



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**LUCAS ANDRADE GUERRA PEREIRA**

**INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DA  
ESTRUTURA METÁLICA DE UM PRÉDIO POR MEIO DO ENSAIO NÃO  
DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE**

**OURO PRETO - MG**  
**2021**

**LUCAS ANDRADE GUERRA PEREIRA**

**lguerrapereira@gmail.com**

**INSPEÇÃO VISUAL E AVALIAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DA  
ESTRUTURA METÁLICA DE UM PRÉDIO POR MEIO DO ENSAIO NÃO  
DESTRUTIVO DE LÍQUIDO PENETRANTE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Diogo Antônio de Souza

**OURO PRETO – MG  
2021**

P436i Pereira, Lucas Andrade Guerra.  
Inspeção visual e avaliação de juntas soldadas da estrutura metálica  
de um prédio por meio do ensaio não destrutivo de líquido penetrante.  
[manuscrito] / Lucas Andrade Guerra Pereira. - 2021.  
71 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Deformações e tensões - Ensaios não destrutivos. 2. Construção  
metálica. 3. Juntas (Engenharia). I. Sousa, Diogo Antônio de. II.  
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Lucas Andrade Guerra Pereira**

**Inspecção visual e avaliação de juntas soldadas da estrutura metálica de um prédio por meio do ensaio não destrutivo de líquido penetrante**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 15 de dezembro de 2021

### Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)  
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/01/2022, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0263565** e o código CRC **C2AE61BE**.

Ao grande Arquiteto dedico mais esta etapa vencida.  
À minha Família e amigos agradeço, pelo continuo apoio,  
À Republica “Mata Virgem” agradeço pela eterna fraternidade e *Rock'n'roll*.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador professor Dr. Diogo Antônio de Souza, pelo incentivo e orientação neste trabalho;

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho;

À vida republicana de Ouro Preto;

Ao rock roll sempre presente em minha caminhada;

Aos irmãos republicanos.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.*

Martin Luther King

## RESUMO

A manutenção preventiva é um ramo de destaque dentro dos processos de engenharia, por causa da consequente economia de custos que a manutenção preventiva bem feita representa para os diversos setores industriais. A engenharia deste tipo de serviço baseia-se em testes, caracterizações, para determinar o estado de uma estrutura ou equipamento *in loco*, e criar diretrizes de rotina que devem ser realizadas com o âmbito de prolongar sua vida útil. Para isso, podem ser utilizados testes não evasivos, chamados não-destrutivos. Este trabalho visou a determinação da integridade das juntas soldadas que compõem a estrutura metálica de um prédio por meio de ensaios por líquido penetrante. Para isso, foi realizado um estudo bibliográfico acerca dos conceitos de engenharia de manutenção, bem como dos fenômenos de corrosão e de falha, além das diretrizes da caracterização por líquidos penetrantes. O objetivo foi estudar a relevância deste ensaio para avaliar a condição das juntas soldadas em aço patinável, com soldagem feita por eletrodo revestido. As regiões dos cordões de solda foram escolhidas por meio de inspeção visual, analisando as regiões com consideráveis níveis de corrosão e por serem regiões preferenciais de nucleação de falhas. Nesse sentido, foram escolhidos três pontos distintos para a realização do ensaio de acordo com as normas ASME – SEC.VIII DIV.1 A.8; AWS D1.1 (2006), com auxílio da norma foi possível seguir as etapas definidas para o processo com parâmetro para avaliação. Os resultados da inspeção visual e pelo ensaio por líquido penetrante sugerem algumas indicações de descontinuidades e regiões de corrosão nas regiões de juntas soldadas da estrutura metálica, porém, não foi possível quantificar a significância dessas indicações. Apesar de os testes por líquidos penetrantes terem apontado algumas indicações, não foi conclusivo. Portanto, se faz necessário a realização de outros testes, como ultrassom, mas, aparentemente, a estrutura está íntegra.

**Palavras-chave:** Ensaios não destrutivos, Líquidos penetrantes, Estrutura Metálica, Descontinuidades, Indicações.



## ABSTRACT

Preventive maintenance is a prominent branch within engineering processes, because of the consequent cost savings that well-made preventive maintenance represents for the various industrial sectors. The engineering of this type of service is based on tests, characterizations, to determine the state of a structure or equipment in place, and to create routine guidelines that must be carried out with the scope of prolonging its service life. For this, non-evasive tests, called non-destructive, can be used. This work aimed to determine the integrity of the welded joints that make up the metal structure of a building by means of penetrating liquid tests. For this, a bibliographic study was carried out on the concepts of maintenance engineering, as well as corrosion and failure phenomena, in addition to the guidelines for the characterization by penetrating liquids. The objective was to study the relevance of this assay to evaluate the condition of welded joints in skating steel, with welding made by coated electrode. The regions of the weld beads were chosen by visual inspection, analyzing the regions with considerable corrosion levels and because they are preferred regions of failure nucleation. In this sense, three distinct points were chosen for the test according to ASME - SEC VIII DIV.1 A.8; AWS D1.1 (2006), with the aid of the standard it was possible to follow the steps defined for the process with parameter for evaluation. The results of visual inspection and penetrating liquid assay suggest some indications of discontinuities and corrosion regions in the regions of welded joints of the metal structure, however, it was not possible to quantify the significance of these indications. Although the tests by penetrating liquids pointed out some indications, it was not conclusive. Therefore, it is necessary to perform other tests, such as ultrasound, but apparently the structure is integrated.

**Keywords:** Non-destructive tests, Penetrant liquids, Metallic Structure, Discontinuities, Indications.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma metodológico para previsão de vida útil de componentes da construção de acordo com a série de normas. ....	23
Figura 2: Diligência inspeção e manutenção, bem como pintura e impermeabilização em estrutura de difícil acesso. ....	24
Figura 3: Inspeção da estrutura de um equipamento metálico utilizando técnicas de análise não destrutivas. ....	26
Figura 4: Modelo de relatório de Ensaio por Líquidos Penetrantes. ....	27
Figura 5: representação esquemática do processo de corrosão atmosférica do aço-carbono. ....	28
Figura 6: Diferentes tipos de efeitos presentes em juntas soldadas, que as tornam locais preferenciais de processos corrosivos. ....	29
Figura 7: Fluxograma dos possíveis efeitos de corrosão em juntas soldadas. ....	30
Figura 8: A qualificação para o ensaio por líquido penetrante. ....	34
Figura 9: Esquema de diferentes ângulos de contato para um líquido. ....	35
Figura 10: Desenho esquemático do processo de soldagem por eletrodo revestido. ....	39
Figura 11: Principais discontinuidades em soldas. ....	40
Figura 12: Resultado do ensaio por líquido penetrantes de juntas soldadas. ....	42
Figura 13: Região ensaiada da estrutura metálica da edificação. ....	46
Figura 14: Solvente utilizado no ensaio. ....	47
Figura 15: Penetrante visível lavável a água. ....	48
Figura 16: Revelador utilizado no ensaio. ....	48
Figura 17: Esmerilhadeira Makita. ....	49
Figura 18: Limpeza da amostra. ....	49
Figura 19: Limpeza da amostra. ....	50
Figura 20: Aplicação do líquido penetrante. ....	50
Figura 21: Aplicação do revelador. ....	51
Figura 22: Revelação após tempo de aplicação. ....	51
Figura 23: Calibração do <i>software ImageJ</i> . ....	55

Figura 24: Cordões de solda inspecionados na coluna “X”: V1 (cordão vertical) e H1 (cordão horizontal).....	56
Figura 25: Inspeção por líquido penetrante e análise: coluna “X”, cordão de solda V <sub>1</sub> .....	57
Figura 26: Analisando a falha de componentes de aço soldados em sistemas construtivos.....	58
Figura 27: Inspeção por líquido penetrante e análise: coluna “X”, cordão de solda H1. ....	59
Figura 28: Indicação patológica de falta de fusão em junta soldada, apontada por setas. ....	59
Figura 29: Exemplos de indicações patológicas encontradas em juntas soldadas. Em inclusão de escória. ....	60
Figura 30: Exemplos de indicações patológicas encontradas em juntas soldadas. Em mordedura .....	61
Figura 31: Coluna “Δ”: inspecionada neste trabalho, onde está localizado o cordão H <sub>2</sub> (cordão horizontal).....	62
Figura 32: Inspeção visual da: coluna “Δ”, cordão de solda H <sub>2</sub> . ....	62
Figura 33: Exemplo de corrosão por frestas. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quadro de itens necessários para a realização de ensaios.....	24
Tabela 2: As principais manifestações patológicas e suas causas. ....	32
Tabela 3: Critérios de avaliação de descontinuidades em juntas soldadas. ....	43
Tabela 4: Composição química percentual do Aço Patinável CORTEN USI SAC 300. ....	45
Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço Patinável CORTEN USI SAC 300. ....	45
Tabela 6: Variáveis e indicadores. ....	52
Tabela 7: Relatório de Ensaio por líquido penetrante.....	53
Tabela 8: Indicações encontradas na amostra V <sub>1</sub> ensaiada. ....	58
Tabela 9: Indicações encontradas na amostra H <sub>1</sub> ensaiada. ....	61

## LISTA DE SIGLAS

A	Aprovado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
END	Ensaio não destrutivo
FF	Falta de fusão
ISO	International Organization for Standardization
MO	Mordedura
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NEC	Necessário exame
PO	Porosidade
R	Reprovado
SO	Sobreposição
TL	Trinca longitudinal
TT	Trinca tridimensional
ZTA	Zona termicamente afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS E ELEMENTOS

P	Pressão superficial
$\gamma$	Tensão superficial
d	Diâmetro
C	Comprimento
L	Largura
D	Distância
C	Carbono
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
Ni	Níquel
O	Oxigênio
Si	Silício
P	Fósforo

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ELEMENTOS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Geral.....	20
1.3.2 Específicos .....	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1 ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA .....	22
2.2 INSPEÇÃO.....	25
2.2.1 Registro de resultados.....	26
2.3 O FENÔMENO DA CORROSÃO.....	28
2.4 PREVENÇÃO DA CORROSÃO .....	31
2.5 CORROSÃO DO AÇO.....	32
2.6 CARACTERIZAÇÃO POR LÍQUIDOS PENETRANTES .....	33
2.6.1 Descrição do ensaio.....	33
2.6.2 Propriedades físicas do penetrante .....	34
2.6.3 Tipos de líquidos penetrantes .....	36
2.6.4 Revelação.....	37
2.6.5 Tipos de Reveladores .....	38
2.7 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.....	38

2.8	DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS .....	40
2.9	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO .....	42
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
3.1	TIPO DE PESQUISA .....	44
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.2.1	<i>Seleção amostral.....</i>	46
3.2.2	<i>Procedimento Utilizado .....</i>	46
3.2.3	<i>Removedor/ Solvente.....</i>	47
3.2.4	<i>Líquido Penetrante.....</i>	47
3.2.5	<i>Revelador .....</i>	48
3.2.6	<i>Equipamentos Utilizados .....</i>	49
3.2.7	<i>Execução do ensaio.....</i>	49
3.2.8	<i>Preparação da Superfície .....</i>	49
3.2.9	<i>Aplicação do penetrante .....</i>	50
3.2.10	<i>Aplicação do revelador.....</i>	51
3.2.11	<i>Tempo para interpretação .....</i>	51
3.2.12	<i>Aplicação do removedor .....</i>	52
3.3	VARIÁVEIS E INDICADORES .....	52
3.4	INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS .....	52
3.5	TABULAÇÃO DOS DADOS .....	54
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	54
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
4.1	AVALIAÇÕES DAS AMOSTRAS .....	55
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>65</b>
5.1	CONCLUSÃO .....	65
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	65
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

As avaliações das condições estruturais de sistemas mecânicos são de suma importância para a engenharia, pois a partir de uma análise estrutural é possível prever falhas, e assim, assegurar a confiabilidade e disponibilidade de um componente, máquina, estrutura metálica, entre outros. Consequentemente ocorre um aumento na segurança e uma redução nos custos, uma vez que a manutenção será programada. Nesse sentido, a engenharia de manutenção torna-se um instrumento importante na garantia da integridade das estruturas, tendo a construção civil como destaque entre as principais áreas da engenharia, pelo crescente desenvolvimento de edifícios em aço (COSTA, 2006).

A construção de estruturas metálicas apresenta melhorias de condições em relação a outros tipos de construção. Devido à alta resistência mecânica nesse tipo de estrutura, diminui a necessidade de grande quantidade de colunas, conferindo à construção em aço o aumento da área útil. Em relação às estruturas de concreto armado, as estruturas metálicas possuem menor peso próprio, garantindo um projeto mais leve, reduzindo a carga nas fundações e o custo de instalação (DEBASTIANI, 2017).

As avaliações baseiam-se em normas técnicas para realizar a investigação das falhas presentes nos componentes. Todo material, metálico ou não, pode apresentar descontinuidades. No entanto, há descontinuidades que são consideradas aceitáveis e outras não, há critérios que definem a relevância da descontinuidade para o desempenho estrutural. As características físicas, como dimensão e forma, são preponderantes na avaliação, regida por meios de normas técnicas (ASME Seção V, edição 2004). No critério de aceitação utiliza a (ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8). As normas parametrizam, por meio de ensaios, as características físicas do material analisado, obtendo informações acerca da integridade estrutural local e prevendo adequações por meio de manutenções corretivas. Para que uma estrutura metálica tenha um potencial de vida útil com maior eficiência, é necessária uma abordagem fundamentada em procedimentos normatizados, organizados em um sistema de manutenção, segundo uma lógica de controle de

custo e qualidade estrutural, não pode ser tratada de modo improvisado ou casual, ela deve ser planejada e preventiva.

A qualidade da estrutura não depende apenas das propriedades do material utilizados. São resultantes da interação entre o material e o ambiente. Por exemplo, um dos fatores mais importantes no projeto para o controle de corrosão é o de evitar frestas, onde depósitos de compostos solúveis em água e umidade possam se acumular, facilitando o trabalho da manutenção. Várias situações deste tipo devem ser analisadas: parafusos, rebites, cantoneiras perfiladas, soldas irregulares, respingo de soldas, cantos vivos, descontinuidades e soldas intermitentes (PANNONI, 2007).

A investigação e caracterização de estruturas metálicas podem ser realizadas a partir da realização de Ensaio Não Destrutivos (END). São intitulados “*não destrutivos*” porque não danificam nem destroem a amostra analisada. Esse tipo de ensaio possibilita verificar, por exemplo, a qualidade das soldas, chapas, cabos e outros componentes. Um dos resultados obtidos é a detecção de descontinuidades nas amostras. Os tipos de ensaios não destrutivos mais aplicados em estruturas metálicas são: por líquidos penetrantes, por ultrassom e partículas magnéticas. Há outras técnicas que também são utilizadas: ensaio eletromagnético, ensaio acústico, radiográfico, estanqueidade, termografia, Holiday detector (uniformidade de película seca) (COSTA, 2012).

De acordo com Costa (2012), o uso dos ensaios não destrutivos permite que o profissional tenha condições de avaliar, diagnosticar e apresentar um parecer técnico das condições mecânicas da estrutura. A aplicação desses ensaios pode ser executada unicamente ou em conjunto com outras técnicas de inspeção, por exemplo se utiliza o ensaio por ultrassom para verificar as profundidades das descontinuidades ou quando elas estão presentes apenas no interior do material. Estes ensaios devem ser aplicados na fase de projeto e manutenção, prevendo e evitando qualquer defeito estrutural que prejudique a durabilidade da estrutura (COSTA, 2012).

A primeira etapa da investigação da integridade é a inspeção local por meio de análise visual. Esta parte da observação técnica responsável em todos os pontos da estrutura, com atenção especial a regiões com maior influência de indicações que podem levar à falha do material, como arestas, nós e cantos, juntas soldadas, elementos de ligação. O objetivo da análise visual é a identificação de qualquer anomalia que possa comprometer a integridade da estrutura (PETROBRAS, 1996).

Desta forma, o ensaio por líquido penetrantes é um método que possibilita a detecção de descontinuidades exclusivamente superficiais. Teve início por volta da primeira guerra mundial, utilizado bastante do método em indústrias ferroviárias para inspeção de eixos. De forma rudimentar, na época só era capaz de detecção de grandes trincas, com a evolução dos penetrantes o ensaio foi tornando mais refinado e capacitando a visualização de trincas inicialmente imperceptível a olho nu (INFOSOLDA, 2023).

Devido o processo de soldagem gerar fortes concentradores de tensão, as trincas podem ocorrer devido à atuação de tensões de tração (tensões transientes, residuais ou externas), consideradas descontinuidades mais graves em uma junta soldada. Estas regiões apresentam alta probabilidade de ocorrência durante ou após ao processo de soldagem. Além disso, a realização de ensaio por líquidos penetrantes pode revelar casos de falhas provenientes dos processos de fabricação (MODENESI, 2001).

Portanto, este trabalho irá analisar se as juntas soldadas apresentam descontinuidades superficiais no qual prejudiquem seu desempenho estrutural, por meio de líquidos penetrantes. Diante da problemática, segue a seguinte pergunta:

**Como o ensaio não destrutivo por líquido penetrante da junta soldadas pode contribuir para prevenção de falha da estrutura de um prédio?**

## **1.2 Justificativa**

A soldagem tem se mostrado o mais importante método para união permanente de metais, devido principalmente à sua simplicidade e economia. Além de ser aplicada em construções navais, estruturas civis, tubulações e diversos outros setores, tem-se mostrado essencial para serviços de reparo e manutenção. Apesar de não agir diretamente no objetivo principal de uma estrutura ou equipamento, ela afeta significativamente a segurança e custo da construção, tornando assim, o estudo da qualidade da solda fundamental (OKUMURA *et al.*,1992).

A inspeção feita por líquidos penetrantes, é um ensaio simples, rápido e de fácil execução. Sua função é detectar qualquer falta de fusão que se estende a superfície, trinca e porosidade superficial (ANDREUCCI, 2013). As juntas soldadas em uma estrutura metálica são regiões de

extrema importância pois permite a ligação das estruturas e seus perfis. Porém é uma região que sofre concentrações de tensões devido aos processos de soldagem. Assim, torna-se devido necessário o controle de qualidade de solda e acompanhamento preditivo através do ensaio não destrutivo (ALCAM, 2001).

Nesse contexto, será feita uma inspeção visual em pontos específicos de um prédio construído em estrutura metálica (aço patinável) situado na cidade de Ouro Preto. Sua construção foi concluída em 1995, desde então, a estrutura metálica vem envelhecendo (processo natural). Portanto, esse estudo pode contribuir para o monitoramento e entendimento da atual condição dessa estrutura.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Avaliar algumas juntas soldadas da estrutura metálica de um prédio localizado na cidade de Ouro Preto, por meio de testes com líquidos penetrantes, a fim de determinar a condição da estrutura na região do cordão de solda.

#### **1.3.2 Específicos**

- Realizar um estudo teórico sobre os ensaios não destrutivos, manutenção corretiva e preventiva e suas implicações;
- Determinar a metodologia de ensaio, usando como base a norma ASME – SEC VIII DIV 1 AP 8 e a norma AWS D1.1 (2006), para que os resultados possam ser representativos para a análise;
- Realizar a avaliação visual da estrutura e o ensaio de líquidos penetrantes para detecção de possíveis discontinuidades provenientes do processo de soldagem;

## 1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso foi dividido 5 segmentos, a saber: Neste contexto, foi inicialmente apresentada a introdução no *Capítulo 1*, que formula o problema a ser estudado. Nela estão inclusas informações básicas sobre o que será abordado ao longo do trabalho: avaliação de juntas soldadas pelo método de líquidos penetrantes. Neste capítulo também foi apresentada a justificativa da importância de tal estudo e por final, os objetivos, que indicam o que será feito e analisado.

No *Capítulo 2* é abordada a revisão da literatura, contendo o levantamento de conceitos teóricos sobre a manutenção preventiva e sobre a caracterização por líquidos penetrantes, incluindo uma revisão que explica forma de avaliação das descontinuidades e seus principais motivos.

O *Capítulo 3* apresentará a metodologia de estudo adotado, com os respectivos materiais, métodos, indicadores, instrumentos de coleta e método utilizado para a tabulação dos dados.

Por seguinte, no *Capítulo 4*, são apresentados os resultados dos ensaios de líquidos penetrantes, através de relatórios elaborados pelo o autor.

E, por último, no *Capítulo 5* é apontada a conclusão do estudo realizado, bem como as considerações finais do trabalho e recomendações para novos estudos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Engenharia de manutenção preventiva

Com a evolução da industrialização, o meio empresarial passou a reconhecer a manutenção como atividade de alta relevância, uma vez que esta contribui para a melhoria do desempenho produtivo, para a melhoria da qualidade do produto e para a segurança humana. Isso acontece porque, de acordo com Assis (2004), os custos de manutenção podem chegar até 50% dos custos de produção de uma indústria, sendo assim a manutenção uma área potencial de ganhos de produtividade. A instalação correta de estruturas e equipamentos garante funcionalidade e segurança, não assegura quanto a deterioração a que estão sujeitos (ASSIS, 2004; SOARES, 2015). Nesse contexto, a manutenção preventiva ganha destaque, pois interfere diretamente nos ganhos de produtividade de uma indústria. Outros fatores importantes relacionados a uma manutenção planejada são os efeitos ambientais decorrentes e a segurança pessoal dos envolvidos (ASSIS, 2004).

A norma NBR 5462/94 rege a confiabilidade e manutenibilidade de estruturas e equipamentos. Esta norma define a manutenção preventiva como a manutenção efetuada periódica, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento do item. Ainda estabelece os critérios de manutenção por meio da manutenibilidade, descrita como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. Além disso, todos os conceitos pertinentes à área de manutenção são descritos, além dos critérios observados e metodologias de realização da manutenção (ABNT NBR 5462, 1994).

A série de normas ISO 15686 – *Buildings and constructed assets – service life planning*. Apresenta metodologia para previsão de vida útil de componentes da construção, demonstrado na Figura 1.

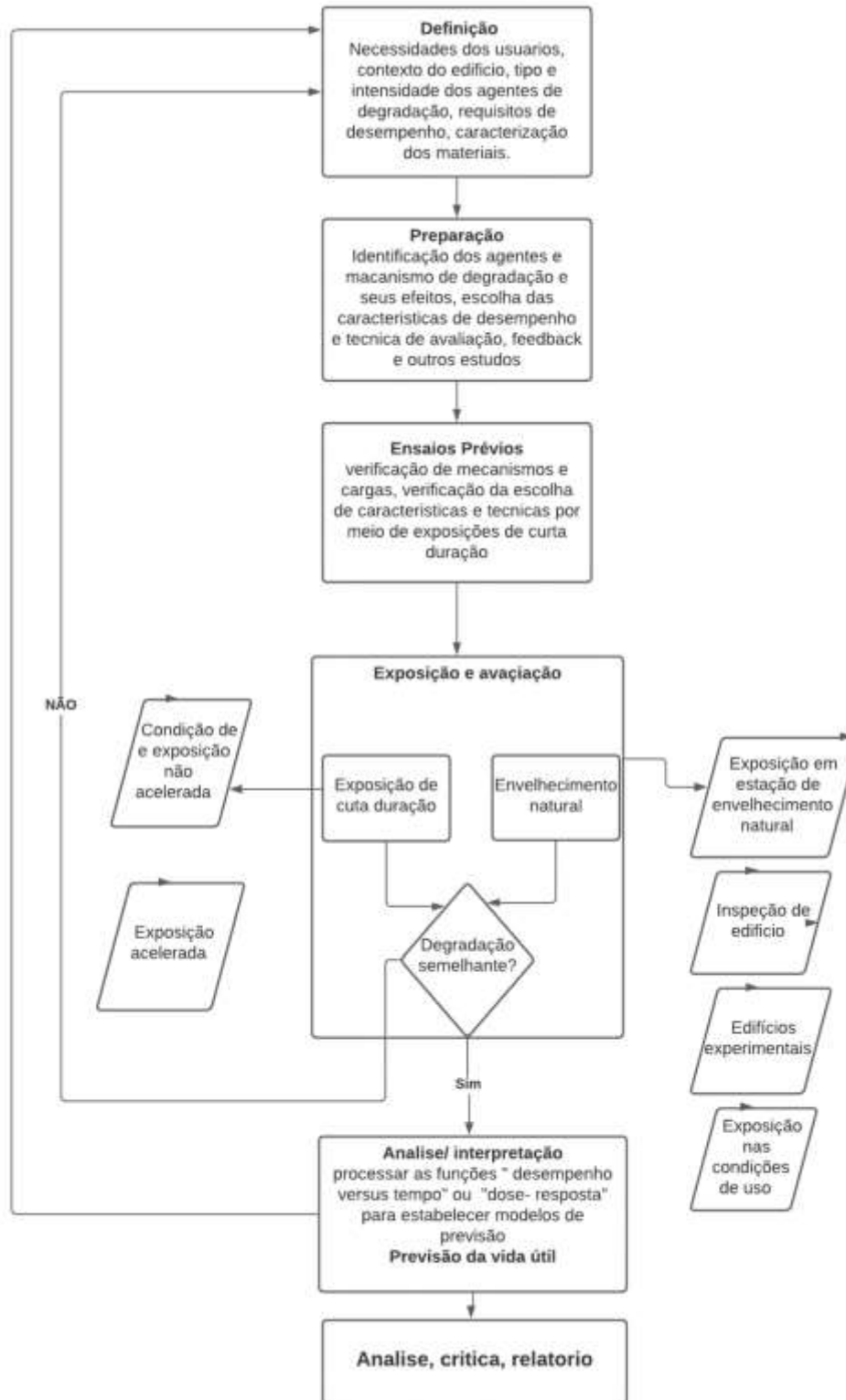


Figura 1: Fluxograma metodológico para previsão de vida útil de componentes da construção de acordo com a série de normas.  
Fonte: ISO 15686, (2011).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece na norma NBR 5674 o procedimento para manutenção de edificações (ABNT NBR 5674, 1999). Os programas de manutenção utilizam-se de caracterizações destrutivas e não destrutivas, além de análises sensoriais para avaliar a integridade de estruturas, podendo direcionar a melhor forma de corrigir as falhas encontradas e prolongar o tempo de vida útil da estrutura. O quadro apresentado na Tabela 1 os itens que devem constar no procedimento ao realizar o ensaio visual, conforme a Norma PETROBRAS N-1597.

Tabela 1: Quadro de itens necessários para a realização de ensaios.

INSPEÇÃO VISUAL		
OBJETIVO	REQUISITOS ADICIONAIS	ESTADO DISPONÍVEL DA SUPERFÍCIE
INSPEÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO	CONDIÇÃO SUPERFICIAL REQUERIDA PARA O ENSAIO
SEQUÊNCIA DO ENSAIO	NORMAS DE REFERÊNCIA	SISTEMA DE REGISTRO ADICIONAIS
ILUMINAÇÃO REQUERIDA		

Fonte: Petrobras N-1597, (1996).

A Figura 2 mostra o diligenciamento em estruturas metálicas realizados por uma empresa, indicando que mesmo em regiões da estrutura de difícil acesso, a avaliação da integridade estrutural se faz necessária.



Figura 2: Diligência inspeção e manutenção, bem como pintura e impermeabilização em estrutura de difícil acesso.

Fonte: Tecalt, (2018).



Cabral (2006) destaca a manutenção preventiva como uma das práticas de engenharia mais importantes, pois minimiza perdas e garante a confiabilidade do processo, visto que aumenta a disponibilidade de máquinas e estruturas. A manutenção corretiva é realizada no momento de falha do equipamento ou estrutura, enquanto que a manutenção preventiva acontece antes da falha se efetivar, diminuindo as perdas e custos decorrentes da parada inesperadas de equipamentos. Todos os equipamentos mecânicos e estruturas demandam manutenção, uma vez que o desgaste é inerente, seja por fadiga, ambiente, sobrecarga, etc. A durabilidade de um determinado equipamento pode estar relacionada a práticas simples que, pode ser desde uma troca de óleo até o estabelecimento de uma vistoria periódica (CABRAL, 2006).

## **2.2 Inspeção**

Toda edificação, assim como, todos os equipamentos de construção mecânica devem ser submetidos a uma rotina de inspeção e manutenção para assegurar o funcionamento, de forma que eventuais processos de degradação sejam constatados e tratados previamente (SILVA, 2015). A inspeção é definida como a análise sistemática das condições operacionais de um item, após a verificação do seu estado real em relação às condições operacionais exigidas. Por meio da inspeção torna-se possível determinar as diligências necessárias para eliminar as falhas e preservar o desempenho operacional do item (FERREIRA, 1998). A Figura 3 mostra a realização de procedimentos investigativos não destrutivos em um equipamento metálico.

Costa (2012) elucida que nas inspeções visuais executadas nos períodos de manutenção são seguidos de ensaios não destrutivos mais específicos, tais como: verificação de defeitos de pintura, danos por corrosão com medição da espessura das peças por técnicas de ultrassom, detecção de fissuras, entre outras técnicas de avaliação com uso de procedimentos específicos. Costa ainda afirma que de acordo com o tipo de construção, a manutenção da edificação tem como finalidade repor a capacidade do edifício em atender as necessidades dos usuários." (COSTA, 2012).



Figura 3: Inspeção da estrutura de um equipamento metálico utilizando técnicas de análise não destrutivas.

Fonte: UTMAAX, (2013).

A inspeção é definida por Xenos (1998) como a realização de uma série de ensaios destrutivos e não destrutivos que, adicionada a uma vistoria técnica, irão atestar a integridade de uma estrutura ou equipamento mecânico. Os ensaios realizados nas inspeções são fundamentais para identificar pontos que demandam manutenção preventiva ou corretiva. Dentre os ensaios, os não destrutivos (END) são preferenciais pois não há a necessidade de destruição da amostra, possibilitando que o ensaio seja realizado diretamente no componente de controle (XENOS, 1998).

### **2.2.1 Registro de resultados**

Os resultados devem ser registrados por meio de um sistema de identificação e rastreabilidade que permita relacionar o local ensaiado com o relatório. No relatório devem conter os seguintes itens:

1. Nome do emitente (órgão da Petrobras ou firma executante);
2. Identificação numérica;
3. Identificação da peça, equipamento ou tubulação;
4. Número e revisão do procedimento;
5. Registro dos resultados;
6. Normas e/ou valores de referência para interpretação e avaliação dos resultados;
7. Laudo indicando aceitação, rejeição ou recomendação de ensaios complementares;
8. Data;
9. Identificação e assinatura do inspetor responsável.

A Figura 4 exemplifica um relatório de inspeção de uma estrutura metálica. Esse relatório deve compreender os itens necessários para a avaliação. A partir do modelo, foi elaborado um relatório para este trabalho.



**RELATÓRIO DE ENSAIO  
LÍQUIDO PENETRANTE**

IDENTIFICAÇÃO DO CDD

PROCEDIMENTO - N.º REV. PR-001 Rev. 7 (Mai/2014)		CRITÉRIO DE ADEQUAÇÃO ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice B		RELATÓRIO N.º 003	
MATERIAL Aço carbono 1020		CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE Soldado por processo MIG		FOLHA 01 de 02	
N.º Amostra 03				NORMA DE REFERÊNCIA ASME Seção V, edição 2004	

	REMOVEDOR	PENETRANTE	REVELADOR
Fabricante	Metal Chek	Metal Chek	Metal Chek
Marca/Modelo	Metal Chek TMC 10	Metal Chek VP30	Metal Chek D70
Lote	13383	13396	17435

N.º	Tipo de Descontinuidade	Localização (mm) de ... a ...	Dimensão (mm)	LAUDO	Coment. / Observação
01	PO	451 a 454mm	3mm	A	O PO é considerado uma indicação irrelevante, pois não tem dimensão de 4,8 mm para ser reparado.
02	TT	455 a 457mm	2mm	R	
					A TT é uma indicação relevante e não se enquadra no critério de aceitação, a peça está reprovada e deve passar por um processo de reparo para remoção do defeito.

LEGENDA:

Laudo: A: Aprovado R: Reprovado NEC: Necessário Exame	Descontinuidades: TL: Trincas Longitudinais TT: Trincas Transversais SO: Sobrepontagem	PF: Falta de Furo PO: Porosidade MO: Mordedura
--	---	--

APROVADO       REPROVADO       NEC

NOME DO CANDIDATO Evander Luiz Abreu Farias		NÚMERO	
ASSINATURA DO EXAME		ASSINATURA DO CANDIDATO	
EMPRESA UEZO	DATA 17/10/2014	NOME DO EXAMINADOR	

Figura 4: Modelo de relatório de Ensaio por Líquidos Penetrantes.  
Fonte: Andreucci, (2014).

### 2.3 O Fenômeno da Corrosão

A corrosão é um processo espontâneo cuja compreensão é de extrema importância para o profissional da área de manutenção e inspeção. Em caso de não haver o controle bem definido, pode representar a destruição completa dos materiais metálicos (GENTIL, 1982). Na construção civil, assim como diversas atividades da engenharia, as perdas econômicas diretas e indiretas decorrentes do processo de corrosão, têm impacto significativo na integridade da estrutura e nos custos de manutenção desta.

Tratam-se de reações químicas e eletroquímicas na superfície dos metais, com princípios bem definidos, que convertem o metal ou componente metálico em óxido, hidróxido ou sal. No caso do aço-carbono, agentes como a água e os gases presentes na atmosfera atuam na superfície do aço formando uma camada chamada ferrugem. A ferrugem é uma mistura de fases que, em condições favoráveis, levam à formação de óxidos de ferro a partir do ferro metálico superficial. (GENTIL, 1982; SILVA *et al.* 2015), A representação esquemática do processo de corrosão atmosférica do aço-carbono é mostrada na Figura 5.

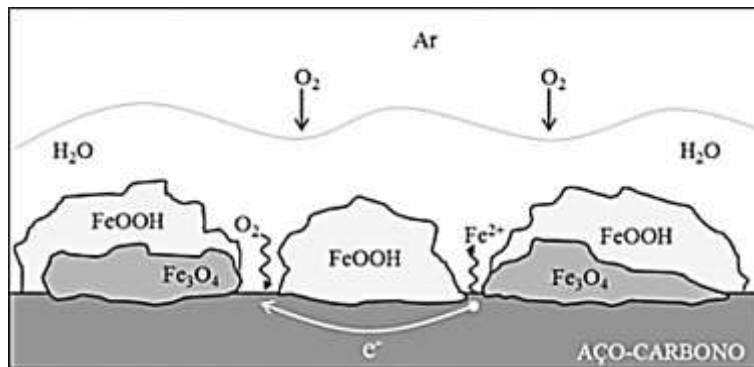


Figura 5: representação esquemática do processo de corrosão atmosférica do aço-carbono. Fonte: Almeida, (1999).

Um dos cuidados que se deve tomar ao qualificar um procedimento de soldagem é a realização de uma inspeção visual final com ênfase em corrosão (ZEEMANN, 2003). A junta soldada apresenta efeitos superficiais decorrentes do processo de soldagem, e do meio, que devem ser levados em consideração. A Figura 6 mostra os efeitos que devem ser observados na análise de juntas soldadas em função da corrosão.



Figura 6: Diferentes tipos de efeitos presentes em juntas soldadas, que as tornam locais preferenciais de processos corrosivos.  
Fonte: Zeemann, (2003).

Os efeitos que podem ser observados no cordão de solda são efeitos galvânicos, efeitos de tensão e efeitos de fresta. Os efeitos galvânicos são resultantes da interação entre os diferentes elementos presentes no metal de solda e no metal de adição em meio aquoso. O meio possibilita que os compostos reajam desencadeando a corrosão. Os efeitos de tensão são mais perceptíveis na Zona Termicamente Afetada (ZTA), e são decorrentes da grande taxa de variação de ciclos térmicos decorrentes do processo de soldagem. As tensões residuais presentes na ZTA podem levar à situações de corrosão-fatiga e/ou fragilização por hidrogênio. Os efeitos de fresta são decorrentes da presença de descontinuidades superficiais, se a solda não for posteriormente usinada, sempre favorece mecanismos de corrosão localizada por frestas.

O fluxograma apresentado na Figura 7 resume as possibilidades decorrentes em função da corrosão que podem ser encontradas em juntas soldadas.

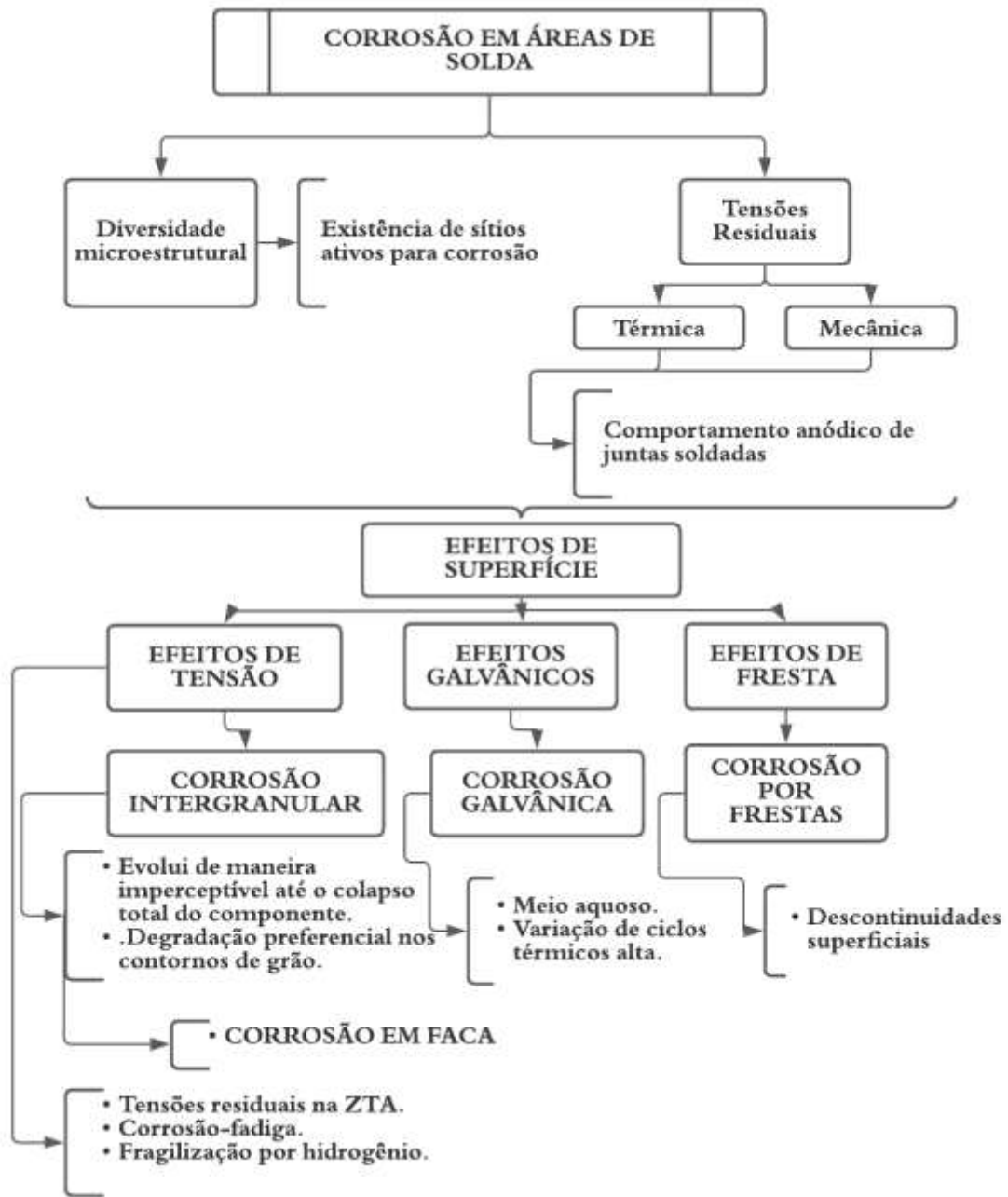


Figura 7: Fluxograma dos possíveis efeitos de corrosão em juntas soldadas.  
Fonte: Zeemann, (2003).

## 2.4 Prevenção da Corrosão

Desde a concepção de um projeto, simplificar as formas das estruturas respeitando a função, a fabricação e a resistência mecânica, é uma das formas de minimizar o efeito da corrosão (LIMA, 2007). Sempre tendo em vista evitar frestas, onde depósitos de compostos solúveis em água e humidade possam se acumular, situações desse tipo devem ser analisadas, bem como: parafusos, rebites, cantoneiras perfiladas, soldas irregulares, respingo de solda, cantos vivos, descontinuidades e soldas intermitentes. Como citado anteriormente, um dos objetivos importantes do engenheiro projetista, é de garantir uma estrutura o mais protegida possível da umidade, de forma que os perfis sejam orientados para não acumularem resíduos e umidade onde a ventilação e a drenagem sejam eficientes (LIMA, 2007). Também aplicando medidas preventivas para evitar como pintura adequada ao projeto com as proteções certas para cada tipo de projeto levando em consideração as regiões e outras características

Para uma boa vida útil da estrutura metálica como mostra o Sacchi (2016) o usuário deve seguir três princípios básicos: seguir procedimentos corretos de manutenção, uso de material correto para substituição de partes corroídas e fazer de forma periódica a manutenção do revestimento protetor. Claro que tudo isso conta com a operação de um profissional qualificado.

Primeiramente, faz uso do ensaio visual, qualificada pela norma da Petrobras N – 1597. A inspeção visual comumente é a primeira ferramenta a ser utilizada, pois a partir do ensaio visual define se o material ensaiado necessita de maior investigação. O ensaio visual busca analisar quando ensaiado em uma junta soldada os seguintes quesitos, citado por (SACCHI, 2016):

- Aspecto externo geral da solda.
- Porosidade superficiais.
- Presença de escoria na superfície
- Mordeduras
- Respingos excessivos.
- Trincas visíveis
- Falta de penetração quando visíveis pelo lado oposto
- Desalinhamentos
- Entalhe sem reforço ou mal preenchido
- Comprimento ou garganta de solda em desacordo com o projeto

De acordo com Pravia e Betinelli (2016), as manifestações principais em estruturas de aço são destacadas em seis tipos, como detalhado na Tabela 2.

Tabela 2: As principais manifestações patológicas e suas causas.

<b>Manifestações Patológicas No Aço</b>	<b>Principais Causas</b>
Corrosão localizada	Causada por deficiência de drenagem das águas pluviais e deficiência de detalhes construtivos, permitindo o acúmulo de umidade e de agentes agressivos.
Corrosão generalizada	Causada pela ausência de proteção contra o processo de corrosão.
Deformações excessivas	Causadas por sobrecargas ou efeitos térmicos não previstos no projeto original, ou ainda, deficiência na disposição de travejamentos.
Flambagem local ou global	Causadas pelo uso de modelos estruturais incorretos para verificação da estabilidade, ou deficiências no enrijecimento local de chapas, ou defeitos de imperfeições geométricas não consideradas no projeto de cálculo.
Fatiga e propagação de fraturas	Falhas essas iniciadas por concentração de tensões, devido a detalhes de projeto inadequados, defeitos de solda, ou variações de tensão não previstas no projeto.

Fonte: Pravia; Betinelli, (2016).

Deve também ter um compromisso com a pintura, com inspeção visual periódica buscando identificar qualquer eventual defeito, são considerada as principais falhas em pintura industrial: poros, bolhas, enrugamento, escorrimento, impregnação de abrasivos e crateras. Quando encontrado tal falha, deve realizar se um bom planejamento de manutenção para obter um bom diagnostico (SACCHI, 2016).

## 2.5 Corrosão do aço

A corrosão do aço é um processo espontâneo que, como visto anteriormente, envolve a reação de oxirredução onde o ferro é oxidado, indo para seu estado de menor energia em forma de óxido. O estudo com aço patinável surgiu após o desenvolvimento do Aço Corten. Isto ocorreu após haver uma demanda do mercado norte americano para um aço com maior resistência mecânica e melhor resistência à corrosão por parte das companhias ferroviárias (COSTA 2019). Com o passar do tempo, o aço Corten foi expandindo aplicações para outros segmentos como construção civil, naval, entre outros. cujo nome vem da formação das palavras “corrosion resistance” (Cor) e



“tensile strength” (Ten). Também conhecido comercialmente como Weathering Steels – Aços aclimáveis ou aços patináveis. Os elementos presentes no aço Corten Cu, Cr, Ni, Si, têm efeito benéfico no controle da corrosão (COSTA, 2019).

O que caracteriza os aços patináveis é a formação de uma camada superficial chama pátina. Trata-se de uma película de óxidos aderentes que reduzem a velocidade de ataque dos agentes corrosivos presentes no meio ambiente. Para propiciar a formação da película protetora, é necessária a interação de fatores estruturais, ambientais e geométricos. Os fatores estruturais estão ligados à composição química do aço. Adição de elementos de liga como o Cu e P, além de Cr, Ni e Si, e o controle desses elementos propiciam ao aço melhoria nas resistências mecânica e à corrosão. Fatores ambientais estão relacionados à concentrações de dióxido de enxofre e cloreto de cálcio presentes na atmosfera, ciclos de temperatura, velocidade dos ventos, são fatores que em determinados níveis podem ser benéficos para a formação da pátina, como podem ser prejudiciais às características dos aços. Os fatores ligados à geometria dizem respeito à interação da superfície com o meio, aquoso ou úmido (CORUS, 2001; GMECCO, 2001; PANNONI, 1987).

## **2.6 Caracterização Por Líquidos Penetrantes**

### **2.6.1 Descrição do ensaio**

O ensaio por líquidos penetrantes é aplicado normalmente em peças de metais não ferrosos. Também é utilizado para outros tipos de materiais sólidos, como metais ferrosos, cerâmicas vitrificadas, vidros, plásticos e outros que não sejam porosos. Por meio deste ensaio torna-se possível detectar discontinuidades abertas na superfície das peças, como trincas, poros, dobras, que não sejam visíveis a olho nu (INFOSOLDA, 2013).

O ensaio consiste em aplicar um líquido penetrante sobre a superfície a ser ensaiada. Após remover o excesso da superfície, faz-se sair da discontinuidade o líquido penetrante retido, utilizando-se para isso um revelador (ANDREUCCI, 2014). A Figura 8 mostra uma peça sob ação do líquido, com as discontinuidades reveladas por este.



Figura 8: A qualificação para o ensaio por líquido penetrante.  
Fonte: Prado Filho, (2016).

## 2.6.2 Propriedades físicas do penetrante

### a) Capilaridade

De acordo com Andreucci (2014), os mecanismos de funcionamento estão diretamente relacionados com as propriedades específicas de cada material. A capilaridade é um dos fenômenos principais de ação do líquido penetrante, uma vez que estes têm a propriedade física de penetrar em tubos de pequenos diâmetros, aproximando de diâmetros inferiores de até 0,1mm (ANDREUCCI, 2014).

Como resultado conjunto da tensão superficial, da molhabilidade e da viscosidade, o líquido é capaz de penetrar na descontinuidade pelo princípio da capilaridade e não pela gravidade, portanto possibilita a aplicação em qualquer posição (SILVA, 2011).

### b) Tensão Superficial

A tensão superficial pode ser determinada como a força que existe na superfície de líquidos em repouso, essa tensão superficial consequência de fortes ligações intermoleculares, é definida como força por unidade de comprimento (N/m) que duas camadas superficiais exercem uma sobre a outra (ANDREUCCI, 2014).

De acordo com a equação da tensão superficial, pode-se:

$$P = \frac{2 \cdot \gamma}{R} \quad (1)$$

P = pressão superficial;

$\gamma$  = tensão superficial;

R = raio do arco da concavidade ou convexidade;

No entendimento de Andreucci (2014), quando aplicar um líquido em tubo capilar (tubo de pequeno diâmetro), a atração das moléculas pode ser maior ou menor do que a força de coesão interna do líquido, desta forma provoca a formação de uma concavidade ou uma convexidade na superfície do líquido, forma que apenas pode ser obtida devido ao efeito de tensão superficial nos líquidos.

### c) Molhabilidade

Uma das características relevantes para um bom penetrante é sua habilidade de molhar e espalhar se em toda superfície ensaiada, quanto maior a molhabilidade melhor é o penetrante. Suas características estão diretamente associadas com a tensão superficial, por isso são adicionados a formulação do penetrante agentes tensoativos (ANDREUCCI, 2014). A Figura 9 ilustra a influência da molhabilidade no ângulo de contato de um líquido em uma superfície, penetrantes típicos tem ângulo de contato em torno de 10° (SILVA, 2011).

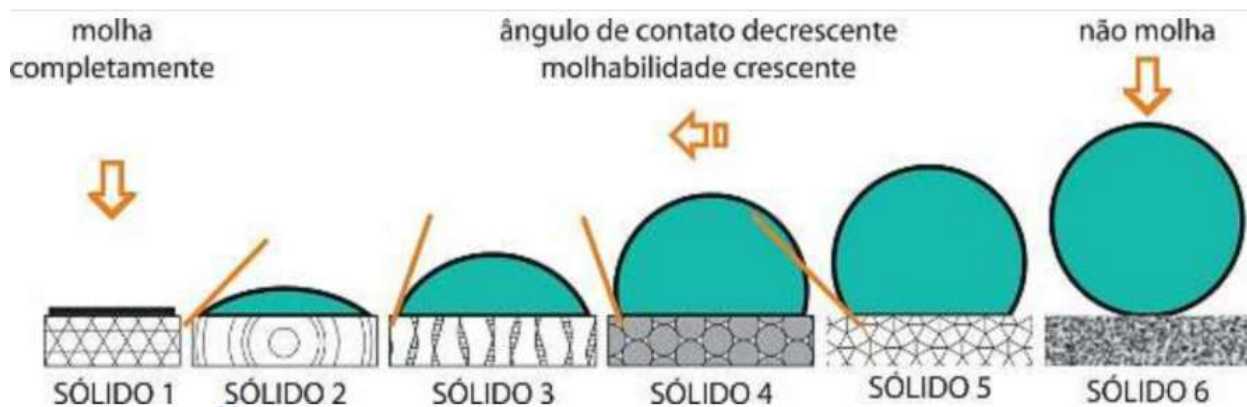


Figura 9: Esquema de diferentes ângulos de contato para um líquido.

Fonte: Dapper, (2013).

### **2.6.3 Tipos de líquidos penetrantes**

Os líquidos penetrantes são classificados quanto à visibilidade e quanto ao tipo de remoção de excesso. Quanto à visibilidade podem ser fluorescentes, denominado Método A, ou podem ser visíveis coloridos (método B). No método A, os líquidos atuantes são constituídos por substâncias naturalmente fluorescentes, são ativados e processados para apresentarem alta fluorescência quando excitados por raios ultravioleta (luz negra). Os líquidos visíveis coloridos são geralmente de cor vermelha, para que as indicações produzam um bom contraste com o fundo branco do revelador tomando como base Petrobras, Norma N-1596 F. (ANDREUCCI, 2014).

#### **a) Laváveis em água**

Os líquidos penetrantes deste tipo são elaborados de tal maneira que permitem a remoção do excesso com água; esta operação deve ser cuidadosa; se for demorada ou se for empregado jato de água, o líquido pode ser removido do interior das descontinuidades (ANDREUCCI, 2014).

#### **b) Pós-emulsificáveis**

Neste caso, os líquidos penetrantes são fabricados de maneira a serem insolúveis em água. A remoção do excesso é facilitada pela adição de um emulsificador, aplicado em separado. Este combina-se com o excesso de penetrante, formando uma mistura lavável com água. Emulsificador é um composto químico complexo que, uma vez misturado ao líquido penetrante à base de óleo, faz com que o penetrante seja lavável pela água. Ele é utilizado na fase de remoção do excesso (ANDREUCCI, 2014).

#### **c) Removíveis por solventes**

Estes tipos de líquidos penetrantes são fabricados de forma a permitir que o excesso seja removido com pano seco, papel-toalha ou qualquer outro material absorvente que não solte fiapo, até que reste uma pequena quantidade de líquido na superfície de ensaio; esta deve ser então removida com um solvente removedor apropriado (ANDREUCCI, 2014).

#### **d) Penetrante fluorescente lavável com água**

Esse método é bom para detectar quase todos os tipos de defeitos, menos arranhaduras ou defeitos rasos. Pode ser utilizado em peças não uniformes e que tenham superfície rugosa; confere boa visibilidade. É um método simples e econômico (ANDREUCCI, 2014).

#### **e) Penetrante fluorescente pós-emulsificável**

É mais brilhante que os demais, tem grande sensibilidade para detectar defeitos muito pequenos e/ou muito abertos e rasos. É um método muito produtivo, pois requer pouco tempo de penetração e é facilmente lavável, mas é mais caro que os outros. Penetrante visível (lavável por solvente, em água ou pós-emulsificável). Estes métodos são práticos e portáteis, dispensam o uso de luz negra, mas têm menos sensibilidade para detectar defeitos muito finos; a visualização das indicações é limitada. As características dos penetrantes sem dúvida nos ajudarão a escolher o método mais adequado para um determinado ensaio, porém o fator mais importante a ser considerado são os requisitos de qualidade que devem constar na especificação do produto. É com base nestes requisitos que devemos escolher o método. (ANDREUCCI, 2018).

#### **2.6.4 Revelação**

O revelador é um tipo de talco que absorve o penetrante das discontinuidades para revelá-las ao inspetor. Além de cumprir esta função, deve ser capaz de formar uma indicação a partir de um pequeno volume de penetrante retido na discontinuidade, e ter capacidade de mostrar separadamente duas ou mais indicações próximas. De acordo com Silva, (2011), este produto deve apresentar certas propriedades para atender a todas estas características necessárias:

- a) deve ser fabricado com substâncias absorventes, que favorecem a ação de mata-borrão;
- b) quando aplicado, deve cobrir a superfície de exame, promovendo assim o contraste;
- c) precisa ter granulação fina;
- d) tem de ser fácil de aplicar, resultando numa camada fina e uniforme;
- e) deve ser umedecido facilmente pelo penetrante;
- f) deve ser de fácil remoção, para a limpeza final;
- g) deve aderir à superfície;
- h) não deve ser tóxico, nem atacar a superfície de exame.

Como ocorre com os líquidos penetrantes, existem também no mercado vários tipos de reveladores, para diversos tipos de aplicação. O critério de escolha deve ser similar ao do líquido penetrante. Os reveladores são constituídos por uma mistura fofa de sílica e talco que deve ser

mantida seca. São indicados para uso em sistemas estacionários ou automáticos (ANDREUCCI, 2018).

### **2.6.5 Tipos de Reveladores**

Os tipos de reveladores assim elucidado por Andreucci, (2018):

#### **a) Revelador aquoso**

Neste tipo de revelador, o pó misturado com água pode ser aplicado por imersão, derramamento ou aspersão (borrifamento). Após a aplicação, as peças são secas com sopradores térmicos, ou em fornos de secagem.

#### **b) Revelador úmido não aquoso**

Neste caso, o talco está misturado com solventes-nafta, álcool ou solventes à base de cloro. Eles são aplicados com aerossol ou pistola de ar comprimido, em superfícies secas. A função principal desse revelador é proporcionar um fundo de contraste branco para os penetrantes visíveis, resultando em alta sensibilidade.

#### **c) Revelador em película**

É constituído por uma película adesiva plástica contendo um revelador que traz o líquido penetrante para a superfície. À medida que a película seca, formam-se as indicações das discontinuidades. Este método permite que, após o ensaio, possa destacar-se a película da superfície e arquivá-la.

## **2.7 Processo de soldagem por Eletrodo Revestido**

A soldagem por eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), conhecido também como soldagem manual a arco elétrico, a solda é feita por calor gerado pelo arco elétrico entre a extremidade do eletrodo revestido e a peça trabalhada, que funde o metal, a alma do eletrodo e o revestimento do fluxo (O`BRIEN, 1991).

Assim descrito por Modenesi & Marques (2000), o eletrodo é formado por um núcleo metálico, conhecido por “alma”, que possui um comprimento na faixa de 250mm à 500mm. Também é composto por uma cama de revestimento intitulada como “fluxo”, que soma se ao diâmetro do eletrodo uma faixa de 2mm a 8 mm.

No processo de soldagem, o arco e a poça metálica são protegidos da atmosfera por uma, cortina gasosa oriunda da queima do revestimento e a decomposição de seus constituintes. Desta forma, a escória líquida, de menor densidade do que o metal base, protege a poça de fusão durante a solidificação. Em seguida a soldagem é imprescindível a retirada dessa camada protetora, que é solidificada em forma de escória sólida (FILHO, 2005). A Figura 10 demonstra os componentes do eletrodo, assim como o arco elétrico e o produto de solda (metal de adição).

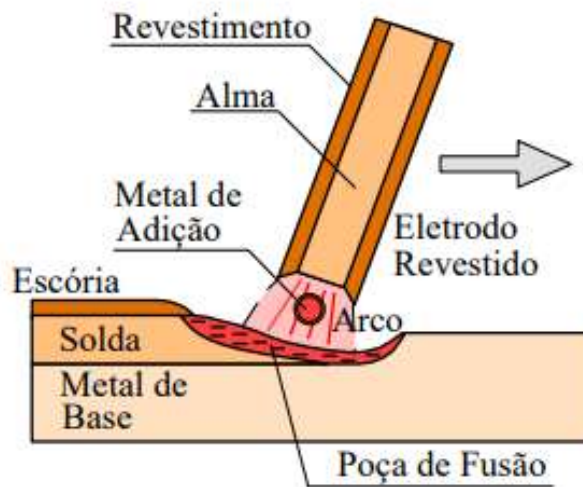


Figura 10: Desenho esquemático do processo de soldagem por eletrodo revestido.  
Fonte: Modenesi & Marques, (2000).

Para operação do processo de soldagem pode ser feita por corrente contínua (CC) ou alternada (CA), depende do tipo de revestimento. No caso da corrente contínua, a polaridade pode ser reversa ou direta. O uso do CC é comumente associado a melhor estabilidade do arco e qualidade de depósitos. Já os benefícios de utilizar a CA é a menor suscetibilidade ao sopro magnético e menor queda de tensão ao longo do cabo de ligação, obtendo maior vantagem onde a soldagem deve ocorrer a distância (MARQUES, 1991).

## 2.8 Descontinuidades em juntas soldadas

Na análise de uma junta soldada, tudo o que pode ser observado e considerado como qualquer interrupção da estrutura típica, chama se descontinuidade. Portanto, pode-se considerar como descontinuidade a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda. Logo, não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. A avaliação se dá pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedade medida com os níveis estabelecidos em norma, projeto ou contrato pertinente (MODENESI, 2001).

Os defeitos mais comuns em juntas soldadas, de acordo com Andreucci (2018) e Modenesi (2001) são: trincas superficiais, porosidade superficial, falta de penetração e mordeduras. As trincas de restrição são consequência das tensões de origem térmica geradas durante a soldagem e da incapacidade do material se deformar para absorver estas tensões. Quanto maiores as restrições externas à solda que impedem a peça soldada de se mover durante o processo, maior a probabilidade de formação de trincas. A Figura 11 representa as principais descontinuidades.

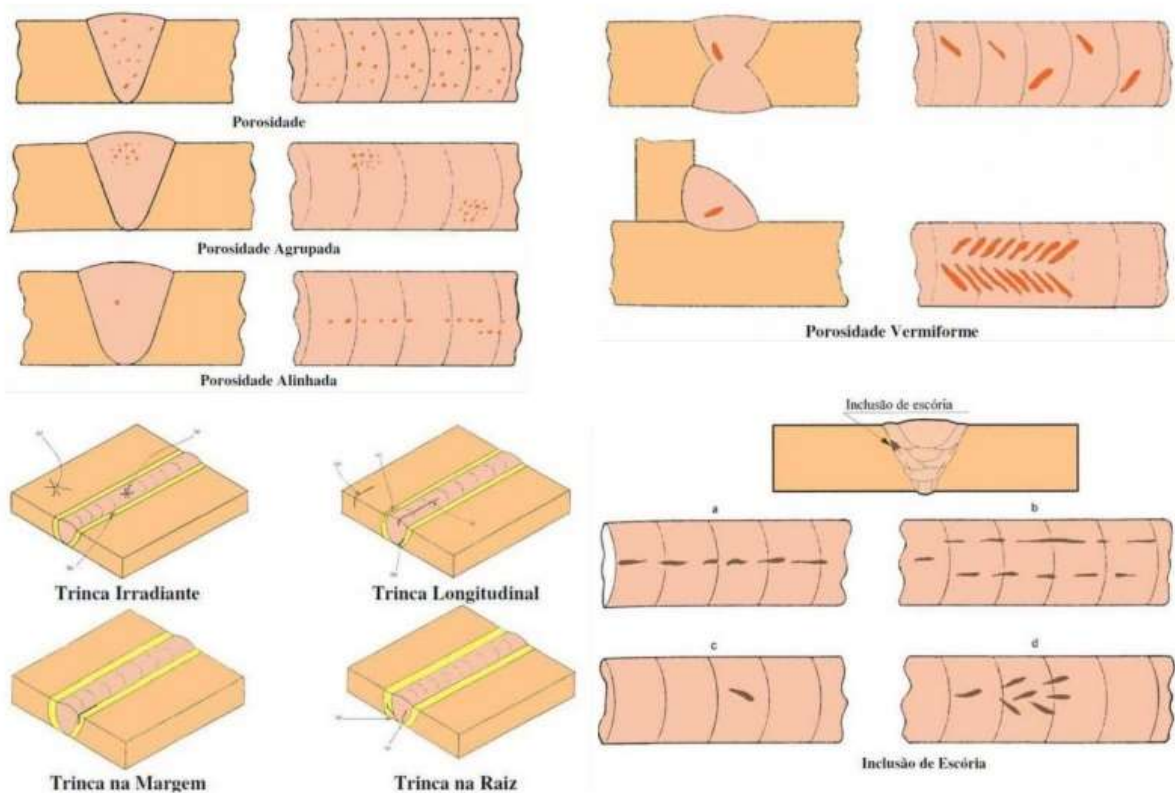


Figura 11: Principais descontinuidades em soldas.  
Fonte: Modenesi, (2001).



Sobre a perspectiva de Mordenesi (2001), a porosidade uma das discontinuidades, pode se desenvolver através da evolução de gases, na região posterior da poça de fusão, durante a solidificação da solda. Os poros podem apresentar formato esférico, comumente observado, ou podem apresentar forma alongada (porosidade vermiforme), associada ao uso do hidrogênio no processo de soldagem. Suas principais origens são normalmente devido a contaminação por particulados(sujeiras), oxidação e umidade na superfície do metal base, também pode ser causado pelo consumíveis de soldagem ou pelo o próprio equipamento irregular. Elucidado também por Mordenesi (2001), os principais aspectos que influencia discontinuidades em diversos tipos de soldas:

- Aparência superficial (profundidade de penetração do eletrodo nas peças, fusão da superfície, formato irregular da solda, deposição de material do eletrodo nas peças, trincas e cavidades).
- Dimensão da Solda.
- Resistencia e ductilidade da junta.
- Descontinuidades internas (trincas, porosidade, cavidades de contração).
- Separação das peças e expulsão do metal fundido.
- Variabilidade das características de um conjunto de soldas (como exemplo, desgaste dos eletrodos).

Segundo Andreucci, (2014), as indicações de trincas são divididas em categorias:

- a) **Indicações em linha contínua:** Podem ser causadas por trincas, dobras, riscos ou marcas de ferramentas. Trincas geralmente aparecerem como linhas sinuosas, dobras de forjamento como tem a aparência de linha finas.
- b) **Linha intermitente:** Podem ser causadas pelas mesmas discontinuidades acima. Quando a peça é retrabalhada por esmerilhamento, martelamento, forjamento, usinagem, etc., porções das discontinuidades abertas à superfície podem ficar fechadas.
- c) **Arredondadas:** Causadas por porosidade ou por trinca muito profunda, resultante da grande quantidade de penetrante que é absorvida pelo revelador.
- d) **Interrompidas finas e pequenas:** Causadas pela natureza porosa da peça ou por grãos excessivamente grosseiros de um produto fundido.
- e) **Defeituosas:** Normalmente não são definidas tornando-se necessário ensaiar a peça. As vezes provém de porosidade superficial. Podem ser causadas por lavagem insuficiente (falsas).

## 2.9 Critério de Aceitação

De acordo com as normas (ASTM E165, ASME SEC.VIII DIV.1 AP.8 e SEC. I), a avaliação das indicações é uma evidência de uma imperfeição mecânica. Somente indicações com dimensões maiores que 1/16 pol. (1,5 mm) devem ser consideradas como relevante. Para as indicações de trinca, esta norma existe dois tipos, são definidas da seguinte forma:

- a) Uma indicação linear é aquela tendo um comprimento maior que três vezes a largura.
- b) Uma indicação arredondada é aquela na forma circular ou elíptica com comprimento igual ou menor que três vezes a largura.

Todas as superfícies examinadas devem estar isentas de:

- a) Indicações lineares relevantes.
- b) Indicações arredondadas relevantes, maiores do que 5,0 mm.
- c) Quatro ou mais indicações relevantes de formato arredondado, alinhadas, separadas por uma distância igual ou menor que 1,5 mm, medida entre bordas de indicações consecutivas.
- d) Indicações detectadas como trincas, independente das condições da superfície, são inaceitáveis

A localização da trinca é de suma importância para um bom relatório de ensaio, assim como ilustrado na Figura 12.

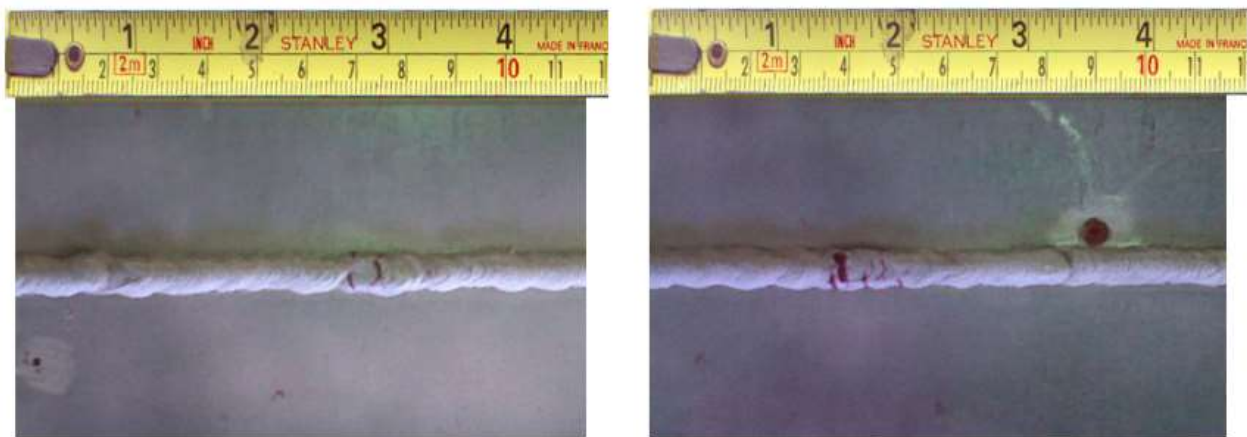

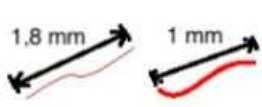

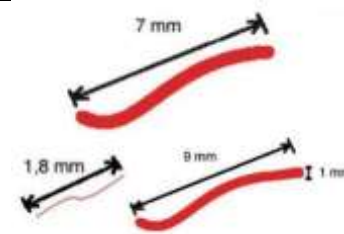
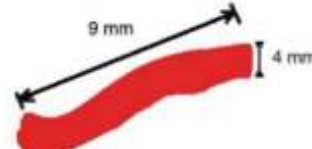
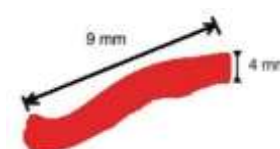
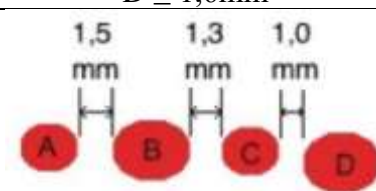


Figura 12: Resultado do ensaio por líquido penetrantes de juntas soldadas.  
Fonte: Abendi, (2018).

A Tabela 3 resume o quadro de critérios de aceitação que dão base para monitoramento das indicações feitas na inspeção.

Tabela 3: Critérios de avaliação de descontinuidades em juntas soldadas.

CRITÉRIOS			
RELEVÂNCIA	CLASSIFICAÇÃO	REPROVAÇÃO	
<p><math>d &gt; 1,5\text{mm}</math></p>  	<p>Linear [<math>C &gt; 3xL</math>]</p> 	<p>Indicação Linear Relevante Trinca <math>&gt; 1,5\text{mm}</math></p> 	
			<p>Indicação arredondada Relevante Poro <math>&gt; 4,8\text{mm}</math></p>
		<p>Arredondada [<math>C \leq 3xL</math>]</p>	
			<p>Distância entre indicações <math>D \leq 1,6\text{mm}</math></p>  <p>A= Ø: 1 mm B= Ø: 3 mm C= Ø: 1 mm D= Ø: 3 mm</p>

Fonte: Adaptado de ASME, (2014).

De posse dos conceitos fundamentais de engenharia de manutenção, bem como os parâmetros de caracterização por líquidos penetrantes, e os mecanismos das indicações patológicas em materiais metálicos, tem-se a base científica para aplicar o procedimento experimental e fazer análises a partir das observações.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

Na segunda classificação, quanto aos objetivos, para Moretti (2021), tem-se três propósitos:

- a) Pesquisa Exploratória: é o modelo onde há o levantamento de informações sobre o problema proposto, de forma a adquirir mais conhecimento específico sobre a área estudada. Normalmente, é sobre pesquisa bibliográfica ou um estudo de caso, com isso, é recorrente em trabalhos de conclusão de curso.
- b) Pesquisa descritiva: é o tipo em que se faz o registro e análise de dados a partir de características de um determinado grupo ou fenômeno sem a interferência do aluno ou pesquisador.
- c) Pesquisa explicativa: existe aqui o registro e análise de dados para entendimento ou explicação de um fenômeno e suas causas. Trabalha com hipóteses e métodos experimentais e observacionais

Este trabalho apresenta diversos aspectos quanto ao tipo de pesquisa realizada. Em geral, pode ser considerado apresentar uma pesquisa exploratória, pois busca conhecimento científico para identificar e qualificar indicações, e a explicativa, quando os dados obtidos pela caracterização são importantes para a identificação e compreensão dos fenômenos envolvidos. Além disso, este trabalho compreende a pesquisa qualitativa, exploratória, bibliográfica e estudo de caso, documental e experimental.

#### **3.2 Materiais e métodos**

Para o desenvolvimento desse trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o ensaio por líquido penetrante em cordões de solda, assim como os critérios de aceitação visual de discontinuidades. Nesta seção serão apresentados os procedimentos de execução do ensaio, os instrumentos e produtos necessários para sua realização.

A matéria a ser ensaiado é a chapa classificada grossa AÇO CORTEN USI SAC 300 (Antigo USI SAC 41). A Tabela 4 apresenta a composição química percentual do Aço Patinável, fabricado pela USIMINAS.

Tabela 4: Composição química percentual do Aço Patinável CORTEN USI SAC 300.

Aço	Espessura (mm)	C max.	Mn max.	Si	P	S max.	Cu	Cr max.	Ni	Ti	Nb
<b>USI-SAC-300 (antigo USI-SAC-41MG)</b>	2,0 ~ 12,70	0,18	1,30	0,50 ~ 1,50	0,010 ~ 0,060	0,030	0,05 ~ 0,40	0,60	Ni ≤ 40	Ti ≤ 0,150	Nb ≤ 0,050

Fonte: USIMINAS, (2015).

A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas do Aço Patinável CORTEN USI SAC 300, fabricado pela USIMINAS.

Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço Patinável CORTEN USI SAC 300.

Teste de Tração (em chapas)							Dobramento (Transversal)
Aço	Espessura (mm)	LE (Mpa)	LR(Mpa)	Alongamento			Diâmetro (mm)
				ESP (mm)	BM (mm)	Valor (%)	
USI-SAC-300 (antigo USI-SAC-41MG)	2,0~12,70	≥ 300	400 ~ 550	2,0 ~ 5,0	50	≥ 19	1,5 E
				5,0~12,70	200		

Fonte: USIMINAS, (2015).

Os aços patináveis apresentam elevada resistência à corrosão atmosférica e alta resistência mecânica ( $LR > 400 \text{ N/mm}^2$ ), além de boa tenacidade e soldabilidade e apresentam ótima aderência à pintura (USIMINAS, 2015). Amplamente empregados na construção civil (estruturas metálicas em geral), contêineres, implementos agrícolas, equipamentos para mineração, vagões ferroviários, navios, pontes e edifícios.

### 3.2.1 Seleção amostral

Para seleção dos pontos de análise, objeto desse estudo, foi realizada uma inspeção visual em algumas colunas metálicas do prédio. Após essa vistoria, foram selecionadas colunas que apresentaram, visualmente, pontos de atenção, por exemplo, corrosão aparente e/ou mordedura no cordão de solda.

Foram selecionados dois pontos semelhantes aos apresentados na Figura 13. Observa-se que, aparentemente, há corrosão na região de solda, o que justifica a realização de ensaios por líquidos penetrantes.



Figura 13: Região ensaiada da estrutura metálica da edificação.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

### 3.2.2 Procedimento Utilizado

Ensaio feito nas amostras seguindo o mesmo padrão, foram escolhidos dois pontos na estrutura metálica da Escola de Minas, onde cada ponto foi analisado as juntas soldadas. A interpretação de cada junta soldada foi feita de forma individual, após a interpretação final das discontinuidades, o ensaio por líquidos penetrantes teve como base as instruções da (ABENDI, 2014). A norma de referência utilizada pelo procedimento para execução do ensaio é a ASME Seção V, edição 2004. No critério de aceitação utiliza a ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8.

### 3.2.3 Removedor/ Solvente

Solvente utilizado na limpeza prévia da superfície. Principais características do produto utilizado no ensaio: marca Metal Chek TMC 10, aplicável às normas Petrobrás N 1596/ 2370, AMS 2644, JIS Z 2343, ASME seção V, ASTM seção 3 Vol. 03.03. Classe de risco 3, número de risco 33, produto inflamável, biodegradável e composição química Thinner. Lote 13383, fabricado em 12/ 2019, com validade até 12/ 2021, mostrado na Figura 14.



Figura 14: Solvente utilizado no ensaio.  
Fonte: Farias, (2014).

### 3.2.4 Líquido Penetrante

Penetrante aplicado na superfície após a limpeza prévia, para penetração nas discontinuidades. Principais características do produto utilizado no ensaio: marca Metal Chek VP30, tipo II (ensaio com penetrante colorido), método de aplicação A (lavável à água), nível de sensibilidade 2, aplicável às normas AMS 2644, JIS Z 2343, Petrobras N2370/N 1596 ASME Seção V, ASTM Seção 3 Vol. 3.3. Composição 46 *química*: solvente, tensoativo, pigmentos orgânicos, glicol e plastificante. Temperatura de aplicação entre 10 a 52 °C. Produto biodegradável (não afeta a camada de ozônio). Lote 19-0740, fabricado em 10/ 2019 e validade até 10/2021, mostrado na Figura 15.



Figura 15: Penetrante visível lavável a água.  
Fonte: Farias, (2014).

### 3.2.5 Revelador

Revelador utilizado no ensaio para detecção do penetrante incluso nas descontinuidades. Principais características do produto utilizado no ensaio: marca Metal Chek 70, tipo não aquoso, aplicável às normas: AMS 2644, ISSO 3452-3, Petrobrás N2370/N1596, ASME Seção V, ASTM Seção 3 vol. 3.3. Composição básica: álcool, espessantes, carbonatos e silicatos amorfos. Temperatura de aplicação: 10 a 52 °C. Concentração mínima de pó 9%. Produto biodegradável (não afeta a camada de ozônio). Lote 190805, fabricado em 12/2019 e validade até 12/2021, conforme a Figura 16.



Figura 16: Revelador utilizado no ensaio.  
Fonte: Farias, (2014).



### 3.2.6 Equipamentos Utilizados

Esmerilhadeira com escovas de cerdas metálicas. Utilizado para limpeza prévia da superfície a ser ensaiada, mostrada na Figura 17.



Figura 17: Esmerilhadeira Makita.  
Fonte: Bosch, (2012).

### 3.2.7 Execução do ensaio

O procedimento de limpeza, aplicação e remoção dos produtos, assim como tempo e materiais utilizados no ensaio seguem da forma elucidada por Andreucci (2018) e foram aplicados igualmente nos seis corpos de prova analisados, desta forma obtém se uma metodologia padrão para execução do ensaio.

### 3.2.8 Preparação da Superfície

A limpeza da região do cordão de solda foi realizada com auxílio de uma esmerilhadeira, removendo toda impureza e sujeira da superfície conforme demonstrado na Figura 18.



Figura 18: Limpeza da amostra.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

Após, foi realizado a limpeza superficial da área esmerilhada com pano levemente umedecido com removedor, demonstrado na Figura 19.



Figura 19: Limpeza da amostra.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

### 3.2.9 Aplicação do penetrante

O penetrante foi aplicado por meio de aerossol criando uma película uniforme em toda região soldada, mais 25% da região adjacentes. Após aplicação do penetrante, espera o tempo mínimo de 20 minutos necessário para sua completa penetração, como demonstra na Figura 20.



Figura 20: Aplicação do líquido penetrante.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

### 3.2.10 Aplicação do revelador

O revelador também é aplicado por meio de aerossol, com cuidado para ser aplicado uma leve camada uniforme na superfície já preparada. Na Figura 21 estão representadas a região da solda após aplicação do revelador.



Figura 21: Aplicação do revelador.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

### 3.2.11 Tempo para interpretação

Inicialmente faz interpretação logo em seguida a secagem do revelador, por meio de inspeção para identificar as possíveis discontinuidades e caracterizar de acordo com o seu formato. Após 20 minutos da aplicação do revelador, faz se a interpretação final do ensaio, como é mostrado na Figura 22.



Figura 22: Revelação após tempo de aplicação.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

### 3.2.12 Aplicação do removedor

Para limpeza final faz uso do removedor para retirar todos os produtos utilizados durante o ensaio, aplicando de acordo com a necessidade da amostra. Considerada a última etapa, geralmente é obrigatório, feita com cautela para que haja a limpeza de todos os resíduos, que podem prejudicar etapas posteriores (soldagem, pintura, etc.) (ANDREUCCI, 2014).

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Na perspectiva de Gil (2008), uma variável pode ser descrita como sendo uma medida ou classificação. Pode ser relacionada quantitativamente com um conceito operacional que apresenta e contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível de verificação. Feito o estudo e medição de cada variável, foram classificados alguns indicadores de acordo com o objetivo do ensaio, de forma qualitativa ou quantitativa, assim exposto na Tabela 6.

Tabela 6: Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Cordão de solda	Descontinuidade (tamanho e forma)
	Corrosão

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

Etapa da pesquisa, responsável pela elaboração do sistema de coleta de resultados do ensaio de juntas soldadas por meio de líquidos penetrantes, foram utilizadas as seguintes técnicas para a construção do trabalho:

- Pesquisa bibliográfica;
- Ensaio experimental;
- Análise dos resultados;
- Microsoft Excel;
- Microsoft Word;
- Software de medição: *ImageJ*

A Tabela 7 mostra o relatório do ensaio de líquidos penetrantes, o qual tem como finalidade o registro dos resultados analisados após a realização dos ensaios, sendo uma ferramenta importante para o inspetor possibilitando a organização e a documentação das indicações reveladas. Neste, contém algumas informações importantes, indo da identificação da amostra e dos materiais utilizados no ensaio, até a descrição das indicações observadas. Além disso, o relatório serve de apoio para estabelecer rotinas de manutenção preventivas e corretivas posteriores.

Tabela 7: Relatório de Ensaio por líquido penetrante.

PROCEDIMENTO – n° REV	CENTRO DE ALTERAÇÃO	RELATÓRIO N°	
Ensaio LP	Estrutura metálica de um prédio	FOLHA:	

MATERIAL	N° CP	CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE	NORMA DE REFERÊNCIA
<b>USISAC</b>	300		

	REMOVEDOR	PENETRANTE	REVELADOR
Febricante	METAL CHECK	METAL CHECK	METAL CHECK
Marca/Modelo	TMC 10	VP 30	70
Lote	13383	190740	190805

N.º	Tipo de Descontinuidade	Localização (mm) De ___ a ___	Dimensão (mm)	LAUDO	Observação N de indicações
					O PO é considerado uma indicação irrelevante, pois não em dimensão de 4,8 mm para ser reprovado. A TT é uma indicação relevante e não se enquadra no critério de aceitação, a peça está reprovada e deve passar por um processo de reparo para remoção do defeito.

**LEGENDAS:**

<b>Laudo</b> <b>A: Aprovado</b> <b>R: Reprovado</b> <b>NEC: Necessário Exame</b>	Descontinuidades TL: Trinca Longitudinal TT: Trinca tridimensional SO: Sobreposição	FF: Falta de fusão PO: Porosidade MO: Mordedura
---	--	---

( ) APROVADO

( ) REPROVADO

( ) NEC

NOME DO CANDIDATO		NÚMERO
MODALIDADE		ASSINATURA DO CANDIDATO
EMPRESA	DATA	VISTO DO EXAMINADOR

### **3.5 Tabulação dos dados**

Através dos dados obtidos pela pesquisa bibliográfica, e pela elaboração do experimento com auxílio do Software de medição *ImageJ* e do Excel para organização e análise dos resultados, foi possível discutir os resultados obtidos.

### **3.6 Considerações Finais do capítulo**

Neste capítulo foi abordado as classificações referentes ao tipo de pesquisa, também foi apresentado o procedimento para realização do ensaio por líquido penetrante demonstrando todos os materiais e métodos até a tabulação de dados. No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos das análises ensaiadas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliações das amostras

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de líquidos penetrantes sobre os cordões de solda selecionados na estrutura metálica do prédio estudado. Utilizando o software “*ImageJ*” foram obtidas as dimensões (comprimento e largura) das indicações (descontinuidades) encontradas. Visto que a calibração do *software* ocorreu por meio da escala métrica (régua) posicionada ao lado do cordão de solda (Figura 23).



Figura 23: Calibração do *software ImageJ*.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

A Figura 24 mostra a primeira coluna inspecionada, localização “X”, destacando os cordões de solda que foram ensaiados. Para diferir os cordões de solda, foram utilizadas siglas de identificação, sendo que “V” corresponde a cordões verticais e “H” a cordões horizontais, já a numeração corresponde à coluna analisada, nesse trabalho foram duas colunas analisadas.



Figura 24: Cordões de solda inspecionados na coluna “X”: V1 (cordão vertical) e H1 (cordão horizontal).

Fonte: Pesquisa direta, (2021).

A Figura 25 mostra a investigação de indicações na primeira amostra, denominada “V1”. Na Figura 25(a) está representada a região da amostra que foi analisada, previamente à aplicação do líquido penetrante, enquanto que a Figura 25(b) corresponde à mesma região após a aplicação do líquido penetrante.



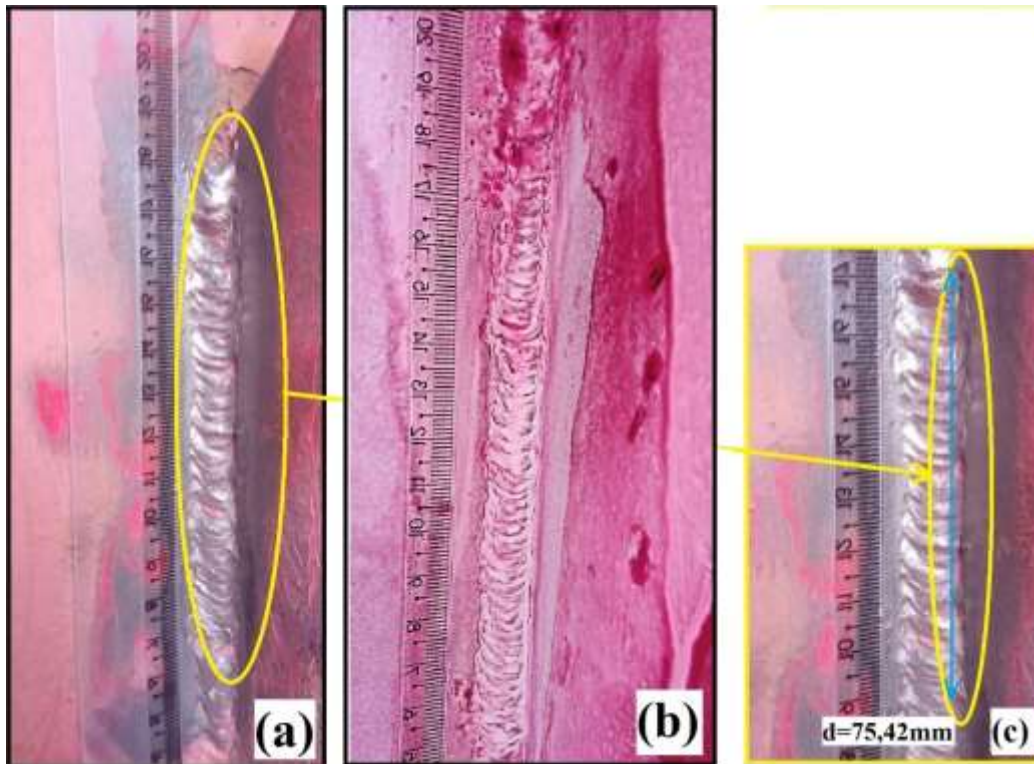


Figura 25: Inspeção por líquido penetrante e análise: coluna “X”, cordão de solda V<sub>1</sub>.

Fonte: Pesquisa direta, (2021).

Na Figura 25(c) destaca a presença de mordedura (MO), com cerca de 75mm. Esta patologia é caracterizada pela fusão da superfície da chapa do metal de base próxima à margem do cordão de solda, ocorre devido a erros de procedimentos de soldagem, em particular a velocidade de soldagem e a tensão do arco. Quando a velocidade de soldagem é muito alta, acontece a formação de uma crista no cordão, por causa da solidificação extremamente rápida. O metal fundido ao longo das margens do cordão acumula-se na região central do cordão, devido às forças da tensão superficial. As partes fundidas do metal de base são afetadas da mesma maneira (ESAB, 2005). A forma da indicação assemelha-se à Figura 26, onde Thomas (2018) apresenta a patologia que pode ser encontrada em juntas soldadas, mostrando indicação de mordedura.

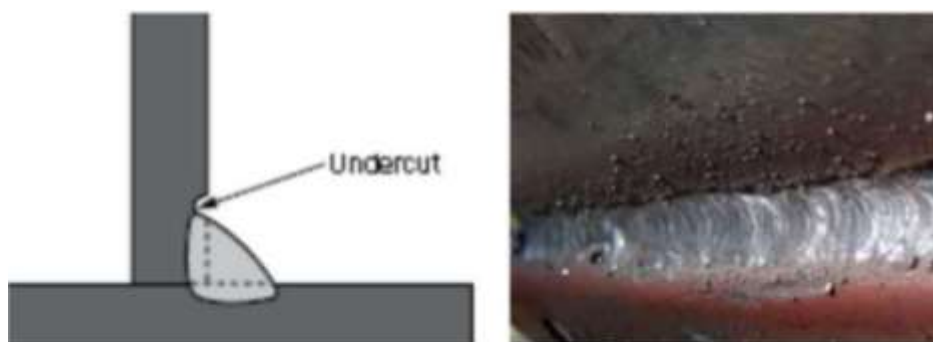


Figura 26: Analisando a falha de componentes de aço soldados em sistemas construtivos.

Fonte; Thomas, (2018).

As informações referentes à amostra “V1” ensaiada foram inseridas na Tabelas 8, que mostra o relatório de análise descritiva para a primeira amostra submetida ao ensaio por líquidos penetrantes.

Tabela 8: Indicações encontradas na amostra V<sub>1</sub> ensaiada.

PROCEDIMENTO – n° REV		CENTRO DE ALTERAÇÃO		RELATORIO N°	1
Ensaio LP		Estrutura metálica de um prédio		FOLHA:	
MATERIAL	AMOSTRA	CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE		NORMA DE REFERENCIA	
USISAC	V <sub>1</sub>				
	REMOVEDOR	PENETRANTE	REVELADOR		
Febricante	METAL CHECK	METAL CHECK	METAL CHECK		
Marca/Modelo	TMC 10	VP 30	70		
Lote	13383	190740	190805		
N.º	Tipo de Descontinuidade	Localização (mm) De a	Dimensão (mm)	LAUDO	N de Indicações 3 indicações
3	Mordedura		75,42	NEC	O PO é considerado uma indicação irrelevante, pois não em dimensão de 4,8 mm para ser reprovado.

Fonte: Pesquisa direta, (2021).

A Figura 27 corresponde à investigação de indicações existentes na segunda amostra, nomeada por “H1” (Figura 24). Observa-se na Figura 27(a) que o cordão de solda não é uniforme, ou seja, a forma, a largura e a quantidade de material depositado (metal de adição) variam ao longo

do seu comprimento. Na inspeção visual e no ensaio com líquido penetrante observou-se que nesse cordão de solda analisado há presença alguns tipos de indicações.

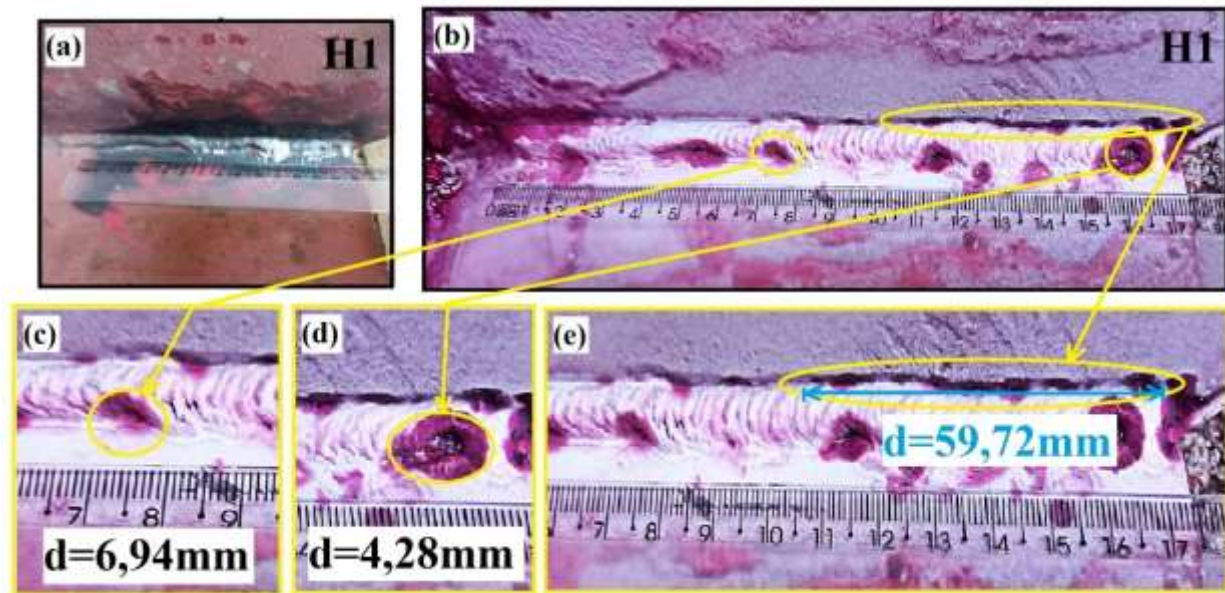


Figura 27: Inspeção por líquido penetrante e análise: coluna “X”, cordão de solda H1.  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

Observou-se na Figura 27(c) que a forma da indicação se assemelha com falta de fusão, que ocorre nas regiões onde não existe fusão entre o metal de adição e as superfícies do metal de base, sendo a técnica de soldagem sua causa mais comum. Esta indicação também possui relação entre a poça de fusão e baixa velocidade de soldagem, decorrentes de uma poção de fusão muito larga, e/ou o metal de adição à frente do arco. Na Figura 28 Costa *et al.*, (2012) apresentam indicações patológicas de falta de fusão da raiz.

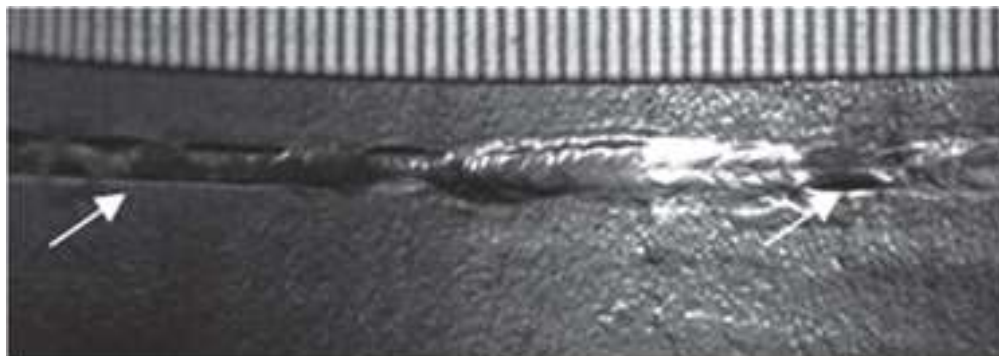


Figura 28: Indicação patológica de falta de fusão em junta soldada, apontada por setas.  
Fonte: Costa *et al.*, (2012).

Agora analisando a Figura 27(d), nota-se que houve inclusão de escória, no qual ocorre durante a fusão subsequente da poça de fusão, essa reação pode gerar partículas que, se presos no metal de solidificação, formam inclusões. Como no processo de eletrodo revestido possui fluxo do eletrodo, se o mesmo não estiver em condições de uso pode ocasionar esse tipo de falha, assim ilustrado na Figura 29, a inclusão encontra-se no fim da junta soldada, com os recursos utilizados nessa inspeção, não foi possível quantificar sua severidade, portanto, sugere-se o acompanhamento. A Figura 29 apresenta a situação encontrada na amostra H1, correlacionando as ocorrências representadas na indicação da Figura 2727(d).

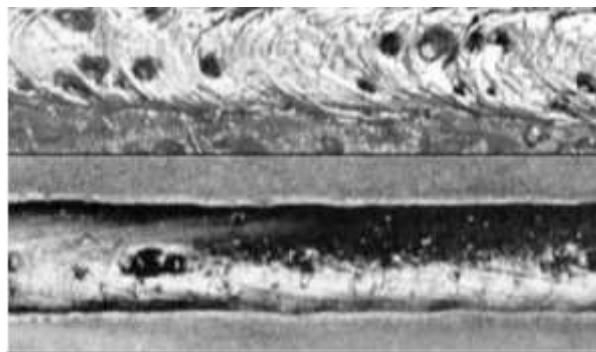


Figura 29: Exemplos de indicações patológicas encontradas em juntas soldadas. Em inclusão de escória.

Fonte: Castro (1999)

Observou-se na Figura 27(e) um ponto de mordedura, representado por uma indicação com forma alongada localizada na fronteira do cordão de solda, por falta de um calibre de solda (instrumento de medição) para medir a profundidade da mordedura observada, não foi possível afirmar que esta indicação é ou não significativa para esta junta soldada, considerando sua aplicação estrutural. Segundo a norma AWS D1.1 (2006) a qual determina o critério de aceitação de soldas planas (não tubulares com carregamento estático) com mordedura, a profundidade do canal deve ser de no máximo 1mm para chapas de até 25 mm de espessura. A fim de estimar a profundidade do canal da amostra foi utilizado um paquímetro. Apesar desse instrumento não ser o recomendado para essa medição, observou-se que a profundidade medida foi menor que 1mm, portanto, esse resultado sugere aceitação da mordedura observada, conforme norma AWS D1.1 (2006). Contudo, recomenda-se acompanhamento (monitoramento) dessa indicação. Na figura 30 ilustra a mordedura de acordo com Castro (1999), com base de comparação com amostra ensaiada.



Figura 30: Exemplos de indicações patológicas encontradas em juntas soldadas. Em mordedura

Fonte: Castro (1999)

A Tabela 9 descreve o relatório de análise descritiva para a amostra “H<sub>1</sub>” submetida ao ensaio por líquidos penetrantes.

Tabela 9: Indicações encontradas na amostra H<sub>1</sub> ensaiada.

PROCEDIMENTO – n° REV		CENTRO DE ALTERAÇÃO		RELATORIO N°	2
Ensaio LP		Estrutura metálica prédio		FOLHA:	
MATERIAL	AMOSTRA	CONDIÇÃO DA SUPERFICIE		NORMA DE REFERENCIA	
USISAC	H <sub>1</sub>				
	REMOVEDOR	PENETRANTE		REVELADOR	
Febricante	METAL CHECK	METAL CHECK		METAL CHECK	
Marca/Modelo	TMC 10	VP 30		70	
Lote	13383	190740		190805	
N.º	Tipo de Descontinuidade	Localização (mm) De a	Dimensão (mm)	LAUDO	N de Indicações 6 indicações
1	Falta de fusão		6,94	NEC	O PO é considerado uma indicação irrelevante, pois não em dimensão de 4,8 mm para ser reprovado.
2	Inclusão de escória		4,28	NEC	
3	Mordedura		59,72	NEC	
LEGENDAS:					
<b>Laudo</b> <b>A: Aprovado</b> <b>R: Reprovado</b> <b>NEC: Necessário Exame</b>		Descontinuidades TL: Trinca Longitudinal TT: Trinca tridimensional SO: Sobreposição		FF: Falta de fusão PO: Porosidade MO: Mordedura	

A Figura 30 mostra a semelhança da descontinuidade encontrada na segunda coluna inspecionada, marcada como ponto “Δ”, destacando o cordão de solda denominado “H<sub>2</sub>” que foi

ensaiado. As condições ambientais a qual a coluna está submetida são diferentes da coluna analisada anteriormente, justificando a realização do teste a nível de comparação.



Figura 31: Coluna “ $\Delta$ ”: inspecionada neste trabalho, onde está localizado o cordão  $H_2$  (cordão horizontal).  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

Com o desenvolvimento do estudo foi possível o entendimento dos tipos de corrosão aos quais a estrutura metálica está sujeita, A partir disso, foi possível comparar o estado da coluna analisada com outras estruturas encontradas na literatura. A Figura 31 mostra a análise por inspeção visual da coluna  $\Delta$ . Por meio de inspeção visual é possível a investigação de indicações na terceira amostra, denominada “H2”.



Figura 32: Inspeção visual da: coluna “ $\Delta$ ”, cordão de solda  $H_2$ .  
Fonte: Pesquisa direta, (2021).

Na amostra H2, representada pela Figura 31 é associada à presença de umidade devido à direção horizontal, o que pode representar a nucleação de indicações mais severas. Além disso, é possível identificar pontos de mordedura, além de pontos com presença de inclusões não metálicas e regiões de oxidação generalizada. As indicações encontradas não são suficientes para comprometer a integridade funcional da estrutura, porém são necessárias para o avanço das falhas. Com isso, recomenda-se o acompanhamento com vistorias periódicas, realizando a análise dos pontos que destacam indicações de manutenção corretiva, almejando o aumento da vida útil da estrutura, além de manutenções preventivas.

Observa-se na imagem a presença de regiões de corrosão generalizada similar à apresentada na Figura 32, Filho *et al.*, (2018) apresentam um exemplo de corrosão por frestas. A corrosão por frestas, de acordo com Pestana (2018), ocorre normalmente entre duas superfícies que estão em contato ou numa distância entre 0,025 e 0,1 mm uma da outra, o que se associa a pequenos depósitos de solução estagnada, de materiais não metálicos como areia ou sujidades, ou mesmo de depósitos de produtos de corrosão que tendem a facilitar este tipo de corrosão. Pode ocorrer em parafusos, porcas e arruelas, materiais de isolamento, depósitos superficiais, películas de tinta descoladas, rebites, etc. Como a soldagem envolve o contato entre dois tipos de metais, ela potencializa o aparecimento desse tipo de corrosão.

Desta forma, as condições ambientais dentro de uma fresta podem, com o tempo, tornar-se um ambiente muito mais agressivo quando comparado com uma superfície ímpa exposta ao ambiente. Pode ocasionar corrosão localizada no interior da fresta (PANNONI, 2007). Com isso, é recomendado um acompanhamento criterioso, onde a limpeza mínima seja requerida como manutenção preventiva. Na Figura 32 verifica um exemplo de corrosão por fresta.



Figura 33: Exemplo de corrosão por frestas.  
Fonte: Filho et al, (2018)

Melo (2021) elenca orientações que devem ser seguidas em cada etapa no processo de manutenibilidade de estruturas metálicas. No caso da inspeção, orienta-se que sejam realizadas inspeções visuais prévias e, quando necessário, a realização de ensaios não destrutivos para investigação. A limpeza deve ser feita com escova de cordas metálicas e as camadas superficiais de tratamento devem ser removidas. O lixamento deve ser promovido para que seja possível analisar os problemas existentes na peça. Orienta-se evitar a troca da peça, que deverá ser feita em alguns casos, sendo analisada cada patologia e direcionando correções específicas. Melo (2021) ainda destaca que, na construção da estrutura deve ser evitado que esta forme um reservatório de intempéries, lembrando inspetor de verificar a geometria e arranjo da estrutura (MELO, 2021).



## **5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 Conclusão**

Por fim, o objetivo do trabalho foi a análise de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido, através de técnicas de inspeção não destrutivas, foi utilizado da inspeção visual e por líquidos penetrantes, desenvolvido de maneira satisfatória de acordo com a metodologia de pesquisa proposta.

A partir dos conhecimentos obtidos em literatura, tornou-se visível a importância da manutenção em estruturas metálicas. Os ensaios não destrutivos são comumente utilizados para a manutenção preventiva e, após a realização de ensaios por líquidos penetrantes, pode-se concluir que o ensaio de líquidos penetrantes é aconselhado para a inspeção inicial de estruturas ou equipamento de engenharia, pois, por meio da aplicação do teste, tornou-se possível identificar possíveis indicações (ocorrências) que podem influenciar o tempo de vida da estrutura e/ou equipamento. A metodologia seguiu o procedimento determinado por Audrecci e com o critério de avaliação dos parâmetros da ASME SEC VIII DIV 1 AP 8 e a norma AWS D1.1 (2006), que possibilitou um procedimento normatizado e com base de avaliação.

Foram identificadas ocorrências de descontinuidades materiais e de corrosão nas juntas soldadas analisadas, também foram identificados erros de processo de soldagem que podem ser melhor analisados. Visto que desta forma os ensaios visuais e por líquidos penetrantes não são suficientes para reprovar ou indicar a severidade (significância) das indicações.

### **5.2 Recomendações**

Para trabalhos futuros recomenda-se mais investigação com técnicas capazes de avaliar e quantificar a significância as indicações, por exemplo, ensaios por ultrassom, partículas magnéticas.

Sugestões de títulos futuros

Ensaio de juntas soldadas de estruturas metálicas por ensaios não destrutivo por meio de ultrassom.

Ensaio de juntas soldadas de estruturas metálicas por ensaio não destrutivo por meio de partículas magnéticas

Criação e elaboração de um projeto de manutenção de um prédio em estrutura metálica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5462-1994. **Gerenciamento da Manutenção**. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro 1994.

ABNT NBR 5674-1999. **Manutenção de edificações – Procedimento**. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1999.

ALCAN, **Soldagem do alumínio e ligas**. Livro, 1ª edição, São Paulo, Alcan S/A, 2001.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. E165/E165M. **Standard practice liquid penetrant examination for general industry**. West Conshohocken: s.n., 2016.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. E433-71. **Standard reference photograph for liquid penetrant inspection**. West Conshohocken: s.n.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for estimating the atmospheric corrosion resistance of alloy steels**. West Conshohocken: s.n., 2004.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. ABENDI, 2014.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. ABENDI, 2018.

ASME Seção V. American Society of Mechanical Engineers. **O critério de aceitação conforme a ASME VIII DIV AP 8**. New York, 2014.

ASSIS, R. **Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção – Confiabilidade e Manutenibilidade**. Lisboa: Lidel – Edições técnicas, 2004.

CABRAL, J. P. S. **Organização e Gestão da Manutenção: Dos Conceitos à Prática**. (6ª Edição). Lisboa: Lidel – Edições técnicas, 2006.

CORUS. **Weathering Steel Bridges**. Publicação Corus (2001).

COSTA, A. V. **Soldabilidade de um aço patinável de alto silício para construção metálica com resistência extra à corrosão em atmosfera marinha**. 2019, 90 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, fevereiro, 2019.

COSTA, F. G. **Manutenção das estruturas metálicas com utilização dos ensaios não destrutivos**: Apostila disponibilizada pelo autor. Engenheiro civil (Pós-graduando em ciências dos materiais e processos metalúrgicos) - Universidade Mongi das Cruzes, 2012.

DEBASTIANI, R.; GARDINI, L. F. **Projeto de edificação em estrutura metálica destinada a estacionamento vertical automatizado**. Artigo (Pós graduação em engenharia civil) - Universidade do Oeste de Santa Catarina, 2017.

FERREIRA, L. A. **Uma Introdução à Manutenção** (1ª Edição). Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 1998.

FILHO, C. A. B. P.; SILVA, M. S.; SOUZA, W. J. F. **Corrosão em estruturas metálicas-estudo de caso**. REMAS - Revista Educação, Meio Ambiente e Saúde, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 25-42, jul. 2018. ISSN 1983-0173. Disponível em: <<http://www.faculdadedofuturo.edu.br/revista1/index.php/remas/article/view/174>>.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3a ed. Editora LTC. Riode Janeiro: 1982.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social** 6ª Edição. Editora Atlas. São Paulo (SP), 2008

GNECCO, C. **A Pintura do Aço Patinável**. Publicação da Sherwin-Williams do Brasil – Divisão Sumaré (2001).

INFOSOLDA. **Ensaos não destrutivos: líquidos penetrantes**. Portal Brasileiro da soldagem, 2013.

ISO 15686. **Buildings and Construced Assets – Service Life Planning. International Organization for Standardization**. Switzerland - 2011.

MARQUES, P. V.; SILVA, S. F. **Ensaos não destrutivos**. Belo Horizonte, 2010.

MELO, I. C. C. **Estratégias para elaboração de projetos de estruturas metálicas na ótica da manutenibilidade**. Dissertação (Mestrado em Projecto Integrado Na Construção De Edifícios) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2021.

MORETTI, I. **Metodologia de pesquisa TCC**. 2021. Disponível em: <https://viacarreira.com/metodologia-de-pesquisa-do-tcc/>.

OKUMURA, T.; TANIGUSHI, C. **Engenharia da Soldagem e Aplicações: Livros técnicos e científico. Rio de Janeiro 1982**

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio.** Coletânea do uso do aço, perfis Gerdau Açominas 4ª ed-2007.

PANNONI, F. D.; MARCONDES, L. **COS-AR-COR – Aços de Alta Resistência Mecânica Resistentes à Corrosão Atmosférica.** Relatório interno de número RT/17 da Coordenadoria de Pesquisa Tecnológica da COSIPA (1987)

PETROBRAS N-1596 F. **Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante.** CONTEC - Comissão de Normas Técnicas. SC-27, novembro, 2009.

PETROBRAS N-1597 REV. D. **Ensaio Não Destrutivo Visual.** CONTEC - Comissão de Normas Técnicas. SC-27, agosto, 1996.

PRADO FILHO, H. R. **A qualificação para o Ensaio por Líquido Penetrante.** 2016. Disponível em: “<https://qualidadeonline.wordpress.com/2016/03/31/a-qualificacao-para-o-ensaio-por-liquido-penetrante/>”.

PRAVIA, Z. M. C.; BETINELLI, E. A. **Falhas em Estruturas Metálicas: Conceitos e estudos de caso.** (Graduação Engenharia Civil) - FEAR – UPF. 2016.

SACCHI, C. C. **Avaliação de desempenho estrutural e manifestações patológicas em estruturas metálicas.** Dissertação (Mestrado. Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil) - Universidade Federal De São Carlos. São Carlos, 2016.

SILVA, M. V. F.; PEREIRA, M. C.; CODARO, E. N.; ACCIARI, H. A. Corrosão do aço carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química. **Quím. Nova:** 28 (2), 2015.

THOMAS, D. J. **Analyzing the Failure of Welded Steel Components in Construction Systems.** ASM International, 2018.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Belo Horizonte, 1998.

ZEEMAN, A. **Corrosão em juntas soldadas.** Infosolda, 2003. Disponível em: [http://www.delposo.com.br/artigos/corrosao\\_js.pdf](http://www.delposo.com.br/artigos/corrosao_js.pdf).

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução ao Processo de Soldagem.** Belo Horizonte (MG), 2000

FILHO, A. L. **Análise da Influência dos Parâmetros do Processo de Soldagem com Eletrodos Revestidos na Estabilidade do Arco e Características Geométricas do Cordão.** Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005.

MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem.** ESAB/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1991