de referência

<i>Corrosão em miligramas</i>		
Segundo metal	Ferro	Segundo metal
Magnésio	0,0	3104,3
Zinco	0,4	688,0
Alumínio	9,8	105,9
Chumbo	183,2	3,6
Estanho	171,1	2,5
Níquel	181,1	0,2
Cobre	183,1	0,0

Fonte: Adaptado de GENTIL (2017)

Dessa forma, pode-se notar que o ferro acoplado ao zinco, por exemplo, irá corroer mais lentamente, por este se tratar de um metal menos nobre e se comportar como anodo. Por isso, o zinco vem ganhando espaço quando se trata de proteção catódica.

Segundo Pannoni (2015), muitos dos problemas causados pela corrosão estão relacionados a corrosão atmosférica, sendo essa a forma mais importante de corrosão uniforme. De acordo com Shreir (1994), a corrosão atmosférica pode ser classificada conforme o grau de umidade na superfície metálica. Essa classificação se dá em seca, úmida e molhada. A diferença entre elas é exatamente a umidade relativa do ambiente e a velocidade com que acontece o processo corrosivo.

A Tabela 5 define as categorias de agressividade em termos de perda de espessura ou massa de corpos de prova padronizados, confeccionados em aço de baixo carbono, expostos à atmosfera e retirados após o primeiro ano de exposição, segundo a ISO 12944-2.

Em 1988, foi concebido o Projeto MICAT (Mapa Ibero-americano de Corrosão Atmosférica) com o envolvimento de 14 países, sendo eles: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Espanha, Equador, México, Panamá, Peru, Portugal, Venezuela e Uruguai. Setenta e cinco estações de ensaio de corrosão atmosférica foram estabelecidas, envolvendo 110 instituições, como universidades, institutos de pesquisa e empresas.

Para o Brasil, o projeto produziu dois mapas de agressividade distintos. O primeiro, Figura 14, apresenta o mapeamento segundo o Índice de Deterioração de Brooks. A análise dela indica que a maior parte do território brasileiro é de muito baixa, baixa ou moderada agressividade.

Tabela 5 - Corrosividade dos ambientes para o aço-carbono, segundo a ISO 12944-2

Categoria de agressividade	Perda de massa e espessura para aço baixo carbono, após 365 dias de exposição		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa (g/m ²)	Perda de espessura (μm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤ 10	≤ 1,3	-	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 (baixa)	> 10 a 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos.
C3 (média)	> 200 a 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por SO ₂ . Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, laticínios, cervejarias, etc.
C4 (alta)	> 400 a 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras de salinidade moderada	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5-I (muito alta, industrial)	> 650 a 1500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.
C5-M (muito alta, marinha)	> 650 a 1500	> 80 a 200	Áreas costeiras com alta umidade e atmosfera agressiva.	

Fonte: Adaptado da ISO 12944-2 (2017)

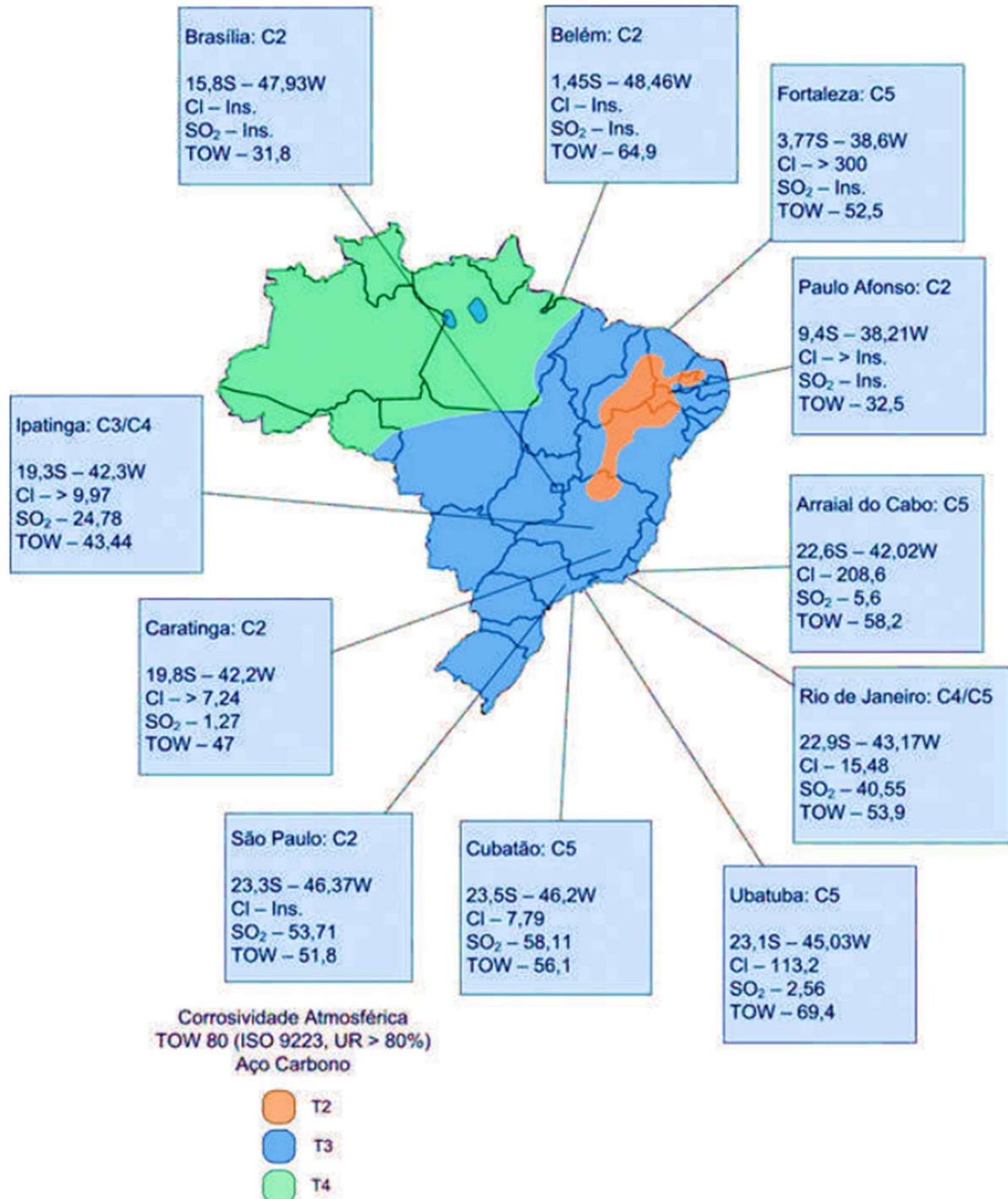
Figura 14 - Índice de Corrosividade de Brooks



Fonte: MORCILLO *et al.* (1998)

O segundo mapa, Figura 15, foi elaborado tendo como base a ISO 12944-2 (2017). Este mapa é um grande auxiliar na escolha mais coerente do grau de corrosividade de atmosferas, especialmente as industriais e costeiras. É importante ressaltar que os mapas são complementares.

Figura 15 - Mapa de corrosividade atmosférica



Fonte: MORCILLO *et al.* (1998)

De acordo com a ISO 9223 (2012), o tempo de superfície úmida, calculado a uma umidade relativa do ar superior a 80% e com uma temperatura superior a 0°C, é medido em horas/ano e possui uma subdivisão como a apresentada na Tabela 6:

Tabela 6 - Classificação em termos de tempo de superfície úmida

Categoria	Tempo de superfície úmida		Exemplos de ocorrência
	horas/ano	%	
T1	$\tau \leq 10$	$\tau \leq 0,1$	Microclimas internos com controle climático.
T2	$10 < \tau \leq 250$	$0,1 < \tau \leq 3$	Microclimas internos com controle climático, exceto para espaços internos sem ar-condicionado em climas úmidos.
T3	$250 < \tau \leq 2500$	$3 < \tau \leq 30$	Atmosferas externas em climas secos, frios e alguns temperados, galpões adequadamente ventilados em climas temperados.
T4	$2500 < \tau \leq 5500$	$30 < \tau \leq 60$	Atmosferas externas em todos os climas (exceto para os climas secos e frios), galpões ventilados em condições úmidas, galpões não ventilados em clima temperado.
T5	$\tau > 5500$	$\tau > 60$	Alguns climas úmidos, galpões não-ventilados em condições úmidas

Fonte: Adaptado da ISO 9223 (2012)

2.2.1.2 Mecanismos físicos

Nas estruturas de metálicas, os mecanismos de físicos geralmente se apresentam na forma de deformações, na maioria das vezes, por movimentações térmicas. A frequência é baixa, comparando com os mecanismos químicos, mas processos de desgaste superficial provocados por atrito também podem ocorrer, segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019). Os mecanismos físicos de deterioração das estruturas metálicas se restringem a análises bem pontuais, sendo elas:

a) **Deformações excessivas:** Como o aço é um material dúctil, as deformações excessivas não provocam fissuras ou aberturas nesses elementos. Com isso, tensões acumuladas causam escoamento ou instabilidades locais, podendo induzir instabilidades globais, como exposto na Figura 16.

Figura 16 - Flambagem da alma (Deformações Excessivas)



Fonte: ANDRADE E MACHADO (2017)

b) **Variações térmicas:** Os metais possuem coeficientes de dilatação linear distintos, como exemplificado na Tabela 7, e dadas as suas condutividades térmicas, a exposição ao calor torna-os mais vulneráveis a alterações físicas do que no caso do concreto. Desse modo, o fenômeno é mais frequente e perigoso ao aço.

Tabela 7 - Coeficientes de dilatação linear de alguns metais

Material	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Alumínio	$2,4 \times 10^{-5}$
Cobre	$1,4 \times 10^{-5}$
Ferro	$1,2 \times 10^{-5}$
Aço	$1,2 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de HALLIDAY E RESNICK (2014)

c) Fadiga: é definida como um processo que altera de forma progressiva, localizada e permanente a estrutura. Isso ocorre quando o material está submetido a condições que produzam variações de tensões e deformações em um ou mais pontos. As manifestações patológicas provocadas pela fadiga das peças de aço podem ser trincas ou fratura completa, como traz a Figura 17.

Figura 17 - Falha por fadiga em parafuso



Fonte: ENSUS (2019)

Segundo Garcia (2000) *apud* Rodrigues (2021), as fraturas por fadiga têm características muito específicas, com duas regiões muito distintas observadas. Uma área corresponde à propagação de trincas, onde podem ser observadas “marcas de praia”, enquanto a outra área tem aspecto rugoso e ocorre a fratura final.

2.2.1.3 Mecanismos biológicos

Esses mecanismos são difíceis de ocorrer em estruturas de aço, pois a existência de microrganismos que se alimentam de metais não é comum. Mesmo que

seja pouco comum, a deterioração metálica acontece, conhecido como biocorrosão, corrosão biológica ou corrosão microbiológica. A corrosão por microrganismos é influenciada pelos seguintes fenômenos: aceleração da corrosão eletroquímica localizada em razão da formação de regiões com diferentes concentrações de oxigênio; influência na velocidade das reações anódicas e catódicas; modificação na resistência da película passivante (fina camada de óxido, aderente e insolúvel, que se forma na superfície do aço, quando este continua entrando em contato com a água e o oxigênio, retardando consideravelmente o avanço da corrosão) pelos produtos do metabolismo microbiano; geração de meios corrosivos, produzindo substâncias agressivas, tais como ácidos orgânicos e inorgânicos e formação de tubérculos que se depositam na superfície do metal, criando condições para corrosão por aeração diferencial (BOLINA, TUTIKIAN E HELENE, 2019).

2.2.1.4 Mecanismos mecânicos

Os mecanismos mecânicos de deterioração são aqueles que possuem uma ação externa à estrutura. E, segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), eles podem ser em relação a:

a) Sobrecargas

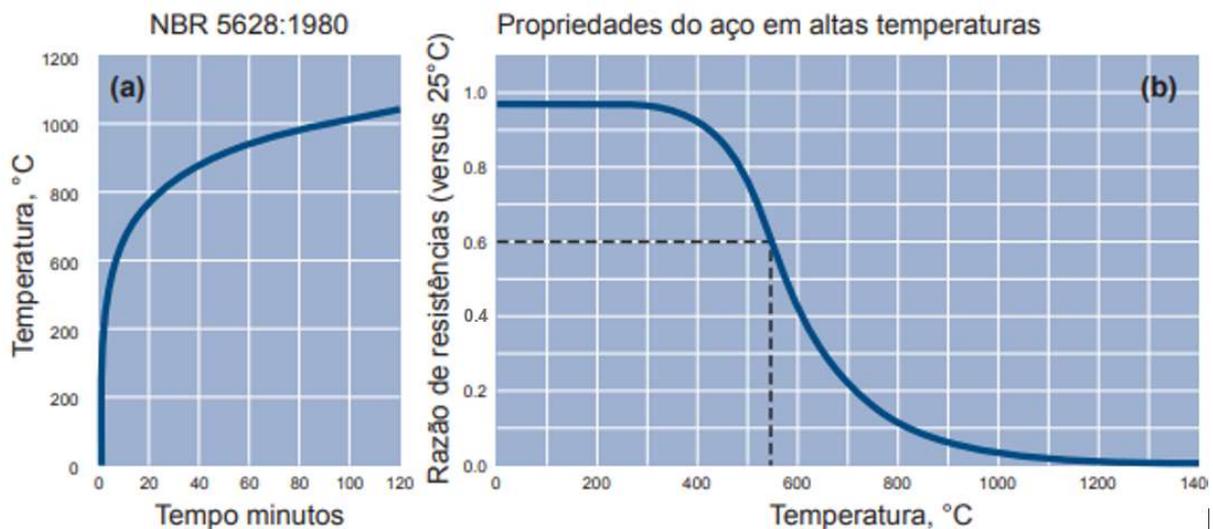
A sobrecarga acontece quando há uma imprevisibilidade de carregamentos excessivos ou inesperados, ou até uma alteração não planejada do uso da edificação, provocando, assim, tensões não calculadas em projeto. Quando isso ocorre e a resistência é ultrapassada, surgem as manifestações patológicas relacionadas às sobrecargas.

A ruptura de peças metálicas não ocorre de forma brusca, no caso das sobrecargas. Normalmente, há alguma deformação perceptível, às vezes excessiva, antes do colapso acontecer, havendo uma exceção: ligações metálicas. Nessas ligações, as deformações são pequenas, na maioria das vezes, e são constituídas por peças também pequenas, comparando-se às dimensões dos elementos estruturais. Dessa forma, se houver sobrecarga nas ligações, as deformações acabam se tornando pouco perceptíveis “a olho nu”.

b) Incêndio

De acordo com Pannoni (2015), as estruturas metálicas são mais suscetíveis a sofrer um grande dano, inclusive colapso, quando expostas a altíssimas temperaturas, em comparação com as de concreto armado. Conforme apresentado na Figura 18, à temperatura de 550 °C, o aço pode alcançar uma redução de sua resistência da ordem de 60% e de mais de 90% a 900 °C. Em vista disso, levou-se ao entendimento de que 550 °C seria a temperatura máxima crítica, a qual uma estrutura de aço, sem proteções específicas, poderia resistir antes de ocorrer um possível colapso.

Figura 18 - (a) Curva de aquecimento do forno segundo o “incêndio-padrão”, descrito pela NBR 5628 e (b) Decréscimo da resistência do aço estrutural em função da temperatura



Fonte: Adaptado de PANNONI (2015)

c) Mecanismos mecânicos congênitos

Quando se trata de mecanismos mecânicos congênitos, observa-se que a origem do fenômeno está no projeto estrutural. Conseqüentemente, as falhas são evidenciadas em um momento posterior, como no ato da montagem do sistema, quando se nota uma dificuldade na execução de uma ligação parafusada ou soldada, ou podendo também se manifestar no decorrer da vida útil da construção, onde manifestações são observadas precocemente no sistema (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

As falhas oriundas dos mecanismos mecânicos congênitos podem subdividir-se da seguinte forma: Falhas de concepção estrutural, no detalhamento de projeto, na integração dos projetos, no gabarito da furação, no recorte dos perfis e na montagem.

Tratando-se das falhas de concepção estrutural, cabe destacar, inicialmente, que deve existir uma concordância entre o cálculo e a realidade. Quando se fala de estrutura metálica, há uma quantidade significativa de parâmetros e coeficientes exigidos por norma que, se mal interpretados, podem ser a origem do comportamento estrutural inesperado e inapropriado da estrutura. Além disso, há de se observar o sentido da maior inércia, no caso de pilares. Se houver um equívoco, a estabilidade global ou local do perfil e do sistema estrutural fica comprometida, e, como resultado, haverá comportamentos inesperados, como deformações excessivas.

Segundo ponto é o detalhamento de projeto. De acordo com Bureau Securitas (1979), *apud* Sacchi e Souza (2016), o detalhamento deficiente é a principal causa das falhas em projetos, sendo responsável por 59% dessas. Esses erros, oriundos de deficiência ou negligência do detalhamento estrutural, forçam a tomada de decisão em obra. Importante frisar que a obra não é o local ideal para tomadas de decisões referentes ao sistema estrutural.

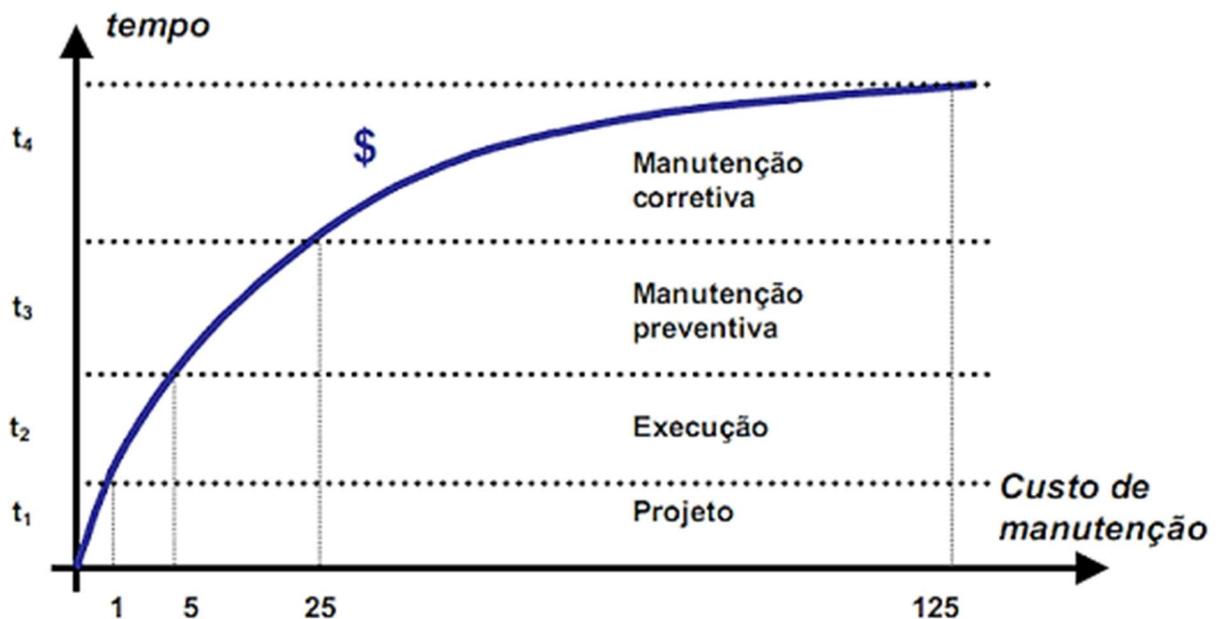
Um projeto bem elaborado previne manifestações patológicas futuras, principalmente as produzidas por mecanismos químicos de corrosão. Quando há detalhes construtivos adequados no projeto, os custos com manutenções corretivas e preventivas se tornam menores, implicando, assim, no aumento da vida útil da estrutura.

A manutenção preventiva, segundo a NBR 5462 (ABNT, 1994), é aquela realizada em intervalos de tempo pré-definidos, ou em conformidade com algum critério pré-estabelecido e possui o objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação da estrutura. Já a manutenção corretiva é aquela efetuada após a ocorrência da falha, ocasionada ou não por falta de manutenção preventiva. Possui a finalidade de corrigir a estrutura, para que, dessa forma, ela possa cumprir o seu papel de acordo com o que foi definido no seu projeto.

Acontece que os custos com manutenções são altíssimos, como traz a Figura 19, a qual expõe uma relação entre os custos e o tempo. A lei de evolução de custos ou Lei de Sitter, também conhecida como Regra dos 5, é um estudo onde se

demonstra os impactos econômicos trazidos pela negligência em se adotar ações preventivas.

Figura 19 – Lei da evolução de custos ou Lei de Sitter



Fonte: MACIEL (2022) *apud* SITTER (1984)

Em seu estudo, Sitter (1984) buscou relacionar dois tipos de intervenções: corretivas e preventivas, e, dessa forma, analisar os custos e como eles evoluem ao longo das diversas fases de um projeto. Com isso, consegue-se perceber que estudos negligentes e superficiais e adiamentos de intervenções são fatores que fazem o custo progredir geometricamente ao longo do tempo.

Apesar de haver softwares computacionais de projetos complementares, projetos arquitetônicos e dimensionamento estrutural, incompatibilidades entre esses projetos, ainda podem ocorrer. Quando se trata de estrutura metálica, a falta de compatibilização entre projetos se torna ainda mais evidente, já que, uma adaptação em obra é muito complicada, além de ser uma estrutura que possui detalhes com precisões milimétricas.

Quando um projeto é mal elaborado, mal detalhado e possui diversas incompatibilidades com outros projetos, também há uma grande possibilidade de acontecer uma falha no gabarito da furação e no recorte dos perfis, gerando a obrigatoriedade de improvisos no canteiro de obras.

E por último, são as manifestações patológicas relacionadas à montagem. São erros cometidos no canteiro de obras e que podem acontecer devido a diversos fatores, como falta de cuidado dos profissionais envolvidos e a uma fiscalização ineficiente ou inexistente.

2.2.2 Manifestações patológicas nas ligações

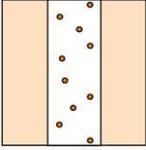
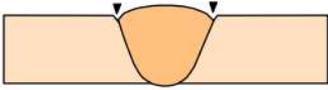
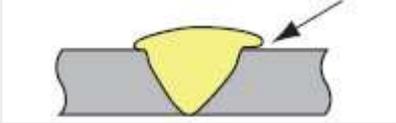
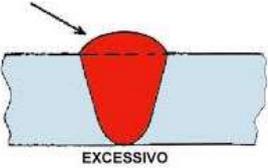
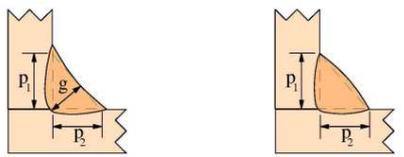
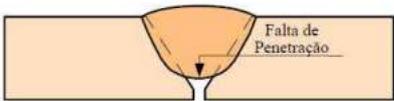
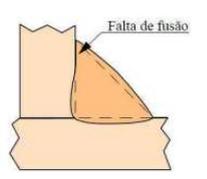
Manifestações patológicas nas ligações são todos os problemas, erros ou anomalias que possam ocorrer tanto nos meios de ligação como nos elementos de ligação, conceituação abordada no item 2.1.3. Alguns dos exemplos dessas manifestações patológicas são defeitos de fabricação de soldas e ligações parafusadas, erros de concepção, erros na montagem, corrosão, entre outros.

2.2.2.1 Manifestações patológicas nas ligações soldadas

Segundo Pfeil (2009), o metal das soldas deve possuir uma resistência superior ao do metal base, com isso, se bem executada, a probabilidade deste meio ligante entrar em um processo de colapso antes do metal base se torna mínimo. Dessa forma, pode-se concluir que boa parte das manifestações patológicas encontradas nas ligações soldadas estão diretamente associadas às falhas durante o processo de execução. Isso posto, as manifestações podem ser evitadas com uma execução cuidadosa e um controle rigoroso durante o procedimento de soldagem.

Castro (1999) afirma que os principais defeitos que ocorrem durante ou após a execução da soldagem são: porosidade, inclusões, falta de fusão, falta de penetração, velocidade de soldagem incorreta, preparação da união e do material inadequados, projeto errado, corrente muito baixa e eletrodo de diâmetro muito grande, mordeduras, trincas, carepas, dimensão incorreta da solda, garganta insuficiente, entre outros. Alguns exemplos dos principais defeitos que ocorrem, estão ilustrados na Figura 20.

Figura 20 - Exemplos de alguns dos principais defeitos de soldas

Tipos	Ilustração
<p>Porosidade</p>	
<p>Mordedura</p>	
<p>Sobreposição de solda</p>	
<p>Reforço excessivo</p>	 <p>EXCESSIVO</p>
<p>Dimensão incorreta da solda</p>	
<p>Falta de penetração</p>	 <p>Falta de Penetração</p>
<p>Falta de fusão</p>	 <p>Falta de fusão</p>

Fonte: Adaptado de MODENESI (2006)

2.2.2.2 Manifestações patológicas nas ligações parafusadas

As manifestações patológicas que ocorrem nas ligações parafusadas, basicamente, resumem-se em problemas de corrosão. Contudo, o colapso das ligações e o detalhamento incorreto podem causar aparecimentos de anomalias, mesmo não se tratando de uma patologia, diretamente. As manifestações patológicas que acometem as ligações parafusadas, ligam-se diretamente à ruína dos fustes dos parafusos e aos elementos de ligação. Independente de qual seja o caso, o procedimento a ser adotado é a recuperação da ligação, verificando-se sempre a sua resistência, de acordo com Castro (1999).

Outro problema que pode ser encontrado, que pode resultar em uma anomalia futuramente, é a mistura improvisada dos dois tipos de ligação, soldada e parafusada, em uma única junção. Esse problema pode acontecer devido a execução incorreta do projeto, despreparo da equipe, incompatibilidades de projetos, entre outros erros. Esse artifício é utilizado com o objetivo de corrigir algum defeito de fabricação, estando diretamente ligado à falta de controle, tanto na fabricação quanto na execução.

2.2.3 Ensaio Não Destrutivo (END)

A Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção – ABENDI (2022) define Ensaio Não Destrutivo (END) como técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos que, de alguma forma, buscam não os danificar, sendo executadas em diversas etapas, como na fabricação, construção, montagem e manutenção.

Os END possuem métodos que conseguem fornecer informações a respeito de diversos quesitos, como exemplo, têm-se: as características tecnológicas de um material, ou ainda, a quantidade de defeitos de um determinado produto/material. (ABENDI, 2022).

As técnicas de END, para estruturas metálicas e estruturas de concreto, segundo ABENDI (2022), são as apresentadas no Quadro 5, o qual também traz a aplicação desses ensaios.

Quadro 5 - Aplicação dos Ensaios Não Destrutivos

Técnicas de END	Vigas	Pilares	Lajes	Pisos	Tubulações	Solos
Inspeção Visual	■	■	■	■	■	■
Líquido Penetrante	■	■	■	■	■	■
Ultrassom	■	■	■	■	■	■
Partícula Magnética	■	■	■	■	■	■
Correntes Parasitas	■	■	■	■	■	■
Pacometria (Magnético)	■	■	■	■	■	■
Esclerometria	■	■	■	■	■	■
Radiográficos	■	■	■	■	■	■
Emissão Acústica	■	■	■	■	■	■
Frequência de Ressonância	■	■	■	■	■	■
Termografia infravermelho	■	■	■	■	■	■
Permeabilidade	■	■	■	■	■	■
Estanqueidade	■	■	■	■	■	■
Revestimento Protetor	■	■	■	■	■	■
Uniformidade revestimento por Holliday Detector	■	■	■	■	■	■
Prova de Carga Estática	■	■	■	■	■	■
Réplica Metalográfica	■	■	■	■	■	■
Prova de Carga Dinâmica – PDA (Pile Driving Analyzer)	■	■	■	■	■	■
Arrancamento com Carga Controlada - Chumbadores e Tirantes	■	■	■	■	■	■
Ensaio Integridade Estacas – PIT (Pile Integrity Test)	■	■	■	■	■	■

Legenda:

- Aplicável em Estruturas Metálicas
- Aplicável em Estruturas de Concreto
- Aplicável em Solos
- Aplicável em Estruturas Metálicas e em Estruturas de Concreto
- Não Aplicável

Fonte: Adaptado de ABENDI (2022)

2.2.4 END em estruturas metálicas

Apesar das normas trazerem a importância de se ter um controle rígido na fabricação das estruturas metálicas, segundo Sacchi e Souza (2016), são poucas as empresas fabricantes que possuem um plano de controle de qualidade nas etapas de projeto, fabricação e montagem. Sendo assim, faz-se necessária a aplicação de ensaios não destrutivos nessas estruturas, pois, assim, consegue-se estimar o nível de deterioração da estrutura, caso haja, e quais tipos de manifestações patológicas estão presentes.

As manifestações patológicas que podem atacar as ligações das estruturas metálicas são várias e podem ser distintas para cada tipo de ligação. No Quadro 6, podem ser observadas as principais normas, com colaboração brasileira, que tratam sobre ensaios não destrutivos para ligações parafusadas e ligações soldadas.

Quadro 6 – Principais normas sobre END para ligações parafusadas e soldadas

Tipo de ligação	Ensaio não destrutivo				
	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Ultrassom	Radiografia	Partícula Magnética
Soldada	ABNT NBR NM 315:2017 Ensaio não destrutivo – Ensaio Visual – Requisitos e práticas recomendadas	ABNT NBR NM 334:2012 Ensaio não destrutivo – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades	ABNT NBR 16196:2020 Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Uso da técnica de tempo de percurso da onda difratada (ToFD) para ensaios em soldas	ABNT NBR 15739:2021 Ensaio não destrutivo – Radiografia em juntas soldadas – Detecção de descontinuidades	ABNT NBR NM 342:2015 Ensaio não destrutivo – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidade
Parafusada		-	ABNT NBR 6002:2015 Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Detecção de descontinuidades em chapas metálicas	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por possuir uma facilidade para se identificar as manifestações patológicas visualmente, as ligações parafusadas possuem poucos ensaios, comparando-se com as ligações soldadas.

Todos os resultados dos ensaios podem ser avaliados individualmente ou em conjunto, permitindo, assim, que se tome a decisão mais adequada e coerente sobre as condições em que a estrutura se encontra e que se possa definir a correta intervenção que será realizada na estrutura. A análise conjunta é realizada, na maioria das vezes, quando é necessário realizar o controle de qualidade, fazendo com que apenas a inspeção visual seja insuficiente. Segundo Castro (1999), os dois ensaios mais utilizados para a avaliação conjunta são o ensaio por LP e o ensaio por ultrassom. Os outros tipos de ensaios também podem ser utilizados, porém, normalmente, acaba sendo restrita às aplicações de grande responsabilidade.

2.2.4.1 Inspeção visual

Conforme a NBR NM 315 (ABNT, 2017), os ensaios não destrutivos devem ser realizados por meio visual, auxiliado ou não por dispositivo ótico. Dessa forma, essa Norma pode ser aplicada na realização de ensaios em:

- a) Acabamento de peças;
- b) Alinhamentos;
- c) Alinhamentos;
- d) Preparação de superfícies;
- e) Juntas preparadas para soldagem;
- f) Juntas soldadas;
- g) Fundidos;
- h) Forjados;
- i) Laminados;
- j) Revestimentos;
- k) Identificação de estados de superfícies;
- l) Deformações e avarias mecânicas;
- m) Evidências de vazamentos;
- n) Outros tipos verificáveis visualmente.

2.2.4.2 Líquido penetrante

Segundo a NBR NM 334 (ABNT, 2012), o método de ensaio por líquidos penetrantes é utilizado para a detecção de descontinuidades que possam estar na superfície da estrutura a ser ensaiada. O líquido é “absorvido” pela estrutura, provocando um manchamento nos pontos descontinuados. Com isso, é possível realizar uma inspeção visual e verificar a presença ou a ausência dessas descontinuidades. Os materiais penetrantes consistem em penetrantes fluorescentes e visíveis, emulsificadores, removedores, reveladores e solventes.

2.2.4.3 Ultrassom

De acordo com a NBR 6002 (ABNT, 2015) e NBR 16196 (ABNT, 2020), o ensaio por ultrassom é basicamente a transmissão de vibrações mecânicas para o material a ser inspecionado, a variação de tempo de trânsito destas vibrações dentro do material é analisada pelo equipamento, que consegue localizar as descontinuidades internas no material. Também podem ser usados para a medir espessuras e caracterizar os materiais analisados.

2.2.4.4 Radiografia

A radiografia, segundo a NBR 15739 (ABNT, 2021), é um método de ensaio não destrutivo que utiliza radiação ionizante ou penetrante para realizar as inspeções nas peças. Esse método pode ser usado em praticamente todas as formas geométricas e densidades. Baseia-se na absorção diferenciada da radiação penetrante, devido à diferença na densidade e às variações na espessura. Essas variações na quantidade de radiação absorvida indicam, entre outras coisas, a existência de uma descontinuidade superficial ou interna em um material.

2.2.4.5 Partícula magnética

Em consonância com a NBR NM 342 (ABNT, 2015), este método de ensaio não destrutivo é baseado na aplicação de um campo magnético em uma região ou seção de interesse. Este campo magnético aplicado é conduzido pelo material através das linhas de fluxo magnético, e quando encontra uma descontinuidade,

eventualmente desvia, “saltando” sobre essa descontinuidade, saindo e retornando ao material. Este efeito é chamado de "campo de fuga". Simultaneamente a este processo, partículas magnéticas são aplicadas na mesma área. Se este efeito ocorrer, as partículas magnéticas são atraídas e seu acúmulo na área forma uma indicação visível a olho nu.

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF

Com o objetivo de realizar análises e melhorar a qualidade dos produtos e projetos, a simulação computacional se tornou uma grande aliada da engenharia, pois com ela é possível obter respostas para os inúmeros problemas que possam ser encontrados. Essas análises podem ser realizadas por meio de softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF). Segundo Farias (2015), o MEF pode ser empregado para simular as distorções, o campo de temperaturas e o campo de tensões residuais de um elemento submetido a um processo de soldagem, por exemplo.

O método consiste em um procedimento numérico pelo qual uma região é discretizada (ou dividida) em pequenos elementos conectados por nós. A partir das conexões nodais compartilhadas entre esses elementos finitos, um conjunto de equações algébricas pode ser obtido, que pode ser resolvido numericamente por métodos de otimização e algoritmos matriciais (MOTA, 2018).

De acordo com Mirlisenna (2016), a precisão do MEF depende da quantidade e tamanho de elementos e nós, e dos tipos de elementos da malha. Geralmente, é possível afirmar que quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior será a precisão dos resultados da análise. Existe no mercado uma vasta variedade de softwares, pagos e gratuitos, para as análises numéricas utilizando o MEF, como: *ABAQUS*, *SAP2000*, *ANSYS*, *LISA*, *Solidworks Simulation*, entre outros.

2.3.1 *ABAQUS*

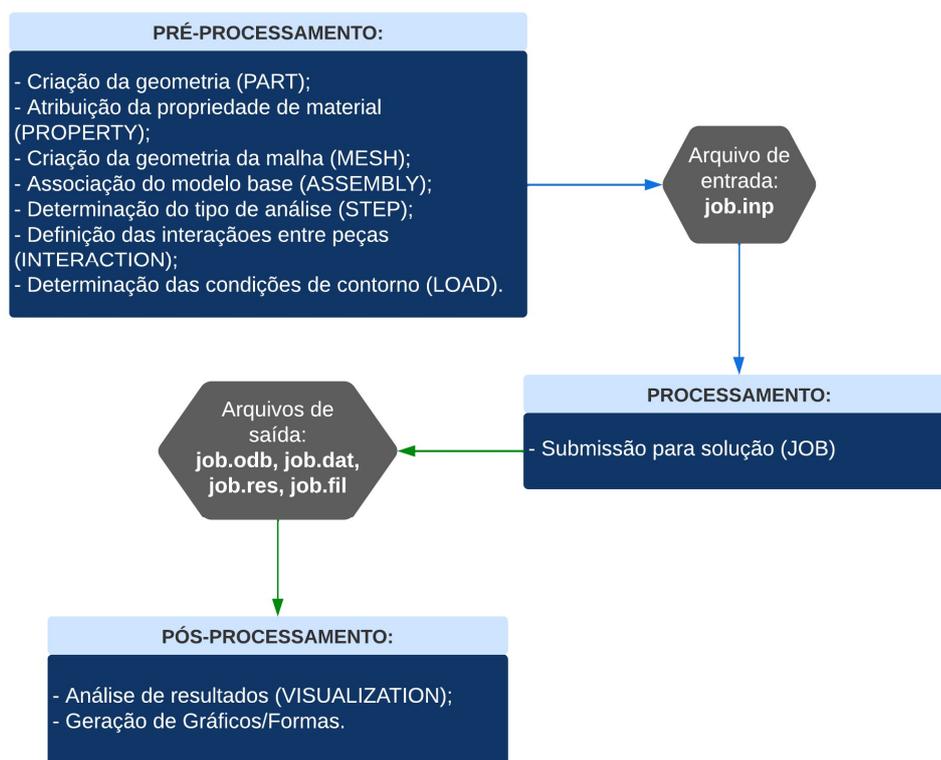
O *ABAQUS* é um pacote de software comercial que pode realizar análise de elementos finitos. Foi desenvolvido pela *HKS Inc de Rhode Island*, Estados Unidos, e

agora é comercializado sob a marca *SIMULIA* da *Dassault Systemes S.A.* Por dispor da possibilidade de definir modelos dos materiais mais complexos, a manipulação do *ABAQUS* torna realizável a representação, com veracidade, dos comportamentos físicos de metais, polímeros, entre outros. Além disso, esse software é capaz de oferecer recursos que podem gerar diferentes tipos de malha.

O *ABAQUS* traz uma gama de possibilidades para solucionar problemas multifísicos, ou seja, problemas que acoplam diferentes modelos físicos ou fenômenos físicos simultâneos. Como exemplo, têm-se: térmico-elétrico, térmico-mecânico, fluido-mecânico-térmico, estrutural-acústico, entre outros, de acordo com a SKA (2022). Também é possível realizar a integração de interfaces associativas para *Solidworks Simulation*, *CATIA V5* e outros sistemas CAD. Logo, permite-se a sincronização de montagens e atualizações rápidas de modelos, levando em consideração de que não haja perda de recursos de análises já definidos.

Geralmente, uma análise completa no *ABAQUS* consiste em três etapas distintas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Essas três etapas estão conectadas conforme ilustrado na Figura 21:

Figura 21 - Representação em fluxograma do funcionamento do ABAQUS



Fonte: Adaptado de MORONE (2021)

2.4 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Com o passar do tempo, qualquer estrutura pode manifestar diversas anomalias, as quais são consequências dos mecanismos de deterioração e/ou por falta de manutenção, que podem acontecer progressivamente ou não. Quando a manutenção preventiva ou corretiva não é realizada devidamente, torna-se necessária a correção de danos na estrutura, ou seja, recuperar, com o objetivo de devolver à estrutura as suas condições originais. Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), os exemplos de recuperações em estruturas metálicas são:

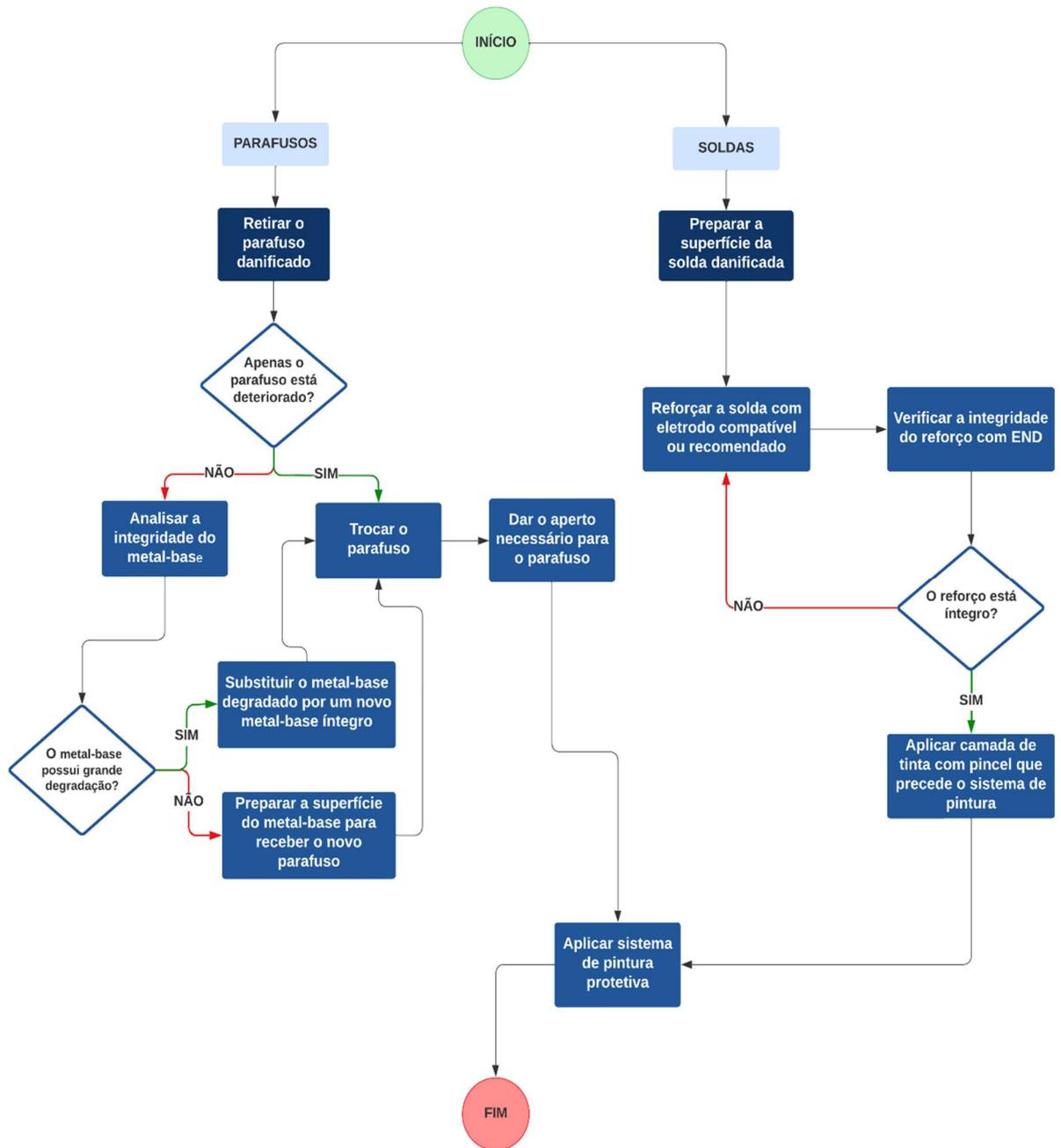
- a) Reforços: atividades que tem por objetivo o aumento do desempenho da estrutura;
- b) Reparos: atividades em locais pontuais da edificação.

2.4.2 Recuperação das ligações em estruturas metálicas

Para garantir a segurança e a estabilidade de uma edificação, é fundamental realizar as devidas manutenções nos elementos de ligações em seus tempos corretos. Segundo Santos (2020), apoiando-se no Anexo B da Norma NBR 5674 (ABNT, 2012), a periodicidade para a realização da manutenção preventiva das conexões estruturais é a cada um ano. Como nem sempre é cumprida a periodicidade das manutenções, faz-se necessário realizar recuperações desses elementos.

Cada elemento de ligação possui suas especificidades e, por isso, suas recuperações também devem ser diferentes. Quando as ligações estão comprometidas, o processo de reparo é o mais indicado. Conforme Santos (2020), o reparo nas ligações deve seguir os passos ilustrados na Figura 22:

Figura 22 - Fluxograma para reparo das ligações



Fonte: Adaptado de SANTOS (2020)

3 METODOLOGIA

Por se tratar de um estudo sobre as manifestações patológicas em elementos de ligação de estruturas de aço, neste capítulo é apresentada a abordagem escolhida para esse trabalho, que é o estudo de caso. O trabalho é uma pesquisa exploratória e possui como objetivo identificar as causas e efeitos das manifestações patológicas encontradas nos elementos de ligações que compõem o sistema estrutural metálico de uma obra de uma instituição de ensino, a qual se encontra paralisada.

Uma abordagem qualitativa também é feita neste trabalho, com o intuito de entender o processo de deterioração da estrutura metálica, como identificar possíveis manifestações patológicas e como pontuá-las, como também apresentar um diagnóstico e/ou prognóstico e consequentes sugestões de intervenções que podem ser feitas. A seguir estão relatadas as principais etapas metodológicas para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Inicialmente, foi realizado um estudo teórico, nas bibliografias referenciadas no presente trabalho, procurando conceituar estrutura metálica e os consequentes elementos de ligação, os quais são o objeto de estudo. Foi feito um estudo bibliográfico a respeito de todos os mecanismos de deterioração que podem acometer as estruturas de aço e estreitando às ligações das estruturas metálicas. Também se pesquisou sobre os ensaios não destrutivos que podem ser realizados para melhor identificação e qualificação das manifestações patológicas que ocorrem nesses elementos, bem como realizar a recuperação da estrutura prejudicada.

A segunda etapa consiste na realização de visitas ao campo para verificar a estrutura em estudo. Nessa etapa são realizados ensaios não destrutivos para analisar a integridade dos elementos de ligação. Os ensaios selecionados para este estudo são o de inspeção visual e o de líquido penetrante. Um registro fotográfico de cada ligação foi realizado a fim de registrar as manifestações patológicas atuantes e, paralelamente, uma descrição detalhada de cada anomalia encontrada.

O passo seguinte consistiu em selecionar uma ligação soldada que, após os ensaios não destrutivos, estivesse com a sua integridade mais afetada em relação às outras as ligações ensaiadas. Após isso, é realizada uma simulação numérica da ligação em questão, via MEF, utilizando o software *ABAQUS*, no qual é verificado o

seu comportamento mecânico, comparando-a com uma ligação saudável, sem quaisquer manifestações patológicas.

Com isso, é possível identificar as prováveis causas das manifestações encontradas e verificar o quão a estrutura em estudo está comprometida. Dessa forma, gerou-se um diagnóstico e/ou prognóstico, que foram realizados baseando-se nas referências bibliográficas desse trabalho.

3.1 ESTUDO DE CASO

A obra de reforma e ampliação do campus Aracaju do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe é o empreendimento escolhido para a aplicação desse estudo de caso. Localizada na Avenida Engenheiro Gentil Tavares, 1166, bairro Getúlio Vargas, na cidade de Aracaju, Sergipe, essa obra foi iniciada em novembro de 2014 e, desde fevereiro de 2018, encontra-se paralisada, com uma porcentagem de execução de 51,89%, segundo o TCU (2019).

Trata-se da reforma e ampliação do prédio administrativo e construção de biblioteca, auditório, guaritas e reurbanização parcial do campus Aracaju, onde nenhuma das propostas conseguiu ser concluída. O projeto possui características especiais, pois se trata de uma ampliação, onde a estrutura se divide em duas partes: infraestrutura em concreto armado (estacas, sapatas, arranque de pilares, bloco de coroamento e vigas baldrame) e a superestrutura em estrutura metálica (pilares da superestrutura, vigas, contraventamentos, lajes e cobertura), conforme traz o edital de licitação, na modalidade Concorrência Pública nº 01/2014 do IFS. A reforma consistiu na demolição de três edificações térrea para a construção de três novos prédios e duas guaritas:

- Prédio Administrativo: 4 pavimentos, sendo o térreo destinado para estacionamento, almoxarifado e recepção e os demais para ambientes administrativos, totalizando cerca de 4400m²;
- Prédio Biblioteca: 4 pavimentos, sendo o térreo destinado à recepção e área de exposição. No primeiro e segundo pavimento, contemplam os acervos e áreas de estudos, e no terceiro pavimento possui os ambientes de estudos individuais, em grupos e uma lanchonete, totalizando 1953m²;

- Prédio Auditório: 2 pavimentos, sendo o térreo, o auditório com 348 cadeiras, sala de suporte técnico e camarim, e o pavimento superior contempla a área de exposição com cerca de 223m². Total de área construída: 1454m².

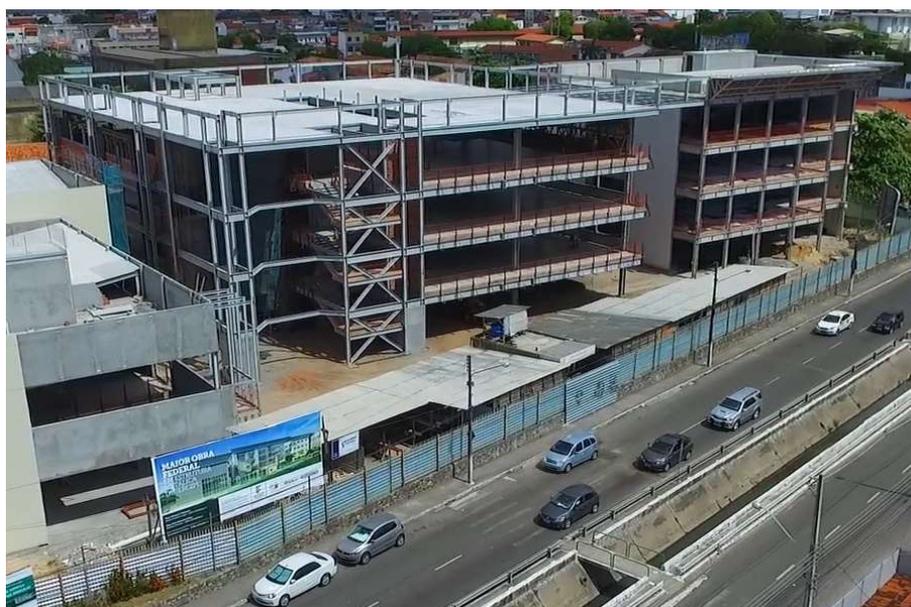
A Figura 23 traz a fachada do projeto, mostrando como ficaria o IFS – Campus Aracaju após a conclusão da obra e a Figura 24 expõe uma imagem aérea de como o campus se encontra após a paralisação.

Figura 23 - Fachada do projeto de reforma e ampliação do IFS – Campus Aracaju



Fonte: IFS (2017)

Figura 24 - Imagem aérea do IFS – Campus Aracaju



Fonte: IFS (2017)

3.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS SELECIONADOS PARA A PESQUISA

3.2.1 Inspeção visual

O ensaio não destrutivo de inspeção visual é utilizado para verificar e avaliar qualitativamente as condições reais das estruturas metálicas e de soldagem de alguns dos elementos que compõe essa estrutura. Segundo a Norma NBR NM 315 (ABNT, 2017), para a realização do ensaio visual deve ser qualificado um procedimento contendo no mínimo os seguintes itens:

- a) objetivo;
- b) norma de referência;
- c) qualificação de pessoal;
- d) técnica de ensaio;
- e) estado disponível da superfície;
- f) técnica de preparação da superfície;
- g) condição superficial;
- h) condições de iluminação;
- i) instrumentos e equipamentos a serem utilizados;
- j) relação de descontinuidades, irregularidades e/ou condições a serem observadas durante o ensaio;
- k) sequência do ensaio quando aplicado;
- l) sistemática de registro dos resultados.

Seguindo alguns requisitos específicos, a Norma NBR NM 315 (ABNT, 2017) traz que o ensaio visual direto, deve ser realizado quando o local dispuser de acessibilidade suficiente para que se possa observar a superfície ensaiada a uma distância máxima de 600 mm e um ângulo não menor que 30°, podendo ser utilizados espelhos para melhorar o ângulo de visão e lentes de aumento.

A luminosidade mínima, sobre a superfície ensaiada, deve ser de 1076 lux e quando se utilizar luz artificial, devem ser adotados ângulos de incidência de luz que possibilitem uma boa visualização das irregularidades. A superfície deve ser preparada conforme indica a Norma NBR NM 315 (ABNT, 2017) e não deve ser contaminada para o ensaio não ser prejudicado ou prejudicar ensaios posteriores.

Deve ser emitido um relatório contendo no mínimo os seguintes itens:

- a) nome do emitente (empresa ou firma executante);
- b) identificação numérica;
- c) identificação da peça ou equipamento;
- d) condição da superfície/fase do processo de fabricação;
- e) técnica utilizada;
- f) número e revisão do procedimento;
- g) registro dos resultados;
- h) normas e/ou valores de referência para interpretação e avaliação dos resultados;
- i) laudo indicando aceitação, rejeição ou recomendação de ensaio complementar;
- j) data do relatório;
- k) registro de certificação, identificação e assinatura do profissional qualificado.

A Norma também informa que podem ser utilizados elementos informativos ou auxiliares para avaliação do ensaio. Com isso, para a realização da inspeção do presente trabalho, são utilizados alguns instrumentos auxiliares para a verificação de dimensões. Com o objetivo de ser mais preciso, um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm foi usado. Com ele podem ser medidos pequenos detalhes, como, o quanto uma peça metálica está corroída ou o quanto perdeu de seção.

Além disso, para realização dos registros de imagens fotográficas e vídeos, é utilizado um celular com uma câmera digital que possui a resolução de 48 megapixels. Para aferição de detalhes muito pequenos, são utilizados o software AutoCAD 2D 2020 e o paquímetro, fixado em 1 mm, para ser usado como referencial de medida.

Com o auxílio da ferramenta computacional, utilizando o comando SCALE para ajustar a imagem, de modo com que o espaçamento entre os bicos do paquímetro se ajustasse também a 1 mm no software, pode-se medir as dimensões aproximadas das porosidades utilizando os comandos DIST, para apenas verificar a distância, ou DIMSTYLE, para também inserir a cota, conforme mostrado na Figura 25.

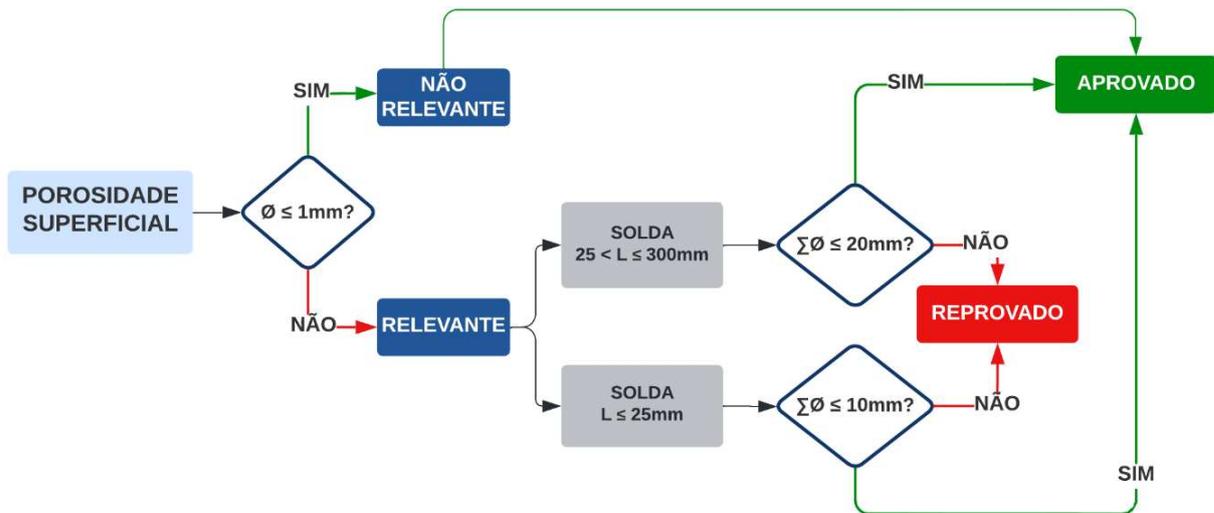
Figura 25 - (a) Paquímetro fixado em 1 mm e (b) Exemplo de medição utilizando o AUTOCAD 2D



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Norma NBR NM 315 (ABNT, 2017) não traz um critério de aceitação em caso de porosidades em soldas. Por causa disso, a ABENDI (2021) utiliza o critério de aceitação do Código AWS D1.1 (ANSI, 2020), o qual diz que para soldagem do tipo filete, o somatório das porosidades visíveis com 1 mm ($1/32''$) ou mais de diâmetro (\emptyset), não deve exceder a 10 mm ($3/8''$) em qualquer 25 mm ($1''$) de solda linear e não deve ter mais que 20 mm ($3/4''$) em qualquer 300 mm ($12''$) de solda. Para resumir os critérios trazidos pelo código, a Figura 26 traz um fluxograma que esclarece a análise das porosidades superficiais.

Figura 26 - Fluxograma para análise das porosidades superficiais



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

3.2.2 Líquido penetrante

De acordo com a Norma NBR NM 334 (ABNT, 2012), o ensaio por LP deve ser conduzido através de um procedimento, que deve conter no mínimo os itens seguintes:

- a) objetivo;
- b) normas de referência;
- c) tipo, forma e processo de fabricação do material a ser ensaiado (exemplo: alumínio fundido, aço-carbono forjado, solda de aço carbono, flange);
- d) materiais penetrantes: o fabricante, a marca, a referência comercial de cada produto, bem como o tipo de acondicionamento de cada um e a família dos materiais penetrantes;
- e) método de preparação da superfície;
- f) modo e tempo de secagem na limpeza prévia da superfície;
- g) modo de aplicação do LP e tempo de penetração;
- h) faixa de temperatura permitida para a superfície em ensaio e para o LP;
- i) modo de remoção do excesso de LP;
- j) modo e tempo de secagem, antes da aplicação do revelador;
- k) modo e tempo máximo para a aplicação do revelador;
- l) requisitos adicionais;
- m) aplicação da limpeza final;

- n) sistemática de registro de resultados (identificação da superfície ensaiada e localização das indicações);
- o) requisitos de segurança e ambientais
- p) relatório de registro de resultados.

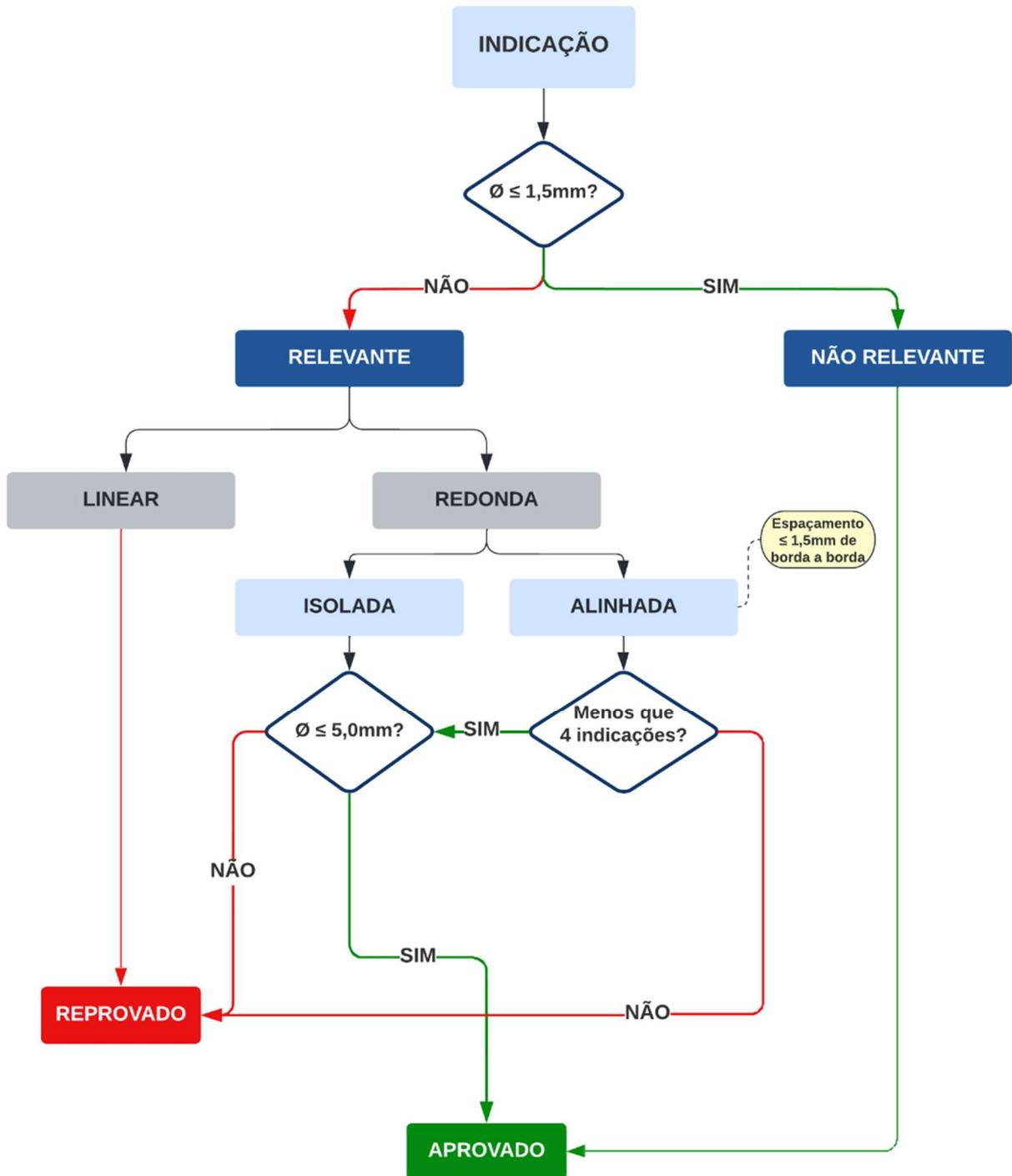
A Norma NBR NM 334 (ABNT, 2012), de maneira semelhante ao ensaio de inspeção visual, não traz um critério de aceitação para as descontinuidades em soldas. Por isso, é utilizado o critério de aceitação do Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8 (ASME, 2019), recomendado pela ABENDI (2021), o qual afirma que somente indicações de diâmetro com dimensões maiores que 1,5 mm (1/16") devem ser consideradas como relevantes e todas as superfícies devem estar livres de:

- a) indicações relevantes lineares (comprimento maior que três vezes a largura);
- b) indicações relevantes arredondadas maiores que 5 mm (3/16");
- c) quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha separadas por 1,5 mm (1/16") ou menos (de borda a borda).

De acordo com o Código, o tamanho da indicação é a base para a avaliação da aceitação. Essas indicações são as manchas formadas pela ação do líquido penetrante e a norma considera que essa indicação da imperfeição pode ser maior que a própria imperfeição.

Para resumir os critérios trazidos pelo código, a Figura 27 traz um fluxograma para análise dessas indicações.

Figura 27 - Fluxograma para análise das indicações



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Para a realização dos registros dos resultados, são utilizados os mesmos instrumentos da inspeção visual (paquímetro, celular com câmera digital com resolução de 48 megapixels e o software AutoCAD 2D). Além disso, também é utilizada uma moeda com 21,96 mm de diâmetro para auxiliar na verificação das dimensões das manchas que pudessem surgir após a realização do ensaio. As

dimensões são medidas de forma análoga ao ensaio de inspeção visual, conforme a Figura 28.

Figura 28 - (a) Diâmetro da moeda e (b) Exemplo de medição utilizando o AUTOCAD 2D



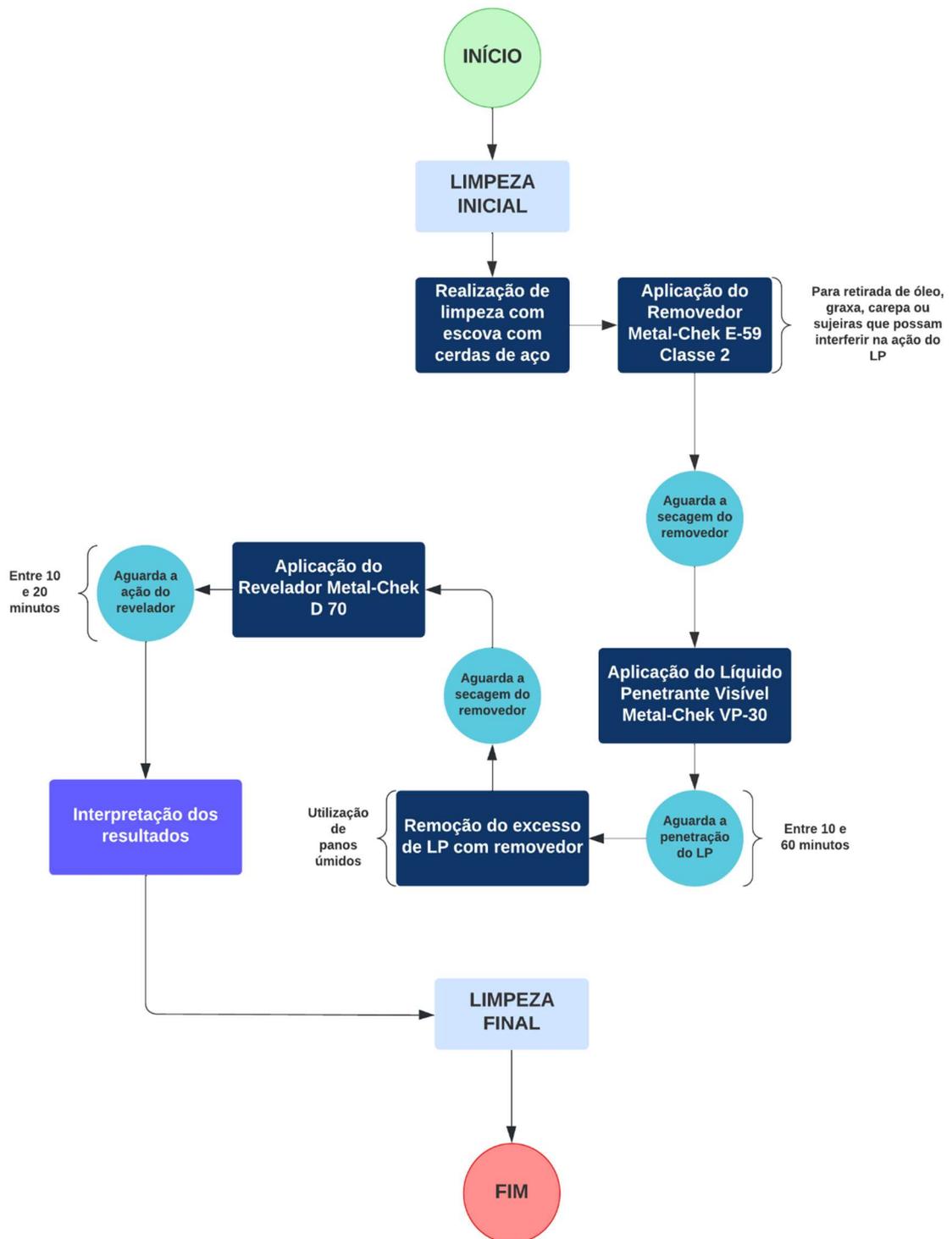
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Para a concretização do ensaio de líquido penetrante, são utilizados os seguintes produtos:

- a) Removedor Metal-Chek E-59 Classe 2;
- b) Líquido Penetrante Visível Metal-Chek VP-30 Tipo II Método A;
- c) Revelador Metal-Chek D 70 Forma D.

Todos os produtos utilizados seguem as especificações: PETROBRAS N-1596, PETROBRAS N-2370, AMS 2644, ISO 3452-2, ASTM E-1417, ASTM E-165, ASME SEC V – Art 6. Seguindo as recomendações do fabricante, normas e especificações, o procedimento de ensaio de líquido penetrante seguido é este, apresentado na Figura 29:

Figura 29 - Procedimento de ensaio de LP



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

3.3 INCONFORMIDADES NORMATIVAS

Quanto às inconformidades normativas, são avaliados os parâmetros dimensionais das soldas de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008). Essa norma estabelece dimensões mínimas e máximas para as pernas das soldas, para evitar distorções excessivas e/ou trincas causadas por resfriamento abrupto.

3.4 LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A PESQUISA

Para a concretização desse trabalho, foram escolhidas ligações do último pavimento do prédio administrativo, onde ficam localizados a cobertura e o reservatório elevado. Todas as ligações selecionadas, segundo o projeto disponibilizado, foram do tipo soldadas, o tipo de aço da estrutura é o ASTM A-588 e o eletrodo utilizado foi o E-7018 com $f_w = 4,92 \text{ t/cm}^2$ ou 485 MPa. Segundo o projeto, todos os perfis analisados possuem as mesmas características geométricas, porém, ao realizar a inspeção visual, pode-se perceber algumas divergências em relação ao tipo de perfil utilizado. A Tabela 8 traz as características geométricas dos perfis analisados.

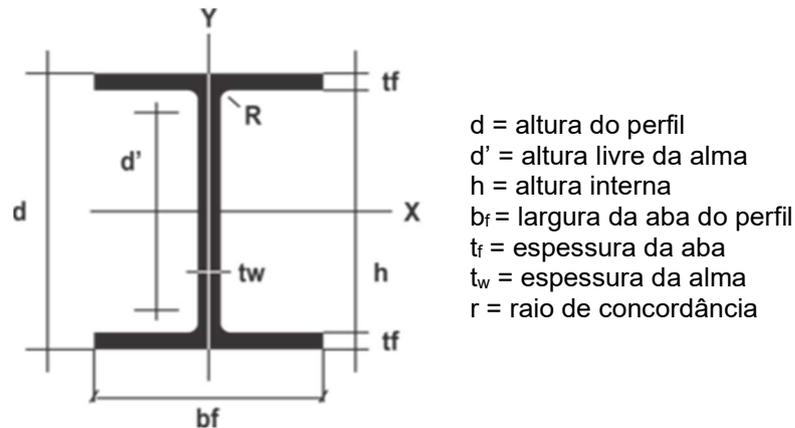
Tabela 8 - Características geométricas dos perfis

Bitola (mm x kg/m)	Peso teórico (kg/m)	d (mm)	b_f (mm)	h (mm)	d' (mm)	Área (cm ²)	Espessura	
							t_w (mm)	t_f (mm)
W 310 x 21,00	21,00	303	101	292	272	27,2	5,10	5,70
W 310 x 23,80	23,80	305	101	292	272	30,7	5,60	6,70
W 310 x 44,50	44,50	313	166	291	271	57,2	6,60	11,20

Fonte: Metal Minas (2022)

A Figura 30 apresenta, esquematicamente, os principais parâmetros da seção transversal dos perfis utilizados nas vigas e pilares.

Figura 30 - Geometria esquemática



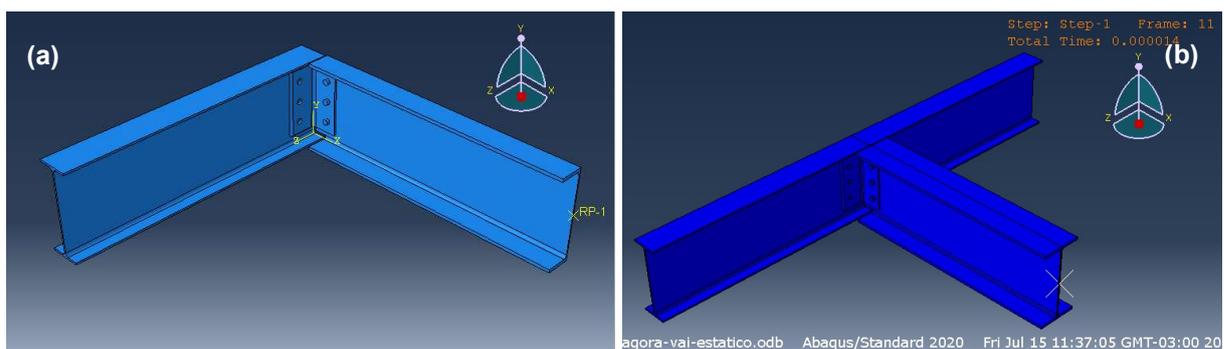
Fonte: Metal Minas (2022)

3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O SOFTWARE ABAQUS

A simulação numérica realizada neste trabalho busca reproduzir os esforços solicitantes por um elemento de ligação da estrutura metálica em estudo. A simulação é realizada por meio do software de análise numérica avançada *ABAQUS*, que utiliza como mecanismo de cálculo o MEF à base da tecnologia *Computer Aided Engineering* (CAE).

Inicialmente, é importante definir condições em que possa haver simetria, pois, com isso, há uma economia de tempo no processamento computacional durante as simulações. Dessa forma, é possível realizar a modelagem e simulação numérica em metade da estrutura, como mostra o modelo idealizado da Figura 31 (a). Isso se torna viável, pois há características geométricas simétricas no plano XY, como mostra o modelo espelhado da Figura 31 (b).

Figura 31 – (a) Modelo idealizado para simulação e (b) Modelo espelhado

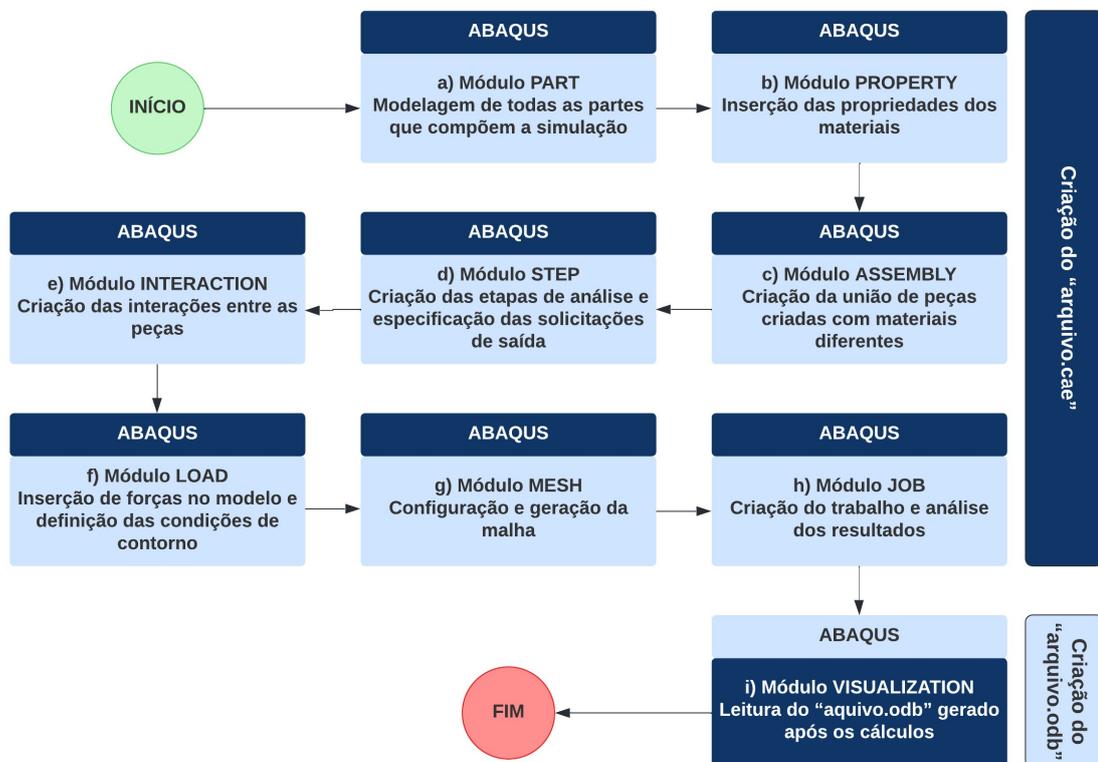


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Para a realização da modelagem, é necessário realizar a verificação das dimensões das partes que compõem a estrutura. Assim sendo, com o auxílio do paquímetro digital, os perfis, os elementos de ligação e os meios de ligação podem ser identificados.

Após a coleta dos dados referentes às dimensões da estrutura que está sendo analisada, o programa pode ser alimentado com as informações. O *ABAQUS* é dividido em módulos e a modelagem segue os passos do fluxograma apresentado na Figura 32.

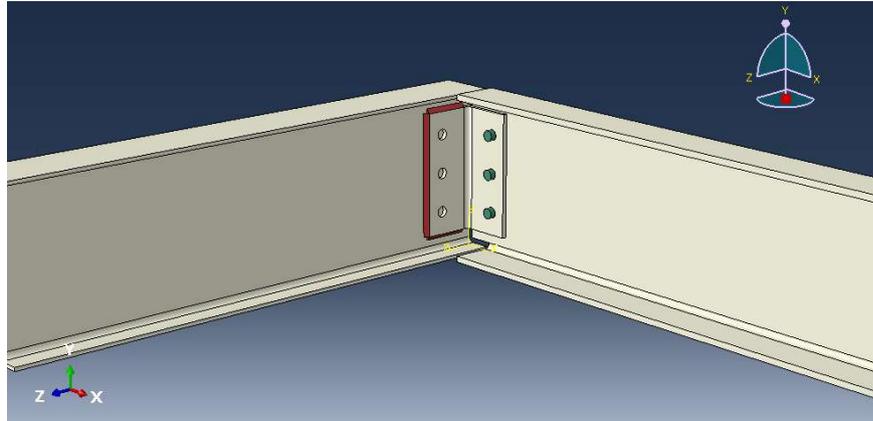
Figura 32 - Fluxograma da modelagem e simulação numérica utilizando o software *ABAQUS*



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

No módulo *PART*, são criadas todas as partes que compõem a simulação, sendo elas: duas vigas metálicas, uma cantoneira, três parafusos, uma solda vertical e duas horizontais. No módulo *PROPERTY*, são inseridas as propriedades dos materiais utilizados, como módulo de elasticidade do aço ($E = 200 \text{ GPa}$), a densidade do aço ($\rho = 7,5 \text{ g/cm}^3$) e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). No módulo *ASSEMBLY*, une-se as peças criadas, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Exemplo da aplicação do módulo ASSEMBLY



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

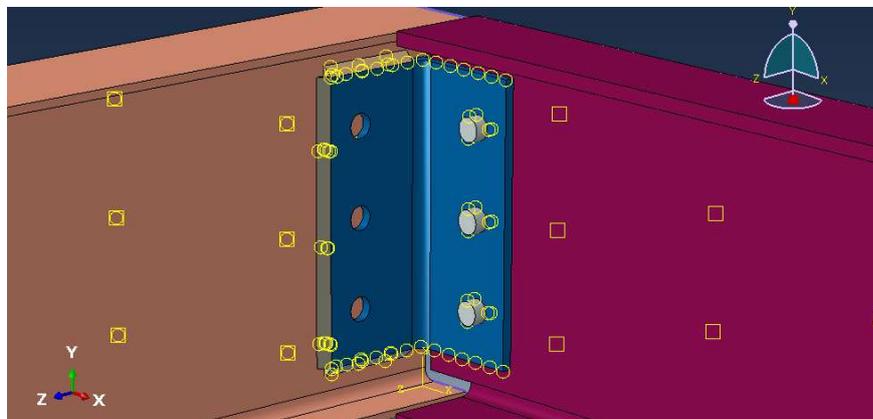
No módulo *STEP*, são definidos os passos da simulação. As configurações adotadas foram:

- Número máximo de incrementos de carga: 5000;
Tamanho dos incrementos: Inicial: $2,5 \times 10^{-7}$; Mínimo: 1×10^{-10} ; Máximo: 1 (correspondente a 100 % do carregamento).

Também é configurada a saída das análises, com os seguintes itens marcados: *Stresses*, *Strain*, *Displacement/Velocity/Acceleration*, *Forces/Reactions*, *Contact*.

Após isso, no módulo *INTERACTION*, são criadas as interações entre todas as peças, em que se definiu as condições de contato entre os componentes, como ilustra a Figura 34.

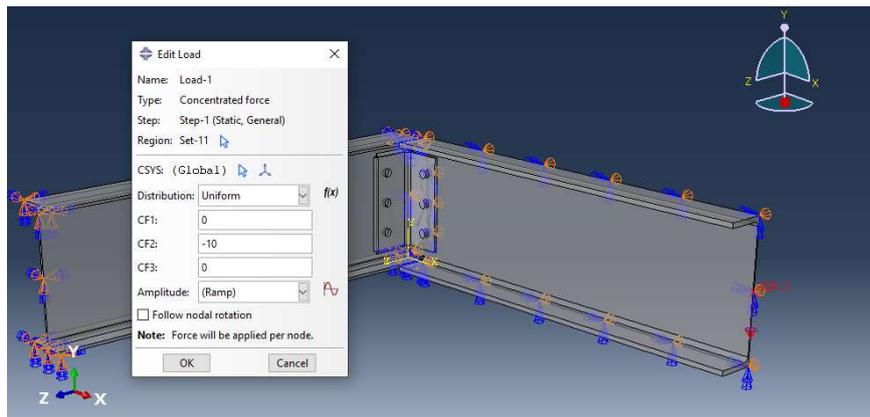
Figura 34 - Exemplo da aplicação do módulo INTERACTION



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

No módulo *LOAD*, define-se carregamentos, adotando-se uma carga de 20 kN (equivalente a um momento de 20 kNm) e condições de contorno, devendo-se determinar em quais *steps* eles deverão ser aplicados, como traz a Figura 35. Esse valor foi determinado usando como premissa básica fazer com a parte mais tensionada atingir o seu limite de escoamento.

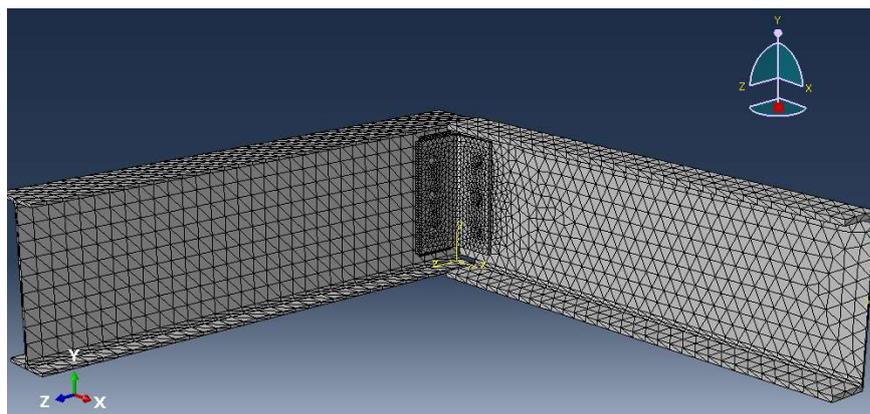
Figura 35 - Exemplo da aplicação do módulo LOAD



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Cria-se a malha de elementos finitos no módulo *MESH*, conforme trazido na Figura 36.

Figura 36 - Exemplo da aplicação do módulo MESH



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por último, após realizar as configurações referentes às variáveis da simulação, dimensões, materiais, esforços, interações, condições de contorno, contatos e malhas de elementos finitos, são realizadas as simulações no módulo *JOB*, que cria e gerencia os trabalhos de análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são descritas e discutidas as manifestações patológicas e inconformidades normativas encontradas nas ligações estudadas, como também mencionadas suas possíveis causas e consequências. Além disso, é realizada uma análise qualitativa e quantitativa empregando simulação numérica e, por fim, sugeridas soluções viáveis, considerando métodos que possam corrigir tais anomalias.

Para a concretização desse trabalho, foram selecionadas quatro ligações, após a realização de uma visita no dia 19 de maio de 2022. O critério de escolha foi baseado no estado de deterioração das ligações presentes na obra e essas foram escolhidas, pois, devido aos seus posicionamentos em planta, as quais se encontravam mais expostas às ações dos ventos e, com isso, as suas degradações aconteceram de forma mais rápida em relação às ligações que estavam menos expostas, como é possível fazer o comparativo na Figura 37. A localização das ligações selecionadas para o estudo está sinalizada no projeto, presente no Anexo C.1 e C.2.

Figura 37 - (a) Ligações expostas às ações dos ventos e (b) Ligação menos exposta às ações dos ventos



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO COM ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR INSPEÇÃO VISUAL DE SOLDA

Na inspeção visual de solda, seguindo o Relatório Técnico de END apresentado no Apêndice A, realizando o comparativo entre os projetos fornecidos e o que realmente foi executado, e seguindo as instruções da NBR NM 315 (ABNT, 2017) e do Código AWS D1.1 (ANSI, 2020), foi possível identificar diversas manifestações patológicas e falhas construtivas, que estão expostas da Figura 38 a Figura 53 e são discutidas nos subitens relacionados.

Figura 38 – (a) Solda realizada na ligação L₁ e (b) Face contrária à da realização da solda



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 39 - (a) Solda realizada na ligação L₂ e (b) Localização da ligação



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 40 – (a) Solda realizada no lado direito da ligação L₃ e (b) Solda realizada no lado esquerdo da ligação L₃



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 41 – (a) Solda realizada na ligação L₄ e (b) Foto aproximada da solda realizada na ligação L₄



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1.1 Corrosão em torno do cordão de solda

Pode-se observar que há um processo corrosivo em todas as ligações estudadas, tanto nos cordões de solda como em seus entornos. Uma das possíveis causas é a exposição excessiva às intempéries, como sol, chuvas e ventos, já que as ligações estão no último pavimento, no qual não possui nenhum tipo de cobertura ou proteção, situação provocada pela paralisação da obra. Além disso, o empreendimento está localizado em um município litorâneo, Aracaju – SE, e, de acordo com a ISO 12944-2 (2017), a categoria de agressividade ambiental aplicada nesse caso é a C5-M, considerada muito alta e é específica para ambientes com exposição marítima.

Outra causa para justificar a corrosão nos cordões de solda, é advinda do próprio processo de soldagem, o qual, devido a sua elevação de temperatura, realiza uma “queimadura” na pintura de proteção do perfil, tanto onde foi realizada a solda, como na face contrária à essa, como se pode perceber na Figura 38. É importante esclarecer que a soldagem em si não provoca a corrosão, mas sim a ausência de

pinturas anticorrosivas, que é o caso estudado. Como não houve uma repintura protetiva nas partes afetadas, após a realização da solda improvisada em campo, a estrutura se manteve exposta e, com isso, vulnerável à ação da corrosão.

É possível comparar a solda realizada na fábrica com a executada em obra, como apontada na Figura 40, podendo afirmar que o processo de soldagem industrial consegue garantir um cordão de solda mais uniforme. Além disso, antes de sair da fábrica, as soldas recebem uma pintura protetiva que as protege contra corrosão e intempéries. Pode-se observar também que os perfis, que possuem soldas originais de fábrica, apresentam uma corrosão menos acentuada e do tipo uniforme.

Conforme apresentado no projeto estrutural fornecido pelo IFS, o tipo de aço utilizado foi o ASTM A-588 que, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), é classificado como “aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica”. Ao realizar as inspeções visuais, pode-se verificar a eficácia desse tipo de aço, pois se nota um pequeno avanço da corrosão nos perfis, apesar da obra estar paralisada desde 2018 e a estrutura estar exposta sem algum tipo de proteção adicional.

Contudo, as ligações que foram soldadas na obra e regiões adjacentes a elas possuem pequenas perdas de massa devido à corrosão, tanto no próprio perfil como nas cantoneiras utilizadas como elementos de ligação para a realização da solda improvisada em campo, como exposto na Figura 39. De modo geral, a corrosão acometida nos cordões de solda das quatro ligações estudadas apresenta-se de forma muito semelhante, como na Figura 41, levando a inferir que as causas para a manifestação desse tipo de corrosão são as mesmas.

4.1.2 Porosidades superficiais

As soldas improvisadas em campo das quatro ligações analisadas possuem porosidades superficiais, que é resultado de alguma contaminação do metal. Segundo Ataíde (2018), pode-se inferir como causa, uma pequena presença de umidade, pois a região onde a obra está localizada é úmida. Além disso, pode ter ocorrido uma instabilidade do arco e uma velocidade de soldagem elevada em relação à intensidade de corrente, pois se nota uma soldagem desuniforme, conforme apresentado na Figura 42 e na Figura 43:

Figura 42 - (a) Porosidades da solda da ligação L₁ e (b) Porosidades da solda da ligação L₂



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 43 - (a) Porosidades da solda da ligação L₃ e (b) Porosidades da solda da ligação L₄



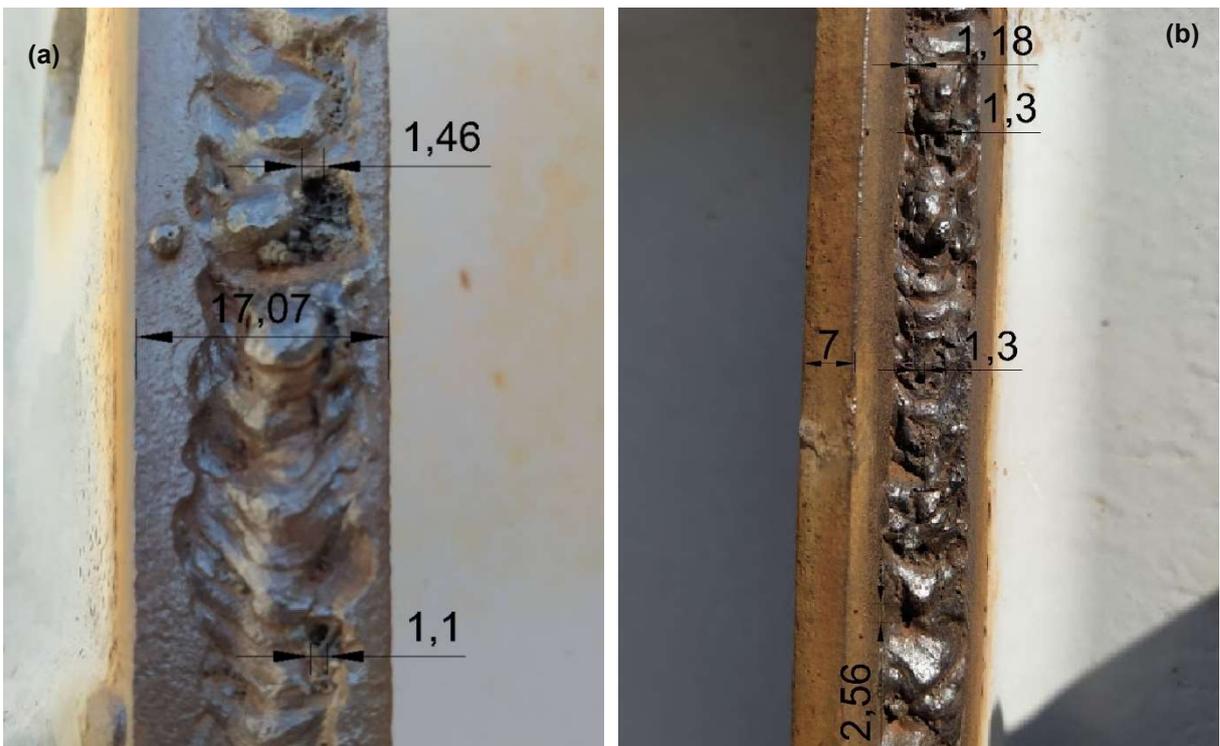
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 44 – (a) Registro das maiores porosidades da ligação L₁ (em mm) e (b) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L₂ (em mm)



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 45 - (a) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L₃ (em mm) e (b) Registro das porosidades acima de 1 mm da ligação L₄ (em mm)



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Conforme inspecionado visualmente, as porosidades superficiais de todas as soldas possuem diâmetros variados, em sua maioria, inferiores a 1 mm. Contudo, existem partes nas soldas que possuem várias porosidades superficiais, como indicados na Figura 42 (b), podendo gerar algum comprometimento significativo da solda. Com o auxílio do AutoCAD 2D, apenas na solda da ligação L₁ há porosidades superficiais com diâmetros inferiores a 1 mm, como apontado na Figura 44 (a).

Nas demais ligações são encontradas porosidades com dimensões que variam até 3 mm de diâmetro. Por possuírem várias porosidades superficiais, de maiores e menores dimensões, torna-se inviável apontar todas elas. Por esse motivo, a Figura 44 (b) e a Figura 45 trazem os registros apenas das porosidades acima de 1 mm das ligações L₂, L₃ e L₄, pois, de acordo com o Código AWS D1.1 (ANSI, 2020), as porosidades consideradas relevantes são as com 1 mm (1/32") ou mais de diâmetro.

Apesar de possuírem porosidades superficiais superiores a 1 mm (1/32"), as soldas não estariam reprovadas, de acordo com critério de aprovação da norma, pois, precisa-se atender também aos requisitos relacionados ao somatório dos diâmetros dessas porosidades dentro de um comprimento estabelecido, como apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Resultado da inspeção visual em relação à porosidade superficial

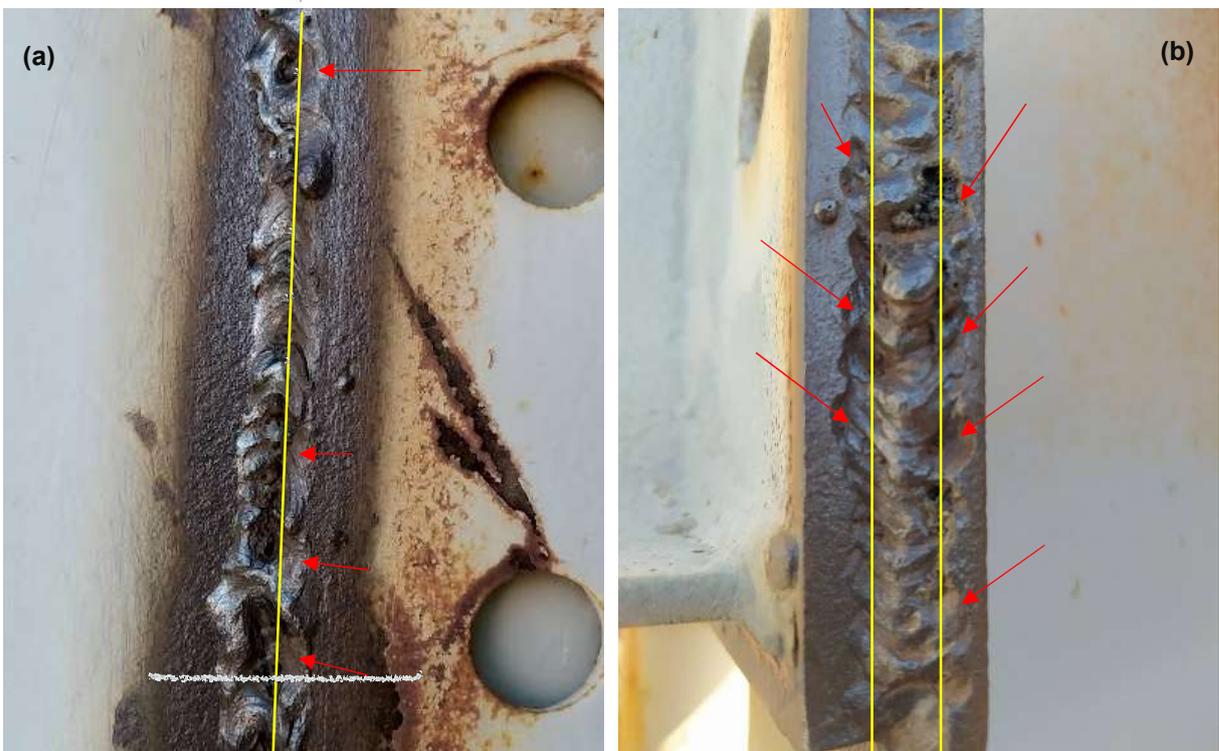
Ligação	$\sum \emptyset$ das porosidades superiores a 1 mm	$\sum \emptyset \leq 10$ mm L \leq 25 mm	$\sum \emptyset \leq 20$ mm 25 mm < L \leq 300 mm
L ₂	2,93 mm	Aprovado	Aprovado
L ₃	2,56 mm	Aprovado	Aprovado
L ₄	6,34 mm	Aprovado	Aprovado

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1.3 Mordeduras

Devido às discontinuidades nos processos de soldagem, que, segundo Ataíde (2018), podem ter sido ocasionadas por uma técnica de soldagem ruim, corrente e velocidade de soldagem muito rápidas ou até utilização de um eletrodo inadequado (diferente do especificado em projeto), as soldas das ligações L₂, L₃ e L₄ apresentam algum problema relacionado à mordedura, conforme apontado na Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - (a) Mordeduras da solda da ligação L₂ e (b) Mordeduras da solda da ligação L₃



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 47 - Mordeduras da solda da ligação L₄



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

As linhas amarelas utilizadas buscaram simbolizar a separação entre os elementos de ligação e a solda ou entre os perfis e as soldas. No caso da ligação L₂, nota-se que há sinais evidentes de mordeduras em cima da cantoneira, indicando que houve uma falha na soldagem, por conta da fusão excessiva dela. Similarmente, acontece nas ligações L₃ (Figura 46), mais aparente, e L₄ (Figura 47), mais sutil.

4.1.4 Sobreposições de solda

De maneira semelhante às mordeduras, as sobreposições de solda (transbordo lateral) podem ter sido causadas por uma técnica de soldagem ruim, com isso, uma quantidade excessiva de solda é depositada. As soldas estudadas que possuem algum nível de sobreposição são as das ligações L₂ e L₃, conforme trazida na Figura 48:

Figura 48 - (a) Sobreposição de solda da ligação L₂ e (b) Sobreposição de solda da ligação L₃



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1.5 Reforços excessivos

Causado pelo excesso de material no acabamento, utilizando as mesmas justificativas das sobreposições de solda, o reforço excessivo é encontrado na ligação L₃, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Reforço excessivo na solda da ligação L₃



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1.6 Carepas de soldagem

Devido a exposição ao intenso calor gerado durante a operação de soldagem, carepas surgiram em todas as ligações estudadas, como apresentado na Figura 50. Os registros fotográficos apresentados a seguir foram feitos sem algum preparo da estrutura, ou seja, sem escovagem das soldas ou qualquer tipo de limpeza.

Figura 50 - Carepas de soldagem nas ligações L₁, L₂, L₃ e L₄



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.1.7 Falhas no detalhamento de projeto e no gabarito da furação

Por se tratar de uma obra federal pública, toda a documentação referente a ela está disponível nos canais de divulgação de informações do IFS, como o próprio site. Os projetos referentes à obra estão anexados à página da licitação. Porém, no projeto estrutural disponível não há o detalhamento das ligações, levando a deprender uma possível tomada de decisões em obra, resultando em improvisos, o que não é recomendado.

Como informado no projeto, o meio de ligação é a solda, porém, nota-se no empreendimento a presença de ligações parafusadas, o que leva a inferir que houve, em algum momento da obra, a mudança do tipo de ligação, de soldada para parafusada, informação essa que não está disponibilizada nos projetos públicos. Contudo, como se pode perceber na Figura 51, a solução inicialmente escolhida, solda, foi aplicada de forma improvisada nas ligações, pois nem todos os perfis possuíam furações. Desse modo, pode-se entender que houve uma outra possível tomada de decisões em obra.

Figura 51 - (a) Ligação L₂ e (b) Ligação L₃



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Na ligação L₃, apesar dos dois perfis possuírem furação, eles são de tamanhos diferentes e possuem furações incompatíveis. Por esse motivo, uma solda improvisada foi utilizada também, conforme a Figura 52. Contudo, a solda foi muito mal realizada, devido à posição que a ligação se encontra, concluindo apenas até a metade em um dos seus lados, pois, conforme constatado na visita, essa solda teve que ser executada sem o contato visual do operário.

Figura 52 - (a) Lado direito da ligação L₃ e (b) Lado esquerdo da ligação L₃ evidenciando a incompatibilidade das furações



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Outro detalhe importante para se destacar é a incompatibilidade entre os perfis apontados no projeto e o que realmente foi utilizado. De acordo com o projeto, que está no Anexo B, C.1 e C.2, os perfis utilizados deveriam ser do mesmo tipo (W 310 x 21,00). Porém, ao realizar a inspeção visual e verificar as dimensões dos perfis, pode-se notar a presença de outros perfis, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Ligações existentes na obra

Ligação	Perfil I (viga)	Perfil II (viga ou pilar)	Previsão
L ₁	W 310 x 44,50	W 310 x 44,50	Prevista, porém incompatível
L ₂	W 310 x 44,50	W 310 x 23,80	Prevista, porém incompatível
L ₃	W 310 x 44,50	W 310 x 21,00	Ligação não prevista em projeto
L ₄	W 310 x 44,50	W 310 x 21,00	Ligação não prevista em projeto

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Devido às essas múltiplas alterações dos tipos de ligações, dos tipos de perfis, a necessidade de se realizar soldas no canteiro de obras sem haver a devida proteção contra a corrosão e intempéries (após a sua realização) e a paralisação da obra, as falhas tornaram-se uns dos fatores determinantes para a rápida propagação das manifestações patológicas nas ligações.

4.1.8 Inconformidade normativa em relação às pernas dos cordões de solda

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), as soldas de filete devem ter sua dimensão (perna) limitada a um máximo. Com isso, tem-se que:

- Materiais com espessura inferior a 6,35 mm, a solda não deve haver uma espessura superior à do material;
- Materiais com espessura igual ou superior a 6,35 mm, a solda não deve haver uma superior a espessura do material subtraída de 1,5 mm.

Conforme apurado na inspeção visual, todas as soldas estão inconformes em relação à norma, com dimensões (pernas) superiores às recomendadas. Na ligação L₃, com o auxílio do software AutoCAD 2D, a chapa da esquerda possui uma espessura de, aproximadamente, 7,63 mm e a da direita, 5,37 mm. Devido às perdas de massa por causa da soldagem, aproximação de dimensões no AutoCAD e angulação da própria foto, deve-se considerar as espessuras comerciais mais próximas, 8 mm e 6,35 mm, respectivamente. Com isso, a solda deveria ter, no máximo, 6,35 mm de perna. Contudo, a solda possui a dimensão aproximada variando entre 5,4 mm e 12 mm, pois a solda possui uma despadronização expressiva, evidenciando que as chapas não foram dispostas paralelamente. De maneira semelhante, acontece na ligação L₄, como apresentado na Figura 53.

Figura 53 - (a) Ligação L₃ e (b) Ligação L₄

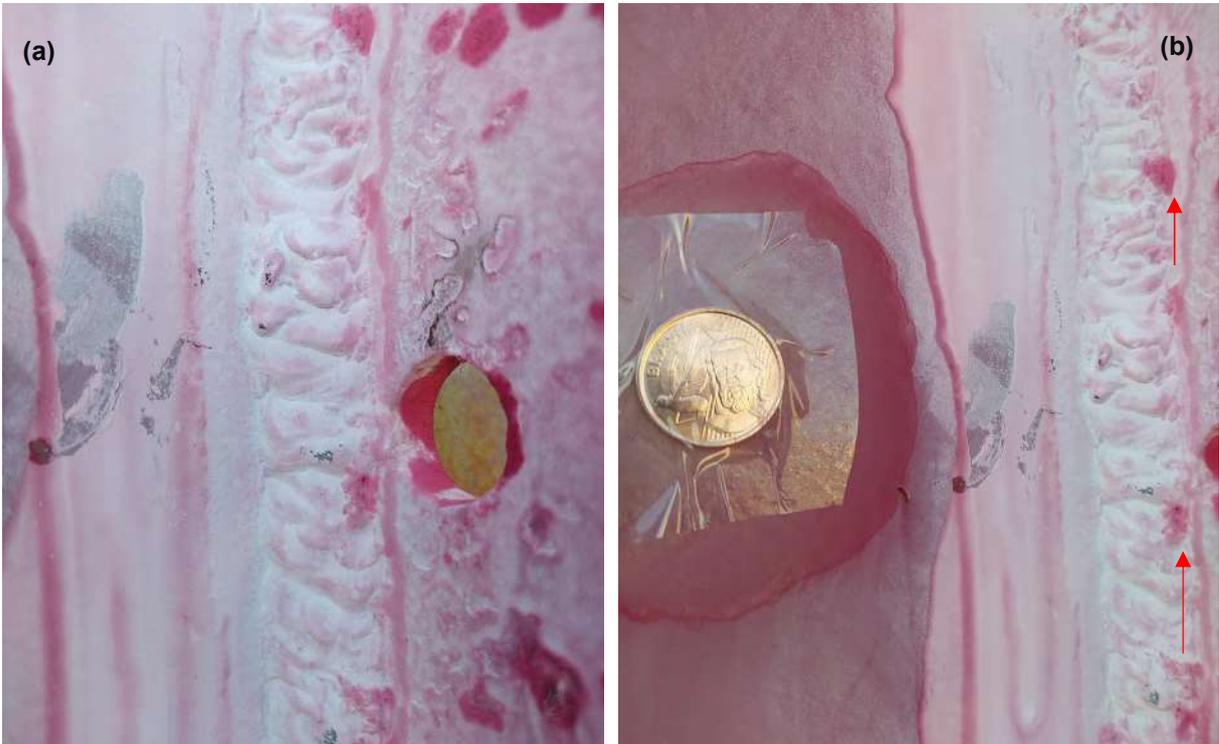


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO COM ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LP

Ao realizar a inspeção visual, porosidades superficiais foram encontradas. Por causa disso, faz-se necessário a realização do ensaio não destrutivo por LP, pois com ele pode-se confirmar a existência de descontinuidades. Seguindo o Relatório Técnico de END apresentado no Apêndice B.1 e B.2 e seguindo as instruções da NBR NM 334 (ABNT, 2012) e do Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8 (ASME, 2019), foi possível alcançar os seguintes resultados, apresentados da Figura 54 a Figura 57:

Figura 54 – (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L₁ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda



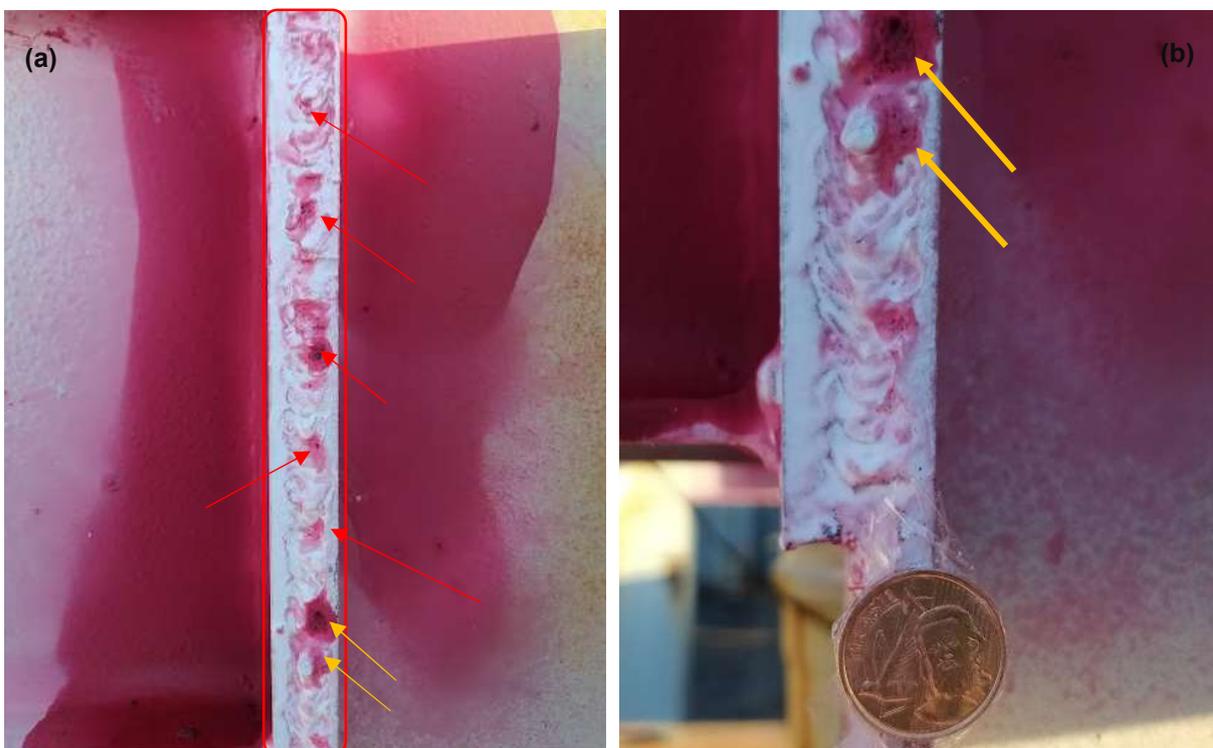
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 55 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L₂ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda



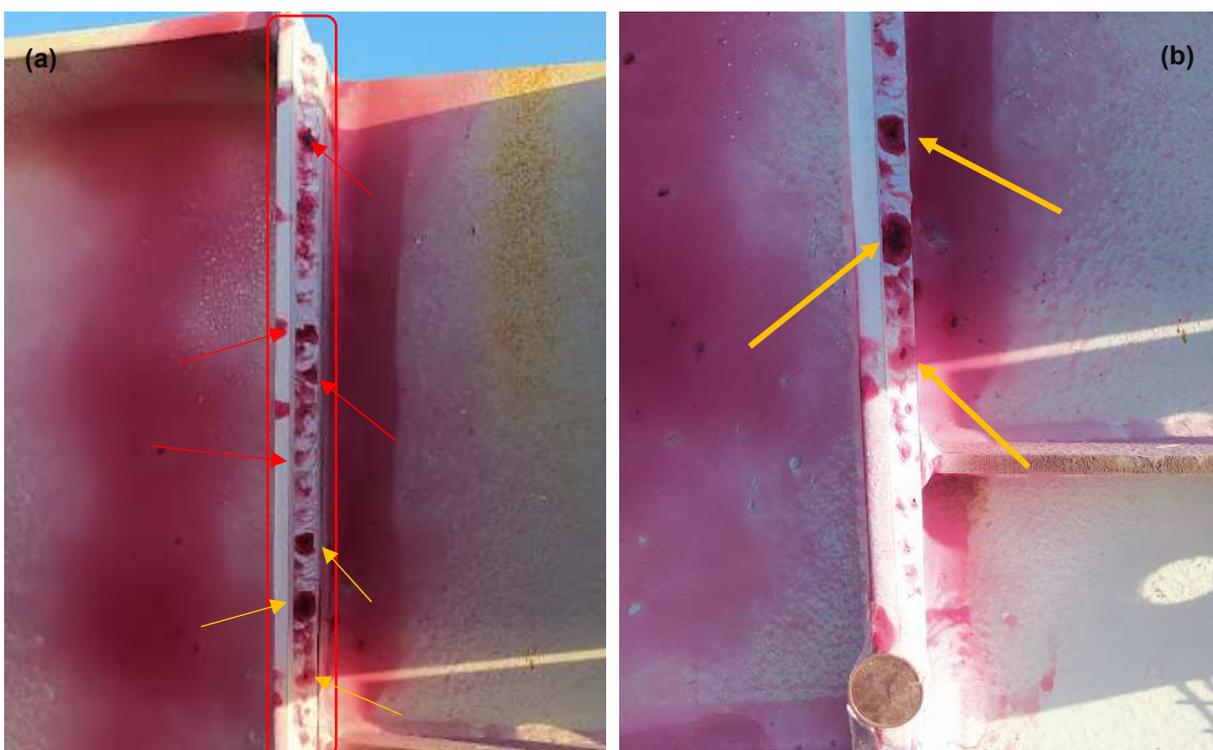
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 56 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L₃ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 57 - (a) Ensaio por LP na solda da Ligação L₄ e (b) Comparativo de dimensões entre uma moeda e as manchas provocadas pelas porosidades presentes na solda



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.2.1 Porosidade da solda

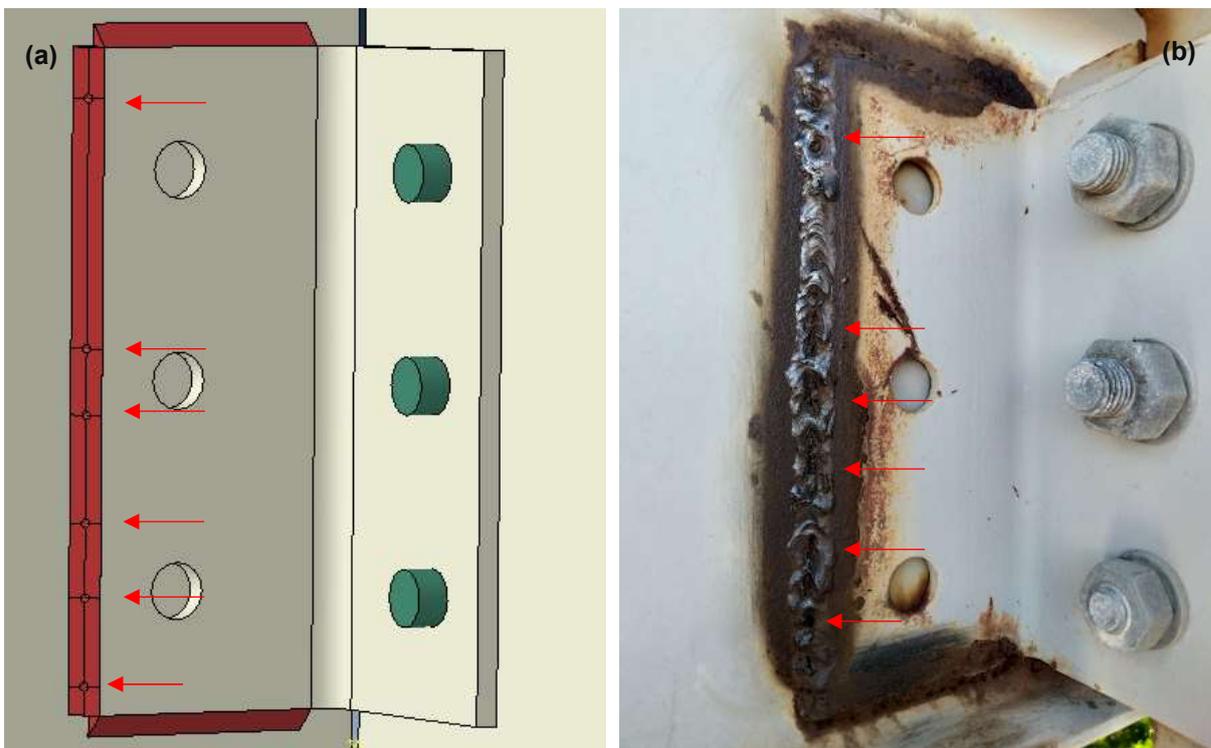
Após a realização do ensaio de LP, pode-se perceber que há descontinuidades em todas as soldas estudadas. Baseando-se nos critérios abordados no item 3.2.2, pode-se concluir que todas as soldas estão comprometidas, de modo que apenas duas indicações de porosidade (uma da ligação L₁ – 4,64 mm – e outra da ligação L₄ – 4,33 mm) estariam dentro do critério de aprovação. No Apêndice B.1, B.2, B.3 e B.4 estão detalhadas as dimensões das demais indicações de porosidade.

4.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA LIGAÇÃO SOLDADA EM ESTUDO

Conforme indicado no Anexo C.1, a ligação selecionada é a L₂. Para cumprir o objetivo de realizar o comparativo entre uma ligação manifestada patologicamente e outra semelhante a ela, contudo, saudável, três análises foram realizadas. Na primeira e segunda análises, as soldas estão saudáveis e a única diferença entre elas é que primeira está em regime elastoplástico e a segunda em regime elástico linear. Na terceira análise, também em regime elastoplástico, foram inseridos alguns defeitos na solda vertical do modelo para simbolizar as perdas de massa apresentadas na solda vertical real da ligação L₂.

Como não houve a possibilidade de representar com 100% de fidelidade os defeitos da solda, devido às limitações de recursos, foram utilizadas seis semiesferas, geradas no próprio *ABAQUS*, com 30 mm de diâmetro e 15 mm de profundidade para representá-los. As soldas horizontais, apesar de apresentarem um nível de corrosão, não possuem perdas de massa, nem porosidades superficiais visíveis. Por esse motivo, apenas a solda vertical recebeu as representações dos defeitos, como apresentado na Figura 58.

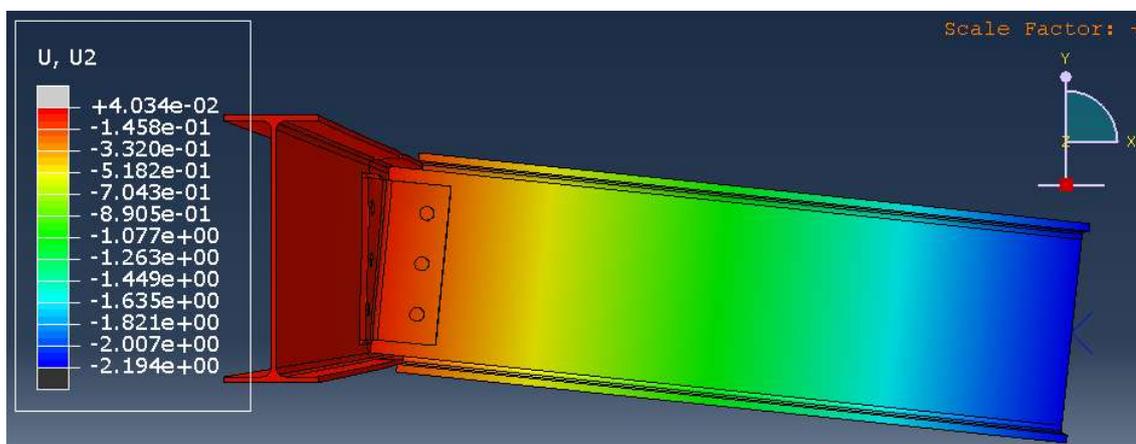
Figura 58 - (a) Ligação L₂ modelada no ABAQUS com os defeitos na solda e (b) Ligação L₂



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

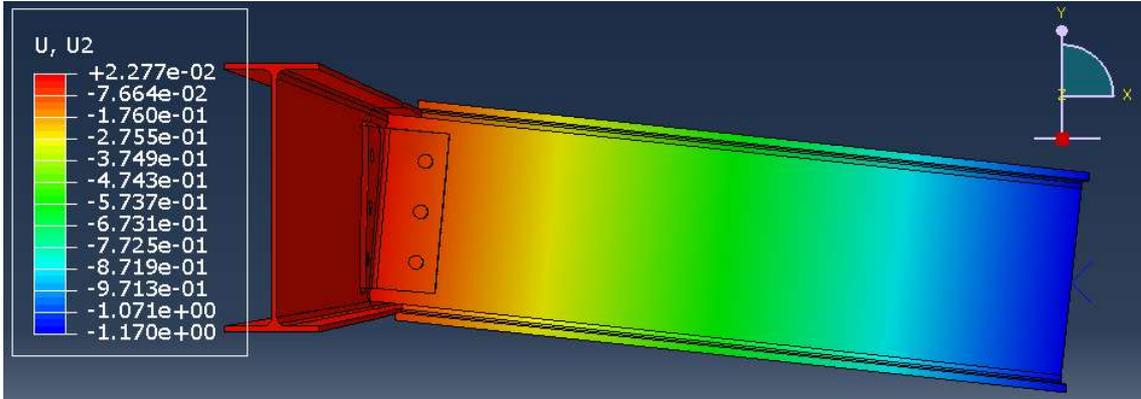
Todas as análises obtiveram resultados fisicamente consistentes. Da Figura 59 a Figura 61 estão em evidência o mapa de cores para o deslocamento vertical da viga e, como esperado, as vigas que tiveram um deslocamento maior, foram as vigas onde suas ligações possuíam o regime elastoplástico, pois após atingir o limite elástico, o material entra em deformação plástica, implicando no maior deslocamento da viga, como apresentado no Gráfico 2.

Figura 59 - Deslocamento da viga da ligação L₂ saudável em um regime elastoplástico



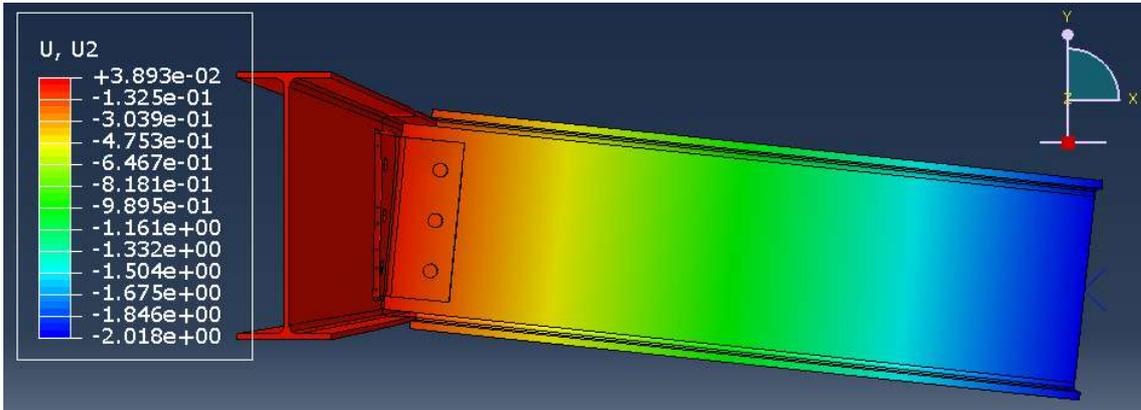
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 60 - Deslocamento da viga da ligação L₂ saudável em um regime elástico



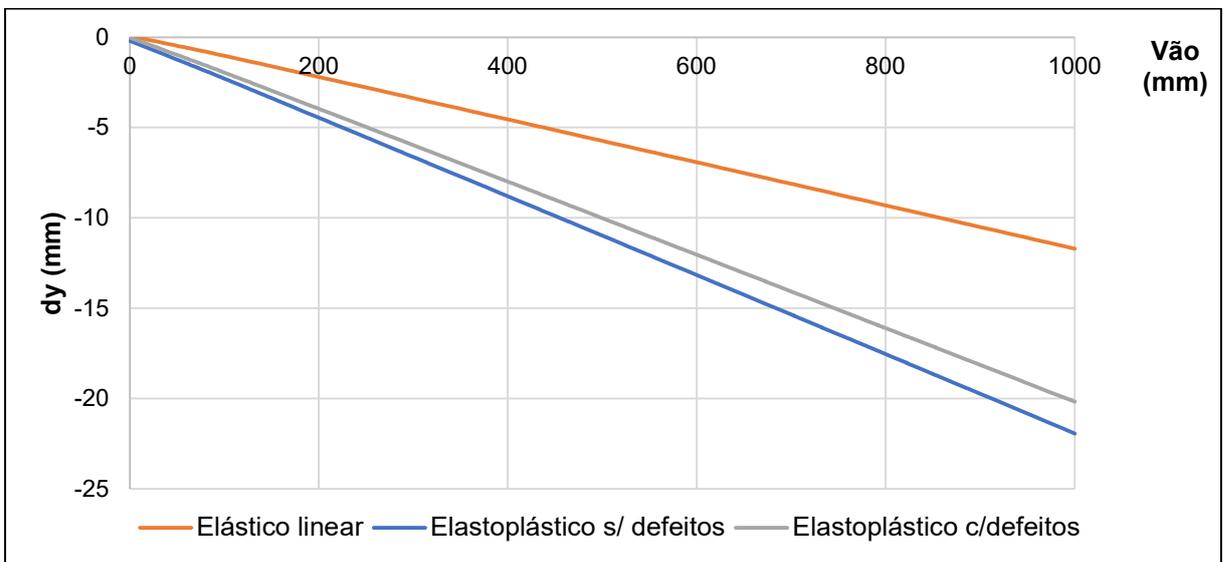
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 61 - Deslocamento da viga da ligação L₂ com patologia em um regime elastoplástico



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Gráfico 2 - Comparativo de deslocamento verticais em mm entre as análises

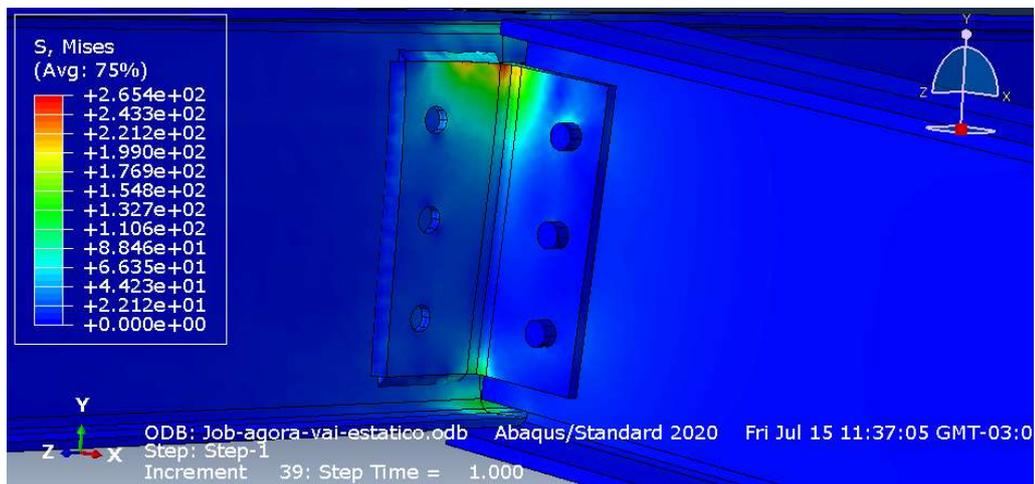


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

As maiores tensões foram encontradas nas ligações, principalmente na solda horizontal superior e na parte superior da cantoneira, como mostrado da Figura 62 a Figura 64. O Gráfico 3, traz o comparativo de tensões ao longo do vão entre as análises e percebe-se uma diferença sutil entre elas, levando a inferir que essa solda manifestada patologicamente não está afetando no desempenho da ligação.

Contudo, se a solda que estivesse com perdas de massa fosse a solda horizontal superior, provavelmente, o resultado seria diferente, pois as tensões atuantes se concentram nela. Dessa forma, pode-se dizer que a ligação L₂ mantém-se com o desempenho muito próximo ao de uma ligação saudável.

Figura 62 - Tensões na ligação L₂ saudável em um regime elastoplástico



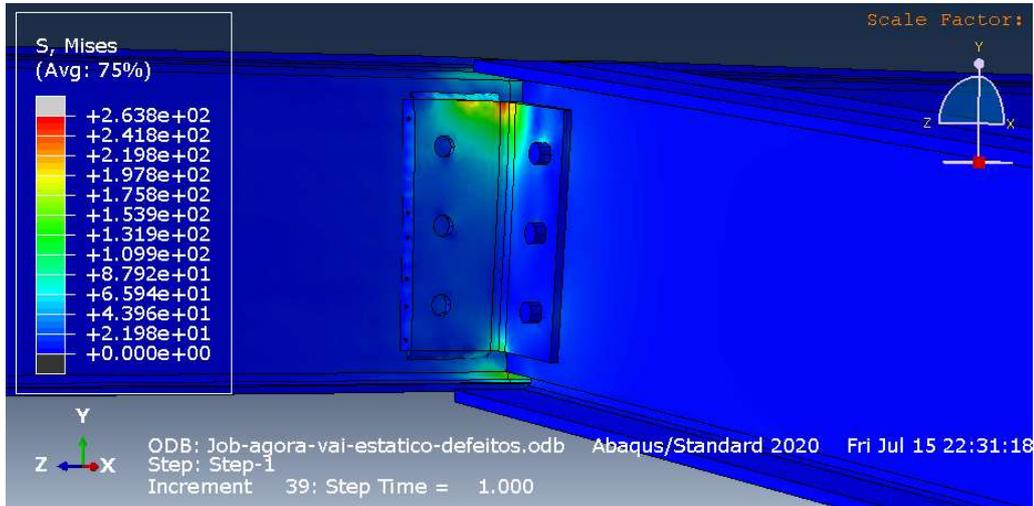
Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Figura 63 – Tensões na ligação L₂ saudável em um regime elástico



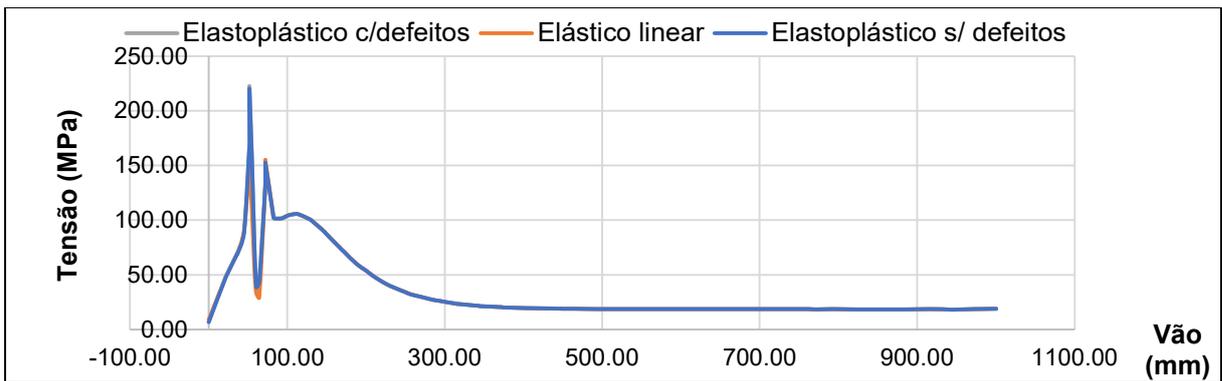
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 64 – Tensões na ligação L₂ com patologia em um regime elastoplástico



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Gráfico 3 - Comparativo de tensões entre as análises ao longo do vão



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

4.4 POSSÍVEIS CONSEQUÊNCIAS DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICADAS

Após a concretização dos ensaios e das análises propostas, foi possível concluir que todas as manifestações patológicas identificadas podem reduzir a integridade da solda. Dessa forma, a sua resistência mecânica também é comprometida. Ao esclarecer que as falhas relacionadas ao projeto também podem ser tão prejudiciais quanto uma manifestação direta, foi possível inferir que elas também provocam diversas manifestações patológicas ao longo do tempo. As anomalias podem viabilizar falhas prematuras e, sem a devida atenção, como manutenções, a estrutura pode chegar até ao colapso. As manifestações

apresentadas raramente acontecem de forma individualizada. Uma porosidade superficial pode facilitar a propagação da corrosão, uma soldagem excessiva pode ocasionar trincas, entre outros exemplos. Desse modo, a estrutura que já possui uma certa quantidade de manifestação, pode apresentar novas ou mesmo piorar as existentes.

4.5 SUGESTÕES DE SOLUÇÕES PARA AS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICADAS

A sugestão de solução mais indicada para a realização da recuperação da das ligações, pode se dar por meio de reparos. Para combater a corrosão já existente na estrutura, é necessário realizar uma limpeza minuciosa com raspagem, lixamento mecânico ou jateamento da região contaminada, de forma com que possa remover as impurezas mais profundas. Faz-se necessário, paralelamente, realizar os reparos nas soldas, conforme elucidado no item 2.4.2. Após isso, o principal objetivo é criar uma barreira superficial, isolando a estrutura e protegendo-a dos agentes agressivos. Uma sugestão é a utilização de tintas anticorrosivas como método de proteção. É importante destacar que a manutenção preventiva deve ser realizada de forma frequente, uma vez que, ao passar do tempo, o desempenho da proteção vai reduzindo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

As obras paralisadas têm o poder de penalizar a sociedade duas vezes, pois a priva do benefício que o empreendimento iria gerar e ocasiona prejuízos financeiros aos cofres públicos devido aos desperdícios dos recursos que foram mal utilizados. Quando a obra possui elementos que são vulneráveis às agressões ambientais, a situação torna-se mais complicada, pois quanto mais tempo paralisada, maiores serão os custos para recuperação, isso quando é possível realizá-la.

Um empreendimento desse porte, como é o da reforma e ampliação do IFS – Campus Aracaju, que possui estrutura metálica como sistema construtivo, paralisado há mais de quatro anos sem as devidas proteções contra as possíveis agressões que pudessem vir a atacar a estrutura, acaba se deteriorando por conta do surgimento de inúmeras manifestações patológicas. Dessa forma, fez-se necessário identificá-las, estudá-las e apresentar sugestões de intervenções que ao menos mitiguem esses impactos.

Após a realização do ensaio não destrutivo de inspeção visual, pode-se concluir que a estrutura analisada está em um estado avançado de deterioração, com corrosão acometendo toda a estrutura. Pode-se identificar também diferentes manifestações patológicas e inconformidades normativas ligadas à execução da soldagem. As descontinuidades encontradas nas ligações, apesar de atenderem aos critérios de aceitação segundo o Código AWS D1.1 (ANSI, 2020), reiteram a necessidade de uma investigação mais aprofundada que possa fornecer um diagnóstico mais preciso, pois essa análise é preliminar.

Após a realização dos ensaios não destrutivos de líquido penetrante, confirma-se os resultados encontrados pelos ensaios de inspeção visual, os quais afirmam que todas as ligações estudadas estão comprometidas, possuindo porosidades que se encontram reprovadas, de acordo com o critério de aceitação do Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8 (ASME, 2019).

Ao realizar as simulações numéricas, verifica-se que a ligação estudada se encontra estável, atendendo às solicitações mecânicas conforme o esperado.

Contudo, apesar das análises mostrarem um resultado positivo em relação às ligações, isso não implica que a estrutura não está afetada, até porque todo o meio de ligação está com algum processo corrosivo, o qual pode se propagar com rapidez.

Diante tudo que foi pesquisado e esclarecido neste trabalho, pôde-se concluir que as manifestações patológicas encontradas na referida obra são decorrentes dos improvisos durante a sua execução e da sua posterior paralisação. Como não houve os devidos cuidados no sentido de se preservar a estrutura, todos os elementos observados que a compõem ficaram expostos às ações degradantes, inclusive, apresentado os mais variados níveis de deterioração.

5.2 SUGESTÕES

Devido às limitações de tempo e recursos, não foram realizadas neste trabalho algumas outras verificações e ensaios, e, portanto, institui-se, como propostas para trabalhos futuros:

- END de Ultrassom nas soldas, para a verificação das profundidades das descontinuidades apontadas no ensaio de LP;
- Inspeção visual em toda estrutura da obra do IFS – Campus Aracaju;
- Modelagem e simulação numéricas com ligações parafusadas;
- END de Líquido Penetrante em ligações de outros pavimentos, podendo realizar um comparativo com as do último pavimento.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. G. C.; MACHADO, I. G. Efeitos do Carregamento de Impacto em Perfis Soldados de Aço. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 22, n. 4, p. 389-400, out. 2017 D.O.I. 10.1590/0104-9224/SI2204.10 ISSN 1980-6973. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2204.10>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Líquidos Penetrantes**. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI), 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15739: Ensaio não destrutivo - Radiografia em juntas soldadas - Procedimento para detecção de descontinuidades**. Rio de Janeiro, p. 17. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16196: Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Uso da técnica de tempo de percurso da onda difratada (ToFD) para ensaio em soldas**. Rio de Janeiro, p. 38. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, p. 37. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674: Manutenção de edifícios**. Rio de Janeiro, p. 6. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6002: Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Detecção de descontinuidades em chapas metálicas**. Rio de Janeiro, p. 9. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, p. 237. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 315: Ensaio não destrutivo – Ensaio Visual – Requisitos e práticas recomendadas**. p. 5. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 334: Ensaio não destrutivo – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades**. p. 30. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 342: Ensaio não destrutivo – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidades**. p. 61. 2015.

ATAIDE, G. P. G. *et al.* **Avaliação da resistência mecânica das juntas da gaiola de mini-baja soldadas pelo processo ER**. 2018.

Auditoria operacional sobre obras paralisadas. **Tribunal de Contas da União**. 2019. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/auditoria-operacional-sobre-obras-paralisadas.htm>. Acesso em: 27 jan. 2022.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. Pini, 2008.

BOILER, A. S. M. E.; CODE, **Rules for Construction of Pressure Vessels**. Section VIII Division I, 2019.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CASTRO, E. M. C. **Patologia dos edifícios em estrutura metálica**. 1999. 202 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 1999.

CHAN, D. K., & FONTANINI, P. S. P. Análise do uso do Sistema Light Steel Frame na Construção Civil. In: **Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos** (pp. 1-8). 2017.

CODE–STEEL, S. W. AWS D1. 1/D1. 1M. **American Welding Society**, 2010.

CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: light steel framing**. 2005. 231 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

ENGENHARIA - Concorrência nº 01/2014 - Construção da 1ª etapa dos blocos administrativo, de biblioteca e auditório do campus Aracaju. **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS)**, [s.l.], 03, fev 2014. Disponível: <http://ifs.edu.br/licitacoes-e-contratos/licitacoes/concorrenca/2014>. Acesso em 20 mar. 2022.

Ensaio não destrutivo e inspeção. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI)**, São Paulo. Disponível: <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>. Acesso em 20 mar. 2022.

ENSUS: Advanced Engineering. **Falha por fadiga em parafuso**. 2019. Disponível em: <https://ensus.com.br/falha-fadiga-parafuso/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

FARIAS, R. M. **Simulação Numérica do Processo de Soldagem MIG/MAG Multipasse de Topo em Chapas de Aço Inoxidável 304L Utilizando a Técnica Element Birth and Death**. 2015.

FILHO, C. A. B. P. *et al.* Corrosão em estruturas metálicas – Estudo de caso. **Revista Educação, Meio Ambiente e Saúde**, Manhuaçu, v. 8, n. 2, p.25-42, jul. 2018.

FORTES, C., ESAB. **Apostila de eletrodos revestidos**. 2005. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf. Acesso em: 03 jun. 2022.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

Grandes obras paradas: como enfrentar o problema? **Confederação Nacional da Indústria (CNI)**. 2018. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/dl/estudo-cni-grandes-obras-paradas.pdf>. Acesso em 20 jul. 2022

HALLIDAY, D. *et al.* **Fundamentos de Física: Gravitação, ondas e termodinâmica**, v.2. 10. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ISO 12944-2:2017 – Paints and varnishes – Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems – Part 2: Classification of environments.

ISO 898-1:2013 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread.

ISO 9223:2012 – Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation.

MACIEL, R. W. **Investigação em estruturas de concretos armado suscetíveis a deterioração por carbonatação em três ambientes distintos estudo de caso**. 2022.

MIRLISENNA, G. Método dos Elementos Finitos: o que é. **Blog ESSS**, 2016.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. Soldagem I. **Introdução aos Processos de Soldagem**, 2006.

MORCILLO, M.; *et al.* **Corrosion Y Proteccion de Metales en las Atmosferas de Iberoamerica, Parte I – Mapas da Iberoamerica de Corrosividade Atmosferica**. Barcelona : Programa CYTED, 1998.

MORONE, M. F. **Análise numérica de uma viga de concreto armado com bambu, no Software ABAQUS**. 2020.

MOTA, D. W. G.; RODRIGUES, M. C.; DE LIMA, L. R. O. Análise numérica de estruturas *DIAGRID* em aço carbono e aço inoxidável por meio do método de elementos finitos. **Projectus**, v. 3, n. 3, p. 16-29, 2018.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5. ed. Gerda, 2015.

PANNONI, F. D. **Projeto e durabilidade**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2017.

PINEDO, C. E. **Tratamentos térmicos e superficiais dos aços**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2021.

PINHEIRO, A. C. F. B. **Estruturas Metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

Produção de estruturas em aço tem crescimento de 25,6% em 2019. **CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA)**, [s.l.], 19, nov. 2020. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticia/producao-de-estruturas-em-aco-tem-crescimento-de-25-6--em-2019>. Acesso em 15 nov. 2021.

QUEIROZ, G.; VILELA, P. M. L. **Ligações, regiões nodais e fadiga de estruturas de aço**. Belo Horizonte: Código Editora, 2012.

SACCHI, C. C.; SOUZA, A. S. C. Manifestações patológicas e controle de qualidade na montagem e fabricação de estruturas metálicas. **Reec - Revista Eletrônica De Engenharia Civil**, [s.l.], v.13, n. 1, p. 20-34, ago. 2016 D.O.I. 10.5216/reec.V13i1.41214. ISSN: 2179-0612. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/41214>. Acesso em: 16 nov. 2021.

SANTOS, A. **Ataque por íons de cloreto custa R\$ 800 milhões por ano ao Brasil. Massa Cinzenta**, 2012. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/ataque-s-por-ions-de-cloreto-custa-r-800-milhoespor-ano-ao-brasil/>. Acesso em: 22 jun. 2022.

SANTOS, M. R. D. **Manual de uso, operação e manutenção de edificações em estruturas metálicas**. 2020.

SHIGLEY, J. E. **Elemento de máquinas: tradução de Edival Ponciano de Carvalho**. Rio de Janeiro; LTC – Livros Técnicos e Científica Editora S.A., 1984.

SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. **Corrosion: Metal/Environment Reactions**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.

SIMULIA ABAQUS. **SKA**. 2022. Disponível em: <https://ska.com.br/produtos/simulia-ABAQUS/simulacao-de-elementos>. Acesso em 30 mai. 2022.

SOUZA, V. C. M. De; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas De Concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1998.

TEIXEIRA, L. A. S.; SIMPLICIO, M. C. A. A Modernização da Construção Civil Através do Uso do Steel Frame. **Boletim do Gerenciamento**, [s.l.], v. 2, n. 2, out. 2018. ISSN 2595-6531. Disponível em: <https://nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento/article/view/46>. Acesso em: 10 fev. 2022.

VASCONCELLOS, A. L. **Ligações em estruturas metálicas**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2017.

Viga "W". **Metal Minas Ferro e Aço**. 2022. Disponível em:
<https://metalminasaco.com.br/product/vigas-w/>. Acesso em 30 jun. 2022.

APÊNDICE A – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR INSPEÇÃO VISUAL DE SOLDA

RELATORIO TECNICO DE ENSAIO NAO DESTRUTIVO POR INSPEÇÃO VISUAL DE SOLDA						Pág: 01/01													
Cliente	IFS - TCC	Procedimento de Inspeção	Ensaio visual direto	Nº Relatório	1														
Unidade	Prédio Administrativo	Norma de Referência	Código AWS D1.1	OS / SST	1														
Item Inspeccionado	Ligações soldadas da cobertura	Critério de Aceitação	Conforme norma	Material	Metálico														
Area	-	Início da Inspeção	19/mai	Fim da Inspeção	14/jun														
Técnica - Método		Luminosidade do ambiente		Condição Superficial		Temperatura do ensaio													
Visual direto		Ambiente aberto e sem cobertura (dia)		Estrutura com corrosão e carepas		Ambiente (25°C)													
Instrumentos Utilizados																			
Nome	Paquímetro	Celular/Câmera (Resolução)		Trena															
Precisão	0,01mm	48MP		1mm															
Registro dos Resultados																			
Identificação			Metal de Base	Metal de Adição	Condição											Laudo			
Posição	Ligação N°	Tipo			TS	PS	SUB	MOR	CON	COR	DI	RE	SOB	FP	PE	SI			
Administrativo - Cobertura	L1	Viga-pilar	A-588	E-7018		X				X			X				X	RAC	
Administrativo - Cobertura	L2	Viga-viga	A-588	E-7018		X		X		X		X	X				X	RAC	
Administrativo - Cobertura	L3	Viga-pilar	A-588	E-7018		X		X		X	X	X	X				X	RAC	
Administrativo - Cobertura	L4	Viga-pilar	A-588	E-7018		X		X		X			X				X	RAC	
IMAGENS																			
LEGENDA																			
AP	Aprovado	TS	Trinca Superficial		DI	Deposição Insuficiente													
RP	Reprovado	PS	Porosidade Superficial		RE	Reforço Excessivo													
RAC	Recomendação de Avaliação Complementar	SUB	Subdimensionada		SOB	Sobreposição													
APR	Aprovado após Reparo	MOR	Mordedura		FP	Falta de Penetração da Raiz													
		CON	Concavidade		PE	Penetração Excessiva da Raiz													
		COR	Corrosão		SI	Solda Improvisada													
INSPECTOR				CLIENTE															
Isabele Paiva Assunção				IFS - TCC															

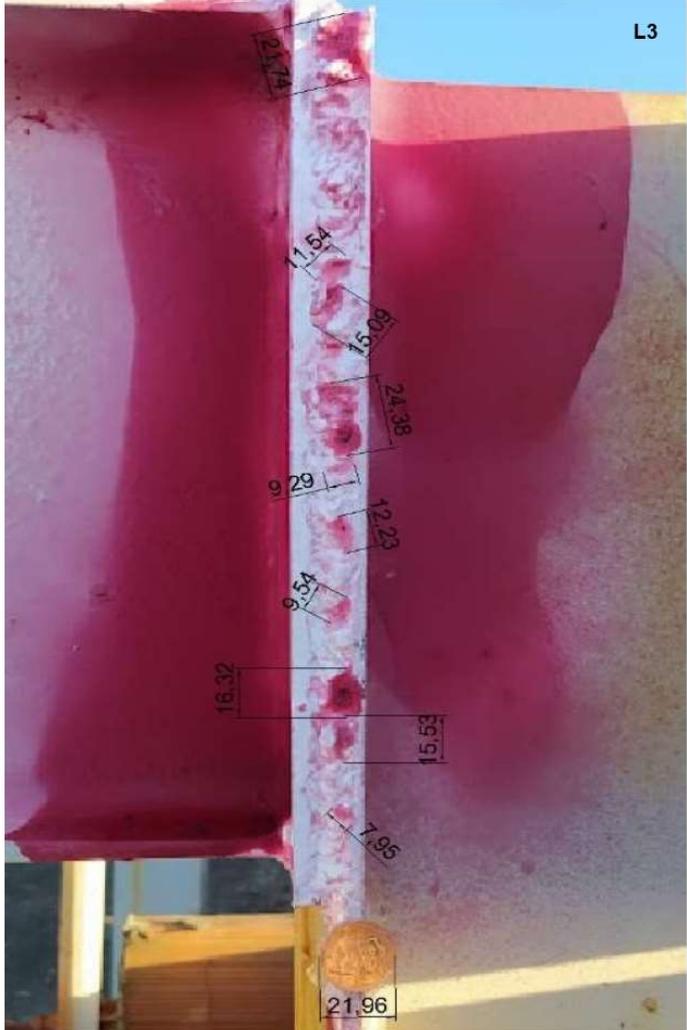
APÊNDICE B.1 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE

RELATORIO TÉCNICO DE ENSAIO NAO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE EM SOLDAS						Pág: 01/04	
Cliente	IFS - TCC	Procedimento de Inspeção	Ensaio visual direto	Nº Relatório	1		
Unidade	Prédio Administrativo	Norma de Referência	Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8	OS / SST	1		
Item Inspeccionado	Ligações soldadas da cobertura	Critério de Aceitação	Conforme norma	Material	Metálico		
Área	-	Início da Inspeção	07/jul	Fim da Inspeção	07/jul		
Tipo de Penetrante		Luminosidade do ambiente	Condição Superficial	Temperatura do ensaio			
Visual direto		Ambiente aberto e sem cobertura (dia)	Estrutura com corrosão e carepas	Ambiente (25°C)			
Consumíveis Utilizados							
Líquido Penetrante		Revelador		Removedor			
Marca	METAL-CHEK	METAL-CHEK		METAL-CHEK			
Lote	LT-22-0098	LT-22-0186		LT-22-0078			
Validade	fev/24	abr/24		fev/24			
Registro dos Resultados							
Identificação			Metal de Base	Metal de Adição	Descontinuidade		Laudo
Posição	Ligação Nº	Tipo			Nº	Dimensão (mm)	
Administrativo - Cobertura	L1	Viga-pilar	A-588	E-7018	1	4,64	AP
					2	5,39	RP
					3	6,86	RP
					4	6,95	RP
Administrativo - Cobertura	L2	Viga-viga	A-588	E-7018	1	9,41	RP
					2	9,62	RP
					3	11,79	RP
					4	15,66	RP
					5	21,39	RP
					6	24,64	RP
					7	25,24	RP
					8	29,73	RP
Administrativo - Cobertura	L3	Viga-pilar	A-588	E-7018	1	7,95	RP
					2	9,29	RP
					3	9,54	RP
					4	11,54	RP
					5	12,23	RP
					6	15,09	RP
					7	15,53	RP
					8	16,32	RP
					9	21,74	RP
					10	24,38	RP
Administrativo - Cobertura	L4	Viga-pilar	A-588	E-7018	1	4,33	AP
					2	6,00	RP
					3	6,55	RP
					4	7,37	RP
					5	7,53	RP
					6	9,18	RP
					7	10,68	RP
					8	11,06	RP
					9	11,78	RP
					10	11,95	RP
					11	11,98	RP
					12	12,12	RP
					13	13,89	RP
					14	16,35	RP
					15	25,42	RP
					16	29,71	RP
					17	34,35	RP
LEGENDA							
AP	Aprovado						
RP	Reprovado						
INSPETOR				CLIENTE			
Isabele Paiva Assunção				IFS - TCC			

APÊNDICE B.2 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE

RELATORIO TECNICO DE ENSAIO NAO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE EM SOLDAS						Pág: 02/04
Cliente	IFS - TCC	Procedimento de Inspeção	Ensaio visual direto	Nº Relatório	1	
Unidade	Prédio Administrativo	Norma de Referência	Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8	OS / SST	1	
Item Inspeccionado	Ligações soldadas da cobertura	Critério de Aceitação	Conforme norma	Material	Metálico	
Area	-	Início da Inspeção	07/jul	Fim da Inspeção	07/jul	
Tipo de Penetrante		Luminosidade do ambiente	Condição Superficial	Temperatura do ensaio		
Visual direto		Ambiente aberto e sem cobertura (dia)	Estrutura com corrosão e carepas	Ambiente (25°C)		
Consumíveis Utilizados						
Marca	Líquido Penetrante	Revelador	Removedor			
Lote	METAL-CHEK	METAL-CHEK	METAL-CHEK			
Validade	LT-22-0098	LT-22-0186	LT-22-0078			
	fev/24	abr/24	fev/24			
Imagens						
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>L1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>L2</p> </div> </div>						
INSPECTOR			CLIENTE			
Isabele Paiva Assunção			IFS - TCC			

APÊNDICE B.3 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE

RELATORIO TECNICO DE ENSAIO NAO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE EM SOLDAS					Pág: 03/04
Ciente	IFS - TCC	Procedimento de Inspeção	Ensaio visual direto	Nº Relatório	1
Unidade	Prédio Administrativo	Norma de Referência	Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8	OS / SST	1
Item Inspeccionado	Ligações soldadas da cobertura	Critério de Aceitação	Conforme norma	Material	Metálico
Area	-	Início da Inspeção	07/jul	Fim da Inspeção	07/jul
Tipo de Penetrante		Luminosidade do ambiente	Condição Superficial	Temperatura do ensaio	
Visual direto		Ambiente aberto e sem cobertura (dia)	Estrutura com corrosão e carepas	Ambiente (25°C)	
Consumíveis Utilizados					
Marca	Líquido Penetrante	Revelador	Removedor		
	METAL-CHEK	METAL-CHEK	METAL-CHEK		
Lote	LT-22-0098	LT-22-0186	LT-22-0078		
Validade	fev/24	abr/24	fev/24		
Imagens					
					
INSPETOR			CLIENTE		
Isabele Paiva Assunção			IFS - TCC		

APÊNDICE B.4 – RELATÓRIO TÉCNICO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE

RELATORIO TECNICO DE ENSAIO NAO DESTRUTIVO POR LÍQUIDO PENETRANTE EM SOLDAS					Pág: 04/04
Ciente	IFS - TCC	Procedimento de Inspeção	Ensaio visual direto	Nº Relatório	1
Unidade	Prédio Administrativo	Norma de Referência	Código ASME BPVC.VIII.1 Ap.8	OS / SST	1
Item Inspecionado	Ligações soldadas da cobertura	Critério de Aceitação	Conforme norma	Material	Metálico
Area	-	Início da Inspeção	07/jul	Fim da Inspeção	07/jul
Tipo de Penetrante		Luminosidade do ambiente	Condição Superficial	Temperatura do ensaio	
Visual direto		Ambiente aberto e sem cobertura (dia)	Estrutura com corrosão e carepas	Ambiente (25°C)	
Consumíveis Utilizados					
Marca	Líquido Penetrante	Revelador	Removedor		
	METAL-CHEK	METAL-CHEK	METAL-CHEK		
Lote	LT-22-0098	LT-22-0186	LT-22-0078		
Validade	fev/24	abr/24	fev/24		
Imagens					
					
INSPECTOR			CLIENTE		
Isabele Paiva Assunção			IFS - TCC		

ANEXO A.1 – CRITÉRIO PARA ACEITAÇÃO DE SOLDAS, SEGUNDO AWS D1.1

Categoria da Descontinuidade e Critério de Inspeção	Conexões não tubulares carregadas Estaticamente	Conexões não tubulares carregadas Ciclicamente										
(1) Proibição de Trincas Qualquer trinca é inaceitável, independente do tamanho e localização	X	X										
(2) Fusão entre metal base e solda Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base e a solda	X	X										
(3) Cratera Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas ao seus comprimentos efetivos	X	X										
(4) Perfil das soldas O perfil das soldas devem estar conforme 5.23 da AWS D1.1	X	X										
(5) Período de Inspeção Inspeção visual das soldas em todos os aços podem iniciar imediatamente após a ter sido a soldagem completada e resfriada na temperatura ambiente. Critério de aceitação para aços ASTM A514, A517 e A 709 Grau HPS100 e 100W [HPS690W] devem estar baseados na inspeção visual realizada não antes que 48 horas da solda estar completada.	X	X										
(6) Soldas Subdimensionadas A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">L</td> <td style="text-align: center;">U</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Dimensão nominal específica da solda (mm)</td> <td style="text-align: center;">Redução permitida de L (mm)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≤ 5</td> <td style="text-align: center;">≤ 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">≤ 2,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 8</td> <td style="text-align: center;">≤ 3</td> </tr> </table> Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda. Em soldas de flanges , sobreposição não é permitida nos terminais para um comprimento igual a duas vezes a largura do flange.	L	U	Dimensão nominal específica da solda (mm)	Redução permitida de L (mm)	≤ 5	≤ 2	6	≤ 2,5	≥ 8	≤ 3	X	X
L	U											
Dimensão nominal específica da solda (mm)	Redução permitida de L (mm)											
≤ 5	≤ 2											
6	≤ 2,5											
≥ 8	≤ 3											
(7) Mordedura (A) Para materiais menores que 1 pol. (25 mm) de espessura, mordeduras não devem exceder a 1/32 pol. (1 mm), com as seguintes exceções: não deve exceder a 1/16 pol. (2 mm) para um comprimento acumulado de 2 pol. (50 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm). Para materiais iguais e maiores que 1 pol.(25 mm) de espessura, mordeduras não devem exceder a 1/16 pol. (2 mm) para qualquer comprimento de solda.	X	NA										
(B) Em membros primários, mordeduras não devem ser maiores que 0,01 pol. (0,25 mm) de profundidade quando a solda for transversal ao esforço de tensão sob qualquer condição de projeto de carga. Mordeduras não devem ser maiores que 1/32 pol. (1 mm) em profundidade para todos os casos.	NA	X										
(8) Porosidade (A) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade visível. Para outras soldas com chanfros e soldas de filete a soma dos diâmetros das porosidades visíveis de 1/32 pol. (1 mm) ou maior não deve exceder 3/8 pol. (10 mm) em qualquer polegada (25 mm) linear de solda e não deve exceder a ¼ pol. (20 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm) de comprimento de solda.	X	NA										
(B) A frequência da porosidade em soldas de filete não deve exceder uma em cada 4 pol. (100 mm) de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 3/32 pol. (2,5 mm). Exceção: para juntas de filete em reforços conectados a parte principal, a soma dos diâmetros das porosidades não deve exceder a 3/8 pol. (10 mm) em qualquer polegada linear de solda e não deve exceder 3/4 pol. (20 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm) de comprimento de solda.	NA	X										
(C) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade. Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 4 pol. (100 mm) de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder a 3/32 pol. (2,5 mm) .	NA	X										

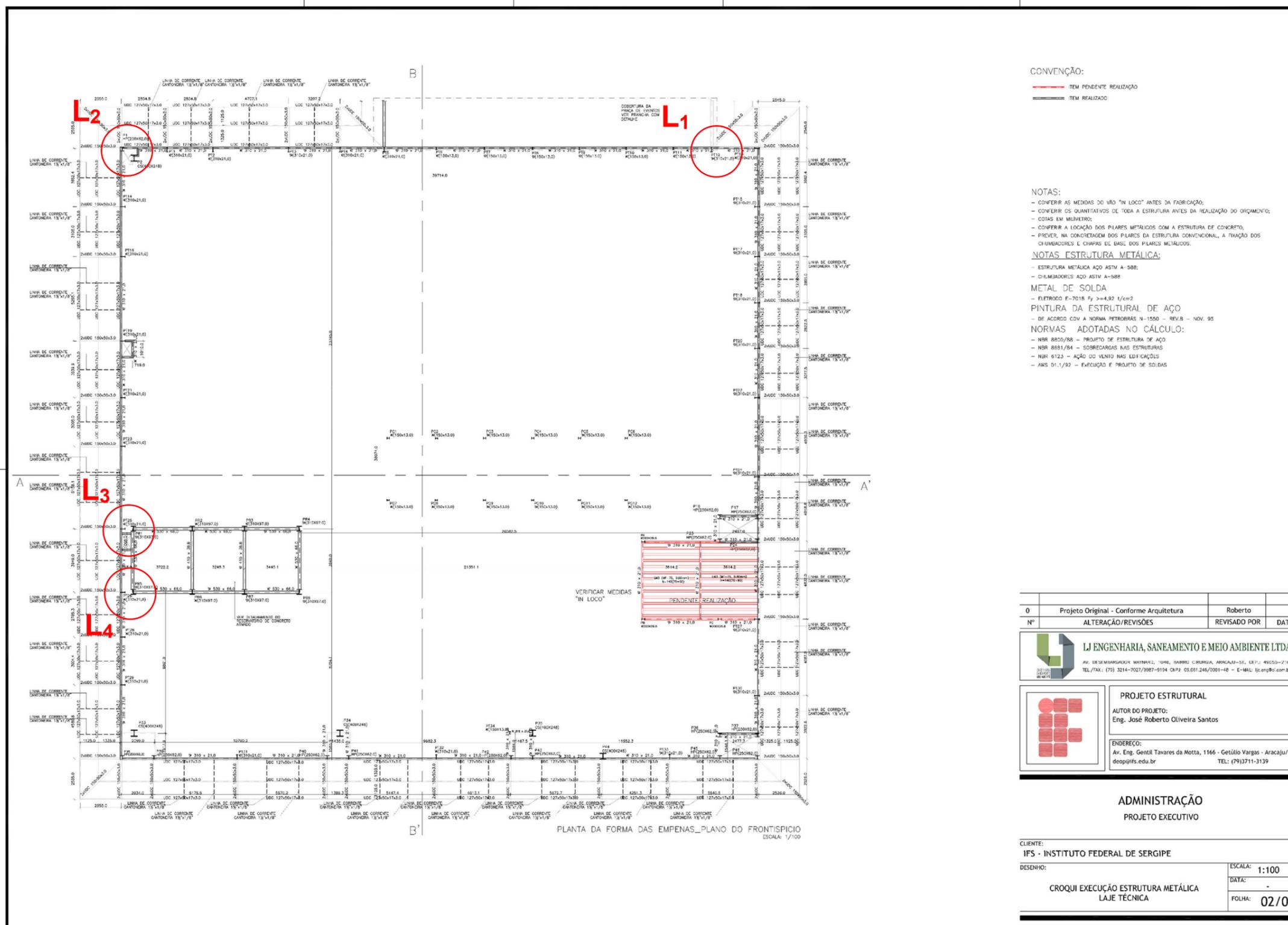
1. Um "X" indica aplicabilidade para o tipo da junta; a área sombreada indica não aplicabilidade (NA)

ANEXO A.2 – CRITÉRIO PARA ACEITAÇÃO DE SOLDAS, SEGUNDO AWS D1.1

Categoria da Descontinuidade e Critério de Inspeção	Conexões Tubulares para todos os Carregamentos										
(1) Proibição de Trinças Qualquer trinca é inaceitável, independente do tamanho e localização	X										
(2) Fusão entre metal base e solda Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base e a solda	X										
(3) Cratera Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas ao seus comprimentos efetivos	X										
(4) Perfil das soldas O perfil das soldas devem estar conforme 5.23 da AWS D1.1	X										
(5) Período de Inspeção Inspeção visual das soldas em todos os aços podem iniciar imediatamente após a ter sido a soldagem completada e resfriada na temperatura ambiente. Critério de aceitação para aços ASTM A514, A517 e A 709 Grau HPS100 e 100W [HPS690W] devem estar baseados na inspeção visual realizada não antes que 48 horas da solda estar completada.	X										
(6) Soldas Subdimensionadas A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): <table style="margin-left: 40px; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">L</td> <td style="text-align: center;">U</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Dimensão nominal específica da solda (mm)</td> <td style="text-align: center;">Redução permitida de L (mm)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≤ 5</td> <td style="text-align: center;">≤ 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">≤ 2,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 8</td> <td style="text-align: center;">≤ 3</td> </tr> </table> Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda. Em soldas de flanges , sobreposição não é permitida nos terminais para um comprimento igual a duas vezes a largura do flange.	L	U	Dimensão nominal específica da solda (mm)	Redução permitida de L (mm)	≤ 5	≤ 2	6	≤ 2,5	≥ 8	≤ 3	X
L	U										
Dimensão nominal específica da solda (mm)	Redução permitida de L (mm)										
≤ 5	≤ 2										
6	≤ 2,5										
≥ 8	≤ 3										
(7) Mordedura (A) Para materiais menores que 1 pol. (25 mm) de espessura, mordeduras não devem exceder a 1/32 pol. (1 mm), com as seguintes exceções: não deve exceder a 1/16 pol. (2 mm) para um comprimento acumulado de 2 pol. (50 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm). Para materiais iguais e maiores que 1 pol.(25 mm) de espessura, mordeduras não devem exceder a 1/16 pol. (2 mm) para qualquer comprimento de solda.	N.A										
(B) Em membros primários, mordeduras não devem ser maiores que 0,01 pol. (0,25 mm) de profundidade quando a solda for transversal ao esforço de tensão sob qualquer condição de projeto de carga. Mordeduras não devem ser maiores que 1/32 pol. (1 mm) em profundidade para todos os casos.	X										
(8) Porosidade (A) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade visível. Para outras soldas com chanfros e soldas de filete a soma dos diâmetros das porosidades visíveis de 1/32 pol. (1 mm) ou maior não deve exceder 3/8 pol. (10 mm) em qualquer polegada (25 mm) linear de solda e não deve exceder a ¼ pol. (20 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm) de comprimento de solda.											
(B) A frequência da porosidade em soldas de filete não deve exceder uma em cada 4 pol. (100 mm) de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 3/32 pol. (2,5 mm). Exceção: para juntas de filete em reforços conectados a parte principal, a soma dos diâmetros das porosidades não deve exceder a 3/8 pol. (10 mm) em qualquer polegada linear de solda e não deve exceder 3/4 pol. (20 mm) em qualquer 12 pol. (300 mm) de comprimento de solda.	X										
(C) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade. Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 4 pol. (100 mm) de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder a 3/32 pol. (2,5 mm) .	X										

1. Um "X" indica aplicabilidade para o tipo da junta; a área sombreada indica não aplicabilidade (NA)

ANEXO B - CROQUI EXECUÇÃO ESTRUTURA METÁLICA (DISPONIBILIZADA PELO IFS) - LAJE TÉCNICA (SEM ESCALA)



0	Projeto Original - Conforme Arquitetura	Roberto	
Nº	ALTERAÇÃO/REVISÕES	REVISADO POR	DATA

LJ ENGENHARIA, SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE LTDA
 AV. DE S. MARGARIDA MATHEUS, 1046, BARRO CURURU, ARACAJU-SE, CEP: 49055-270
 TEL./FAX: (79) 3214-7027/9087-9194 CNPJ: 03.051.246/0001-40 - E-MAIL: lj.eng@ljb.com.br

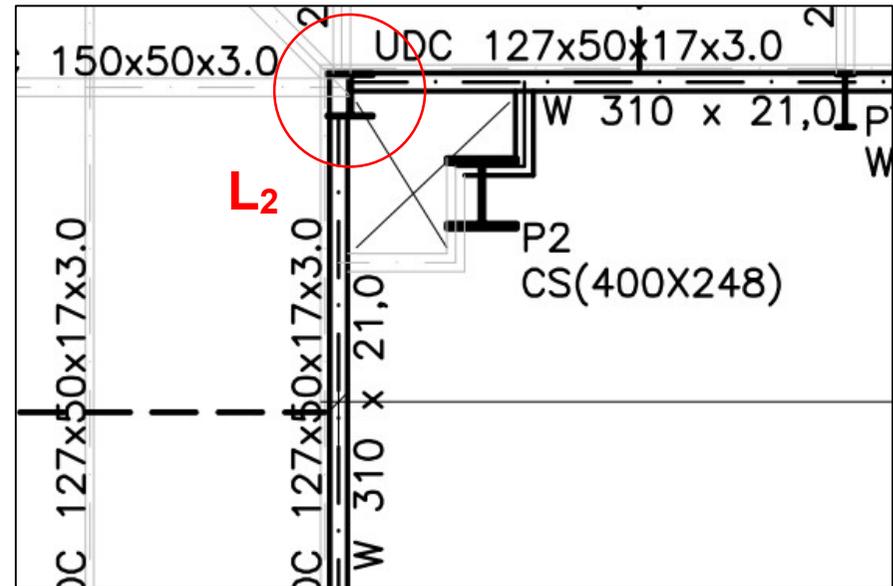
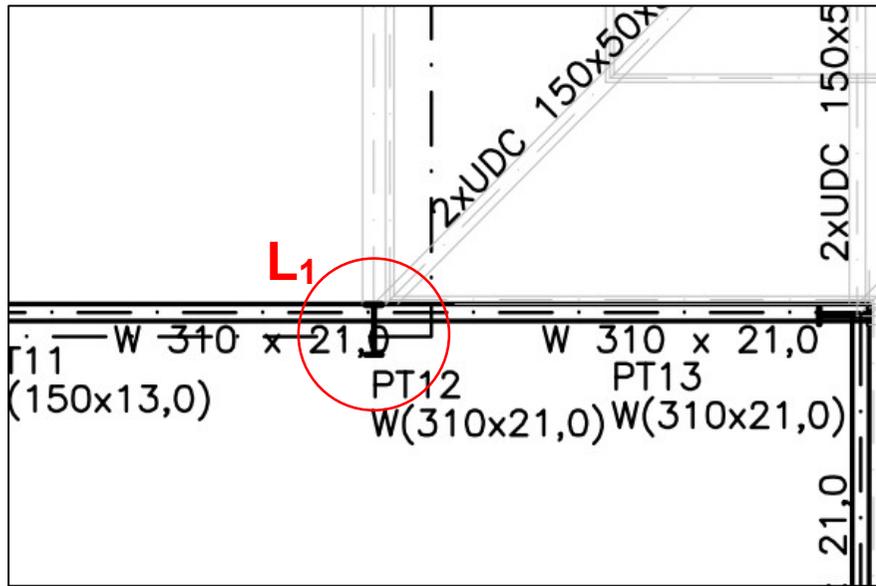
PROJETO ESTRUTURAL
 AUTOR DO PROJETO:
 Eng. José Roberto Oliveira Santos

ENDEREÇO:
 Av. Eng. Gentil Tavares da Motta, 1166 - Getúlio Vargas - Aracaju/SE
 deop@ifs.edu.br TEL: (79)3711-3139

ADMINISTRAÇÃO
 PROJETO EXECUTIVO

CLIENTE: IFS - INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE	
DESENHO:	ESCALA: 1:100
CROQUI EXECUÇÃO ESTRUTURA METÁLICA LAJE TÉCNICA	
	DATA: -
	FOLHA: 02/08

ANEXO C.1 – LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (SEM ESCALA)



ANEXO C.2 – LIGAÇÕES SELECIONADAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (SEM ESCALA)