

MAURO MUNIZ DE CASTRO

# **CORROSÃO EXTERNA EM FUNDO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE PETRÓLEO E DERIVADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Montagem Industrial.

Orientadores: Professor FERNANDO BENEDICTO MAINIER, D. Sc.  
Professor MIGUEL LUIZ RIBEIRO FERREIRA, D. Sc.

NITERÓI  
2018

**MAURO MUNIZ DE CASTRO**

**CORROSÃO EXTERNA EM FUNDO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE  
PETRÓLEO E DERIVADOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em  
Montagem Industrial da Universidade Federal  
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do  
Grau de Mestre. Área de Concentração Montagem  
Industrial.

Aprovada em, 12 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Fernando Benedicto Mainier – Orientador - Presidente  
Universidade Federal Fluminense



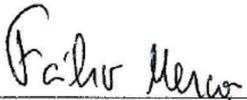
---

Prof. Dr. Miguel Luiz Ribeiro Ferreira - Orientador  
Universidade Federal Fluminense



---

Profª Dra. Cassia Andréa Ruotolo Morano  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof. Dr. Fábio Merçon  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Niterói, RJ  
2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

C355c Castro, Mauro Muniz de  
Corrosão externa em fundo de tanque de armazenamento de  
petróleo e derivados / Mauro Muniz de Castro ; Fernando  
Benedicto Mainier, orientador ; Miguel Luiz Ribeiro Ferreira,  
coorientador. Niterói, 2018.  
102 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal  
Fluminense, Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2018.mp.08322670745>

1. Corrosão. 2. Corrosão de aço. 3. Tanque de  
armazenamento. 4. Produção intelectual. I. Título II.  
Mainier, Fernando Benedicto, orientador. III. Ferreira, Miguel  
Luiz Ribeiro, coorientador. IV. Universidade Federal  
Fluminense. Escola de Engenharia.

CDD -

Dedico este trabalho a todos os profissionais  
sérios de engenharia do nosso país

*O começo de todas as ciências é o espanto  
de as coisas serem o que são.*

Aristóteles

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal Fluminense – UFF pela oportunidade e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, professor Fernando Benedicto Mainier, D. Sc., e professor Miguel Luiz Ribeiro Ferreira, D. Sc., pela atenção e direcionamento para a elaboração desta dissertação.

## RESUMO

As empresas de armazenamento e transporte de petróleo e derivados lidam frequentemente com problemas relacionados à corrosão de fundo de tanques de armazenamento, um dos equipamentos mais importantes deste ramo logístico. A melhoria das características químicas das tintas aplicadas internamente nesses equipamentos reduziu a incidência do modo de falha corrosão interna, possibilitando aumento dos intervalos de inspeção interna. Por outro lado, a corrosão externa de fundo de tanque de armazenamento ainda é bastante presente, pois a ausência de revestimentos anticorrosivos torna o seu controle dependente do sistema de proteção catódica por corrente impressa. Neste cenário, este trabalho objetiva identificar possível razão da ineficácia do sistema de proteção catódica por corrente impressa e analisar a viabilidade técnica da utilização de aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanque. Para tanto foram realizados experimentos laboratoriais que possibilitaram concluir que a ineficácia da proteção catódica por corrente impressa pode ser causada por ausência de contato entre parte das chapas de fundo e o solo, bem como, indicaram que há viabilidade técnica de utilização do revestimento de alumínio para esta aplicação.

**Palavras-Chave:** Tanque. Fundo. Corrosão. Aspersão Térmica.

## **ABSTRACT**

Oil and derivatives storage and transport companies often deal with problems related to the bottom plate corrosion of storage tanks, one of the most important equipment in this logistics sector. The improvement of the chemical characteristics of the internally applied coatings has reduced the incidence of the internal corrosion failure mode, allowing increased internal inspection intervals. On the other side, the external corrosion of the tank bottom is still present, since the absence of anticorrosive coatings makes its control dependent on the impressed current cathodic protection system. In this scenario, this work aims to identify possible reasons for the ineffectiveness of the impressed current cathodic protection system and to analyze the technical viability of the use of aluminum thermal spray as anticorrosive protection for the external face of the tank bottom plates. Therefore, laboratory experiments were carried out which allowed to conclude that the ineffectiveness of the impressed current cathodic protection system can be caused by absence of contact between part of the bottom plates and the soil, as well as, indicated that there is technical feasibility of using the aluminum coating to this application.

**KeyWords:** Tank. Bottom. Corrosion. Thermal Spray.

## SUMÁRIO

### **1 INTRODUÇÃO, p. 13**

- 1.1 RELEVÂNCIA DO ASSUNTO, p. 13
- 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO, p. 14
- 1.3 OBJETO E OBJETIVO, p. 19
- 1.4 METODOLOGIA, p. 19
- 1.5 RESUMO DOS CAPÍTULOS, p. 20

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, p. 22**

- 2.1 TANQUES DE ARMAZENAMENTO, p. 25
  - 2.1.1 Bases e fundações, p. 27**
  - 2.1.2 Fundo de tanque, p. 29**
  - 2.1.3 Material e espessura para chapas de fundo de tanque, p. 31**
- 2.2 CORROSÃO, p. 33
  - 2.2.1 Corrosão eletroquímica e química, p. 34**
  - 2.2.2 Mecanismo eletroquímico, p. 36**
    - 2.2.2.1 Potencial de eletrodo, p. 36
    - 2.2.2.2 Pilhas eletroquímicas, p. 39
  - 2.2.3 Proteção catódica, p. 42**
    - 2.2.3.1 Proteção catódica galvânica, p. 43
    - 2.2.3.2 Proteção catódica por corrente impressa, p. 45
      - 2.2.3.2.1 Diagrama de Pourbaix, p. 47**
      - 2.2.3.2.2 Polarização, p. 48**
  - 2.2.4 Formas de corrosão, p. 49**
    - 2.2.4.1 Corrosão uniforme, p. 49
    - 2.2.4.2 Corrosão por pites, p. 50
  - 2.2.5 Proteção contra corrosão, p. 51**
    - 2.2.5.1 Pintura, p. 53
    - 2.2.5.2 Revestimento metálico, p. 55
- 2.3 SOLDAGEM, p. 57
  - 2.3.1 Processos de soldagem, p. 58**
    - 2.3.1.1 SMAW (soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido), p. 59
    - 2.3.1.2 GTAW (soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa), p. 59

2.3.1.3 GMAW (soldagem a arco elétrico com gás de proteção), p. 60

2.3.1.4 FCAW (soldagem a arco elétrico com arame tubular), p. 61

2.3.1.5 SAW (soldagem a arco submerso), p. 62

2.3.1.6 Cuidados na soldagem, p. 62

### **2.3.2 Fluxo de calor, p. 64**

2.3.2.1 Ciclo térmico e repartição térmica na soldagem, p. 65

2.3.2.2 Cálculo da energia de soldagem, p. 67

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS, p. 72**

3.1 EXPERIMENTO 01 – EFICÁCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA, p. 73

3.2 EXPERIMENTO 02 – TEMPERATURA NA CHAPA SOBREPOSTA DURANTE A SOLDAGEM, p. 75

3.3 EXPERIMENTO 03 – EFICÁCIA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍNIO, p. 78

3.4 EXPERIMENTO 04 – COMPORTAMENTO DAS ÁREAS ANÓDICAS E CATÓDICAS, p. 80

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO, p. 82**

4.1 EFICÁCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA, p. 82

4.2 AVALIAÇÃO DO COMPROMETIMENTO DO REVESTIMENTO EXTERNO DA CHAPA PELA SOLDAGEM DO FUNDO DO TANQUE, p. 85

4.3 EFICÁCIA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍNIO, p. 86

4.4 COMPORTAMENTO DAS ÁREAS ANÓDICAS E CATÓDICAS, p. 90

4.5 VIABILIDADE TÉCNICA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍMINO, p. 92

## **5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS, p. 97**

5.1 CONCLUSÕES, p. 97

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS, p. 97

## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, p. 99**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Corrosão externa e corrosão interna em fundo de tanque, p. 15**
- Figura 2 – Resultado de inspeção pela técnica MFL, p. 17**
- Figura 3 – Ausência de contato entre chapa de fundo e solo, p. 18**
- Figura 4 – Corrosão externa em chapa de fundo de tanque, p. 19**
- Figura 5 – Esquema de elaboração da dissertação, p. 20**
- Quadro 1 – Palavras-chaves utilizadas na pesquisa bibliográfica em sites, p. 24**
- Quadro 2 – Resultados obtidos na pesquisa bibliográfica em *sites*, p. 24**
- Figura 6 – Tanques de armazenamento atmosféricos, p. 26**
- Figura 7 – Principais componentes de tanque de armazenamento, p. 27**
- Figura 8 – Fundação direta com anel de concreto, p. 28**
- Figura 9 – Fundo de tanque com chapas anulares na periferia, p. 29**
- Figura 10 – Fundo de tanque integralmente com chapas recortadas, p. 30**
- Figura 11 – Chapas recortadas unidas por juntas sobrepostas, p. 31**
- Figura 12 – Chapas anulares unidas por junta de topo, p. 31**
- Gráfico 1 – Influência da umidade atmosférica contendo 0,01% de dióxido de enxofre na corrosão do ferro, p. 35**
- Figura 13 – Representação do eletrodo de ferro, p. 37**
- Figura 14 – Medição de potencial de eletrodo padrão de um elemento, p. 38**
- Figura 15 – Áreas anódicas e catódicas na pilha Zn – Fe, p. 40**
- Figura 16 – Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica por corrente impressa, p. 46**
- Figura 17 – Diagrama simplificado de potencial e PH para o sistema ferro puro imerso em água pura, p. 47**
- Figura 18 – Formas de pites, p. 50**
- Figura 19 – Esquema do processo de aspersão térmica, p. 56**
- Figura 20 – Seção transversal de um revestimento aspergido, p. 57**
- Figura 21 – Desenho esquemático de soldagem com eletrodo revestido, p. 59**
- Figura 22 – Desenho esquemático de soldagem GTAW, p. 60**
- Figura 23 – Desenho esquemático de soldagem GMAW, p. 61**
- Figura 24 – Desenho esquemático de soldagem com arame tubular, p. 61**
- Figura 25 – Desenho esquemático de soldagem com arco submerso, p. 62**
- Figura 26 – Tensões geradas por contração do cordão de solda, p. 63**

- Figura 27 – Formas básicas de distorção em juntas soldadas, p. 64**
- Figura 28 – Ciclo térmico de soldagem (esquemático), p. 65**
- Figura 29 – Curvas esquemáticas de repartição térmica de soldas realizadas com diferentes energias de soldagem, p. 67**
- Figura 30 - Esquema explicativo do sistema de classificação de eletrodos revestidos adotados pela norma AWS A5.1:2012, p. 68**
- Figura 31 – Experimento 01 – Verificação da eficácia da proteção catódica por corrente impressa, p. 73**
- Figura 32 – Experimento 01 em andamento, p. 75**
- Figura 33 – Experimento 02 – Medição de temperatura. Vista lateral e vista inferior das chapas com juntas sobrepostas, p. 76**
- Figura 34 – Medição de temperatura de pico durante a soldagem, p. 77**
- Figura 35A – Corpo de prova A - Face sem revestimento anticorrosivo, p. 78**
- Figura 35B – Corpo de prova B - Face com alumínio aspergido (parcial), p. 79**
- Figura 36 – Aspersão térmica de alumínio nos corpos de prova, p. 80**
- Figura 37 – Chapa antes do experimento 01, p. 82**
- Figura 38 – Chapa após o experimento 01, p. 82**
- Figura 39 – Área corroída da chapa, p. 83**
- Figura 40 – Área corroída da chapa com zoom aproximado de 700 vezes, p. 84**
- Figura 41 – Área protegida da chapa com zoom aproximado de 700 vezes, p. 84**
- Quadro 03 – Comparativo entre temperatura de pico medida e calculada, p. 85**
- Figura 42 - Corpos de prova A em imersão no início do experimento, p. 86**
- Figura 43 – Corpos de prova B em imersão no início do experimento, p. 87**
- Figura 44 - Corpos de prova A em imersão após decorridos três meses, p. 87**
- Figura 45 – Corpos de prova B em imersão após decorridos três meses, p. 88**
- Figura 46 – Corpos de prova A após o período de imersão, p. 88**
- Figura 47 - Corpos de prova B após o período de imersão, p. 89**
- Figura 48 – Detalhe de corpo de prova A após o período de imersão, p. 89**
- Figura 49 – Detalhe de corpo de prova B após o período de imersão, p. 90**
- Figura 50 – Corpo de prova A - áreas anódicas e catódicas, p. 91**
- Figura 51 – Corpo de prova B – áreas catódicas, p. 92**
- Figura 52 - Cenário das chapas unidas por juntas sobrepostas, p. 94**
- Figura 53 – Cenário das chapas unidas por juntas de topo, p. 94**

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1 – Composição química de aço ASTM A 283:2007, p. 32**

**Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A 283:2007, p. 32**

**Tabela 3 – Tabela prática em água do mar, p. 39**

**Tabela 4 – Consumo anódico de metal, p. 45**

**Tabela 5 – Espessura mínima de película de tinta anticorrosiva, p. 54**

**Tabela 6 - Valores aproximados das propriedades físicas de alguns materiais, p. 66**

**Tabela 7 – Significado do último dígito da classificação AWS A5.1:2012 de alguns tipos de eletrodos revestidos para aço carbono, p. 69**

**Tabela 8 – Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para eletrodos revestidos, p. 70**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA DO ASSUNTO

Os tanques de armazenamento de petróleo e derivados são equipamentos de grande importância para a indústria petrolífera, amplamente utilizados em refinarias, terminais e bases de distribuição de derivados de petróleo.

Os tanques de armazenamento abordados neste estudo estão sujeitos à pressão interna próxima à atmosférica, razão pela qual são conhecidos por tanques de armazenamento atmosféricos, fabricados em aço carbono, cilíndricos, verticais e não enterrados. Estes equipamentos, conforme Barros (2006), são construídos em uma ampla faixa de capacidades, desde 100 barris (16 m<sup>3</sup>) até grandes tanques com aproximadamente 550.000 barris (87.500 m<sup>3</sup>).

Segundo Demoz e Friesen (2005, p. 2), “a corrosão é uma das causas mais comuns de vazamentos em tanques de armazenamento”. Sendo que, a corrosão se apresenta tanto interna como externamente nestes equipamentos. A melhoria das características químicas das tintas aplicadas internamente reduziu a incidência da corrosão interna, possibilitando aumento das campanhas operacionais.

Por outro lado, a corrosão externa de fundo de tanque, ou seja, a corrosão que acontece na face que fica em contato com o solo ou concreto da base, ainda é bastante presente e identificada nas inspeções realizadas. A técnica amplamente utilizada contra a corrosão externa de fundo de tanque é a proteção catódica por corrente impressa.

A dificuldade de acesso, sob o fundo dos tanques, para a medição periódica dos potenciais de proteção obtidos através do uso da proteção catódica dificulta o acompanhamento de sua efetividade. Soma-se o fato que, conforme Cardoso et al. (2015), a efetividade do projeto de proteção catódica depende também do domínio das instalações do tanque, um meio bastante variado composto por solos, areias e concretos. Ademais, para que a proteção catódica seja efetiva a face da chapa de fundo precisa estar em contato com o mesmo eletrólito que o anodo, ou seja, a chapa precisa estar em contato físico com o solo, cenário que nem sempre ocorre em função

dos recalques de solo e vãos formados pelo comportamento ondulatório das chapas de fundo.

Neste cenário, identifica-se a necessidade de desenvolvimento de formas alternativas ou complementares de proteção à corrosão externa das chapas de fundo de tanque, como a aspersão térmica de alumínio, que necessita de análise quanto a sua utilização e limitações para este fim. Segundo Ashworth (2010) tanques de armazenamento apoiados diretamente sobre o solo geralmente possuem proteção catódica para evitar corrosão pelo lado da chapa que apoia sobre solo, sendo que, a utilização de revestimentos neste lado da chapa é geralmente omitida mais por ignorância do projetista do que uma decisão consciente de não revestir. Para Chatterjee (2009) quando o sistema de pintura / revestimento para tanques de armazenamento é complementada por um sistema de proteção catódica adequadamente projetado, instalado e mantido, a possibilidade de ocorrência de vazamentos pode ser eliminada.

Os revestimentos de alumínio como proteção anticorrosiva são conhecidos na indústria, porém, a utilização deste revestimento na face externa das chapas de fundo de tanque esbarra na dificuldade de acesso para aplicá-lo após as chapas serem soldadas umas às outras, formando o piso do tanque, pois a face externa das chapas estará em contato com o solo. Desta forma, os revestimentos anticorrosivos para estas faces devem ser aplicados antes das chapas serem soldadas umas às outras, sendo necessários estudos quanto à viabilidade técnica desta aplicação em função da falta de acesso para retoques após a soldagem, considerando ainda que a região próxima à solda não recebe revestimento para não interferir no processo de soldagem.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Para as empresas do ramo logístico de petróleo e derivados, os tanques de armazenamento constituem um dos principais equipamentos de suas unidades operacionais, justificando as ações que possibilitam aumento de suas campanhas operacionais, aumentando a disponibilidade e reduzindo os impactos de lucro cessante com a parada dos equipamentos para manutenção. Soma-se o fato que, a utilização de sistema de proteção anticorrosivo mais eficaz para as chapas de fundo

contribui para redução da ocorrência de vazamentos nestes equipamentos, e por consequência, reduz a possibilidade de danos ambientais.

A corrosão externa em fundo de tanque de armazenamento ocorre em decorrência da exposição da chapa ao meio encontrado na base do tanque, já a corrosão interna do fundo ocorre em função da exposição da chapa ao produto que o tanque armazena e seus contaminantes, como pode ser visualizado na Figura 1 abaixo.

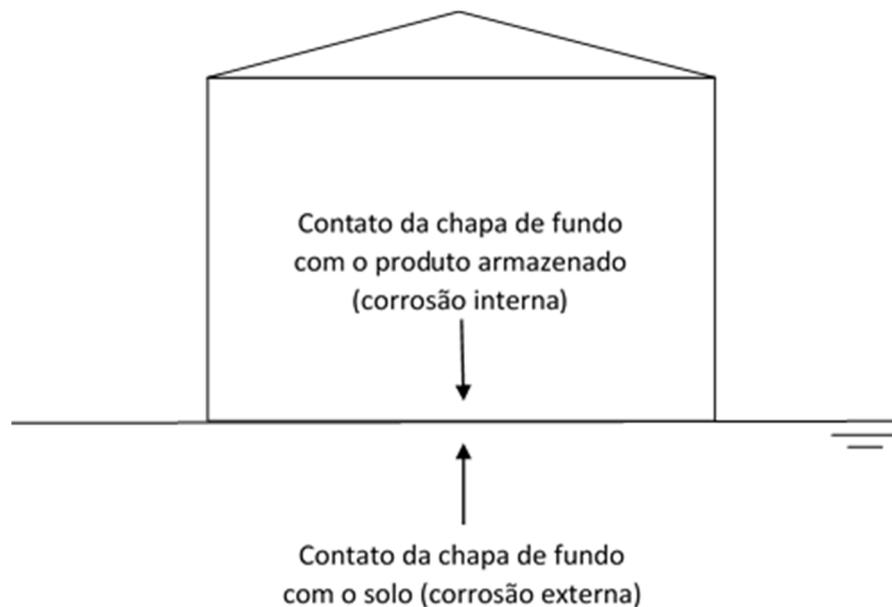


Figura 1: Corrosão externa e corrosão interna em fundo de tanque  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O foco desta dissertação está na corrosão externa de fundo de tanque, ou seja, na corrosão que ocorre pelo lado do fundo que fica voltado para solo sob o tanque. Não está sendo abordado neste trabalho os tanques apoiados sobre base de concreto.

É importante notar que o eletrólito presente no lado interno do tanque é diferente do eletrólito existente no lado externo, por esta razão, os anodos de sacrifício que são utilizados internamente ao tanque não protegem as chapas da corrosão externa, pois o anodo de sacrifício e a superfície a ser protegida precisam estar em contato com o mesmo eletrólito para que a proteção catódica galvânica ocorra.

A técnica amplamente utilizada contra a corrosão externa de fundo de tanque é a proteção catódica por corrente impressa, sendo prevista em normas internacionais de tanques de armazenamento, como a API RP 651:2014. Cabe salientar que a utilização de proteção catódica galvânica através de aspersione térmica de alumínio, avaliada neste trabalho, não é prevista na referida norma.

A ocorrência de corrosão em fundo de tanque de armazenamento é detectada através das inspeções que são realizadas periodicamente nestes equipamentos.

Segundo Barros (2006), a inspeção de tanques de armazenamento que já se encontram em operação nas unidades industriais é geralmente realizada pelo setor de inspeção da unidade operacional e aborda, basicamente, as condições físicas dos equipamentos, interna e externamente, a determinação da taxa de corrosão e avaliação da vida útil do equipamento, bem como, avaliação estrutural e determinação das causas de deterioração ou avaria do tanque.

Conforme Barros (2006), a inspeção de tanque de armazenamento pode ser externa ou geral, sendo que, a inspeção externa é realizada com o tanque armazenando produto, ou seja, não é necessário que seja retirado de operação. A inspeção geral é realizada com o tanque fora de operação, devidamente limpo e em condições de ser inspecionado interna e externamente em toda sua extensão.

Segundo previsão normativa “o intervalo entre inspeções de um tanque (ambas, interna e externa) deve ser determinado pelo seu histórico a menos que razões especiais indiquem que uma inspeção antecipada deve ser feita” (API 653:2014, seção 6.2.2).

Conforme o critério normativo citado, o setor de inspeção define o intervalo entre as inspeções de um tanque, e desta forma, fica estabelecido o tempo da campanha operacional do equipamento, pois a inspeção geral é realizada com o equipamento fora de operação.

As inspeções de chapa de fundo de tanque são realizadas durante as inspeções gerais do equipamento, e conforme previsão normativa “vários métodos para determinar a corrosão externa da chapa de fundo de tanque estão disponíveis [...]” sendo que “[...] a técnica *Magnetic Flux Leakage* (MFL) é comumente utilizada,

juntamente com ferramentas de medição de espessura ultrassônica, para inspecionar fundos de tanque” (API 653:2014, seção 4.4.4).

Na Figura 2 pode-se observar o resultado de uma inspeção de chapas de fundo de tanque de armazenamento, pela técnica MFL.

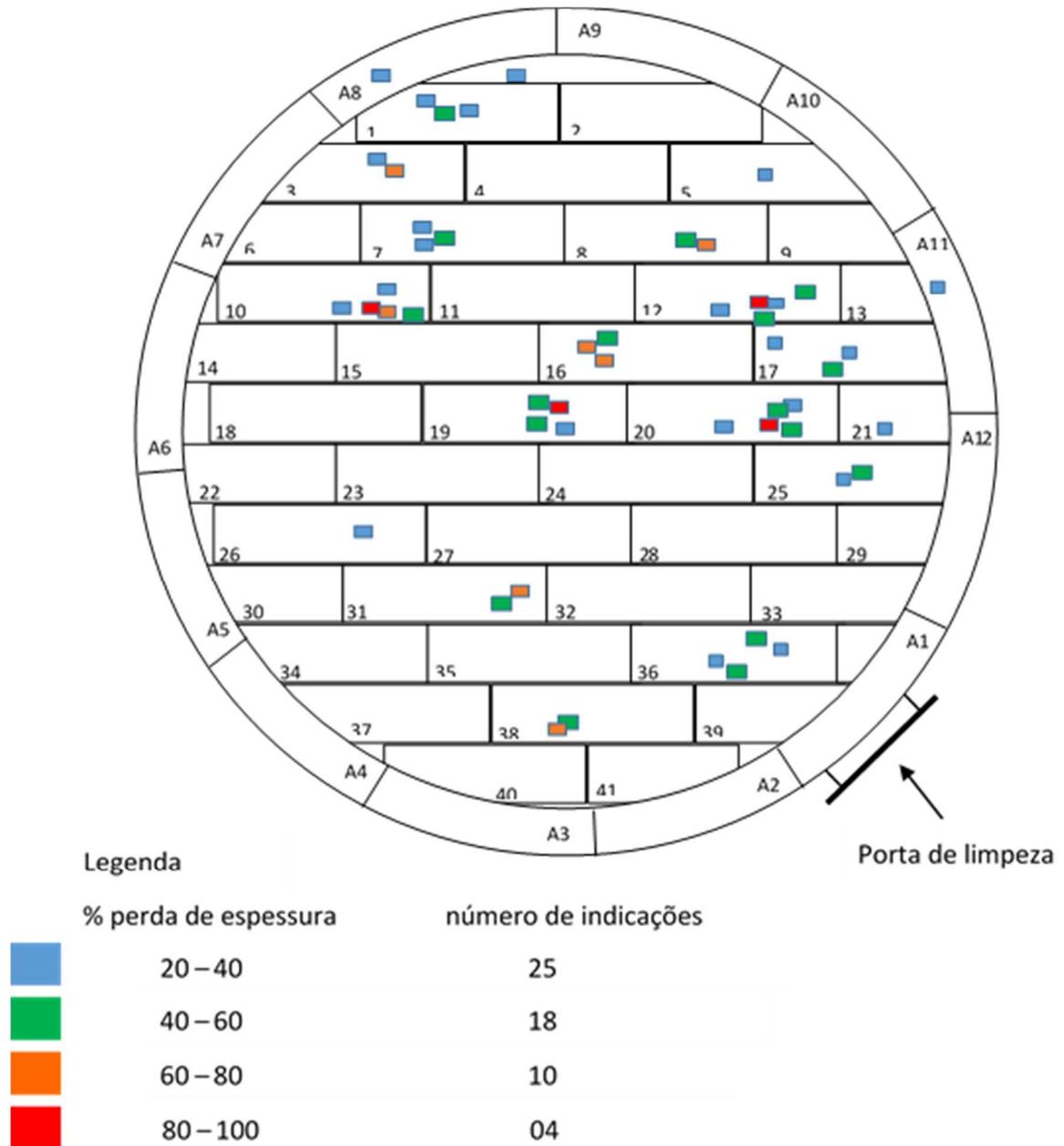


Figura 2: Resultado de inspeção pela técnica MFL  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2009)

Nota-se na Figura 2 a existência de um sistema de referências das informações de corrosão, indicando de forma macro a localização das corrosões em cada chapa do fundo do tanque, bem como, a adoção de um sistema de cores para ilustração dos percentuais de corrosão em cada ponto indicado. Este sistema facilita a identificação de áreas com maior perda de espessura, auxiliando na análise e definição dos reparos.

Uma das chapas do fundo com indicação de perda de espessura entre 80 e 100% foi removida, e pode-se observar a ausência de contato entre a chapa de fundo e solo, na Figura 3, cenário propício para a ocorrência de corrosão nas chapas de fundo por impossibilidade de proteção por proteção catódica por corrente impressa, podendo ser esta a razão da ocorrência da corrosão nesta chapa. Cabe salientar que a resistividade do solo também pode influenciar na eficácia da proteção catódica por corrente impressa.



Figura 3: Ausência de contato entre chapa de fundo e solo  
Fonte: Elaborado pelo autor (2009)

Após a retirada da chapa supracitada, pode-se observar a corrosão localizada que ocorreu pela face externa do fundo do tanque, como pode ser visualizado na Figura 4.

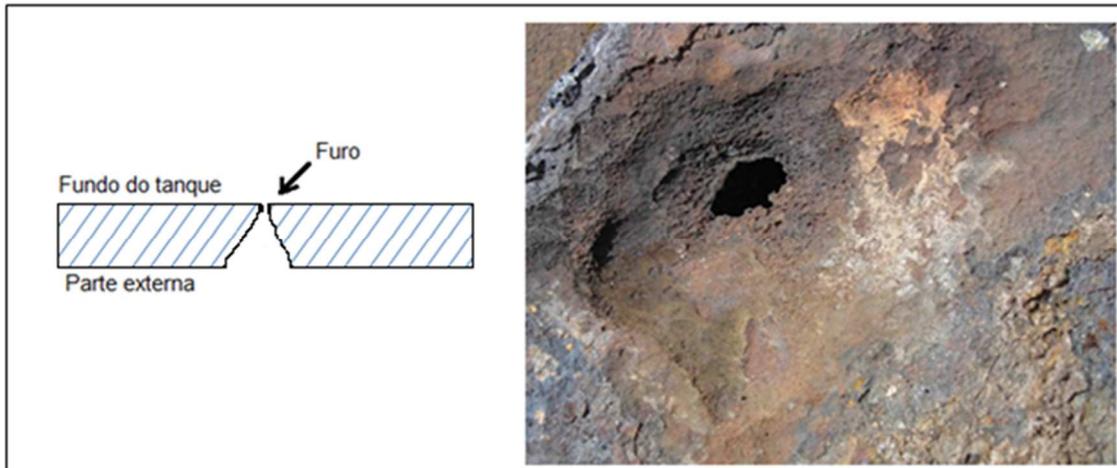


Figura 4: Corrosão externa em chapa de fundo de tanque  
Fonte: Elaborado pelo autor (2009)

### 1.3 OBJETO E OBJETIVO

O objeto desta dissertação é a corrosão em tanques de armazenamento de petróleo e derivados.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- identificar possível razão da ineficácia do sistema de proteção de catódica por corrente impressa como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanques de armazenamento de petróleo e derivados.

- analisar através de ensaios de laboratório a utilização de aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanques. Respondendo a seguinte questão: há viabilidade técnica de utilizar aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados?

### 1.4 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada na elaboração deste trabalho foi do tipo experimental, com realização de ensaios laboratoriais de soldagem e de corrosão em corpos de prova de aço carbono, detalhados no Capítulo 3 deste trabalho. O esquema do desenvolvimento desta dissertação é apresentado na Figura 5.

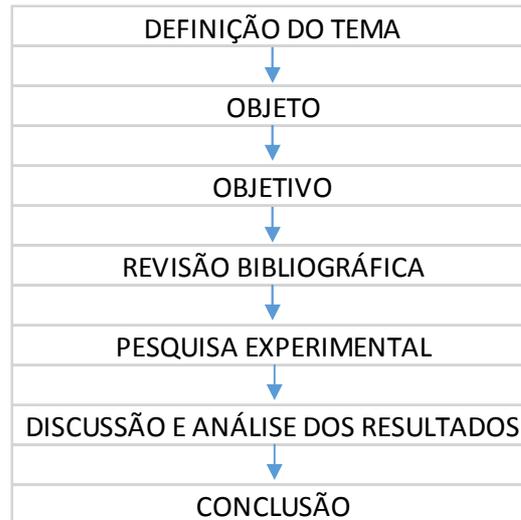


Figura 5: Esquema de elaboração da dissertação  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

## 1.5 RESUMO DOS CAPÍTULOS

O Capítulo 1 é dedicado à introdução, a qual aborda a relevância do assunto estudado, a justificativa do trabalho desenvolvido, os objetivos da dissertação, a metodologia utilizada e o resumo dos capítulos.

O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – demonstra a estratégia e os resultados da busca realizada pelas publicações relacionadas ao tema da dissertação, bem como, o referencial teórico que traz o embasamento necessário para o entendimento dos fenômenos e mecanismos envolvidos no processo corrosivo e de soldagem, e ainda, o funcionamento das técnicas de sistemas anticorrosivos para chapas de fundo de tanque de armazenamento.

O Capítulo 3 é dedicado à Materiais e Métodos, o qual descreve os experimentos realizados, suas formas e objetivos.

O Capítulo 4 é dividido em dois subitens para abordar os resultados dos experimentos e a discussão destes resultados.

O Capítulo 5 encerra a dissertação apresentando as conclusões embasadas nas análises dos resultados dos experimentos e na pesquisa bibliográfica realizada.

Ainda no Capítulo 5, há indicações para futuros estudos relativos a este tema, como o uso de outro material de base para chapa de fundo ao invés do aço carbono, como o aço inox por exemplo, bem como, indicação de futuros estudos de prevenção de distorção por soldagem nas chapas de fundo de tanque.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica foi realizada observando as publicações com período de abrangência de 20 anos. Como resultado foram citadas neste trabalho: 15 normas; 17 livros; 19 artigos; 1 tese; 1 dissertação; 1 apresentação.

As fontes de consulta utilizadas para a pesquisa bibliográfica foram:

### a) sites

Os sites utilizados na pesquisa bibliográfica foram escolhidos com objetivo de obter ampla abrangência internacional de informações, bem como, pesquisar nas bibliotecas digitais de universidades brasileiras, com foco principal naquelas que contam com pesquisadores membros da National Association of Corrosion Engineers (NACE), para tanto foi consultado o site da NACE, em 19 de Junho de 2017, através do endereço eletrônico ([nace.org/Corrosion-Central/University-Corrosion-Programs](http://nace.org/Corrosion-Central/University-Corrosion-Programs)).

Adicionalmente foram pesquisados os sites das três maiores empresas de óleo e gás do mundo em 2017, com base no ranking publicado pela revista Forbes, consultado através do endereço eletrônico ([www.forbes.com/sites/laurengensler/2017/05/24/the-worlds-largest-oil-and-gas-companies-2017-exxon-mobil-reigns-supreme-chevron-slips/#1e7074314f87](http://www.forbes.com/sites/laurengensler/2017/05/24/the-worlds-largest-oil-and-gas-companies-2017-exxon-mobil-reigns-supreme-chevron-slips/#1e7074314f87)), em 19 de Junho de 2017. O ranking foi estabelecido com base em uma pontuação composta de receitas, lucros, ativos e valor de mercado. Com base nesta lista foram pesquisados os sites das empresas *Exxon Mobil*, *Royal Dutch Shell*, e *China Petroleum & Chemical Corporation*.

A seguir são listados os sites utilizados na pesquisa bibliográfica:

Periódicos Capes: [www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)

Google Acadêmico: [scholar.google.com.br](http://scholar.google.com.br)

Universidade de São Paulo - USP: [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP:  
[www.bibliotecadigital.unicamp.br](http://www.bibliotecadigital.unicamp.br)

Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações – BDTD: [bdtd.ibict.br](http://bdtd.ibict.br)

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT: [www.ipt.br/en/institutional](http://www.ipt.br/en/institutional)

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR: [www2.ufscar.br](http://www2.ufscar.br)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS:  
[www.ufrgs.br/ufrgs/inicial](http://www.ufrgs.br/ufrgs/inicial)

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia  
– COPPE: [www.coppe.ufrj.br](http://www.coppe.ufrj.br)

*Exxon Mobil*: [corporate.exxonmobil.com](http://corporate.exxonmobil.com)

*Royal Dutch Shell*: [www.shell.com](http://www.shell.com)

*China Petroleum & Chemical Corporation*: [www.sinopecgroup.com/group/en](http://www.sinopecgroup.com/group/en)

#### b) livros

Foram utilizados livros de referência relativos aos principais assuntos abordados nesta dissertação. Desta forma, os livros utilizados são os afetos a: corrosão; proteção catódica; aços; soldagem; e materiais para equipamentos de processo.

#### c) normas

Foram utilizadas normas nacionais e internacionais relativas a tanques de armazenamento de petróleo e derivados.

Nacionalmente foram utilizadas normas PETROBRAS por consolidarem a experiência profissional da empresa referência neste ramo no país.

Internacionalmente foram utilizadas normas da *American Petroleum Institute* (API) por ser referência internacional em normatização das atividades do ramo de petróleo e derivados, sendo amplamente adotadas e aceitas como referência para a construção e manutenção de tanques de armazenamento no Brasil.

A definição das palavras chaves para a busca nos sites considerou os principais aspectos abordados no estudo, objetivando o melhor direcionamento dos mecanismos de busca ao objeto da pesquisa.

Palavras - Chaves	
Português	Inglês
tanque, corrosão, fundo, lado, solo, aspersão, anodo, armazenamento	<i>tank, corrosion, bottom, side, soil, aboveground, thermal spray, anodic, storage</i>

Quadro 1: Palavras-chaves utilizadas na pesquisa bibliográfica em sites  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As combinações das palavras-chaves foram montadas para dar foco à pesquisa sem reduzir a abrangência necessária. Conforme a quantidade de resultados apresentados em cada site de busca, foram realizados ajustes nas combinações para otimizar a pesquisa, conforme disposto no quadro abaixo.

Site	Combinação de palavras chaves	Resultados
Periódicos Capes	tanque, fundo, corrosão, aspersão térmica, solo	0
	tank, bottom, corrosion, thermal spray, soil, side	119
	tank, bottom, corrosion, thermal spray, aboveground	13
Google Acadêmico	"storage tank", bottom, corrosion, "thermal spray", soil side	50
	"tanque de armazenamento", fundo, corrosão, lado, solo	389
	"storage tank", bottom, corrosion, "thermal spray", aboveground	16
	"storage tank", "thermal spray", corrosion, anodic	33
	aspersão, anodo, fundo, "tanque de armazenamento"	5
USP	"tanques de armazenamento", fundo, corrosão, solo	194
	tank, bottom, corrosion, soil, side	6
Unicamp	"tanques de armazenamento", fundo, corrosão, solo	0
	tanque, fundo	22
BDTD	"tanques de armazenamento", fundo, corrosão, solo	0
	tanque, fundo, corrosão	5
COPPE	tanque, corrosão	15
	tank, corrosion	1
UFRGS	tanque, fundo, corrosão	4
	tank, corrosion	39
UFSCAR	tanque, fundo, corrosão	19
	tank, corrosion	13
IPT	tanque, corrosão	3
	tank, corrosion	19
Exxon Mobil	Corrosion, tank	23
Shell	Corrosion, tank	16
China Petr.	Corrosion, tank	1

Quadro 2: Resultados obtidos na pesquisa bibliográfica em sites  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

No *site* periódicos capes ([www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)) foi utilizado filtro de busca para os últimos 20 anos de publicação.

No *site* google acadêmico ([scholar.google.com.br](http://scholar.google.com.br)) foi utilizado filtro de busca para os últimos 20 anos de publicação, e desabilitadas as opções “incluir citações” e “incluir patentes”.

No *site* de teses da USP ([www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da biblioteca digital a UNICAMP ([www.bibliotecadigital.unicamp.br](http://www.bibliotecadigital.unicamp.br)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da biblioteca digital brasileira de teses e dissertações ([btdt.ibict.br](http://btdt.ibict.br)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da COPPE ([www.coppe.ufrj.br](http://www.coppe.ufrj.br)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da UFRGS ([www.ufrgs.br/ufrgs/inicial](http://www.ufrgs.br/ufrgs/inicial)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da UFSCAR ([www2.ufscar.br](http://www2.ufscar.br)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* do IPT ([www.ipt.br/en/institutional](http://www.ipt.br/en/institutional)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da *Exxon Mobil* ([corporate.exxonmobil.com](http://corporate.exxonmobil.com)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da *Shell* ([www.shell.com](http://www.shell.com)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

No *site* da *China Petroleum & Chemical Corporation* ([www.sinopecgroup.com/group/en](http://www.sinopecgroup.com/group/en)) não foram inseridos filtros adicionais além das palavras chaves citadas.

## 2.1 TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Os tanques de armazenamento abordados neste estudo estão sujeitos à pressão interna próxima à atmosférica, razão pela qual são conhecidos por tanques de armazenamento atmosféricos, fabricados em aço carbono, cilíndricos, verticais e não enterrados. Segundo Nunes e Lobo (2012) os tanques metálicos de armazenamento apoiados sobre o solo são mais utilizados nas indústrias de petróleo e petroquímica. A Figura 6, a seguir, apresenta a imagem de tanques de armazenamento atmosféricos.



Figura 6: Tanques de armazenamento atmosféricos  
Fonte: Barros (2006, p.20)

Estes equipamentos, conforme Barros (2006), são construídos em uma ampla faixa de capacidades, desde 100 barris ( $16 \text{ m}^3$ ) até grandes tanques com aproximadamente 550.000 barris ( $87.500 \text{ m}^3$ ).

Os tanques de armazenamento atmosféricos são usualmente classificados conforme o tipo de teto que possui. Os tipos de teto mais comuns são: teto fixo e teto flutuante. Conforme Barros (2006) os tetos fixos são diretamente ligados à parte superior de seus costados, podendo ser autoportantes (apoiados exclusivamente no costado) ou suportados por uma estrutura interna de perfis metálicos. Já os tetos flutuantes ficam diretamente apoiados na superfície do líquido armazenado, acompanhando a movimentação do nível de líquido no esvaziamento e no enchimento. A Figura 7, a seguir, indica os principais componentes de um tanque de armazenamento de teto fixo.

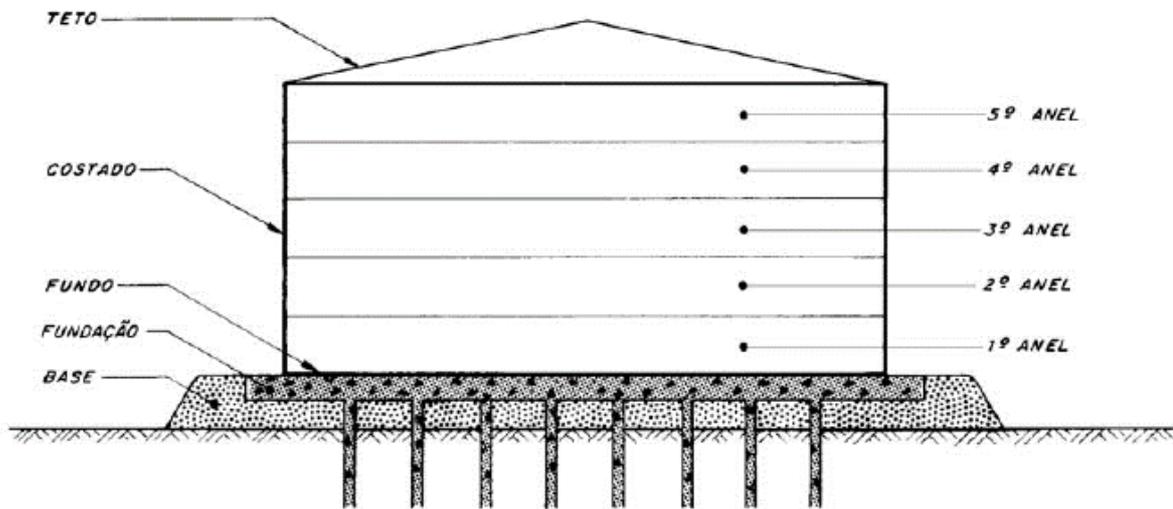


Figura 7: Principais componentes de tanque de armazenamento  
 Fonte: Barros (2006, p.3)

### 2.1.1 Bases e fundações

As bases e fundações são projetadas e construídas para prover o suporte necessário à estabilidade e correto funcionamento dos tanques, para tanto, faz-se necessário estudo do solo no qual o tanque será construído.

Conforme Barros (2006), os tanques de armazenamento podem ser construídos sobre dois tipos de fundação:

a) fundação profunda, é o tipo mais caro de fundação, só utilizado quando as condições de solo impossibilitam a utilização de fundação direta. Consiste na instalação de uma série de estacas no solo, sobre as quais é construída uma laje de concreto armado. O fundo e o costado do tanque se apoiam sobre esta laje, conforme pode ser visto na Figura 7.

b) fundação direta, apresenta dois aspectos construtivos: aterro compactado e anel de concreto.

- aterro compactado: consiste na substituição da camada superficial do terreno por um material mais adequado (cascalho, areia grossa ou outro material estável) e compacta-lo.

- anel de concreto: consiste em um anel de concreto localizado sob o costado do tanque. A profundidade do anel depende das condições do solo. Este tipo de fundação é utilizado em terrenos de qualidade duvidosa, ou para tanques de grandes diâmetros ( $D > 30$  m), ou tanques de teto flutuantes, que precisam de um melhor prumo do costado para a flutuação do teto. A Figura 8 ilustra o anel de concreto sobre o qual o costado é apoiado.



Figura 8: Fundação direta com anel de concreto  
Fonte: Barros (2006, p.3)

Cabe salientar que a norma internacional de construção de tanques de armazenamento do American Petroleum Institute, API 650:2013, seção B.3.2, explicita que a base drenante que fica sob as chapas do fundo do tanque deve ser de areia limpa com aumento gradual da granulometria à medida que a profundidade aumenta, para propiciar a efetividade da proteção da catódica. Já a norma Petrobras N-1822:2013, seção 5.2, preconiza a aplicação de uma camada de revestimento (betuminoso, argamassa de cimento e areia, ou concreto simples) entre a base drenante (areia, cascalho) e as chapas de fundo de tanque. Na prática são encontrados tanques com a camada de supracitada de revestimento da base, e tanques sem esta camada. Com relação ao revestimento betuminoso, Guan (2003, p. 96) cita que “é de fácil aplicação e relativamente barato, mas é ambientalmente hostil e pode ser removido e danificado pelo contato casual”.

O desenvolvimento deste estudo considera o cenário de fundação direta, no qual a chapa de fundo de tanque se apoia sobre a base drenante de areia.

### 2.1.2 Fundo de tanque

O fundo de tanque de armazenamento, conforme Barros (2006), deve ser cônico com inclinação mínima de 1:120 do centro para a periferia, exceto quando armazenar produtos que requerem alto controle do teor de água, como a gasolina de aviação, o querosene de aviação e o biodiesel. Nestes casos específicos o caimento deve ser da periferia para o centro do tanque, e a inclinação normalmente utilizada é de 1:25.

Conforme Barros (2006) a disposição das chapas de fundo de tanque armazenamento pode ser realizado de duas formas:

a) com chapas recortadas no centro e chapas anulares na periferia (sob o costado). Conforme mostra a Figura 9.

b) integralmente com chapas recortadas. Conforme mostra a Figura 10.

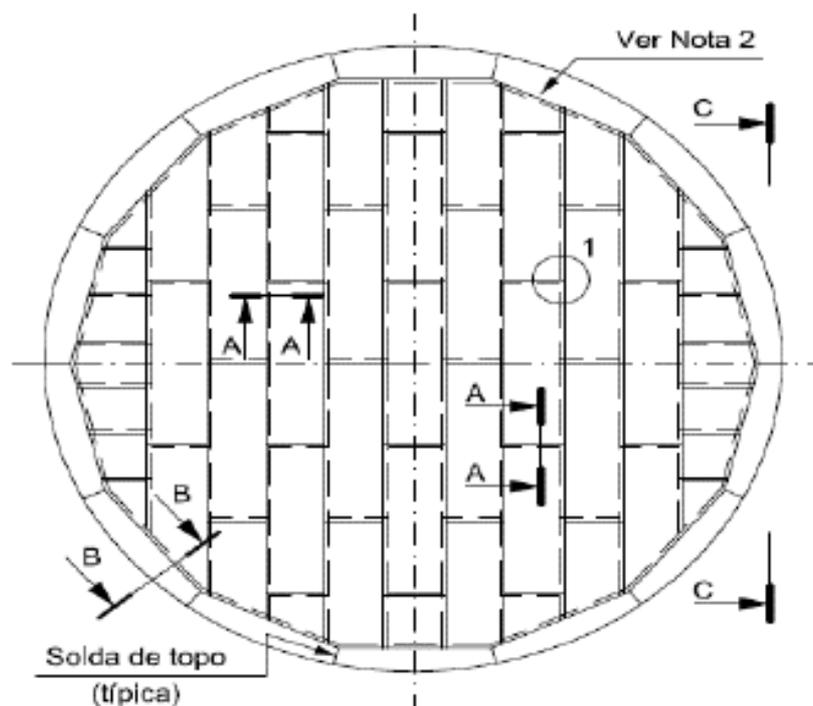


Figura 9: Fundo de tanque com chapas anulares na periferia  
Fonte: Petrobras N-270:2014, seção B.1

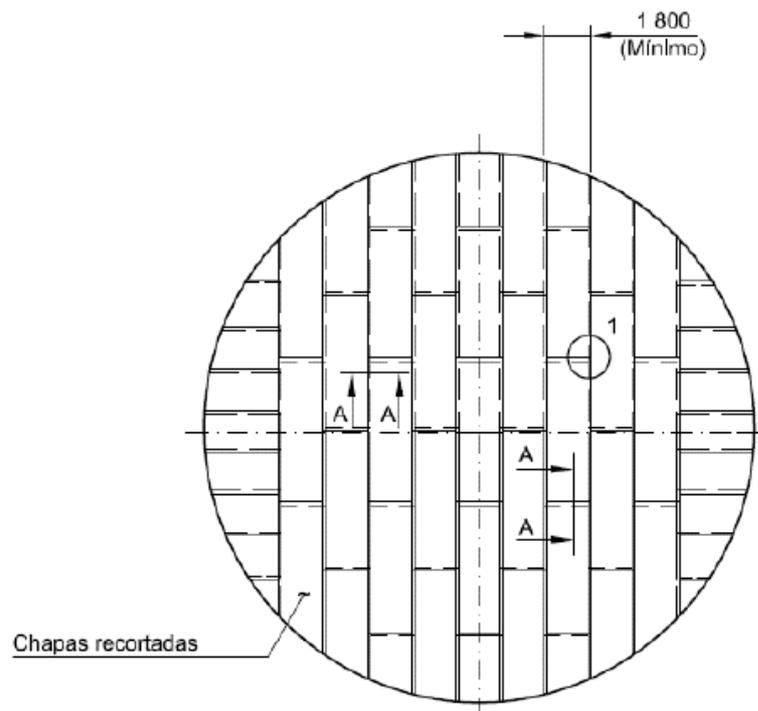


Figura 10: Fundo de tanque integralmente com chapas recortadas  
 Fonte: Petrobras N-270:2014, seção B.2

Nota-se que as chapas recortadas são utilizadas nos dois tipos de construção de fundo de tanque, o que diferencia um tipo construtivo de outro é a utilização de chapas anulares na periferia em um dos métodos.

As normas de projeto de tanques de armazenamento, API-650:2013, seção 5.5.1 e N-270:2014, seção 8, listam exigências e recomendações para o uso do tipo de montagem de fundo com chapas anulares e integralmente com chapas recortadas, podendo ser observado que o uso integral de chapas recortadas possui forte limitação. Exemplifica-se que, pela norma Petrobras N-270:2014, seção 8.2.2, este tipo de montagem só é permitido para tanques com diâmetro de até 15 metros.

As chapas recortadas são unidas umas às outras por soldagem através de juntas sobrepostas, com solda somente na face superior, conforme a norma Petrobras N-270, a sobreposição das chapas deve ser de cinco vezes a espessura da chapa, como pode ser visualizado na Figura 11, que traz o detalhamento da seção A-A da Figura 9.

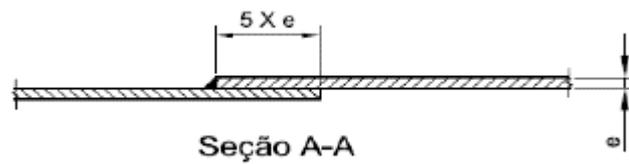


Figura 11: Chapas recortadas unidas por juntas sobrepostas  
Fonte: Petrobras N-270:2014, seção B.1

As chapas anulares são unidas umas às outras por soldagem através de juntas de topo. Conforme Figura 12.

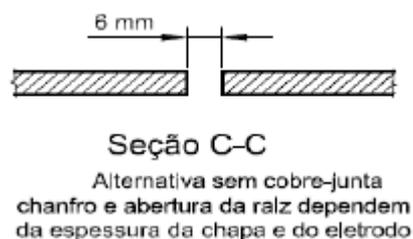


Figura 12: Chapas anulares unidas por junta de topo  
Fonte: Petrobras N-270:2014, seção B.1

### 2.1.3 Material e espessura para chapas de fundo de tanque

A norma API-650:2013, seção 4.2.2, traz uma lista de tipos de aço carbono aplicáveis à construção de tanques de armazenamento, com indicação das condições de aplicação para cada tipo. A norma Petrobras N-270:2014, seção 8.2.1, recomenda que todas as chapas de fundo devem ser de aço carbono que atendam às especificações técnicas da norma ASTM A283 Gr. C ou ASTM A36, e as chapas anulares devem ser do mesmo material da chapa do costado diretamente ligada a elas.

Os aços carbono que atendem às especificações para ser enquadrado como ASTM A 283 Gr. C e ASTM A 36, citados pela N-270:2014, seção 8.2.1, estão na lista dos materiais recomendados pela API-650:2013, seção 4.2.2, havendo convergência das normas em questão. Desta forma, para os ensaios laboratoriais deste estudo foram utilizados chapas de aço que atendem às especificações para ser enquadrado como ASTM A 283 Gr. C, conforme o preconizado pelas principais normas

supracitadas. A Tabela 1 explicita a composição química de aço para atendimento à norma ASTM A 283:2007.

Tabela 1: Composição química de aço ASTM A 283:2007

Elementos	Grau A	Grau B	Grau C	Grau D
Carbono, máx.	0,14	0,17	0,24	0,27
Magnésio, máx.	0,9	0,9	0,9	0,9
Fósforo, máx.	0,035	0,035	0,035	0,035
Enxofre, máx.	0,04	0,04	0,04	0,04
Silício (chapas até 40mm), máx.	0,4	0,4	0,4	0,4
Silício (chapas acima de 40 mm), máx.	0,15 - 0,40	0,15 - 0,40	0,15 - 0,40	0,15 - 0,40
Cobre, mín. % quando especificado	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: ASTM A 283/A 283M:2007, *table 1*, adaptada pelo autor

Com relação às propriedades mecânicas do aço para atendimento para atendimento à norma ASTM A 283:2007, seção 6, são explicitadas na Tabela 2 abaixo. As informações de propriedades mecânicas do material das chapas de fundo de tanque são importantes no desenvolvimento deste trabalho para seleção do eletrodo revestido utilizado no experimento de soldagem.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço para atendimento à norma ASTM A 283:2007

	Grau A	Grau B	Grau C	Grau D
Limite de resistência, ksi	45 - 60	50 - 65	55 - 75	60 - 80
Tensão de escoamento, mín. ksi	24	27	30	33

Fonte: ASTM A 283/A 283M:2007, *table 2*, adaptada pelo autor

Com relação à espessura das chapas de fundo de tanque, a norma N-270:2014, seção 8.2.3, define que deve ser no mínimo de 6,30 mm. A espessura mínima das chapas anulares é definida na N-270:2014, seção A.3, em função da espessura da chapa do costado em que será soldada sobre a chapa anular, desta forma, quanto maior a espessura da chapa do costado maior deverá ser a espessura da chapa anular. Observando os números desta correlação nota-se que as espessuras das chapas anulares podem variar de 6,30mm a 16 mm.

A norma API 650:2013, seção 5.4.1, especifica que a espessura das chapas de fundo não deve ser menor que 6,0 mm, descontada a sobre espessura de corrosão. Esta norma também correlaciona a espessura da chapa anular com a espessura da chapa do costado em que será soldada, sendo 6,0 mm a menor espessura identificada nesta correlação.

Nota-se, no Brasil, a utilização da espessura de 6,35 mm, que corresponde à medida comercial de ¼" (um quarto de polegada) para as chapas recortadas. Para as chapas anulares observa-se obediência às espessuras previstas na norma Petrobras N-270:2014, seção A.3, na qual os valores variam de 6,3 mm a 16 mm em função da espessura da chapa do primeiro anel do costado e da declividade do fundo do tanque.

Para os ensaios laboratoriais deste estudo foram adotadas as espessuras 6,35 mm para os corpos de prova que representam tanto as chapas recortadas como as chapas anulares.

## 2.2 CORROSÃO

Considerando o escopo do estudo em questão, faz-se necessário conceituar e entender mecanismos de corrosão que podem ocorrer nas chapas de fundo de tanque de armazenamento.

Segundo Gentil (2007, p. 1) “pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos”.

Outra abordagem interessante feita por Gentil (2007, p. 1) cita que “pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo siderúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal”.

A justificativa para se estudar os processos corrosivos, para atuar em sua mitigação, é abordada por Gentil (2007) que cita que a corrosão é, em geral, um processo espontâneo, que constantemente transforma os materiais metálicos de modo que a durabilidade e o desempenho dos mesmos deixam de atender o fim a que se destinam. Por consequência, são frequentes os problemas causados por corrosão nas mais variadas atividades, que vão desde a indústria em geral até a medicina e

obras de arte, acarretando grandes perdas econômicas não somente pela necessidade de substituição dos materiais, mas também pelas perdas indiretas, ocasionadas pelo mau funcionamento dos equipamentos corroídos e a consequência de acidentes por falha por corrosão, por exemplo.

Corroborando com as justificativas supracitadas, Telles (2003) e Roberge (2000) citam que a corrosão é responsável por enormes prejuízos provindos da necessidade constante de substituir equipamentos corroídos e pela necessidade de superdimensionamento de numerosas peças para evitar a possibilidade de falha em serviço. Ainda segundo Telles (2003, p. 51) “aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de todo o aço no mundo destina-se, exclusivamente, a repor material destruído pela corrosão”.

### **2.2.1 Corrosão eletroquímica e química**

De acordo com Telles (2003, p. 53) “do ponto de vista físico-químico, a corrosão nos materiais metálicos pode assumir duas formas bastante diferentes: a chamada corrosão eletroquímica e o ataque químico, resultante da ação direta do agente agressivo sobre o metal”.

A diferença entre os mecanismos da corrosão eletroquímica e da corrosão química é abordada por Gentil (2007), que cita que no mecanismo eletroquímico ocorrem reações químicas com transferência de carga ou elétrons através de um eletrólito, já no mecanismo químico ocorrem reações químicas diretas entre o material metálico e o meio corrosivo.

De forma a facilitar o entendimento, Telles (2003) exemplifica casos em que ocorre o ataque químico, cita a dissolução de alguns metais em meios ácidos e a corrosão por gases em altas temperaturas. Sendo que, “a corrosão eletroquímica, em suas diversas formas, é, de longe, mais frequente e causadora de prejuízo e, por isso, mais importante na prática do que a corrosão química” (TELLES 2003, p. 53).

Para o caso da corrosão externa nas chapas de fundo de tanque de armazenamento, Rim-Rukem e Okokoyo (2005) citam que “a corrosão que ocorre no lado de baixo da chapa é um processo eletroquímico, pois envolve o transporte de elétrons de uma fonte (anodo) para um receptor (catodo) através de um caminho

elétrico criado por um meio condutor (eletrólito)”. Por esta razão, no decorrer deste trabalho foi dada ênfase no processo de corrosão eletroquímica.

Conforme Telles (2003, p. 53) “as diversas formas de corrosão eletroquímicas ocorrem necessariamente em meios úmidos, com presença de água ou umidade, sendo que, em muitos casos, alguns poucos ppm (parte por milhão) de umidade já são suficientes para provocar corrosão”.

Segundo Gentil (2006) cita que, em atmosfera de baixa umidade relativa, o ferro praticamente não sofre corrosão, de forma que, em atmosfera com umidade relativa próxima de 60% a corrosão é lenta, mas acima de 70% ela é acelerada, sendo chamado de umidade crítica o valor da umidade relativa acima do qual verifica-se uma rápida aceleração do processo corrosivo. Caso haja, além da umidade, a presença de outras substâncias poluentes, a velocidade de corrosão é acelerada.

O Gráfico 1 ilustra a corrosão do ferro em função da umidade relativa da atmosfera, com a presença de 0,01% de dióxido de enxofre.

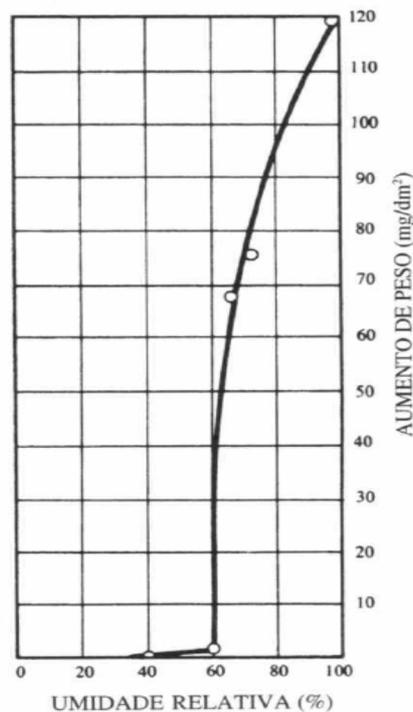


Gráfico 1: Influência da umidade relativa atmosférica contendo 0,01% de dióxido de enxofre na corrosão do ferro  
Fonte: Gentil (2007, p. 56)

Segundo Zayed et al. (2005, p. 6), “a umidade relativa crítica é a umidade abaixo da qual a água não se formará em superfície de metal limpa e, portanto, a corrosão eletroquímica ou úmida também não ocorre. A espessura e a composição química do filme de água são importantes”.

Alinhado com o que se pode observar no gráfico acima, Zayed et al. (2005, p. 6), cita que “os valores críticos de umidade relativa são encontrados entre 50 e 70% para o aço, cobre, níquel e zinco. Estes valores dependem da natureza dos poluentes ou contaminantes presentes na atmosfera”.

Desta forma, faz-se necessário o entendimento do mecanismo de corrosão eletroquímica para o desenvolvimento deste estudo, pois com o conhecimento do funcionamento do mecanismo de corrosão presente pode-se identificar as técnicas adequadas de prevenção.

### **2.2.2 Mecanismo eletroquímico**

Para o entendimento do mecanismo eletroquímico de corrosão faz-se necessário compreensão de conceitos de potencial de eletrodo e de pilhas eletroquímicas.

#### **2.2.2.1 Potencial de eletrodo**

Conforme Gentil (2007) quando um metal é imerso em uma solução eletrolítica ocorre uma diferença de potencial entre o metal e a solução. Esta diferença de potencial é de natureza elétrica e química, simultaneamente, e por esta razão é denominada diferença de potencial eletroquímico.

Para entendimento do que consiste um eletrodo, cabe a explicação que “o eletrodo é o sistema formado pelo metal e pela solução eletrolítica vizinha ao metal”. (GENTIL 2007, p. 16)

O eletrodo de ferro pode ser representado pela Figura 13.

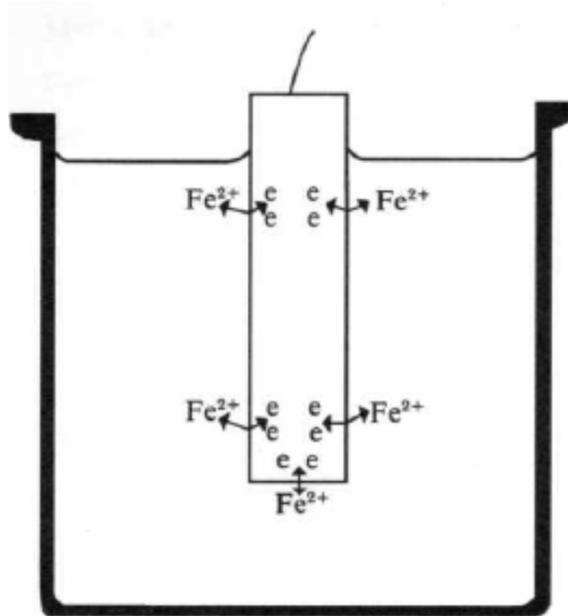


Figura 13: Representação do eletrodo de ferro  
 Fonte: Gentil (2007, p. 16)

Nota-se que no caso do ferro, importante para este estudo, há a passagem de íons de  $\text{Fe}^{2+}$  para o eletrólito, e cada íon deixa dois elétrons no metal. Tal fenômeno ocorre de forma espontânea até o estabelecimento de um estado de equilíbrio.

A medição do potencial de eletrodo, em que ocorre o equilíbrio supracitado, não pode ser realizada sem um valor de referência ou de um potencial padrão, conforme Gentil (2007). Segundo o mesmo autor pode-se medir o potencial de um eletrodo ligando-o a um voltímetro e considerando um segundo eletrodo como referência. Desta forma, “valores relativos de potenciais podem ser determinados experimentalmente usando-se o eletrodo padrão ou normal de hidrogênio que foi escolhido como referência, e, arbitrariamente, fixado como tendo zero potencial”. (GENTIL, 2007, p. 17)

A Figura 14 representa o esquema para medição do potencial de eletrodo do zinco, que neste caso vem exemplificar a forma como é obtido o potencial de eletrodo padrão de um elemento. Na literatura encontram-se os valores tabelados do potencial de eletrodo padrão dos elementos.

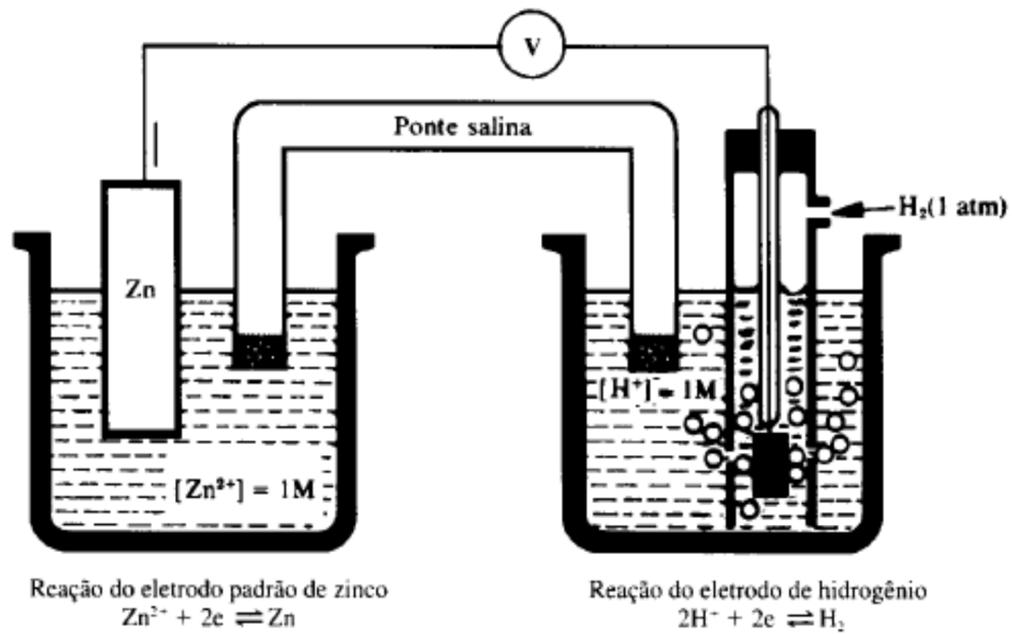


Figura 14: Medição de potencial de eletrodo padrão de um elemento  
 Fonte: Gentil (2017, p. 18)

A tabela de potencial de eletrodo padrão é montada em função do valor do potencial medido. Sendo que os elementos que ocupam posições mais altas na tabela comportam-se como anodos nas pilhas eletroquímicas formadas com elementos mais abaixo na tabela. O entendimento do funcionamento das pilhas eletroquímicas, descrito no subitem subsequente, é fundamental para a compreensão do mecanismo de corrosão eletroquímica.

Conforme Gentil (2007), além da tabela de potencial padrão, é de grande utilidade a chamada tabela prática em água do mar, na qual metais e ligas estão distribuídos de acordo com seus potenciais medidos em água do mar. Nesta tabela os principais metais e as ligas mais usadas estão dispostos de forma que as posições mais altas são ocupadas por materiais que se comportam como anodos nas pilhas eletroquímicas formadas com elementos mais abaixo na tabela, assim como na tabela de potencial padrão.

Tabela 03: Tabela prática em água do mar

Extremidade anódica (corrosão)	
1. Magnésio	24. Latão Almirantado
2. Ligas de Magnésio	25. Latão Alumínio
3. Zinco	26. Latão Vermelho
4. Alclad 38	27. Cobre
5. Alumínio 3S	28. Bronze
6. Alumínio 61S	29. Cupro-Níquel 90/10
7. Alumínio 63S	30. Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)
8. Alumínio 52	31. Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)
9. Cádmio	32. Níquel (passivo)
10. Aço doce	33. Inconel (passivo)
11. Aço baixo teor liga	34. Monel
12. Aço liga	35. Hastelloy C
13. Ferro fundido	36. Aço AISI 410(passivo)
14. Aço AISI 410 (ativo)	37. Aço AISI 430 (passivo)
15. Aço AISI 430 (ativo)	38. Aço AISI 304 (passivo)
16. Aço AISI 304 (ativo)	39. Aço AISI 316 (passivo)
17. Aço AISI 316 (ativo)	40. Titânio
18. Chumbo	41. Prata
19. Estanho	42. Grafite
20. Níquel (ativo)	43. Ouro
21. Inconel (ativo)	44. Platina
22. Metal Muntz	Extremidade catódica
23. Latão Amarelo	(proteção)

Fonte: Gentil (2007, p. 26)

#### 2.2.2.2 Pilhas eletroquímicas

Segundo Gentil (2007) uma pilha eletroquímica é constituída dos componentes listados abaixo. A retirada de qualquer um desses componentes elimina a pilha, e conseqüentemente, reduz a possibilidade de corrosão eletroquímica.

a) anodo: eletrodo em que ocorre a corrosão (oxidação), onde a corrente elétrica (íons metálicos positivos) entra no eletrólito.

b) eletrólito: meio condutor (em geral, um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo.

c) catodo: eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito, provocando reações de redução.

d) circuito metálico: ligação metálica entre o anodo e o catodo para passagem de elétrons, no sentido anodo-catodo.

A pilha é caracterizada pela diferença de potencial entre seus eletrodos (anodo e catodo) em circuito aberto, sendo esta a sua força eletromotriz.

Segundo Telles (2003), o anodo e o catodo poderão ser de peças de metais diferentes, ou ser pontos na mesma peça metálica.

Os metais e ligas metálicas quando em contato com qualquer eletrólito, ionizam-se superficialmente, gerando, assim, uma diferença de potencial entre o material metálico e o eletrólito. Havendo qualquer diferença, ou falta de homogeneidade, seja no material ou seja no eletrólito, o potencial de ionização será diferente entre os dois elementos metálicos, que serão, assim, o anodo e o catodo de uma pilha de corrosão. (TELLES, 2003, p. 54)

O comportamento de metais diferentes quando estes formam uma pilha é descrito por Gentil (2007), que cita que a pilha formada por eletrodos de metais diferentes é chamada pilha galvânica, na qual cada material se comportará como anodo ou catodo conforme sua posição na tabela de potencial de eletrodo. O metal mais ativo na tabela será o anodo da pilha, cedendo elétrons, sendo corroído.

A Figura 15 apresenta um exemplo de pilha formada por eletrodos de metais diferentes (ferro e zinco) imersos em solução aquosa a 3% de cloreto de sódio. Neste cenário, o zinco é o anodo, por estar em posição mais elevada na tabela prática em água do mar em relação ao ferro.

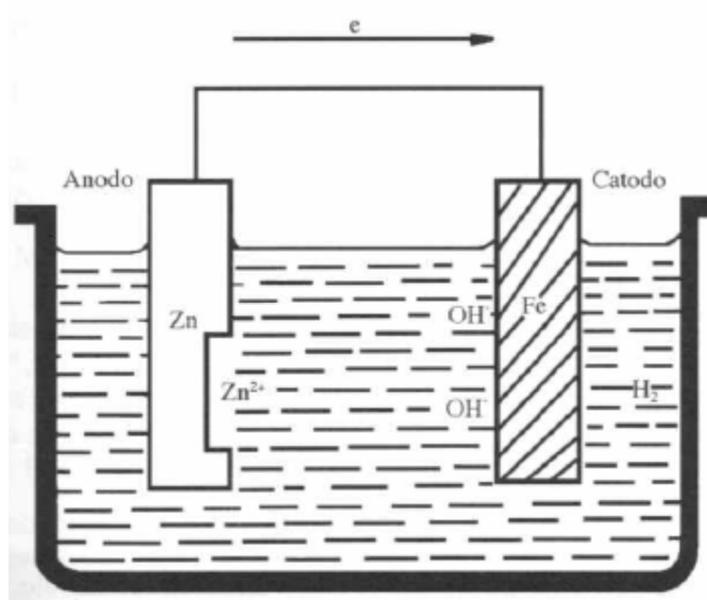


Figura 15: Áreas anódicas e catódicas na pilha Zn-Fe  
Fonte: Gentil (2007, p. 35)

Ao observar a Figura 15 nota-se que o ferro, sendo o catodo da pilha galvânica, não sofre corrosão, fica protegido. Segundo Gentil (2007), esta conclusão explica o funcionamento da proteção catódica com anodos de sacrifício. Por esta razão são utilizados magnésio, zinco e alumínio para proteção do ferro em estruturas, cascos de navio, e internamente em tanques de armazenamento de petróleo e água salgada.

Este conceito pode ser utilizado para a proteção externa de chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados, através da aplicação de zinco, alumínio ou outro material que apresente comportamento anódico em relação ao Ferro.

Segundo Telles (2003) as irregularidades microscópicas no próprio material metálico são as causas mais comuns de diferenças de potencial. Essas irregularidades são as diferenças existentes entre os grãos que constituem os materiais, sendo intituladas pilhas de ação local. Nestes casos, as pilhas serão formadas por grãos vizinhos entre os quais exista diferenças de natureza, de estrutura cristalina, de composição química, de tamanho e outros. Por esta razão, ocorre a formação de pilhas, e assim a corrosão, em quase todos os materiais metálicos. As pilhas de ação local mais fortes ocorrem entre grãos de natureza diferentes (fases diferentes), o aço carbono, por exemplo, é formado basicamente de grãos de ferrita e cementita, onde os grãos de ferrita são os anodos e os grãos de cementita são os catodos destas pilhas microscópicas, espalhadas por toda a superfície da peça em contato com o meio corrosivo.

Conforme Dutra e Nunes (2006) os fatores de heterogeneidade da superfície do material e as heterogeneidades do eletrólito podem atuar isoladamente ou em combinação uns com os outros na formação das pilhas de corrosão, aumentando a velocidade do ataque corrosivo.

Conforme citado anteriormente, qualquer diferença ou a falta de homogeneidade no eletrólito também propicia a formação de potenciais diferentes no metal, formando a pilha. Segundo Gentil (2007) a pilha constituída de um único material metálico em contato com um mesmo eletrólito que apresenta regiões com diferentes teores de gases dissolvidos é chamada pilha de aeração diferencial. Esta pilha ocorre com mais frequência em regiões diferentemente aeradas, como frestas por exemplo, sendo o eletrodo mais aerado o catodo e o menos aerado o anodo.

Segundo Dutra e Nunes (2006) outra importante pilha de corrosão é a pilha de resistividade elétrica diferencial, a qual ocorre em tubulações enterradas em solos com diferentes resistividades elétricas. Nestes casos, o trecho de tubulação que está em contato com o solo de mais baixa resistividade funciona como anodo. Nota-se que o cenário citado pelos autores, relativo às tubulações enterradas, pode ser visualizado nas chapas de fundo de tanque de armazenamento, as quais podem formar pilhas de corrosão em função do contato com solos com diferentes resistividades elétricas.

A formação de pilha ativa-passiva, conforme Gentil (2007) ocorre em alguns metais e ligas que tendem a tornar-se passivos em função da formação de uma película fina e aderente de óxido ou outro composto em sua superfície, como ocorre com o alumínio, chumbo, aço inoxidável, ferro e cromo. Em função da passivação estes materiais se comportam como áreas catódicas, porém o íon cloreto destrói, em alguns casos, esta passivação ou impede sua formação, pois aumentam a permeabilidade da camada formada. Esta destruição da passividade pelo cloreto ocorre de forma pontual, formando pequenos pontos de metal ativo (anodos) circundados por grandes áreas de metal passivo (catodos), gerando uma diferença de potencial entre estas áreas da ordem de 0,5 V. A destruição da camada passivadora também pode ocorrer por riscos na camada de óxido, expondo a superfície metálica ativa (anodo).

### **2.2.3 Proteção catódica**

Segundo Roberge (2000) e Dutra e Nunes (2006), a proteção catódica é um método de controle de corrosão que consiste em transformar em catodo de uma célula eletrolítica ou eletroquímica a estrutura que se deseja proteger. Em função da necessidade de um eletrólito contínuo para que a proteção catódica seja atuante, a mesma não pode ser utilizada em estruturas aéreas, podendo ser utilizada em estruturas enterradas ou submersas.

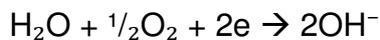
Os processos de aplicação de proteção catódica são apresentados por Dutra e Nunes (2006) além de Parker e Peattie (1984), que citam a existência de dois processos pelos quais se pode aplicar proteção catódica, ambos com base no mesmo princípio, que consiste na injeção de uma corrente elétrica na estrutura, através do

eletrólito. Os dois processos são intitulados de proteção catódica galvânica e proteção catódica por corrente impressa.

A previsão normativa de utilização de proteção catódica para a face externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento está na norma americana (API 650:2013, seção I.3), o qual cita que “os sistemas de proteção catódica podem ser instalados em conjunto com sistemas de detecção de vazamentos pelo fundo”.

Segundo Dutra e Nunes (2006) a superfície metálica protegida catodicamente é polarizada a um nível tal que toda sua área se torna catódica, e em uma superfície catódica só ocorrem reações de redução, por esta razão, não ocorre a reação de dissolução do metal,  $M \rightarrow M^{n+} + ne$ , que é uma reação de oxidação. Devido às reações de redução na superfície catódica, há uma elevação do pH próximo ao catodo, o que favorece a não ocorrência de corrosão do metal. Em função do meio em que ocorrem, as reações de redução são diferentes, sendo que as mais frequentes são:

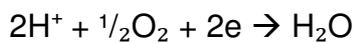
Em meio neutro e aerado



Em meio neutro desaerado



Em meio ácido aerado



Em meio ácido desaerado



### 2.2.3.1 Proteção catódica galvânica

Segundo Dutra e Nunes (2006) neste tipo de proteção a corrente elétrica é promovida pela força eletromotriz existente entre o metal a proteger (catodo) e o metal que está sendo utilizado como anodo, como resultado da diferença de seus potenciais eletroquímicos. Sendo que, para proteger o aço, os principais materiais metálicos

utilizados são as ligas de zinco, magnésio e alumínio, por apresentarem maior diferença de potencial em relação ao mesmo.

A estimativa da massa que será consumida do anodo nas pilhas galvânicas de materiais dissimilares é abordada por Gentil (2007), que cita que a massa dos materiais metálicos que atuam como anodo neste tipo de proteção pode ser calculada usando-se a relação quantitativa existente entre a quantidade de corrente que passa através de um eletrólito e a massa do material que é oxidado nos eletrodos. Sendo que, tal relação é objeto da lei de Faraday e pode ser expressa pela Equação 01:

$$M=Kit \quad (01)$$

Onde:

M = massa do metal

K = equivalente eletroquímico

I = intensidade da corrente em ampère

t = tempo em segundos

A Tabela 4 expressa a massa de um metal consumido anodicamente pela passagem de um ampère durante um ano. Cabendo salientar que o equivalente eletroquímico do metal é igual a sua massa atômica dividida pelo número de elétrons cedidos.

Tabela 4: Consumo anódico de metal

<b>Metal</b>	<b>Reação Anódica</b>	<b>Equivalente Eletroquímico</b>	<b>Massa (kg)</b>
Fe	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$	$\frac{55,85}{2}$	9,125
Cu	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + 1\text{e}$	$\frac{63,57}{1}$	20,77
	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	$\frac{63,57}{2}$	10,39
Pb	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$	$\frac{207,2}{2}$	33,866
Zn	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$	$\frac{65,38}{2}$	10,665
Al	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$	$\frac{26,98}{3}$	2,9

Fonte: Gentil (2006, p. 41)

### 2.2.3.2 Proteção catódica por corrente impressa

Segundo Telles (2003) e Revie (2008) a proteção catódica por corrente impressa é um sistema muito eficiente, com instalação e manutenção relativamente dispendiosas, com especial aplicação em equipamentos enterrados, submersos ou em contato com o solo, como dutos e chapas de fundo de tanque de armazenamento apoiados sobre o solo. Em equipamentos em contato com a atmosfera, a proteção catódica por corrente impressa não é possível, pois exige a existência de um eletrólito contínuo.

A forma de aplicação da proteção catódica por corrente impressa é abordada por Dutra e Nunes (2006), que citam que na proteção catódica por corrente impressa a corrente elétrica é promovida por uma força eletromotriz de uma fonte geradora de corrente contínua, utilizando um conjunto dispersor de corrente no eletrólito, feito de anodos inertes (como o grafite e o titânio, por exemplo), chamado leito de anodos. A Figura 16, a seguir, exemplifica um esquema simplificado de um sistema de proteção catódica por corrente impressa.

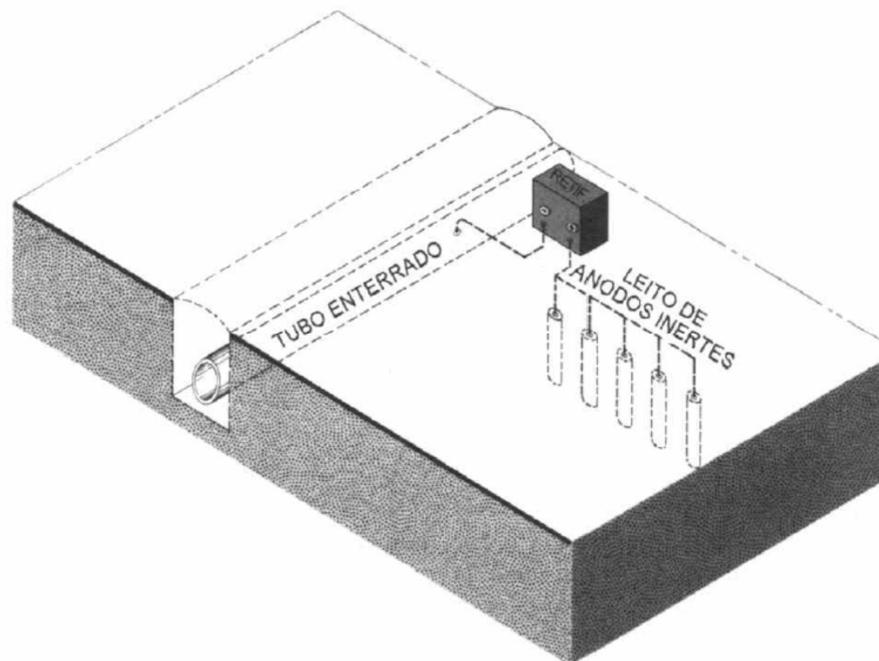


Figura 16: Esquema simplificado de um sistema de proteção catódica por corrente impressa  
 Fonte: Dutra e Nunes (2006, p. 69)

Na visão de Dutra e Nunes (2006) as fontes de corrente contínua mais utilizadas na prática são os retificadores, os quais são alimentados em corrente alternada, que após retificada é usada no sistema. No uso deste tipo de sistema é extremamente importante conectar o polo negativo da fonte de corrente à estrutura que se deseja proteger, e o polo positivo ao leito de anodos inertes, caso a polaridade seja invertida poderá ocorrer corrosão acelerada na estrutura que se desejava proteger.

Para tanques de armazenamento de petróleo e derivados, identifica-se na literatura trabalhos que objetivam a distribuição uniforme da corrente de proteção na superfície externa das chapas de fundo, através de melhor distribuição dos anodos no solo. Segundo Lourenço e Moura (2009) são utilizados anodos em forma de fitas paralelas no solo sob o tanque, nos casos em que há membrana de contenção de vazamento instalada na fundação. E conforme Kroon e Urbas (1992), para melhor distribuir a corrente de proteção catódica, os anodos do sistema de proteção catódica por corrente impressa podem ser instalados de formas variadas, como: horizontal ou verticalmente ao redor da periferia do tanque; em furos inclinados estendendo os anodos para baixo do tanque; anodos profundos em coluna vertical.

### 2.2.3.2.1 Diagrama de Pourbaix

O entendimento sobre do diagrama de Pourbaix é de fundamental importância para a técnica de proteção catódica, pois na ótica de Gentil (2006) o diagrama de Pourbaix é um método gráfico que relaciona potencial de eletrodo e pH, e apresenta uma possibilidade de prever as condições sob as quais podem-se ter corrosão, imunidade ou possibilidade de passivação do metal. As representações gráficas das reações possíveis, a 25 °C e sob pressão de 1 atm entre os metais e a água, representam os vários equilíbrios químicos e eletroquímicos que podem existir entre o metal e o eletrólito líquido.

Conforme Dutra e Nunes (2006) o diagrama de Pourbaix apresenta as curvas representativas das condições de equilíbrio entre um elemento e os seus compostos, definindo os domínios de estabilidade termodinâmica de cada um.

A Figura 17 representa um diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema ferro puro imerso em água pura.

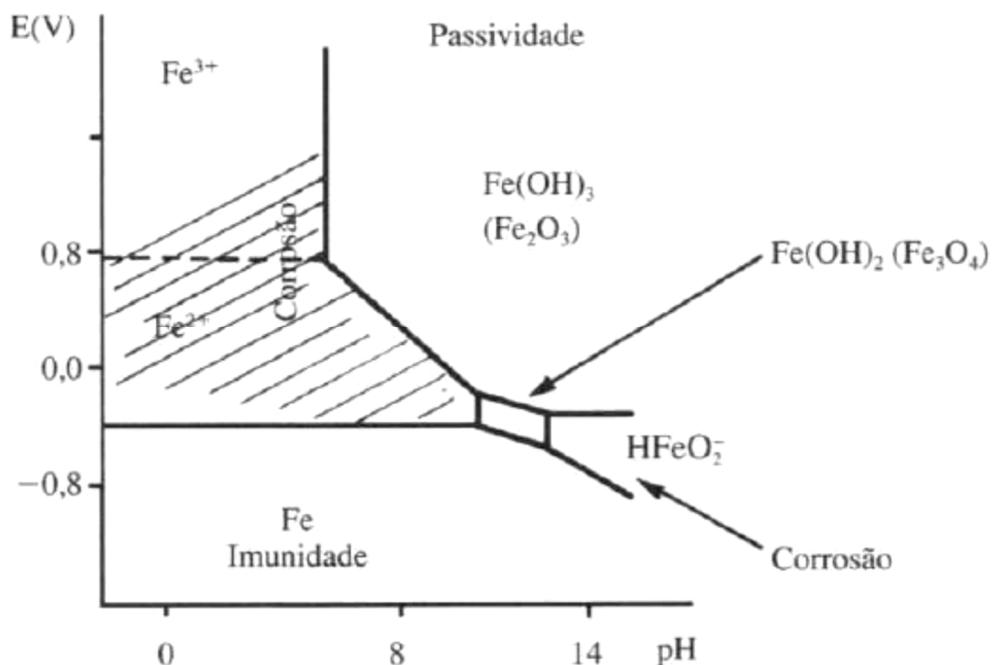


Figura 17: Diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema ferro puro imerso em água pura.

Fonte: Gentil (2006, p. 25)

Segundo Dutra e Nunes (2006) pode-se observar neste diagrama que, no campo onde as formas estáveis são o  $\text{Fe}^{2+}$  e o  $\text{Fe}^{3+}$ , tem-se corrosão, ou seja, as reações de corrosão são espontâneas. No campo em que a forma estável é o Fe, tem-se imunidade, não ocorrendo corrosão. E no campo onde a forma estável é o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o ferro apresenta-se passivado, em função da formação deste óxido aderido e compacto sobre superfície do metal, formando uma barreira contra a ação corrosiva da solução.

Conforme Gentil (2006) a proteção catódica do ferro por anodo de sacrifício ou por corrente impressa corresponde, do diagrama potencial e pH, a abaixar o potencial do metal para um valor em que ocorra a imunidade. A utilização deste diagrama para este fim assegurará a proteção da estrutura contra a corrosão, bastando manter o potencial da estrutura dentro do domínio da imunidade.

#### **2.2.3.2 Polarização**

O entendimento sobre o fenômeno da polarização é importante para os estudos de proteção catódica. Segundo Dutra e Nunes (2006), o potencial de eletrodo de um metal, que se desenvolve quando o sistema entra em equilíbrio, conforme ilustrado na Figura 14, se altera quando este metal compõe uma pilha de corrosão, pois o equilíbrio das reações em ambos os eletrodos (anodo e catodo) é rompido. Com a utilização de um eletrodo de referência é possível medir o potencial de cada metal em suas condições de equilíbrio e durante o processo de corrosão que se estabelece com a pilha galvânica. Realizando estas medições percebe-se que com a passagem da corrente elétrica, em função da pilha formada, o potencial de ambos os metais (anodo e catodo) se modificam, acarretando a redução do escoamento de elétrons na pilha, ou seja, houve redução da diferença de potencial entre o anodo e o catodo, pois houve alteração do potencial de ambos os eletrodos.

Conforme Dutra e Nunes (2006) denomina-se polarização a variação do potencial de um eletrodo causada pela passagem de uma corrente elétrica, sendo que se a variação do potencial for ao sentido positivo diz-se que a polarização é anódica, e se a variação for no sentido negativo diz-se que a polarização é catódica, sempre tomando como referência inicial o potencial de repouso do eletrodo em causa. A polarização traduz uma relutância da natureza em oposição às causas que geraram

desequilíbrio ao sistema, impondo uma redução na intensidade de corrente que circula entre o anodo e o catodo pelo condutor metálico, diminuindo assim a intensidade da corrosão.

Conforme Dutra Nunes (2006), o fenômeno da polarização é de grande importância na cinética dos processos de corrosão eletroquímica e para a proteção catódica, a qual consiste essencialmente na polarização catódica da estrutura que se pretende proteger.

#### **2.2.4 Formas de corrosão**

Segundo Gentil (2006), a corrosão pode ocorrer sob diferentes formas, sendo muito importante o conhecimento das mesmas no estudo dos processos corrosivos. A caracterização segundo a morfologia da corrosão auxilia no esclarecimento do mecanismo e na definição das medidas adequadas de proteção.

Com foco em equipamentos de processo, como os tanques de armazenamento de petróleo e derivados, Telles (2006) cita que as formas de corrosão mais importantes para equipamentos de processo são a corrosão uniforme, a corrosão por pites e a corrosão sob tensão. Sendo que a ocorrência de corrosão sob tensão depende da presença simultânea de tensão de tração elevada, meio corrosivo e material metálico suscetível.

Devido ao cenário típico de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados não propiciar a formação de corrosão sob tensão, esta forma não será detalhada neste estudo, sendo detalhadas as formas de corrosão uniforme e por pites.

##### **2.2.4.1 Corrosão uniforme**

Segundo Telles (2003) e Roberge (2000) a corrosão uniforme, também conhecida como corrosão generalizada, é uma forma de corrosão que ocorre aproximadamente por igual em toda a superfície da peça em contato com o meio corrosivo, gerando uma redução mais ou menos constante de espessura. Embora seja a forma de corrosão que mais gera perda de material, não é a forma mais perigosa, pois pode ser prevista, controlada e facilmente medida.

#### 2.2.4.2 Corrosão por pites

Segundo Telles (2003) a corrosão por pites consiste na formação de cavidades de pequeno diâmetro e maior profundidade na peça, podendo chegar a perfurar a peça, com pouca ou nenhuma perda de espessura do material, por esta razão, esta forma de corrosão é muito destrutiva e perigosa. Esta distribuição irregular do ataque corrosivo dificulta a estimativa de tempo de vida do material.

Conforme Gentil (2006) as formas de corrosão por placas e alveolar, usuais no Brasil, não são utilizadas em publicações em língua estrangeira, as quais utilizam somente a afirmativa corrosão por pite para corrosões localizadas. A Norma G 46-76-ASTM apresenta cortes transversais de diferentes formas de pites, na qual algumas se assemelham bastante a classificação usada no Brasil para placas e alveolar.

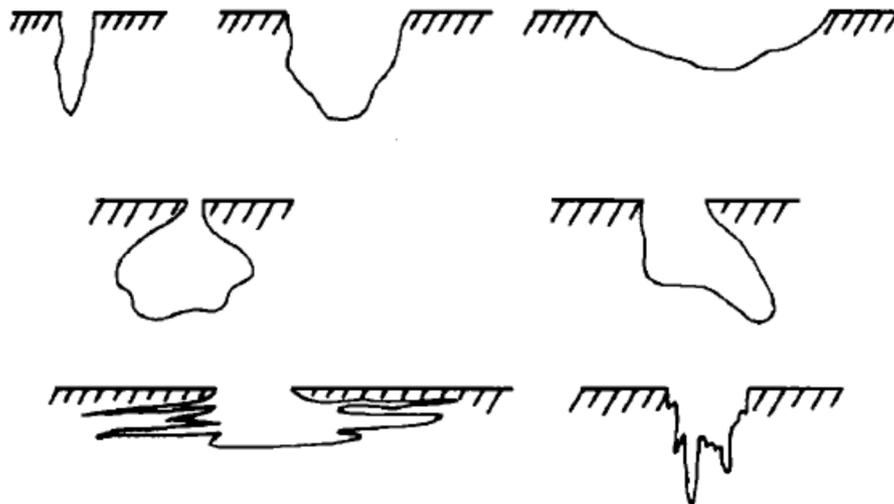


Figura 18: Formas de pites  
Fonte: Gentil (2006, p. 46)

Segundo Telles (2003) a corrosão alveolar é uma variante da corrosão por pites, na qual o diâmetro das cavidades é maior e a profundidade menor.

Os fatores mais frequentemente envolvidos em casos de corrosão localizada, como pites e alvéolos, segundo Gentil (2006), são: a relação entre áreas catódica e anódica, aeração diferencial, variação de pH e produtos de corrosão presentes na superfície metálica ou formados durante o processo de corrosão.

Conforme Gentil (2006) a composição química do meio corrosivo ou do material metálico podem influenciar significativamente no ataque por pites. Os mecanismos propostos para o início da formação dos pites, admitem:

- o íon, como o cloreto por exemplo, penetrando na película de passivação (óxido) existente na superfície do material metálico, aumenta a condutividade iônica de forma localizada na película, e ocasiona ataque anódico com formação de pite;

- o íon é adsorvido na interface película de passivação (óxido) – solução, reduzindo a energia interfacial, gerando fratura ou deslocamento da película de passivação.

Ainda segundo Gentil (2006), a formação do pite inicialmente é lenta, mas após formado há um processo autocatalítico que produz condições para o contínuo crescimento do mesmo.

### **2.2.5 Proteção conta corrosão**

Considerando que a corrosão externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados são eletroquímicas, os métodos de proteção abordados neste trabalho têm foco neste tipo de corrosão.

Segundo Dutra e Nunes (2006) os métodos utilizados para proteção contra corrosão eletroquímica baseiam-se em impedir ou controlar o funcionamento das pilhas de corrosão. Com este objetivo, as ações podem ser no metal, no meio corrosivo, nos potenciais das pilhas e na interface metal/eletrólito.

Com relação ao material que é utilizado nas chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados, Chiaverini (2005) cita que o aço carbono utilizado na fabricação de produtos planos, como chapas, possui menor resistência à corrosão que o ferro comercialmente puro, devido à maior presença de carbono, que aumenta a tendência à corrosão eletroquímica. Por outro lado, a adição de um pequeno percentual de cobre, em torno de 0,25%, melhora significativamente sua tendência à corrosão.

Segundo Pannoni (2004), o cobre e o fósforo são os principais elementos de liga utilizados em aços carbonos para aumenta-lhes a resistência quanto à corrosão

atmosférica, favorecendo a formação de uma película de óxidos aderentes e protetores, chamada de pátina, que reduz a velocidade do ataque dos agentes corrosivos do meio ambiente. Sendo que, uma condição ambiental importante para a formação da pátina é existência de períodos de umedecimento e secagem alternados. Não havendo esta alternância, como no caso de exposição constante da superfície ao solo, ou à água, a velocidade de corrosão dos aços patináveis é aproximadamente a mesma do aço carbono estrutural. Por esta razão não será abordada neste trabalho a utilização de aço com adição de cobre para evitar corrosão na face externa das chapas de fundo de tanque.

Dentre os possíveis métodos contra corrosão à serem utilizados na face externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento, será dado foco na proteção catódica por corrente impressa, por ser o método atualmente mais utilizado para este fim, e na aspersão térmica de alumínio, por ser o método objeto de análise de viabilidade neste trabalho.

Os métodos contra corrosão que atuam no metal, como o uso de aços inoxidáveis, podem ser abordados em estudos posteriores sendo importante a análise econômica.

O uso de inibidores de corrosão, que segundo Dutra e Nunes (2006) são compostos químicos que são adicionados ao meio corrosivo e diminuem ou eliminam sua agressividade, também podem ser abordados em estudos posteriores sendo importante a verificação da lixiviação do inibidor que pode ocorrer sob o tanque. Segundo Lyublinski (2014) o uso da técnica de proteção catódica associada com inibidores de corrosão reduz a densidade de corrente necessária para alcançar o potencial de proteção necessário, além disso, essa solução fornece proteção contra corrosão em locais em que a chapa de fundo não toca o solo, cenário em que a proteção catódica não atua. Para tanques de armazenamento que possuem fundo duplo, Lyublinski (2010) cita que “os inibidores podem ser uma solução eficaz. No entanto, em muitos casos, sua eficiência não pode ser prevista e, por si só, não é rentável”.

O método contra corrosão através da proteção catódica por corrente impressa é utilizado para proteção das chapas de fundo de tanque de armazenamento, e possui

previsão na norma API 650:2013. Tal método é abordado no item 2.2.3 deste trabalho. Cabe destacar que o sistema de proteção catódica adequadamente projetado, suplementado por pintura / revestimento da face inferior das chapas de fundo de tanque, é a medida de proteção apropriada para garantir a integridade das chapas de fundo do tanque contra corrosão do lado do solo por um período maior (CHATTERJEE, 2008; JOHN; SINGH, 2004).

Uma definição de revestimentos anticorrosivos é feita por Telles (2003), que cita que os revestimentos protetores são películas aplicadas artificialmente sobre o metal, formando uma barreira para evitar o contato do fluido corrosivo com o material metálico revestido. Sendo que alguns revestimentos podem atuar, além da proteção como barreira, também como proteção por inibição anódica ou por inibição catódica, a exemplo da galvanização em peças de aço-carbono.

De acordo com Thomason (1985) o revestimento de alumínio por aspensão térmica fornece proteção tanto como barreira entre o meio corrosivo e o metal, tanto como proteção catódica galvânica efetiva para o aço exposto por danos ao revestimento. Soma-se o fato que, conforme experimentos realizados por Wolfson (1996), o revestimento de alumínio por aspensão térmica pode atuar como única fonte proteção catódica em áreas de aproximadamente 5% expostas por falha no revestimento quando exposto a lodo salino encontrado no Golfo do México.

Conforme Telles (2003), qualquer que seja o revestimento, é importante que seja perfeito, sem falhas de continuidade, pois uma pequena falha pode provocar um ponto de corrosão localizada, que talvez cause a perfuração do metal mais depressa do que se não houvesse revestimento algum.

#### 2.2.5.1 Pintura

Conforme Gentil (2006) e Revie (2008) a aplicação de pinturas e esquemas de pintura é uma das técnicas de proteção anticorrosiva mais empregadas, sendo que, o desenvolvimento tecnológico neste setor tem sido intenso, não apenas quanto a novos tipos de resinas e outras matérias primas utilizadas na fabricação das tintas, mas também em relação aos métodos de aplicação das mesmas. Os avanços tecnológicos no segmento de endurecedores para resinas epoxídicas já possibilita a disponibilidade no mercado de tintas líquidas isentas de solventes orgânicos.

Com relação à espessura das tintas, para que sejam eficazes na proteção anticorrosiva, Gentil (2006) cita que, de acordo com resultados experimentais, a espessura mínima que a película de tinta deve possuir para que cumpra sua finalidade de proteção anticorrosiva é, conforme o ambiente de exposição, descrita na Tabela 5.

Tabela 5: Espessura mínima de película de tinta anticorrosiva

Atmosfera altamente agressiva	> 250 $\mu\text{m}$
Imersão permanente (em água salgada)	> 300 $\mu\text{m}$
Superfícies aquecidas	75 a 120 $\mu\text{m}$
Atmosfera com agressividade média	> 160 $\mu\text{m}$
Atmosfera pouco agressiva	> 120 $\mu\text{m}$

Fonte: Gentil (2006, p. 269), adaptada pelo autor

Conforme Gentil (2006) o mecanismo de proteção por barreira consiste na colocação de uma película, o mais impermeável possível, entre o metal e o meio corrosivo de forma a abaixar a corrente de corrosão a níveis desprezíveis, porém, todas as películas são parcialmente permeáveis. Desta forma, com o tempo, o eletrólito alcança a superfície do metal e o processo corrosivo tem início, assim, a eficiência da proteção depende da espessura do revestimento e da resistência das tintas ao meio corrosivo.

O mecanismo de barreira, segundo Nunes e Lobo (2012), é também denominado por retardamento do movimento iônico, pois em virtude da porosidade da película, o eletrólito chegará à superfície metálica depois de algum tempo, e iniciará o processo corrosivo.

Conforme Nunes e Lobo (2012) a passagem de umidade através da película de tinta é denominada osmose, e ocorre sob o efeito de uma pressão osmótica que força a passagem de água da região com menor concentração de sal para a interface da película com o metal, onde haja uma concentração maior de sal. A aplicação de

proteção catódica com elevadas densidades de corrente, gerando superproteção, acelera o processo de osmose, sendo neste caso intitulada eletrosmose.

Segundo Nunes e Lobo (2012) a pintura de tanques de armazenamento situados sobre a superfície do solo é geralmente toda realizada em campo, sendo que a pintura interna do equipamento é realizada conforme o produto que será armazenado, já a pintura externa dos tanques é realizada no costado, teto e acessórios.

#### 2.2.5.2 Revestimento metálico

A definição de revestimentos metálicos é abordada por Dutra e Nunes (2006) e Schweitzer (2009) que citam que os revestimentos metálicos consistem na interposição de uma película metálica entre o meio corrosivo e o metal que se deseja proteger, sendo que, os mecanismos de proteção propiciado por estas películas são geralmente por barreira, podendo prover também mecanismos como passivação e proteção catódica.

Sendo a aspensão térmica do alumínio um dos métodos de proteção estudados neste trabalho, método também intitulado de metalização, cabe explicitar que conforme Dutra e Nunes (2006) a metalização consiste na deposição de metais de baixo ponto de fusão sobre o metal que se pretende proteger através de uma pistola, fazendo-se revestimentos com zinco, alumínio, chumbo e estanho. Segundo Helsel, Lanterman e Wissmar (2008), “a metalização fornece proteção galvânica ao aço e é um revestimento muito durável e resistente à abrasão”.

A breve descrição do processo de aspensão térmica é feita por Lima e Trevisan (2006, p. 21), que cita que “aspensão térmica é um grupo de processos onde materiais metálicos ou não-metálicos, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato preparado, formando um depósito aspergido”.

Conforme Lima e Trevisan (2007), a pistola utilizada para aspensão térmica gera o calor necessário utilizando gases combustíveis ou um arco elétrico, desta forma, aquecem os materiais sólidos que serão aspergidos alterando-os para um estado plástico ou fundido, sendo então acelerados por um gás comprimido, impelindo os

vapores de partículas para o substrato que se pretende cobrir, formando finas partículas lenticulares que se resfriam, se conformam e aderem na superfície preparada do substrato, formando uma estrutura lamelar.

A Figura 19 ilustra o esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica.

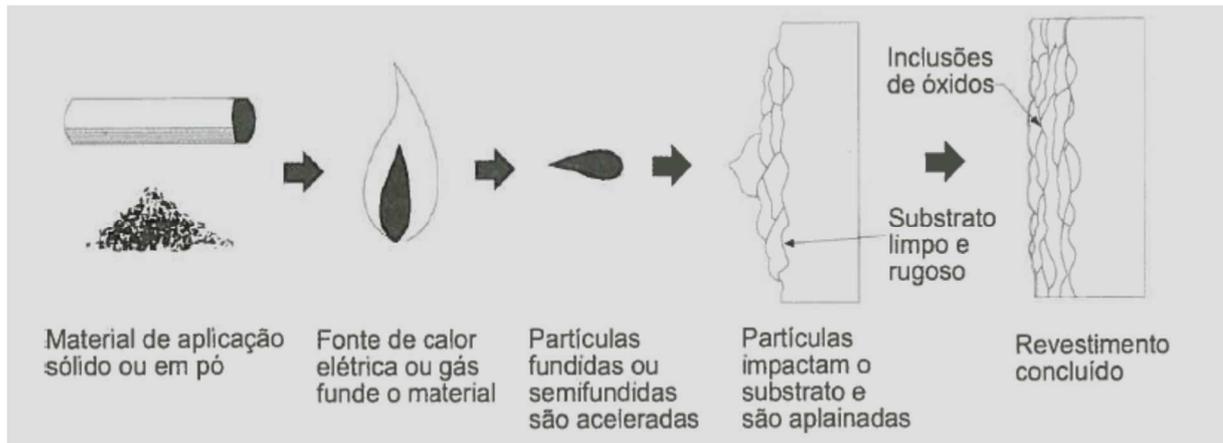


Figura 19: Esquema do processo de aspersão térmica  
Fonte: Lima e Trevisan (2007, p. 23)

O método de aplicação da aspersão térmica por pistola permite que este serviço seja executado em campo, e possibilita ao executante proteger as bordas das chapas para não receber a camada de alumínio, evitando que a mesma interfira no processo de soldagem. Segundo Thomason (1985, p.125) “o dispositivo utilizado para aspersão térmica tem aparência similar a uma pistola de pintura *spray* e pode ser utilizado para cobrir quase todas os formatos”.

Conforme Lima e Trevisan (2007) a preparação da superfície do substrato que receberá o material aspergido é necessária para qualquer variação de aspersão térmica que se pretenda realizar, sendo importante a limpeza da superfície para eliminar a contaminação que inibirá a ligação do revestimento ao substrato, e a existência de perfil de rugosidade na superfície para permitir a adesão do revestimento.

Com relação a camada formada pelo metal aspergido, Lima e Trevisan (2007) cita que a estrutura depositada e a química do revestimento aspergido em ar ambiente são diferentes daquelas do mesmo material antes de ser aspergido, tais diferenças são devidas à natureza do revestimento, à reação com gases do processo de

aspersão e gases da atmosfera, enquanto no estado fundido. A Figura 20 ilustra a seção transversal de um revestimento aspergido.

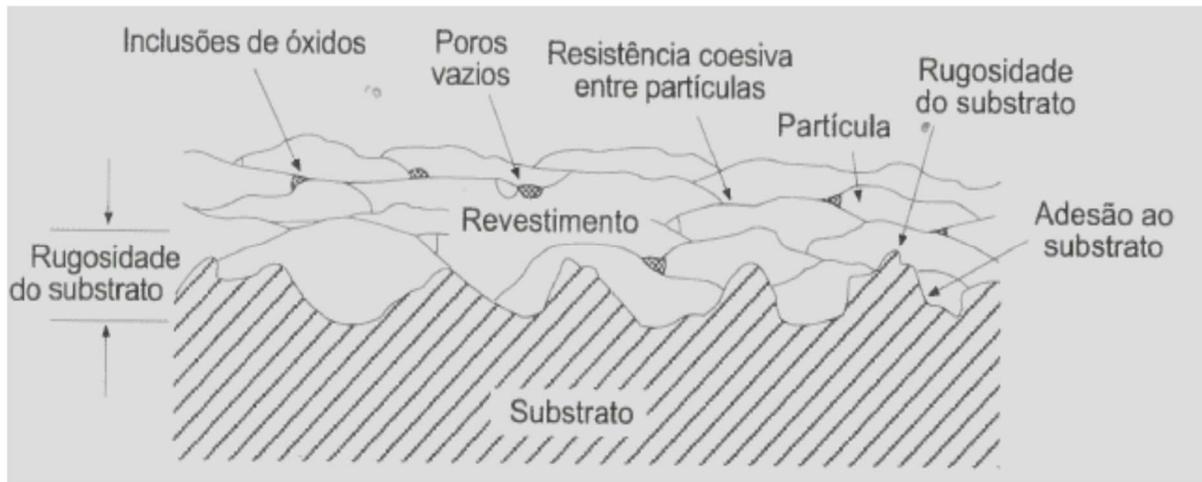


Figura 20: Seção transversal de um revestimento aspergido.  
Fonte: Lima e Trevisan (2007, p. 24)

A aspersão térmica de alumínio foi realizada nos corpos de prova para os ensaios previstos, conforme o Capítulo de Materiais e Métodos deste trabalho.

### 2.3 SOLDAGEM

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 18), encontram-se na literatura algumas definições de soldagem, dentre elas encontra-se a que define soldagem como um “processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

A fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão, conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2007) é o arco elétrico, por possuir uma concentração adequada de energia para a fusão localizada, facilidade de controle, equipamentos de baixo custo relativo e um nível aceitável de riscos à saúde dos profissionais envolvidos no processo. O arco elétrico é formado por uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma, gerando energia térmica suficiente para a soldagem das peças através de fusão localizada.

Os processos de soldagem utilizados no Brasil para a solda das chapas de fundo de tanque de armazenamento são, geralmente, com eletrodos revestidos e

arame tubular, sendo que, ambos utilizam o arco elétrico como fonte de calor. Para o desenvolvimento deste trabalho optou-se pela utilização do processo com eletrodos revestidos em função da ampla disponibilidade de profissionais e equipamentos.

### **2.3.1 Processos de soldagem**

As principais normas nacionais e internacionais para construção de tanque de armazenamento, norma Petrobras N-271:2010 e API 650:2013, abordam processos e cuidados a serem observados na soldagem destes equipamentos.

A norma Petrobras N-271:2010, seção 4.5, cita que a soldagem dos tanques de armazenamento deve ser executada de acordo com a norma Petrobras N-133. Por sua vez, a norma Petrobras N-133:2017, seção 5.1.4, cita quais são os processos de soldagem permitidos para aços carbono, são eles: *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Flux Cored Arc Welding* (FCAW), *Stud Welding* (SW) e *Submerged Arc Welding* (SAW).

Os processos acima, listados na N-133:2017, foram definidos para uso geral em materiais de aço carbono, porém, nem todos se aplicam para chapas de fundo de tanque, como é o caso do SW, que consiste em soldagem de pinos.

A norma internacional API 650:2013, seção 7.2.1.1, cita que os tanques e seus acessórios estruturais podem ser soldados por SMAW, GMAW, GTAW, *Oxy-Fuel Gas Welding* (OFW), FCAW, SAW, *Electroslag Welding* (ESW) ou *Electrogas Welding* (EGW) utilizando equipamento adequado.

Os processos acima, listados pela API 650:2013, foram definidos para uso geral em tanques de armazenamento, porém, nem todos podem ser utilizados em chapas de fundo de tanque, como o ESW e EGW, pois são processos utilizados para soldas verticais.

Os processos de soldagem que figuram nas listas das duas normas acima, e que são aplicáveis em fundo de tanque de armazenamento, são abordados nos subitens abaixo.

### 2.3.1.1 SMAW (soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2007) a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada. Este foi o principal processo de soldagem usado na indústria até os anos 60, a partir daí sua importância relativa vem decrescendo em países desenvolvidos, principalmente em função da baixa produtividade. No Brasil, a substituição do processo de soldagem com eletrodos revestidos ocorre de forma mais lenta. O processo em questão é usado na fabricação e montagem de equipamentos e estruturas, tanto em oficina como no campo, sendo um processo basicamente manual, com o soldador controlando manualmente toda a operação.

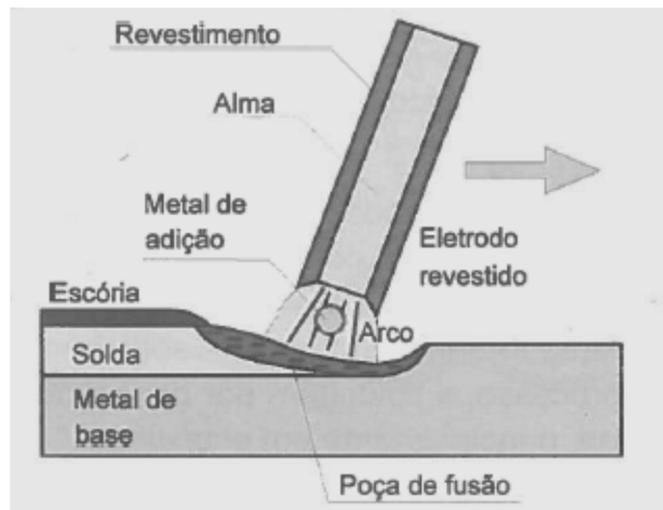


Figura 21: Desenho esquemático de soldagem com eletrodo revestido  
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 181)

### 2.3.1.2 GTAW (soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa)

A soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é realizada através da fusão destas por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças que serão unidas. Uma nuvem de gás inerte protege a poça de fusão contra contaminações pela atmosfera. Devido ao controle independente da

fonte de calor e da adição de metal de enchimento, o controle de energia transferida para a peça é excelente, sendo um diferencial para soldagem de peças de pequena espessura. Como o eletrodo não é consumível, há a possibilidade de realizar soldagem sem adição de metal de enchimento. A produtividade deste processo é baixa, mesmo quando comparada com o SMAW, o que limita sua aplicação a situações em que a qualidade da solda produzida seja mais importante que a produtividade ou o custo da operação. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE 2007, p. 205-206)

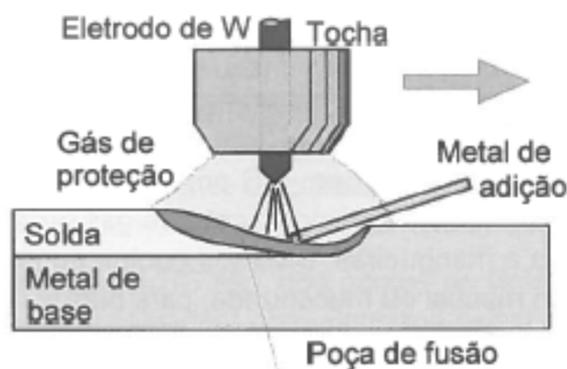


Figura 22: Desenho esquemático de soldagem GTAW  
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 205)

### 2.3.1.3 GMAW (soldagem a arco elétrico com gás de proteção)

Segundo Brandi, Wainer e Mello (2004), o processo de soldagem GMAW utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível, alimentado continuamente, e a peça. A proteção gasosa pode ser feita por um fluxo de gás inerte ou gás ativo, o que influi no modo de transferência e no formato do arco e do cordão de solda formado. Dentre as vantagens deste processo pode-se citar a velocidade de soldagem elevada e a possibilidade de executar a solda em todas posições. Dentre as limitações pode-se citar que o equipamento de soldagem é mais caro, complexo, e menos portátil que o do SMAW, por exemplo.

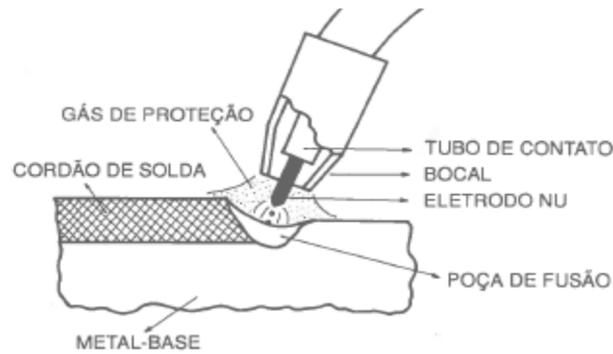


Figura 23: Desenho esquemático de soldagem GMAW  
 Fonte: Brandi, Wainer e Mello (2004, p. 100)

#### 2.3.1.4 FCAW (soldagem a arco elétrico com arame tubular)

A soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW) é um processo que produz a união de metais pela fusão destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, de alimentação contínua, e a peça a soldar. Um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo faz a proteção do cordão de solda e do arco, tal proteção pode ser suplementada por um fluxo de gás, geralmente  $\text{CO}_2$ . Os fluxos contidos dentro dos arames podem ter outras funções, como refinar o metal de solda e adicionar elementos de liga, por exemplo. O processo de soldagem FCAW é semelhante ao processo GMAW no que tange a equipamentos e princípios de funcionamento, com alto rendimento e alta taxa de deposição, por outro lado, também possui semelhanças com o processo SMAW do ponto de vista metalúrgico, possibilitando o ajuste de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE 2007, p. 255-256)

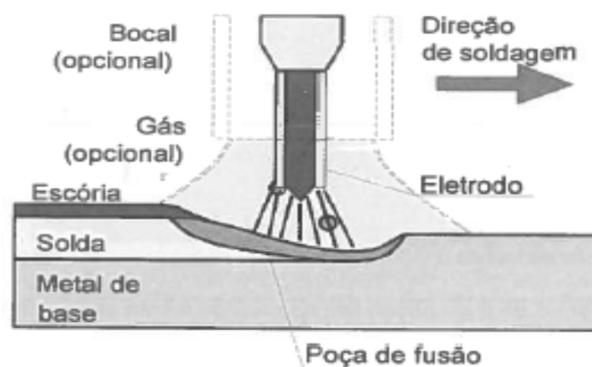


Figura 24: Desenho esquemático de soldagem com arame tubular  
 Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 255)

### 2.3.1.5 SAW (soldagem a arco submerso)

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2007), a soldagem a arco submerso (SAW) é um processo em que a união entre metais obtida pela fusão destes por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu e a peça. O arco elétrico ocorre sob uma camada de material granular fusível (fluxo), protegendo-o da contaminação pela atmosfera. A adição de metal é obtida do próprio eletrodo, que possui alimentação contínua por um dispositivo mecânico. Após a abertura do arco elétrico, o eletrodo e o fluxo são alimentados continuamente enquanto a tocha é deslocada. O eletrodo, parte da camada de fluxo, e parte do metal de base são fundidos pelo arco e formam a poça de fusão. Este processo caracteriza-se por possuir elevada taxa de deposição, e ser um processo estável, tendo como principal limitação a posição de soldagem. Em função da alta intensidade de corrente, normalmente utilizada neste processo, o volume da poça de fusão é grande e tende a escorrer para fora da junta. Assim, o processo fica limitado às posições plana e horizontal.

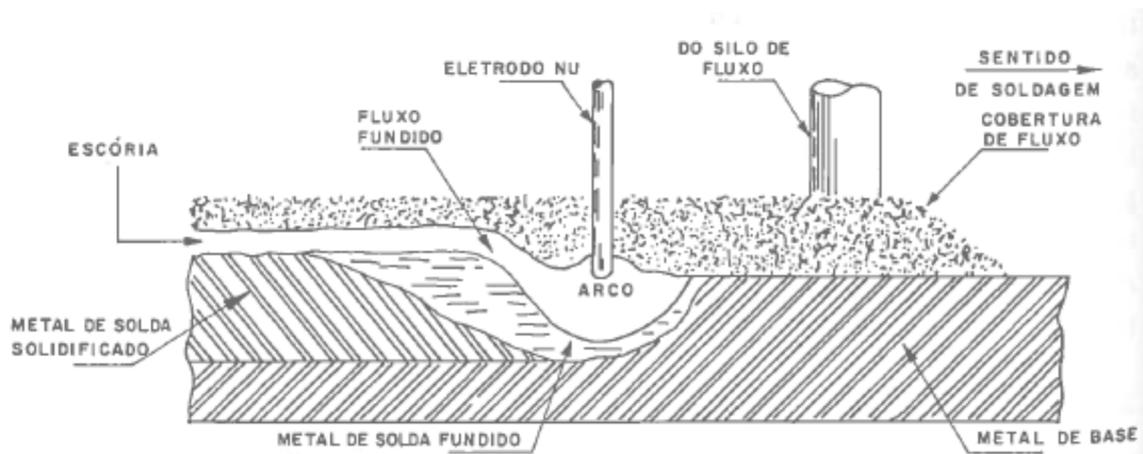


Figura 25: Desenho esquemático de soldagem com arco submerso  
Fonte: Brandi, Wainer e Mello (2004, p. 134)

### 2.3.1.6 Cuidados na soldagem

Com relação aos cuidados a serem observados na soldagem de tanques de armazenamento, as normas de soldagem e de projeto de tanques são bastante abrangentes para garantir a qualidade da união soldada, abordando questões como qualificação de pessoal, qualificação de procedimentos, processos e técnicas de soldagem, condições ambientais, inspeções e controle de qualidade.

Exemplificando, a norma Petrobras N-133:2010, seção 4.1.2, explicita que “não é permitida a soldagem sem a qualificação dos soldadores e dos procedimentos de soldagem requeridos conforme código de projeto”.

Em norma internacional, um exemplo de cuidado na soldagem citado na norma API 650:2013, seção 7.2.2.1, cita que após as chapas de fundo serem posicionadas, elas devem ser soldadas em uma sequência que o resulte em menos distorção e, assim, obter um fundo o mais próximo possível de uma superfície plana.

A redução das distorções geradas na soldagem é importante para o controle da corrosão externa das chapas de fundo de tanque, pois estas distorções podem ser responsáveis por um assentamento irregular do fundo sobre o solo, e desta forma, interferir na eficácia da proteção catódica por corrente impressa, a qual não será eficaz nas áreas de chapas que não estiverem em contato com o mesmo eletrólito que os anodos, neste caso, o solo.

A soldagem gera aquecimento localizado nas peças que estão sendo unidas por este processo, sendo que, a distribuição de temperatura não ocorre de maneira uniforme, havendo mudanças estruturais e metalúrgicas à medida que soldagem avança ao longo da junta. Tipicamente, o metal de solda e a região adjacente estão a uma temperatura substancialmente superior à do restante do metal de base. À medida que a poça de fusão solidifica e contrai, ela começa a exercer tensão trativa no metal de solda circundante e no metal de base adjacente à poça de fusão. Esta tensão aumenta até atingir o ponto de escoamento das regiões tensionadas. À medida que a solda é feita, as partes da solda que já solidificaram resistem à contração das porções posteriores do cordão de solda, conseqüentemente, as porções soldadas primeiro sofrem tensão trativa na direção longitudinal à solda (AWS, 2001).

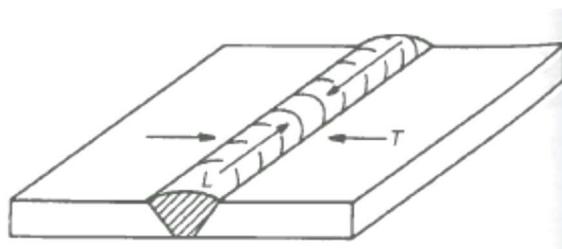


Figura 26: Tensões geradas por contração do cordão de solda  
Fonte: AWS (2001, p. 298)

A distorção em soldas de filete é similar à que ocorre em soldas de topo. A contração longitudinal e transversal, e a distorção angular resultam de tensões desbalanceadas das tensões presentes nestas soldas (AWS, 2001).

A Figura 27 ilustra formas básicas de distorção em juntas soldadas.

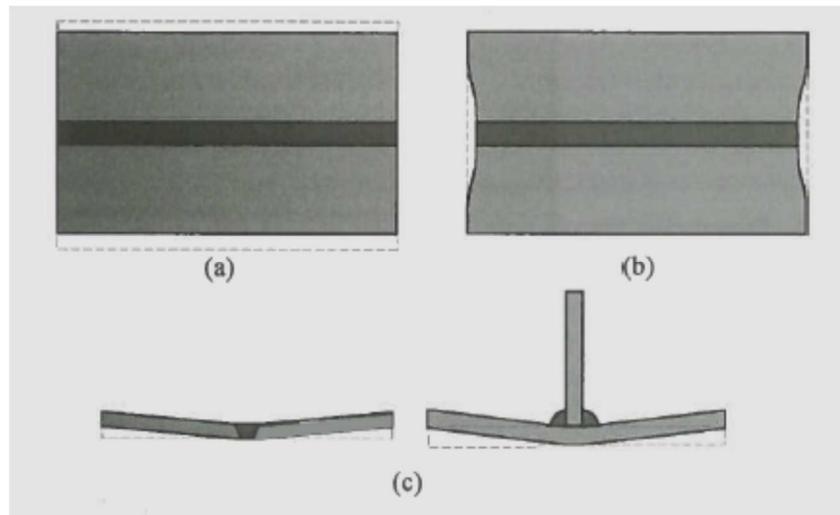


Figura 27: Formas básicas de distorção em juntas soldadas: (a) contração transversal, (b) contração longitudinal, (c) distorção angular.

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 101)

Segundo Soares (2006) várias medidas podem ser tomadas para o controle das distorções em soldagem, como sequências de soldagem que possibilitem melhor distribuição do calor na peça e a utilização de dispositivos de fixação para manter o posicionamento das peças durante a soldagem, por exemplo.

O uso de técnicas de soldagem que minimizam as distorções geradas pode contribuir para o aumento da efetividade da proteção catódica por corrente impressa nas chapas de fundo de tanque, os quais são citados como sugestão para novos estudos na conclusão deste trabalho.

### 2.3.2 Fluxo de calor

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 88) “o fluxo de calor na soldagem pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas etapas básicas: fornecimento de calor à junta e dissipação deste calor pela peça”.

Para a primeira etapa citada, o fornecimento de calor, Marques, Modenesi e Bracarense (2007) cita que a energia de soldagem (aporte térmico ou “*heat input*”) é um parâmetro importante para caracterizar o processo, e é definida como a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma. Para o processo de soldagem a arco, pode-se considerar o arco como única fonte de calor, e expressar sua energia de soldagem através da Equação 02.

$$H = (\eta V I) / v \quad (02)$$

Na qual “H é a energia de soldagem (J/mm),  $\eta$  é a eficiência térmica do processo, V é a tensão no arco (V), I é a corrente de soldagem (A), e v é a velocidade de soldagem (mm/s)”. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2007, p. 88)

A segunda etapa citada, a dissipação de calor pela peça, é abordada com base nos conceitos de ciclo térmico e repartição térmica na soldagem.

### 2.3.2.1 Ciclo térmico e repartição térmica na soldagem

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2007), a dissipação de calor pela peça ocorre principalmente por condução das regiões aquecidas para o restante da peça, sendo que, a evolução da temperatura em diferentes pontos, em função da soldagem, pode ser estimada de forma teórica ou experimental. Cada ponto do material próximo à junta soldada experimentará uma variação de temperatura, em função da passagem da fonte de calor, conforme ilustrado na Figura 28, a qual ilustra a curva deste ciclo térmico de soldagem.

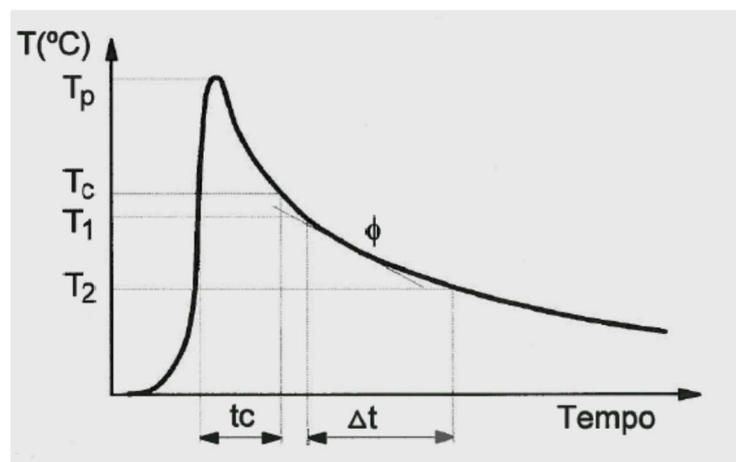


Figura 28: Ciclo térmico de soldagem (esquemático)  
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 88)

Na Figura 28 a temperatura máxima do ponto medido próximo à junta soldada é identificada por  $T_p$ , com o significado de temperatura de pico. A identificação da temperatura de pico atingida na face externa das chapas de fundo de tanque, quando soldadas por solda de filete, permite identificar se os revestimentos anticorrosivos seriam danificados ou não durante a soldagem. Neste trabalho, a identificação da temperatura de pico foi realizada de forma experimental e comparada com temperatura estimada através de cálculo teórico utilizando a Equação 03, a qual é indicada na literatura para estimativa de temperatura de pico de pontos próximos a soldas de um passe e penetração total.

$$\frac{1}{T_p - T_o} = 4,133 \frac{\rho \cdot c \cdot h \cdot y}{H} + \frac{1}{T_f - T_o} \quad (03)$$

Na qual  $\rho$  é a densidade do material da chapa;  $c$  é o seu calor específico;  $h$  é a espessura das chapas;  $y$  é a distância do ponto considerado à linha de fusão;  $T_f$  é a temperatura de fusão do material;  $T_o$  é a temperatura inicial e  $H$  é a energia de soldagem, conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2007).

As informações de densidade, calor específico, e temperatura de fusão do aço podem ser observados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6: Valores aproximados das propriedades físicas de alguns materiais

Material	Propriedade			
	Densidade [ $\rho$ ] (g/cm <sup>3</sup> )	Calor específico [c] (J/g °C)	Condutividade térmica [k] (W/cm °C)	Temperatura de fusão [ $T_f$ ] (°C)
Aço carbono	7,8	0,63	0,47	1520
Aço inoxidável	7,9	0,59	0,25	1500
Alumínio	2,7	1,05	2,05	658
Cobre	8,9	0,42	3,76	1083

Fonte: Modenesi (2003, p. 6)

O impacto do aumento da energia de soldagem na temperatura de pico atingida em pontos próximos à junta soldada pode ser observado na Figura 29, na qual nota-se que o aumento da energia da soldagem aumenta a temperatura de pico atingida. Desta forma, o aumento da energia de soldagem impacta diretamente na temperatura a qual os revestimentos externos das chapas de fundo de tanque estarão

submetidos, sendo importante sua consideração na definição dos parâmetros de soldagem que serão utilizados, bem como, o acompanhamento em campo quanto a obediência a estes parâmetros.

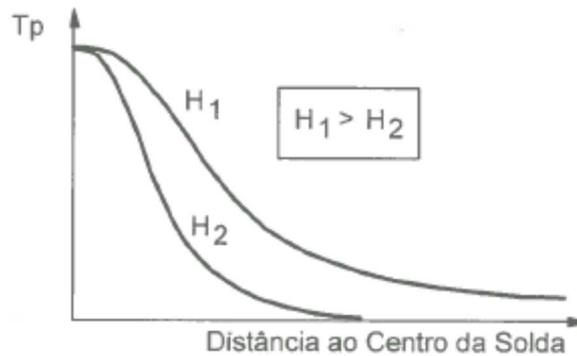


Figura 29: Curvas esquemáticas de repartição térmica de soldas realizadas com diferentes energias de soldagem

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 90)

### 2.3.2.2 Cálculo da energia de soldagem

Conforme descrito anteriormente, a energia de soldagem (J/mm) é calculada em função da eficiência térmica do processo, da tensão no arco (V), da corrente de soldagem (A), e da velocidade de soldagem (mm/s), conforme descrito na Equação 02.

Considerando que para o desenvolvimento deste trabalho optou-se pela utilização do processo com eletrodos revestidos em função da ampla disponibilidade de profissionais e equipamentos, a eficiência deste processo, segundo AWS (2001), apresenta valores entre 66% e 88%, sendo que para os cálculos deste trabalho foi atribuído o valor médio do intervalo citado, 77%.

Para a seleção do eletrodo, utilizado no experimento para medição da temperatura de pico na face externa da chapa de fundo de tanque, fez-se necessário observar a classificação de eletrodos existente, e segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2007), as classificações propostas pela American Welding Society – AWS são as mais usadas no Brasil, sendo a classificação AWS A5.1:2012 utilizada para eletrodos revestidos para soldagem de aços carbono.

O sistema de classificação dos eletrodos revestidos adotado pela norma AWS A5.1:2012 é ilustrado na Figura 30 abaixo.

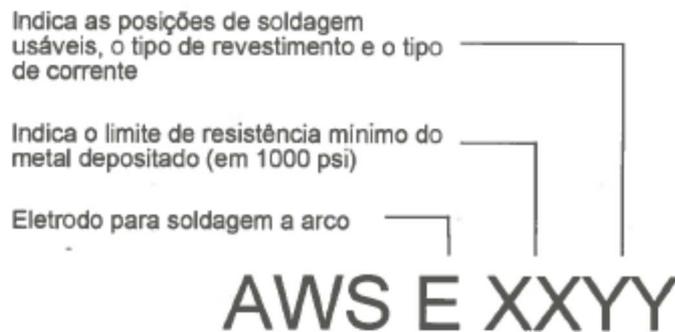


Figura 30: Esquema explicativo do sistema de classificação de eletrodos revestidos adotados pela norma AWS A5.1:2012

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 189) adaptado pelo autor.

Considerando a premissa de que o metal de solda deve possuir resistência mecânica igual ou superior a mínima especificada para o metal de base, e que a resistência mecânica do material das chapas de fundo de tanque varia de 55 a 77 ksi, conclui-se que o limite de resistência mínimo do metal de solda depositado é 55 ksi. Tal limite de resistência mecânica mínimo é satisfeito com eletrodos comerciais de 60 ksi ou superior. Cabe salientar que os limites de resistência mecânica mínimo são encontrados comercialmente em valores múltiplos de dez ksi.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2007), o dígito que indica a posição em que o eletrodo pode ser utilizado assume o valor de: 1 para soldagem em todas as posições; 2 para soldagem na posição plana e horizontal e 4 para soldagem na posição plana, horizontal e vertical descendente. Considerando que a soldagem das chapas de fundo de tanque ocorre na posição plana, qualquer dos valores acima pode ser assumido para esta aplicação.

O último dígito do sistema de classificação do eletrodo revestido, adotado pela norma AWS A5.1:2012, é relativo ao tipo de revestimento. A Tabela 7 traz o significado do último dígito de alguns tipos de eletrodos revestidos de aço carbono, segundo a classificação AWS A5.1:2012.

Tabela 7: Significado do último dígito da classificação AWS A5.1:2012 de alguns tipos de eletrodos revestidos para aço carbono

<b>Eletrodo</b>	<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Posição de soldagem ou tipo (#)</b>	<b>Tipo de corrente (*)</b>
E 6010	Celulósico, sódio	P, H, V, SC	CC+
E 6011	Celulósico, potássio	P, H, V, SC	CC+, CA
E 6012	Rutílico, sódio	P, H, V, SC	CC-, CA
E 6013	Rutílico, potássio	P, H, V, SC	CC+, CC-, CA
E 6019	Ácido/Rutílico, potássio	P, H, V, SC	CC+, CC-, CA
E 6020	Ácido	P, Filete H	CC+, CC-, CA
E 7014	Rutílico com pó de ferro	P, H, V, SC	CC+, CC-, CA
E 7015	Básico, sódio	P, H, V, SC	CC+
E 7016	Básico, potássio	P, H, V, SC	CC+, CA
E 7018	Básico, potássio, pó de ferro	P, H, V, SC	CC+, CA
E 7024	Rutílico, pó de ferro	P, Filete H	CC+, CC-, CA
E 7027	Ácido, pó de ferro	P, Filete H	CC+, CC-, CA
E 7048	Básico, potássio, pó de ferro	P, H, V, SC, Vd	CC-, CA

(#) P — Plana, H-Horizontal, V — Vertical, SC — Sobrecabeça, Filete H — Filete horizontal  
 Vd — Vertical descendente  
 (\*) CA — Corrente alternada  
 CC+ — Corrente contínua eletrodo positivo (polaridade inversa)  
 CC- — Corrente contínua eletrodo negativo (polaridade direta)

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 190)

O eletrodo selecionado para a realização dos ensaios deste trabalho é o E-7018, em função de sua utilização em soldas de campo para chapas de fundo de tanque, e por atender aos requisitos técnicos necessários para a solda em questão, conforme a análise do sistema de classificação de eletrodo citada acima. Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2007), o pó de ferro contido no revestimento deste eletrodo é fundido e incorporado à poça de fusão durante a soldagem, aumentando a taxa de deposição do mesmo.

Conforme recomendação da norma Petrobras N-270:2014, seção 8.4.5, todas as soldas de fundo de tanque de armazenamento, quando executadas por processos manuais, devem ser realizadas com no mínimo dois passes. Por esta razão, o experimento que envolve soldagem neste trabalho utilizou dois passes. Em função da espessura das chapas recortadas de fundo, 6,35 mm, foi selecionada a bitola de 2,5

mm para o eletrodo do primeiro passe e a bitola de 3,25 mm para o eletrodo do segundo passe. A Tabela 8 apresenta os valores de corrente e tensão para a soldagem com o eletrodo E-7018 em função da bitola.

Tabela 8: Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para eletrodos revestidos

Eletrodo	AWS E 6010		AWS E 7018	
	Bitola (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)
2,0	50 – 70	18 – 28	50 – 90	20 – 30
2,5	60 – 100		65 – 105	
3,25	80 – 150		110 – 150	
4	105 – 205		140 – 195	
5	155 – 300		185 – 270	
6	195 – 350		225 – 355	

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2007, p. 197)

Para o primeiro passe da solda foi utilizada corrente de 80 A e tensão de 24 V, para o segundo passe de solda foi utilizada corrente de 120 A e tensão de 24V.

A definição da velocidade de soldagem finaliza os parâmetros necessários para o cálculo da energia de soldagem de cada passe. A velocidade em questão foi medida de forma empírica, durante a realização do experimento 02 deste trabalho, sendo identificada para o primeiro passe o valor de 2,3 mm/s e para o segundo passe o valor de 2,6 mm/s.

De posse dos parâmetros de soldagem, e utilizando a Equação 02, o cálculo da energia de soldagem do primeiro passe indica o valor de 643 J/mm e no segundo passe indica o valor de 852 J/mm.

A limitação do aporte térmico da soldagem é importante para evitar danos nos revestimentos anticorrosivos das chapas sobrepostas, conforme Katoh et al. (2003), que realizaram testes com aspensão térmica de zinco e zinco-magnésio em fundo de tanques de armazenamento de petróleo, a limitação do “*heat input*” em 600 J/mm na soldagem de filete de chapas de aço de 9 mm de espessura foi utilizada para evitar danos ao revestimento de zinco aspergido.

Cabe salientar que a temperatura de fusão do zinco é próxima a 440 °C, enquanto a temperatura de fusão do alumínio é próxima a 660 °C, possibilitando utilização de maior “*heat input*” com a utilização de alumínio aspergido.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificação prática da possível razão da ineficácia do sistema de proteção de catódica por corrente impressa, e analisar a utilização de aspensão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanques de armazenamento de petróleo e derivados, foram realizados ensaios laboratoriais descritos a seguir.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema de proteção catódica por corrente impressa é atualmente o sistema amplamente utilizado para este fim, inclusive com previsão normativa pela norma API 650:2013, seção I.3, mas sua eficácia em campo depende de fatores como a suficiente aplicação e distribuição de corrente elétrica para atingimento do potencial de proteção do aço, além da necessidade do contato físico entre o eletrólito em que se encontram os anodos e a superfície a ser protegida.

Para a verificação prática da eficácia e limitações da proteção catódica por corrente impressa na face externa das chapas de fundo de tanque foi realizado um experimento laboratorial, intitulado experimento 01, no qual foi utilizado tal sistema de proteção.

Com foco em fornecer informações para a utilização de revestimentos anticorrosivos na face externa do fundo de tanque, foi realizado o experimento 02 que objetivou identificar a temperatura máxima que um revestimento externo de chapa de fundo estará submetido durante o processo de soldagem das chapas sobrepostas. Este experimento é importante para o entendimento das condições térmicas que os possíveis revestimentos anticorrosivos externos serão submetidos durante o processo de soldagem. As chapas de aço carbono de fundo de tanque são em geral de grandes dimensões (12 m x 2,5 m) e não há acesso para posteriores reparos nos revestimentos, caso sejam danificados durante a soldagem.

O experimento 03 consistiu em ensaios de corrosão por imersão, em laboratório, para analisar a utilização da aspensão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva externa para fundo de tanque. Para tanto, os resultados dos ensaios de imersão dos corpos de prova com o revestimento foram comparados com os

resultados dos corpos de prova sem aplicação de revestimento, que representam a prática atual em campo.

Para auxiliar no entendimento do processo de corrosão que ocorre no experimento 03, foi executado o experimento 04, que consistiu na visualização das áreas anódicas e catódicas dos corpos de prova. Para tanto, foram utilizados corpos de prova com os revestimentos e corpos de prova sem revestimento anticorrosivo, os quais foram imersos em eletrólito e adicionados reagentes químicos que possibilitaram a visualização das áreas anódicas e catódicas nos corpos de prova.

### 3.1 EXPERIMENTO 01 – EFICÁCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA

O experimento 01 consistiu na aplicação de corrente impressa em uma chapa de aço carbono sem revestimento sobre areia umedecida com água do mar sintética. O uso da areia umedecida com solução de cloreto de sódio teve por finalidade aumentar a condutividade visando ensaios acelerados. Para aplicação da corrente elétrica ao eletrólito foi utilizado um retificador de corrente e inserido um anodo de aço carbono na areia na qual a chapa se apoia. A Figura 31 ilustra o esquema do experimento 01.

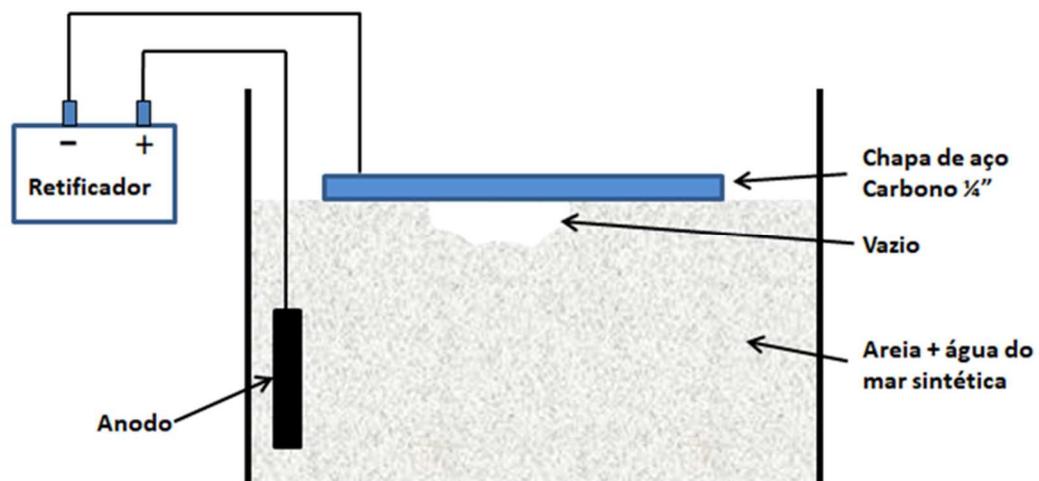


Figura 31 – Experimento 01: Verificação da eficácia da proteção catódica por corrente impressa

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

É importante salientar que há uma parte da chapa de aço que não ficou em contato com a areia umedecida, pois foi realizado um rebaixo na areia para simular um possível espaço que pode ocorrer em campo, podendo ser provocado por um recalque do solo ou distorções das chapas de fundo em função da soldagem, por exemplo.

A lista dos materiais utilizados no experimento 01 foi a seguinte:

- chapa de aço carbono de 20 cm x 30 cm, espessura de 6,35 mm;
- caixa plástica de 30 cm x 40 cm x 15 cm (comprimento x largura x altura);
- 12 dm<sup>3</sup> de areia peneirada (preenche a caixa plástica até a altura de 10 cm);
- 1 litro de água do mar sintética (cloreto de sódio a 3,5%);
- haste de aço de diâmetro 8 mm, com 30 cm de comprimento (anodo);
- retificador de corrente;
- meia-célula de Cu/CuSO<sub>4</sub>;

Antes de posicionar a chapa de aço sobre a areia, durante a montagem do experimento, a mesma foi borrifada com água do mar sintética, simulando uma exposição da chapa de fundo a um eletrólito. Após montado o esquema do experimento, foi medida e ajustada a corrente elétrica aplicada pelo retificador ao sistema, até se obter potencial chapa/eletrólito de 0,91 V, sendo este mais negativo que -0,85 V, medido com a meia-célula de Cu/CuSO<sub>4</sub>, pois conforme Gentil (2007) o ajuste estará adequado para proteção anticorrosiva da chapa. A Figura 32 ilustra o experimento em andamento.

A duração do experimento 01 foi de 1 mês, e após este período foi analisada qualitativamente a corrosão apresentada na face inferior da chapa, verificando a diferença entre a área que estava em contato com o mesmo eletrólito do anodo e a área que ficou sobre o rebaixo na areia.



Figura 32: Experimento 01 em andamento  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Na Figura 35 pode-se notar que o retificador impõe uma diferença de potencial de 7,8 V, e uma corrente de 0,24 A, para que a medição com a meia-célula de Cu/CuSO<sub>4</sub> fosse de - 0,91 V, valor mais negativo do que - 0,85 V, desta forma, conforme Gentil (2007) o ajuste está adequado para proteção anticorrosiva da chapa.

Decorrido o período de um mês do experimento a chapa foi retirada e limpa, utilizando solução de ácido clorídrico a 10%, para melhor observar a corrosão ocorrida na mesma.

### 3.2 EXPERIMENTO 02 – TEMPERATURA NA CHAPA SOBREPOSTA DURANTE A SOLDAGEM

O experimento 02 consistiu em realizar em oficina e em pequena escala o cenário de solda das chapas sobrepostas de fundo de tanque de armazenamento, com o objetivo de verificar a temperatura máxima atingida na face externa das chapas. A medição da temperatura máxima atingida na face em questão permitiu identificar se o revestimento anticorrosivo de alumínio aspergido seria danificado ou não durante a soldagem.

A Figura 33 ilustra o esquema utilizado no experimento 02 para medição da temperatura máxima atingida na face externa das chapas com solda sobreposta.

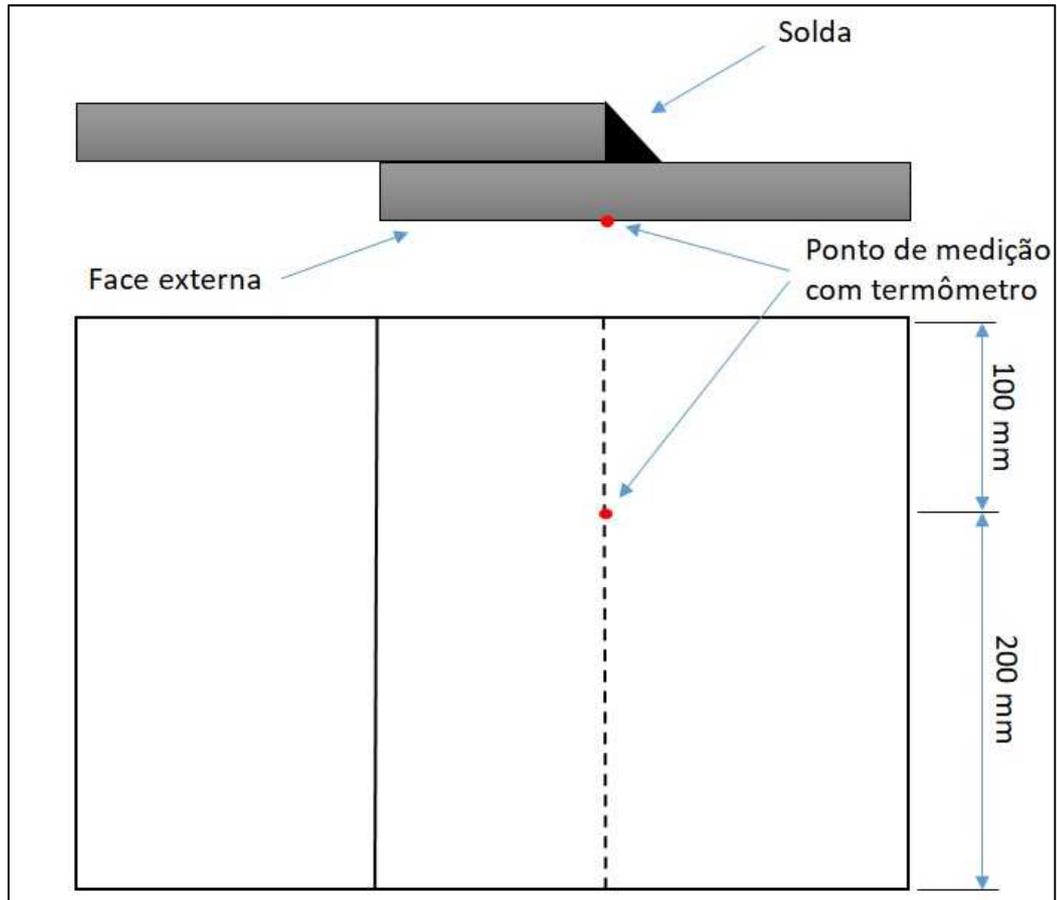


Figura 33 – Experimento 02: Medição de temperatura. Vista lateral e vista inferior das chapas com juntas sobrepostas  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O material amplamente utilizado para chapa de fundo de tanque é o aço carbono, na espessura de 6,35 mm, sendo este o material que foi utilizado no experimento em questão. Foram utilizadas duas chapas de aço carbono de 20 cm x 30 cm, com 6,35 mm de espessura.

As medições de temperatura foram realizadas durante a soldagem com termômetro infravermelho marca Wintact, modelo WT900, com ajuste da emissividade em 0,8 conforme recomendação do manual do equipamento.

A soldagem utilizou eletrodo revestido E-7018, em dois passes, sendo a bitola de 2,5 mm para o eletrodo do primeiro passe e a bitola de 3,25 mm para o eletrodo do segundo passe, conforme descrito no Capítulo 3 deste trabalho.

Para o primeiro passe da solda foi utilizada corrente de 80 A e tensão de 24 V, para o segundo passe de solda foi utilizada corrente de 120 A e tensão de 24V. A velocidade de soldagem foi medida durante a execução dos passes, sendo identificada para o primeiro passe o valor de 2,3 mm/s e para o segundo passe o valor de 2,6 mm/s. A Figura 34 ilustra a realização do experimento em questão.



Figura 34: Medição de temperatura de pico durante soldagem  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As temperaturas de pico medidas com o termômetro laser foram comparadas com os valores estimados através de cálculos teóricos, utilizando a Equação 03 descrita no subitem 2.3.2.1 deste trabalho, a qual é indicada por Marques, Modenesi e Bracarense (2007) para estimativa de temperatura de pico de pontos próximos a soldas de um passe e penetração total, por esta razão, para utilizá-la em um cenário de solda de filete foram realizadas algumas considerações descritas a seguir:

- a espessura do metal de base foi considerada como a soma das espessuras das chapas sobrepostas;

- para a variável “y”, que é a distância do ponto que se quer calcular a temperatura até a linha de fusão, foi adotado o valor de 5,35 mm para o primeiro passe de solda, e 8 mm para o segundo passe. Valores atribuídos com base no percentual

de diluição usualmente obtidos neste processo de soldagem. Conforme Stupello (2006) a diluição em processo SMAW varia em 10 e 30%.

### 3.3 EXPERIMENTO 03 – EFICÁCIA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍNIO

O experimento 03 consistiu em ensaios de imersão para analisar a eficácia da aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para o cenário de fundo de tanque, utilizando como balizador os resultados da imersão dos corpos de prova com face sem aplicação de revestimento, que representam a prática atual em campo. A comparação das superfícies após o ensaio foi realizada por inspeção visual.

Para tanto foram elaborados dois tipos de corpos de prova:

- Corpo de prova A: possui dimensões de 10 cm x 15 cm, feito de chapa de aço carbono ASTM A 283 Gr. C com espessura de 6,35 mm. Possui a face de análise sem proteção anticorrosiva, com acabamento usinado e posteriormente lixado com lixas de numeração 150, 240, e 320. Esta face representa o lado externo das chapas de fundo de tanque conforme prática atual. As demais faces deste corpo de prova foram pintadas com tinta epóxi que atende a norma Petrobras N-2680:2007, com espessura mínima de 300µm, depositada após tratamento superficial por jateamento abrasivo atingindo Grau SA 2 ½ conforme norma Petrobras N-9:2013. A Figura 35A ilustra o corpo de prova A.

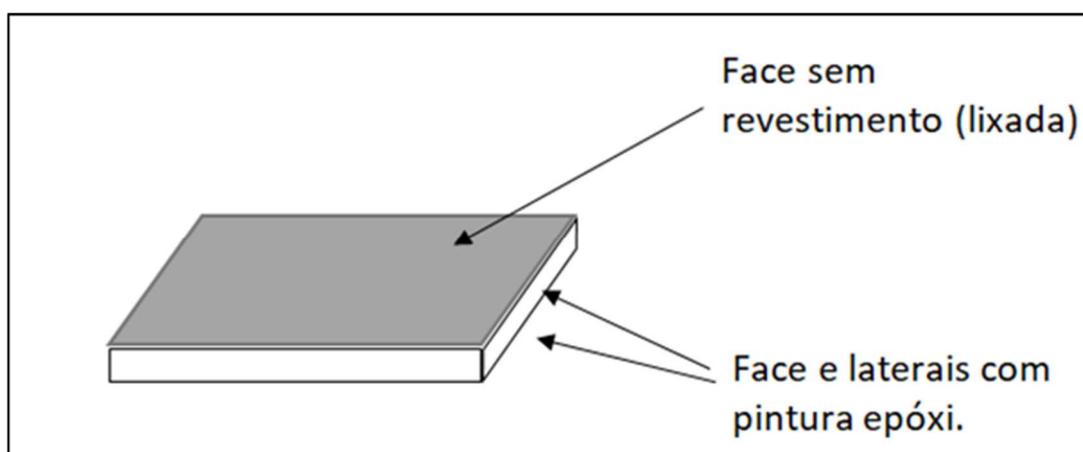


Figura 35A: Corpo de prova A - Face sem revestimento anticorrosivo  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

- Corpo de prova B: possui dimensões de 10 cm x 15 cm, feito de chapa de aço carbono ASTM A 283 Gr. C com espessura de 6,35 mm. Possui a face de análise

revestida com aspersão térmica de alumínio em 85% da superfície, com espessura de 500  $\mu\text{m}$ , e os demais 15% da superfície com acabamento usinado e posteriormente lixado com lixas de numeração 150, 240, e 320. Esta face representa a face externa das chapas de fundo com aspersão térmica parcial em função da área próxima a solda que não pode ser revestida. As demais faces deste corpo de prova foram pintadas com tinta epóxi que atende a norma Petrobras N-2680:2007, com espessura mínima de 300 $\mu\text{m}$ , depositada após tratamento superficial por jateamento abrasivo atingindo Grau SA 2 ½ conforme norma Petrobras N-9:2013. A Figura 35B ilustra o corpo de prova B.

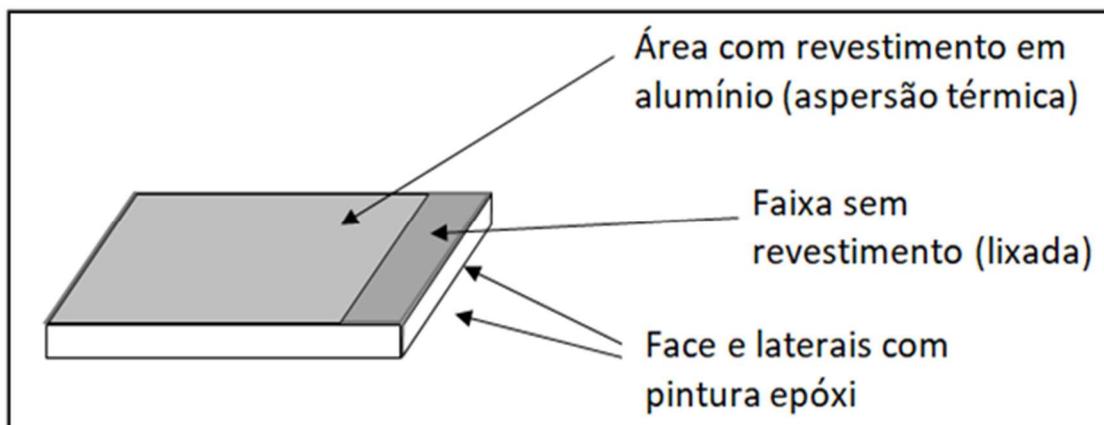


Figura 35B: Corpo de prova B - Face com alumínio aspergido (parcial)  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Todos os corpos de prova tiveram as laterais e uma das faces pintadas com tinta epóxi para que estas superfícies não participassem das reações, e houvesse reações apenas nas faces que representavam o lado externo das chapas de fundo de tanque.

Os ensaios de imersão foram realizados em triplicata, a exemplo de Moreira et al. (2015), totalizando seis corpos de prova. Cada corpo de prova foi imerso em um litro de água de mar sintética (cloreto de sódio a 3,5%), em um recipiente plástico de 13 cm x 20 cm, durante 3 meses.

A Figura 36 ilustra a aplicação do revestimento de alumínio, através de aspersão térmica por arco elétrico, nos corpos de prova utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

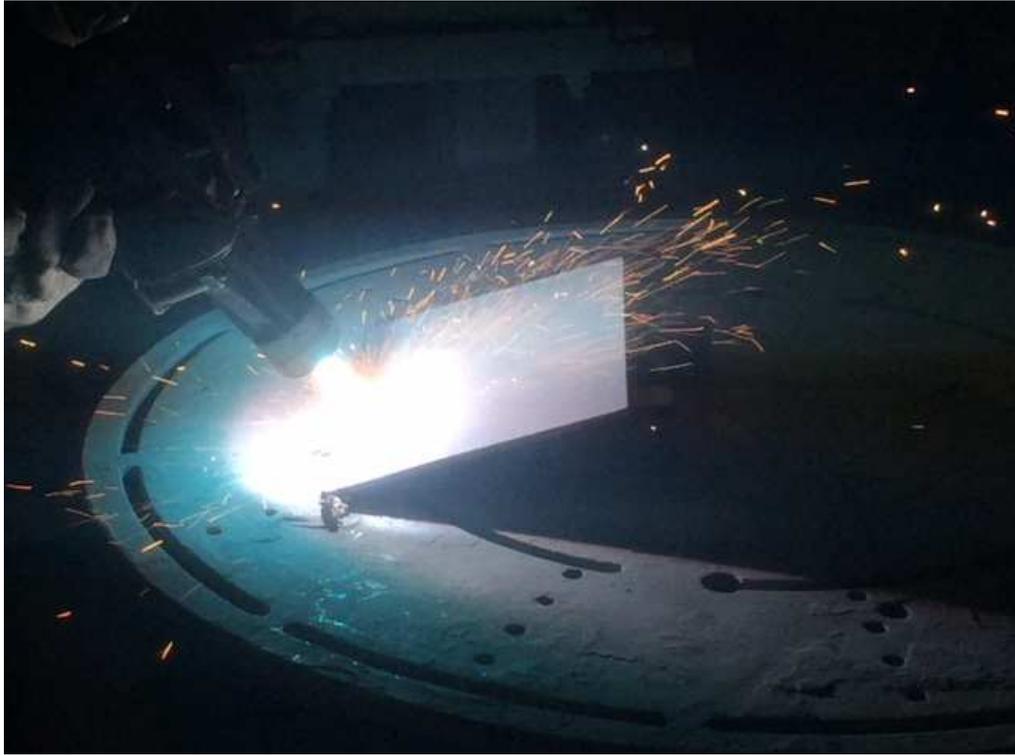


Figura 36: Aspersão térmica de alumínio nos corpos de prova  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

### 3.4 EXPERIMENTO 04 – COMPORTAMENTO DAS ÁREAS ANÓDICAS E CATÓDICAS

O experimento 04 consistiu na realização de ensaios de imersão com objetivo de identificação das áreas anódicas e catódicas em corpos de prova tipo A e B, detalhados no experimento 03, e desta forma auxiliar no entendimento do processo de corrosão ocorridos nestes corpos de prova.

O experimento 04 utilizou como eletrólito o gel de ágar com cloreto de sódio e reagentes químicos, fenolftaleína e o ferricianeto de potássio, seguindo as proporções descritas por Gentil (2007), para que as áreas anódicas fossem identificadas pela cor azul do ferricianeto de potássio na presença de íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ), e as áreas catódicas fossem identificadas pela cor rósea da fenolftaleína na presença de íons  $\text{OH}^-$ .

Desta forma, um corpo de prova A e um corpo de prova B foram colocados em recipientes plásticos de 13 cm x 20 cm, e imersos em gel de ágar elaborado conforme segue: 300 mL de água destilada aquecidos até a ebulição, acrescidos de

4,5 g de ágar e aquecidos até que este se disperse. Na sequência, adicionados 3 g de cloreto de sódio, 0,45 g de ferricianeto de potássio e 3 mL de solução a 1% de fenolftaleína, agitando para solubilizar todas as substâncias adicionadas.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 EFICÁCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA POR CORRENTE IMPRESSA

O experimento 01, conforme descrito no item 3.1 deste trabalho, foi montado e acompanhado pelo período de um mês. Ao término do prazo estipulado a chapa foi retirada e observada a existência de corrosão na área que não ficou em contato com a areia, bem como, foi observada a ausência de corrosão na área que ficou em contato com a areia. A Figura 37 mostra a chapa antes do experimento, e a Figura 38 apresenta a chapa logo após o experimento.

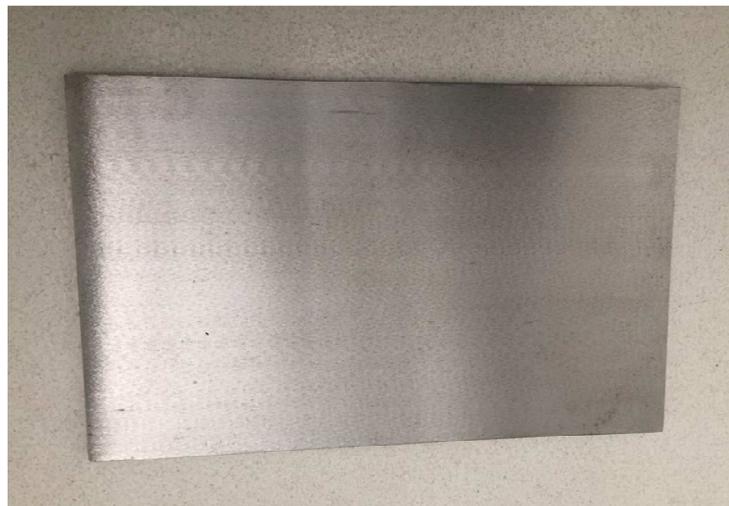


Figura 37: Chapa antes do experimento 01  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 38: Chapa após o experimento 01  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para melhor observar a corrosão ocorrida na chapa foi realizado o processo de limpeza da mesma, utilizando solução de ácido clorídrico a 10%, e pode-se observar a perda de massa ocorrida na chapa nos pontos de corrosão ocorridos na região em que não havia contato da chapa com a areia. A Figura 39 mostra a imagem da área corroída da chapa, após o processo de limpeza supracitado.



Figura 39: Área corroída da chapa  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Utilizando microscópio digital com zoom aproximado de 700 vezes pode-se obter imagens da área corroída da chapa, que não estava em contato com a areia, e imagens da área que estava em contato com a areia usufruindo da proteção catódica por corrente impressa. A Figura 40 ilustra a área corroída da chapa, com zoom aproximado de 700 vezes. A Figura 41 ilustra a área da chapa que ficou sob proteção catódica, também com zoom aproximado de 700 vezes.

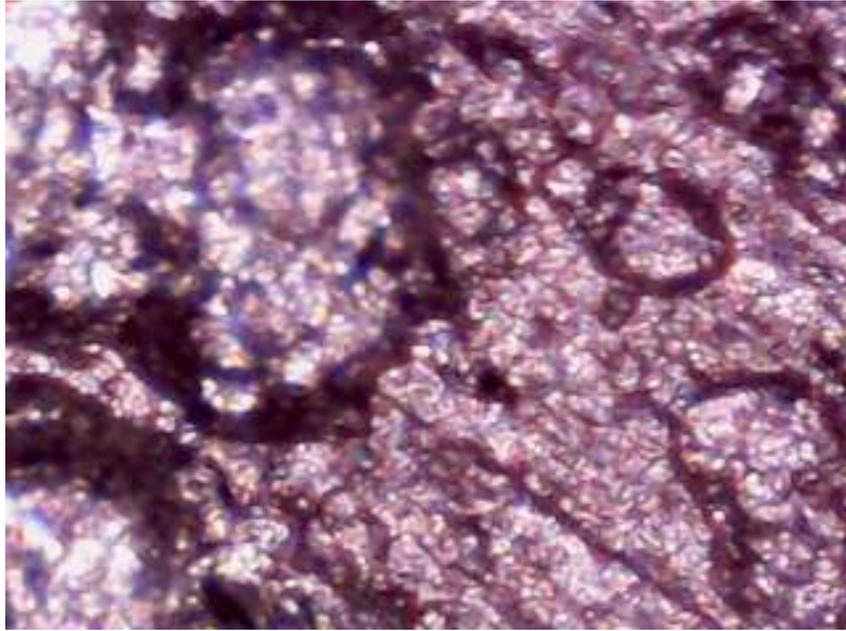


Figura 40: Área corroída da chapa com zoom aproximando de 700 vezes  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

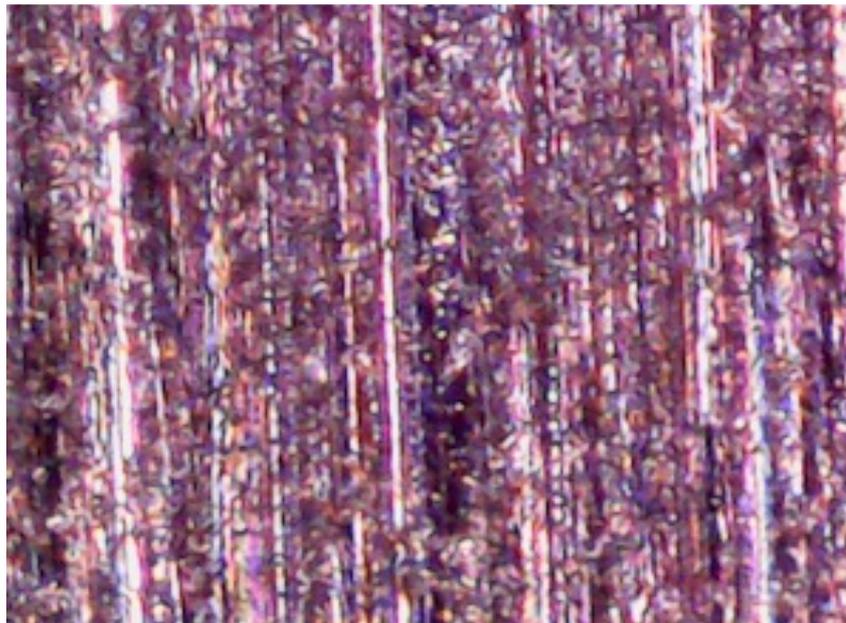


Figura 41: Área protegida da chapa com zoom aproximado de 700 vezes  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nota-se que, conforme citado por Telles (2003) e Revie (2008), para que a proteção catódica por corrente impressa seja efetiva como proteção anticorrosiva é necessário que a superfície a ser protegida e o anodo estejam em contato com um eletrólito contínuo. Neste cenário, os recalques de solo e as distorções das chapas

em função da soldagem podem acarretar espaços entre o solo e as chapas de fundo, impossibilitando a atuação da proteção catódica por corrente impressa nas superfícies que não estiverem em contato com o solo, sendo esta uma das causas da ineficácia deste sistema para proteção anticorrosiva externa de fundo de tanques de armazenamento de petróleo e derivados.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DO COMPROMETIMENTO DO REVESTIMENTO EXTERNO DA CHAPA PELA SOLDAGEM DO FUNDO DO TANQUE

O experimento 02 foi realizado para medição da temperatura de pico na face externa das chapas de fundo de tanque durante soldagem de chapas sobrepostas, conforme descrito no item 3.2 deste trabalho. Como resultado, a temperatura de pico medida durante a realização do primeiro passe de solda foi de 295 °C e no segundo passe foi de 320 °C.

Utilizando na equação 03 os dados do item 2.3.2.1 e 2.3.2.2 deste trabalho, obtém-se o seguinte quadro comparativo entre os valores calculados e os valores obtidos de forma experimental.

<b>Passe de Solda</b>	<b>Energia de Soldagem J/mm</b>	<b>Temperatura Medida °C</b>	<b>Temperatura Calculada °C</b>	<b>Diferença %</b>
Primeiro Passe	643	295	380	29%
Segundo Passe	852	320	349	9%

Quadro 3: Comparativo entre temperatura de pico medida e calculada  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nota-se que a maior diferença percentual entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as calculadas ocorre no primeiro passe da solda, no qual a temperatura calculada apresenta valor 29% superior ao valor medido no experimento. Observa-se que, a maior temperatura medida experimentalmente ocorreu durante a execução do segundo passe, atingindo o valor de 320 °C, e que a maior temperatura calculada através da equação 03 ocorreu no primeiro passe, indicando o valor de 380 °C. Cabe salientar que a equação 03, utilizada nos cálculos acima, é indicada na literatura para estimativa de temperatura de pico de soldas de um único passe e

penetração total, e sua adaptação para o uso em solda de filete em dois passes pode gerar imprecisão.

Conforme norma Petrobras N-2568:2011, tabela C.1, os revestimentos de alumínio aspergidos termicamente podem ser utilizados em temperaturas de até 600 °C. Desta forma, observa-se que as temperaturas de pico obtidas tanto nos cálculos como experimentalmente são inferiores à temperatura máxima de utilização do revestimento de alumínio por aspersão térmica, não sendo restritivas para a utilização deste revestimento nestas condições.

#### 4.3 EFICÁCIA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍNIO

O experimento 03, conforme descrito no item 3.3 deste trabalho, consistiu em ensaios de imersão para analisar a eficácia da aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva, utilizando como balizador os resultados da imersão dos corpos de prova com face sem aplicação de revestimento. Nas Figuras 42 e 43 a seguir, pode-se observar os corpos de prova A e B, respectivamente, em imersão no início do experimento.



Figura 42: Corpos de prova A em imersão no início do experimento  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 43: Corpos de prova B em imersão no início do experimento  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Após três meses de imersão, os corpos de prova A apresentaram coloração alaranjada e depósitos de óxido de ferro no fundo do recipiente. Os corpos de prova B apresentaram coloração esbranquiçada e depósitos de óxido de alumínio. As Figuras 44 e 45 ilustram os corpos de prova A e B em imersão após decorridos três meses.



Figura 44: Corpo de prova A em imersão após decorridos três meses  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 45: Corpo de prova B em imersão após decorridos três meses  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Após retirar os corpos de prova da imersão, os mesmos foram lavados em água corrente para melhor visualização das superfícies à serem analisadas. As Figuras 46 e 47 ilustram os corpos de prova A após o período de imersão. As Figuras 48 e 49 ilustram os corpos de prova B após o período de imersão.



Figura 46: Corpos de prova A após o período imersão  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 47: Detalhe de corpo de prova A após o período de imersão  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 48: Corpo de prova B após o período de imersão  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)



Figura 49: Detalhe de corpo de prova B após o período de imersão  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Pode-se notar que nos corpos de prova A, que representaram o cenário atual de chapas de fundo de tanque, ou seja, sem qualquer revestimento anticorrosivo, houve corrosão na superfície de aço carbono. Já nos corpos de prova B, que representaram a utilização de revestimento de alumínio aspergido termicamente como proteção anticorrosiva, não foi identificada ocorrência de corrosão na superfície de aço carbono que ficou exposta. Os resultados deste experimento estão alinhados com os textos de Telles (2003) e Dutra e Nunes (2006), os quais indicam que as heterogeneidades do aço carbono propiciam a ocorrência de corrosão em sua superfície quando em contato com um eletrólito, sendo este o ocorrido com os corpos de prova A. Com relação aos corpos de prova B, Gentil (2007) indica que nas pilhas eletroquímicas formadas entre o alumínio e o aço carbono, o primeiro apresenta comportamento anódico e o segundo comportamento catódico, desta forma, o aço carbono fica sob proteção catódica galvânica e não apresenta corrosão, sendo este o ocorrido com os corpos de prova B neste experimento.

#### 4.4 COMPORTAMENTO DAS ÁREAS ANÓDICAS E CATÓDICAS

O experimento 04, conforme descrito no item 3.4 deste trabalho, objetivou a identificação das áreas anódicas e catódicas em corpos de prova tipo A e B, detalhados no item 3.3 deste trabalho, e desta forma auxiliar no entendimento do

processo de corrosão nestes corpos de prova. A Figura 50 mostra um corpo de prova A com identificação de áreas anódicas (em azul) em função da presença de íons ferrosos, e áreas catódicas (em rosa) em função da presença de íons  $\text{OH}^-$ .

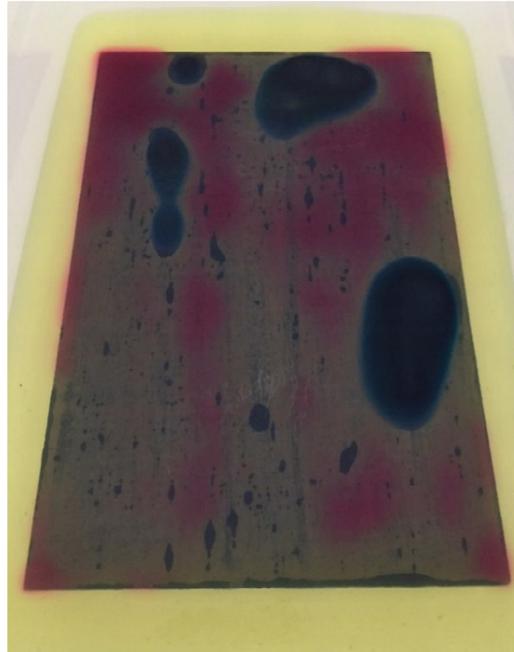
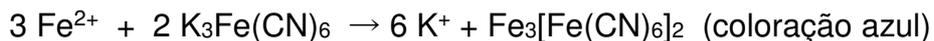
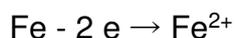


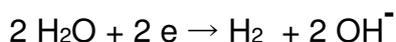
Figura 50: – Corpo de prova A - áreas anódicas e catódicas  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Em função da heterogeneidade do aço carbono houve o surgimento de áreas anódicas e catódicas na superfície quando colocada em contato com o eletrólito, gerando processo corrosivo no material com perda de massa nas áreas anódicas, conforme também visualizado no experimento 03.

A coloração azul nas áreas anódicas é devido às seguintes reações:



A coloração rosa é devido à formação de  $\text{OH}^-$  (pH básico) originária da reação:



Tal cenário está alinhado com o texto de Telles (2003), o qual indica que as heterogeneidades na superfície do material são responsáveis pela ocorrência de

corrosão em quase todos os materiais metálicos, sendo o aço carbono um material heterogêneo.

A Figura 51 ilustra um corpo de prova B com identificação de áreas catódicas (em rosa) em função da presença de íons  $\text{OH}^-$ . Nota-se que não há o surgimento da coloração azul, que é formada na presença de íons ferrosos, isto porque o anodo da pilha eletroquímica formada é o alumínio, cuja reação anódica forma íons de alumínio.



Figura 51: Corpo de prova B: área catódica  
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nota-se que toda a superfície de aço carbono que ficou exposta apresentou coloração rosa, indicando que toda esta região apresentou comportamento catódico em função da pilha eletroquímica formada entre o alumínio e o aço. Desta forma, não houve perda de massa no aço carbono, pois estava sob efeito de proteção catódica galvânica. Tal cenário está alinhado com o texto de Gentil (2007), pois o comportamento previsto para estes materiais na tabela prática em água do mar, na qual o alumínio aparece em posição mais alta que o aço carbono, indica que o alumínio apresenta comportamento anódico em uma pilha eletroquímica formada com o aço.

#### 4.5 VIABILIDADE TÉCNICA DA ASPERSÃO TÉRMICA DE ALUMÍNIO

As pesquisas e ensaios realizados no desenvolvimento de trabalho tiveram foco em atender aos objetivos descritos no item 1.3, sendo um deles a verificação da

viabilidade técnica da aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para a face externas das chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados. No experimento 01 pode-se verificar que a temperatura de pico que o revestimento de alumínio é exposto durante a soldagem é inferior à temperatura de máxima utilização deste revestimento, não sendo restritiva sua utilização sob estas condições. Já nos experimentos 03 e 04 nota-se que a utilização do revestimento de alumínio é capaz de exercer proteção anticorrosiva em áreas de aço carbono desprovidas de revestimento, quando em contato com o mesmo eletrólito. Tal cenário indica que o revestimento de alumínio pode exercer proteção a superfícies de aço carbono mesmo em situações em que haja falhas no revestimento (riscos, faixas sem revestimento), desde que em contato com o mesmo eletrólito.

Conforme Gervásio, Nunes e Leon (2013), a distância de 5 mm entre a região a ser soldada e o revestimento aspergido de alumínio é suficiente para evitar os problemas na soldagem. Por esta razão, as análises realizadas neste trabalho consideram a aplicação de alumínio aspergido em toda a face da chapa que ficará voltada para o solo, exceto nas regiões próximas às bordas que serão soldadas, as quais possuem uma faixa de 5 mm sem aplicação de alumínio para não impactar a soldagem. Desta forma, considerando as dimensões comerciais de uma chapa recortada de fundo de tanque, aproximadamente 2,5 m x 12 m, nota-se que as faixas de 5 mm que não possuem o revestimento de alumínio representam aproximadamente 0,5% do total da área das chapas recortadas. Naturalmente, nem todas as chapas de fundo de tanque são utilizadas em suas dimensões comerciais, pois algumas são reduzidas e ajustadas para formação do desenho do fundo, mas este valor permite visualizar a ordem de grandeza das regiões sem revestimento em comparação às regiões revestidas.

Diante do exposto, pode-se analisar o revestimento de alumínio nos dois cenários de juntas soldadas de chapas de fundo de tanque. A Figura 52, a seguir, ilustra o cenário de solda das chapas anulares, ou seja, o cenário das chapas que são unidas por juntas de topo. A Figura 53 ilustra o cenário das chapas recortadas, ou seja, o cenário das chapas centrais do fundo do tanque, as quais são unidas por juntas sobrepostas.

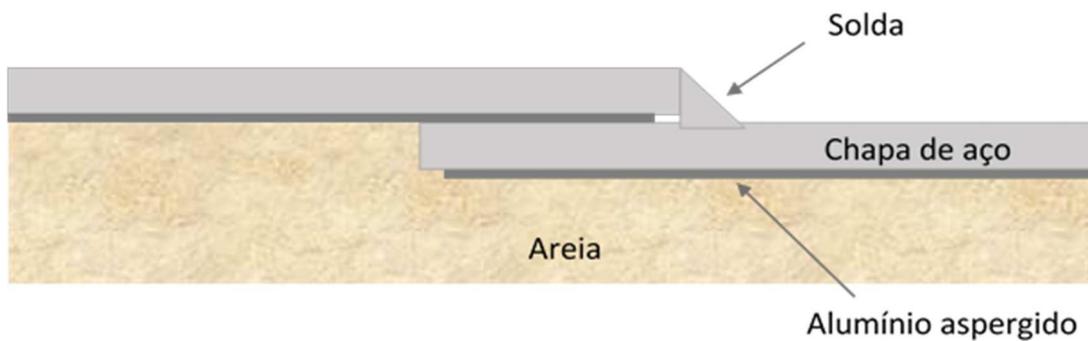


Figura 52: Cenário das chapas unidas por juntas sobrepostas  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para o cenário das chapas unidas por juntas sobrepostas pode-se notar que a região sem revestimento de alumínio (próxima à solda) se encontra entre as chapas sobrepostas, fato que não impede que venha a ter contato com eletrólito pois as chapas não são soldadas pelo lado inferior, desta forma, para que não haja corrosão nesta região sem revestimento é necessária a atuação da proteção catódica galvânica exercida pelo alumínio. Pode-se notar que a proteção catódica galvânica do alumínio atuará em toda a superfície de aço que estiver sem revestimento dentro da fresta formada pelas chapas, na presença de eletrólito contínuo. Esta atuação fará com que a face superior da chapa de baixo (dentro da fresta) também seja protegida, o que acarreta maior consumo da camada de alumínio. Cabe ainda observar que, em função das chapas sobrepostas pode-se gerar heterogeneidade no eletrólito por aeração diferencial na região da fresta formada entre as chapas, tal cenário pode gerar diferença de potencial entre diferentes áreas do revestimento de alumínio e assim reduzir localmente sua espessura.

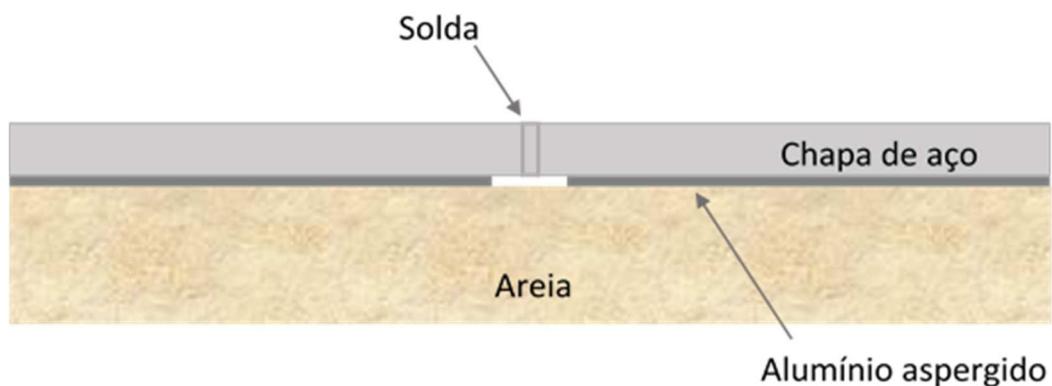


Figura 53: Cenário das chapas unidas por juntas de topo  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para o cenário das chapas unidas por juntas de topo, pode-se notar que é necessária a atuação da proteção catódica galvânica do alumínio para que não haja corrosão na região sem revestimento (próxima à solda).

Nota-se que em ambos os cenários de juntas de chapas de fundo há a possibilidade do revestimento de alumínio prover proteção catódica galvânica nas áreas de aço expostas, mesmo em locais onde as chapas não tocam o solo, em função da proximidade do alumínio aspergido com a área de aço exposta.

Com relação ao tempo de proteção que o revestimento de alumínio é capaz de prover em áreas de aço expostas, a literatura indica que:

Estudos realizados sobre a capacidade dos revestimentos de Al de protegerem catódicamente áreas expostas de aço carbono em água de mar afirmam que: Tempo de serviço =  $0,64 \times$  espessura do revestimento ( $\mu\text{m}$ ) / área de aço exposta. Ou seja, 250  $\mu\text{m}$  de Al por exemplo, com 5% de exposição do aço, garantiria uma vida estimada de 32 anos para a área revestida". (THOMANSON, 1985, p. 20-28 apud PAREDES, 1998, p. 69)

Pode-se observar que o tempo de proteção fornecido pelo revestimento de alumínio depende da espessura do mesmo e da relação entre a área revestida com alumínio e a área exposta de aço em contato com um eletrólito contínuo. Considerando o cenário de corrosão externa de fundo de tanque, no qual há possibilidade do eletrólito não ser contínuo em toda a superfície, inclusive com perda de contato entre o solo e a chapa de fundo de tanque devido a recalques de solo ou distorções das chapas, pode-se obter cenários variados da relação entre a área revestida com alumínio e a área exposta de aço em contato com um eletrólito contínuo, tornando imprecisa a definição do tempo de proteção do revestimento de alumínio nesta aplicação.

Com relação a resistência a corrosão do revestimento de alumínio, em locais onde não há áreas de aço exposta, a literatura traz que, segundo Paredes (2012) o óxido de alumínio formado sobre o revestimento é extremamente estável e assim que formada a película que isola o metal do meio ambiente, a reação cessa. Soma-se que, conforme Bland (1974 apud PAREDES, 1998) resultados demonstraram que revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica, com espessura de 80

$\mu\text{m}$ , não apresentaram qualquer dano ao substrato após 19 anos de exposição na praia de Wrigtsville nos Estados Unidos.

Diante do exposto, pode-se afirmar que há viabilidade técnica de utilizar aspersão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados, por ser um revestimento que atua tanto como barreira entre o meio corrosivo e a chapa de fundo, tanto como proteção catódica galvânica, não necessitando do contato da chapa com o solo para sua atuação. Cabe destacar que o tempo de proteção fornecido por este revestimento tende a ser menor nas regiões próximas às soldas em função da área de aço exposta, que representa aproximadamente 1% do total da área do fundo do tanque. Desta forma, futuras manutenções em fundos de tanque com revestimento de alumínio tendem a indicar quantidade significativamente menor de reparos por corrosão externa, caso haja.

## 5- CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e discussões apresentados neste trabalho, a seguir são descritas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros relacionados ao tema desenvolvido.

### 5.1 CONCLUSÕES

A análise do sistema de proteção de catódica por corrente impressa como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanques de armazenamento de petróleo e derivados indicou que, uma possível razão de sua ineficácia, é a ausência de um eletrólito contínuo em contato com toda a superfície externa da chapa de fundo. Tal cenário pode ser gerado, por exemplo, por distorções das chapas de fundo em função da soldagem das mesmas, fazendo com que algumas áreas das chapas não se apoiem diretamente sobre o solo, e desta forma não usufruem da proteção catódica por corrente impressa.

Com relação a utilização da aspensão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanque de armazenamento de petróleo e derivados, pode-se afirmar que há viabilidade técnica para esta utilização, por ser um revestimento que atua tanto como barreira entre o meio corrosivo e a chapa de fundo, tanto como proteção catódica galvânica, não necessitando do contato da chapa com o solo para sua atuação. Soma-se o fato de que o revestimento em questão é capaz de resistir à temperatura de pico que é submetido durante a soldagem das chapas, desde que realizado controle da energia da soldagem conforme experimento 02 deste trabalho, e mantido afastamento de 5 mm em relação às bordas de soldagem. Diante do exposto, trata-se de um revestimento capaz de prolongar a vida útil e reduzir significativamente a quantidade de futuros reparos das chapas de aço de fundo de tanque por corrosão externa.

### 5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros relativos ao assunto desenvolvido neste trabalho, pode ser avaliada a viabilidade econômica da utilização da aspensão térmica de alumínio como proteção anticorrosiva para face externa das chapas de fundo de tanque de petróleo e derivados.

O uso de técnicas de soldagem que minimizem as distorções das chapas do fundo para aumento da eficácia da proteção catódica também pode ser avaliado, bem como, a utilização de outros materiais para as chapas de fundo de tanque, como o aço inoxidável, por exemplo. Pode-se ainda, analisar a utilização simultânea de proteção catódica por corrente impressa e revestimento externo das chapas de fundo de tanque.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API RP 651: 2014 – Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tank. Washington, 2014. 46 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 650: 2013 – Welded Steel Tanks for Oil Storage. Washington, 2013. 498 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 653: 2014 – Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction. Washington, 2014. 172 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A 283/A 283 M:2007 – Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates. West Conshohocken, 2007. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A 36/A 36 M:2008 - Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.1/A5.1M:2012 – Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. Doral, 2012. 50 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook: welding science & technology. 9 ed. Miami, 2001. 918 p.

ASHWORTH, V. Principles of Cathodic Protection. In:\_\_\_\_\_. Shreir's Corrosion. 4. ed. London: Elsevier, 2010. 3367 p. v4. v4. 4.18, p. 2747-2762.

BARROS, S. M. Tanques de Armazenamento. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006. 480 p.

BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F. D. H. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.

CARDOSO, J. L.; Almeida, N. L.; Pimenta, G. S.; Santos, F. R.; Laurino, E. W. Simulação de sistemas de proteção catódica aplicada à área externa do fundo de tanques de armazenamento atmosférico. Corrosão & Proteção, Rio de Janeiro: Aporte, n. 58, 2015, p. 18-26.

CHATTERJEE, B. CP System Arrangement Prevents Soil-side Corrosion on Tank Bottoms. Pipeline & Gas Journal, v. 236, p 54-56, 2009.

CHATTERJEE, B. Prevention of External (Soil Side) Corrosion on Storage tank Bottom Plates by Cathodic Protection System. In: Corrosion 2008, Paper n.08058, NACE International, New Orleans, Louisiana, EUA, 2008.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.

DEMOZ, A.; FRIESEN, W. Resistance of Impressed Current Parallel Grid and Concentric Circular Ribbon Anode Beds Underneath Tank Bottoms. In: Corrosion 2005, Paper n.05045, NACE International, Houston, Texas, EUA, 2005.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. Proteção Catódica: técnica de combate à corrosão. 4 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

GENTIL, V. Corrosão. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 353 p.

GERVÁSIO, J. P. K.; NUNES, E. B.; LEON, H. R. Use of Metal Coatings by Thermal Spraying as Sacrificial Anodes for Protecting the Inner Surface of Welded Joints. In: Rio Pipeline, 2013, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2013.

GUAN, S. W. External Corrosion Protection Systems for Flammable and Combustible Liquids Underground Storage Tanks. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, v. 50, p. 91-107, 2003.

HELSEL, J. L.; LANTERMAN, R. L.; WISSMAR, K. L. Expected service life and cost considerations for maintenance and new construction protective coating work. In: Corrosion 2008, Paper n.08279, NACE International, Houston, Texas, EUA, 2008.

JOHN, R. C.; SINGH, K. B. The Design And Performance Of Polymeric Anode, Cathodic Protection Systems On Burmed Lpg Bullet Tanks And Above Ground Storage Tank Bottoms. In: Corrosion 2004, Paper n.04037, NACE International, New Orleans, Louisiana, EUA, 2004.

KATOH, K.; NISHIMURA, K.; SHINDO, H.; ISHIMOTO, H.; YASHIKI, T. Development of Zn-Mg-alloy-coated Anti-corrosion Steel Plate for Oil Storage Tank. *Nippon Steel Technical Report*, n. 87, p. 6-9, 2003.

KROON, D. H.; URBAS, M. Cathodic protection of above ground storage tank bottoms. In: Proceedings of second international symposium on aboveground storage tanks, Saint Louis, Missouri, EUA, 1992.

LIMA, C. C.; TREVISAN, R. *Aspersão Térmica: fundamentos e aplicações*. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2007.

LOURENÇO, Z.; MOURA, R. Aplicação de protecção catódica a tanques de armazenamento de combustíveis. *Corrosão e Protecção de Materiais*, v. 28, n. 3, p. 87-91, 2009.

LYUBLINSKI, E.; RAMDAS, G.; VAKS, Y.; NATALE, T.; POSNER, M.; BAKER, K.; SINGH, R.; SCHULTZ, M. Corrosion Protection of Soil Side Bottoms of Aboveground Storage Tanks. In: Corrosion 2014, Paper n.4337, NACE International, San Antonio, Texas, EUA, 2014.

LYUBLINSKI, E.; VAKS, Y.; SCHULTZ, M. Corrosion Protection of Oil Storage Tank Double Bottoms. In: The European Corrosion Congress - EUROCORR 2010, European Federation of Corrosion Event, n. 324, Moscow, Russia, 2010.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MODENESI, P. J. *Fluxo de calor em soldagem*. Belo Horizonte: UFMG, 2003.

MOREIRA, A. R.; ALMEIDA, N. L.; LEÓN, H. R.; GERVÁSIO, J. P. K. Proteção catódica de juntas soldadas de dutos com revestimento de alumínio e de zinco. *Corrosão & Proteção*, Rio de Janeiro: Aporte, n. 55, 2015, p. 26-33.

NUNES, L. P.; LOBO A. C. O. *Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva*. 4 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 413 p.

PANNONI, F. D.; História, comportamento e uso dos aços patináveis na engenharia estrutural brasileira. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo.

PARKER, M. E.; PEATTIE, E. G. *Pipe line corrosion and cathodic protection: a practical manual for corrosion engineers, technicians, and field personnel*. Houston: Gulf Professional Publishing, 1984.

PAREDES, R. S. C. *Aspersão térmica*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 102 p.

PAREDES, R. S. C. *Estudo de Revestimentos de Alumínio Depositados por Três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço Contra a Corrosão Marinha*. Florianópolis, 1998. 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

PETROBRAS. N-9 revisão G: 2013 – *Tratamento de Superfícies de Aço com Jato Abrasivo e Hidrojateamento*. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.

PETROBRAS. N-133:2017 – *Soldagem*. Rio de Janeiro, 2017. 116 p.

PETROBRAS. N-270:2014 – *Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico*. Rio de Janeiro, 2014. 71 p.

PETROBRAS. N-271:2010 – *Montagem de Tanque de Armazenamento*. Rio de Janeiro, 2010. 17 p.

PETROBRAS. N-1822:2013 – *Tratamento de Superfície de Base de Tanque*. Rio de Janeiro, 2013. 18 p.

PETROBRAS. N-2568:2011 – *Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica*. Rio de Janeiro, 2011. 50 p.

PETROBRAS. N-2680:2007 - *Tinta Epóxi, Sem Solventes, Tolerante a Superfícies Molhadas*. Rio de Janeiro, 2007. 11 p.

PETROBRAS. N-2843:2015 – *Revestimento Interno de Tubos*. Rio de Janeiro, 2015. 16 p.

REVIE, R. W. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

RIM-RUKEH, A.; OKOKOYO, P. A. Underside Corrosion of above Ground Storage Tanks (ASTs). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 9, p. 161-163, 2005.

ROBERGE, P. R. Handbook of Corrosion Engineering. 2 ed. New York: MCGraw-Hill, 2000. 1085 p.

SCHWEITZER, P. A. Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SOARES, H. C. G. Estudo de Sequências de Soldagem para Redução e Eliminação de Distorções. Belo Horizonte, 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

STUPELLO, B. Processos Construtivos: soldagem. Centro de Estudos em Gestão Naval. São Paulo, 2006.

TELLES, P. C. S. Materiais para Equipamentos de Processo. 6 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 275 p.

THOMASON, W. H. Offshore corrosion protection with thermal-sprayed aluminum. In: Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 1985.

ZAYED, A.; GARBATOV, Y.; SOARES, C. G.; WANG, G. Environmental factors affecting the time dependent corrosion wastage of marine structures. Maritime transportation and exploitation of ocean and coastal resources, v. 1, p. 589-598, 2005.

WOLFSON, S. L. Corrosion control of subsea piping systems using thermal sprayed aluminum coatings. In: Corrosion 1996, Paper n.560, NACE International, Denver, Colorado, EUA, 1996.