



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BAIXO TOCANTINS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JOSÉ EDUARDO RIBEIRO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA PROTEÇÃO ELETROSTÁTICA E  
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO SUPER-HIDROFÓBICO EM ISOLADORES DE  
ALTA TENSÃO

Abaetetuba-PA

2016

JOSÉ EDUARDO RIBEIRO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA PROTEÇÃO ELETROSTÁTICA E  
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO SUPER-HIDROFÓBICO EM ISOLADORES DE  
ALTA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, *Campus* Universitário do Baixo Tocantins, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Industrial, sob orientação do Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis.

Abaetetuba-PA

2016

JOSÉ EDUARDO RIBEIRO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA PROTEÇÃO ELETROSTÁTICA E  
APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO SUPER-HIDROFÓBICO EM ISOLADORES DE  
ALTA TENSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial, pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Baixo Tocantins.

Abaetetuba, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2016.

---

Prof. Dr. Marcos Allan Leite Dos Reis  
UFPA  
Orientador

---

Prof. M.sc. Eliomar Azevedo do Carmo  
UFPA  
Examinador

---

Prof. Dr. Lamartine Vilar de Souza  
UFPA  
Examinador

***À minha mãe.***

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a DEUS, por tudo;

Ao Professor Marcos Allan Leite dos Reis pela orientação e confiança;

À minha família: Francisco Valdir Oliveira da Silva, Lúcia dos Santos Ribeiro da Silva, Luciana Cesarina Ribeiro da Silva e Flávia Danielle Ribeiro da Silva, pelo apoio;

À minha namorada Márjorye Katharine Aires dos Santos pelo apoio e compreensão.

E a todas as outras pessoas que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

*“Se você acredita que é capaz, ou acredita que não é capaz, de qualquer forma você está certo.”*

*Henry Ford*

## RESUMO

A corrosão é um dos principais fatores que geram prejuízos na ordem de milhões de reais para empresas do setor de energia devido à deterioração precoce dos equipamentos elétricos das redes de alta tensão. Dentre estes se destacam os isoladores do tipo disco de vidro, os quais são formados por uma campânula metálica, um pino de aço carbono, um disco de vidro e argamassa estrutural para unir os três elementos anteriores. A ação da poluição atmosférica, umidade e intenso campo elétrico sobre a superfície desses isoladores propiciam o acúmulo de cargas e a incidência de descargas elétricas na superfície dos pinos, fatores que maximizam a degradação dos mesmos, resultando na falha catastrófica do equipamento. Nesse sentido, este trabalho desenvolveu um dispositivo anticorrosivo para pinos de isoladores, baseado no princípio da blindagem eletrostática, com o objetivo de anular a presença de cargas superficiais e a incidência de descargas elétricas na superfície dos pinos. Também avaliou a aplicação de revestimento super-hidrofóbico na superfície dielétrica de um isolador, objetivando verificar a redução da camada de poluição depositada sobre a mesma. Além disso, fez um ensaio de corrosão atmosférica com um corpo de prova de aço carbono exposto às condições ambientais da cidade de Abaetetuba. Os resultados de uma simulação computacional mostraram claramente que o dispositivo anticorrosivo consegue anular a influência de campos elétricos sobre os pinos, fato que foi reafirmado por um ensaio experimental que comprovou a eficácia do dispositivo em blindar eletrostaticamente a superfície do pino de um isolador de vidro, pois evitou que descargas elétricas da ordem de 20 a 60 kV atingissem a superfície do mesmo. Além disso, análises realizadas após a aplicação do revestimento super-hidrofóbico na superfície vítrea de um isolador comprovaram a eficiência do produto na remoção de poluentes, o que condiz com o ângulo de contato de  $155,55^\circ$  formado entre a superfície revestida e gotas de água. O ensaio de corrosão, por sua vez, revelou que o corpo de prova de aço carbono perdeu aproximadamente 0,56 g durante 1 ano de exposição às condições ambientais da cidade supracitada.

**Palavras-chave:** Isoladores do tipo disco de vidro, Pinos de aço carbono, Corrosão, Anel para proteção eletrostática, Revestimento super-hidrofóbico.

## ABSTRACT

Corrosion is one of the main factors that generate losses in the order of millions of reais for power sector companies due to early deterioration of the electrical equipment of high voltage networks. Among these stand out the insulators type glass disc, which are formed by a metal hood, a pin carbon steel, a glass disk and structural mortar to unite the above three elements. The action of air pollution, humidity and intense electric field on the surface of these insulators provide the accumulation of charges and the incidence of electrical discharges on the surface of the pins, factors that maximize the degradation thereof, resulting in catastrophic failure of the equipment. In this sense, this work developed an anticorrosive device to pin insulators, based on the principle of electrostatic shielding, in order to nullify the presence of surface charges and the incidence of electrical discharges on the surface pins. Also assessed the application of super-hydrophobic coating on the dielectric surface of an insulator in order to verify the reduction of pollution layer deposited on it. He also made a atmospheric corrosion test with a steel specimen carbon exposed to environmental conditions of the city of Abaetetuba. The results of a computer simulation showed clearly that the anticorrosion device can cancel the influence of electric fields on the pins, a fact which was reaffirmed by experimental trial that demonstrated the effectiveness of the device for electrostatically shielding the surface of the pin of a glass insulator, as he avoided that electrical discharges on the order of 20 to 60 kV reached the surface. Moreover, analyzes conducted after the application of super-hydrophobic coating on the glass surface of an insulating proved the efficiency of the product in the removal of pollutants, which is consistent with the  $155,55^\circ$  contact angle between the coated surface and water droplets . The corrosion test, in turn, revealed that the carbon steel test specimen lost about 0.56 g for 1 year of exposure to environmental conditions of the above city.

**Keywords:** Insulators like glass disc, Carbon steel pins, Corrosion, Electrostatic protection ring, Super-hydrophobic coating.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo dos Metais .....	19
Figura 2 - Componentes de uma pilha eletroquímica .....	21
Figura 3 - Pilha eletroquímica entre o ferro e o cobre .....	21
Figura 4 - Reação de passagem de íons metálicos para a solução .....	23
Figura 5 - Mecanismo de proteção catódica em tubulação de aço-carbono com anodo de magnésio .....	25
Figura 6 - Galvanização do ferro por mergulho a quente .....	26
Figura 7 - Variação da massa corroída do aço em função da umidade relativa .....	30
Figura 8 - Figura esquemática mostrando a variação da velocidade de corrosão em função das condições climáticas .....	30
Figura 9 - Esquematização do processo de corrosão do aço carbono .....	34
Figura 10 - Constituintes básicos da ferrugem .....	35
Figura 11 - Fase inicial do processo corrosivo .....	36
Figura 12 - Fase da “corrosão úmida” .....	37
Figura 13 - Fase da “corrosão seca” .....	37
Figura 14 - Partes constituintes de um isolador de disco .....	39
Figura 15 - Isolador de disco de vidro temperado .....	40
Figura 16 - Cadeias de isoladores sendo substituídas em linhas de transmissão ....	41
Figura 17 - Comprimento da cadeia de isoladores .....	41
Figura 18 - Distância de arco seco .....	42
Figura 19 - Distância de Perfuração .....	42
Figura 20 - Distância de dispersão ou escoamento das correntes de fuga para um único isolador .....	43
Figura 21 - Isolador do tipo disco de vidro com poluição em sua superfície e com o pino comprometido .....	44
Figura 22 - Simulação de campo elétrico em um isolador de disco de vidro .....	47
Figura 23 - Isolador com a base do pino corroída .....	48
Figura 24 - Distribuição das cargas na superfície de um condutor carregado .....	49
Figura 25 - Casca metálica oca exposta a um campo elétrico externo .....	50
Figura 26 - Gaiola metálica protegendo um homem de uma descarga elétrica .....	51
Figura 27 - Flor de Lótus com gotas de água escorrendo em sua superfície .....	51
Figura 28 - Ângulo de contato entre uma gota de água e uma superfície sólida .....	52

Figura 29 - Projeto final das peças constituintes do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos.....	54
Figura 30 - Representação de como o “Dispositivo anticorrosivo” será acoplado nos isoladores de disco de vidro .....	55
Figura 31 – A) Procedimento feito para simular descargas elétricas e comprovar a eficácia do “Dispositivo anticorrosivo”. B) Condições utilizadas para a simulação de um campo elétrico externo sob a superfície de isoladores. C) Situação real utilizada como base para a definição dos parâmetros da simulação apresentados na Figura 31(B) .....	56
Figura 32 - Parte da superfície dielétrica do isolador onde se aplicou o revestimento super-hidrofóbico.....	57
Figura 33 - Fotografia rasante de uma superfície com o revestimento super-hidrofóbico sob a qual há uma pequena gota de água misturada com tinta preta ....	59
Figura 34 - Cadeia com três isoladores exposta na UFPA de Abaetetuba, na qual apenas o isolador do meio está com parte do corpo dielétrico revestido com a película super-hidrofóbica e sujo com pó de grafite .....	60
Figura 35 - A) Massa inicial do corpo de prova; B) Pino de aço carbono (corpo de prova) no primeiro dia de exposição .....	62
Figura 36 - Protótipo das peças constituintes do “Dispositivo anticorrosivo” .....	64
Figura 37 - Passos de acoplamento das peças para a formação do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores.....	65
Figura 38 - A) Simulação de campo elétrico na superfície de dois isoladores após a proteção de um dos pinos pelos anéis metálicos do “Dispositivo anticorrosivo”. B) Distribuição das cargas elétricas na superfície do pino de um isolador que está sob influência do campo elétrico de uma linha de transmissão. C) Nova distribuição das cargas elétricas após o acoplamento do “Dispositivo anticorrosivo”, com o isolador submetido às mesmas condições anteriores.....	67
Figura 39 - Blindagem eletrostática da superfície do pino que fica exposta às condições ambientais e elétricas.....	69
Figura 40 - Blindagem eletrostática após a junção de dois isoladores, entre os quais se encontra o “Dispositivo anticorrosivo” .....	70
Figura 41 - Ângulo de contato, mensurado com o auxílio do programa ImageJ, entre uma superfície com revestimento super-hidrofóbico e uma pequena gota de água .	71
Figura 42 - Princípio de autolimpeza do revestimento super-hidrofóbico .....	72

Figura 43 - Simulação de incidência de chuva sobre a superfície dielétrica de um isolador revestido com “NeverWet®” .....	72
Figura 44 - Variação da massa do corpo de prova.....	73
Figura 45 - Variação da massa do aço.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de potenciais de eletrodo padrão .....	24
Tabela 2 - Concentração das principais impurezas na atmosfera.....	32
Tabela 3 - Etapas antecedentes a ocorrência dos <i>flashovers</i> .....	45
Tabela 4 - Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e seus respectivos ângulos de contato .....	53
Tabela 5 - Composição química dos aços inoxidáveis.....	55
Tabela 6 - Composição química do revestimento super-hidrofóbico conhecido como NeverWet®.....	58
Tabela 7 - Taxas de corrosão para o aço segundo a norma ISO 9223:1992.....	63
Tabela 8 - Mudanças causadas pelo “Dispositivo anticorrosivo” .....	68

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>1.3 Estrutura do Trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Corrosão: uma abordagem geral</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Processo de corrosão dos metais: mecanismo eletroquímico</b> .....	<b>20</b>
2.2.1 Pilhas eletroquímicas.....	20
2.2.2 Potencial de eletrodo padrão .....	22
2.2.3 Pilha Galvânica .....	24
2.2.4 Mecanismo eletroquímico de corrosão dos metais .....	26
<b>2.3 Corrosão atmosférica</b> .....	<b>29</b>
2.3.1 Fatores que influenciam a corrosão atmosférica .....	29
2.3.2 Mecanismo da Corrosão Atmosférica do aço-carbono .....	32
<b>2.4 Corrosão em isoladores de linhas de transmissão de energia</b> .....	<b>38</b>
2.4.1 Isoladores de disco utilizados em linhas de transmissão de energia.....	38
2.4.2 Descargas elétricas fracas ou parciais ( <i>spark-overs</i> ) e descargas fortes ou integrais ( <i>flashovers</i> ).....	43
2.4.3 Corrosão nos pinos de isoladores de rede elétrica .....	46
<b>2.5 Gaiola de Faraday: blindagem eletrostática</b> .....	<b>49</b>
<b>2.6 Superfícies super-hidrofóbicas</b> .....	<b>51</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1 Gaiola de Faraday para pinos de isoladores de disco de vidro</b> .....	<b>54</b>

3.2 Utilização de revestimento super-hidrofóbico na superfície dielétrica de isoladores de linhas de transmissão de energia.....	57
3.3 Ensaio atmosférico de perda de massa de um pino de aço carbono exposto às condições ambientais da cidade de Abaetetuba .....	60
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1 Resultados com o “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores</b>	<b>64</b>
4.1.1 Protótipo e especificações para acoplamento nos isoladores .....	64
4.1.2 Simulação de campo elétrico e nova distribuição das cargas elétricas após a proteção do pino pelo “Dispositivo anticorrosivo” .....	66
4.1.3 Proteção contra os <i>spark-overs</i> e <i>flashovers</i> .....	69
<b>4.2 Resultados com o revestimento super-hidrofóbico .....</b>	<b>71</b>
4.2.1 Com relação ao princípio autolimpante do revestimento .....	71
<b>4.3 Resultados com o ensaio atmosférico de perda de massa do pino de aço carbono exposto na cidade de Abaetetuba (Local: Campus da UFPA) .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 Variação da massa do corpo de prova após um ano de exposição .....	73
4.3.2 Taxa de corrosão do corpo de prova de aço carbono e o grau de corrosividade do ambiente da cidade de Abaetetuba .....	74
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE – COMPROVANTE DE DEPÓSITO DE PATENTE.....</b>	<b>81</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Isoladores do tipo disco de vidro temperado são úteis para efetuar o isolamento elétrico entre linhas de transmissão de energia que ficam suspensas por uma mesma torre de sustentação. Além disso, desempenham a função estrutural de suportar o peso dos cabos condutores. Eles são formados por uma campânula metálica (objeto em forma de sino), um pino de aço carbono, um disco de vidro e argamassa estrutural para unir os três elementos anteriores. A ação da poluição atmosférica, umidade e intenso campo elétrico sobre a superfície desses isoladores propiciam a corrosão dos pinos, o que resulta numa possível ruptura dos mesmos, e, conseqüentemente, num potencial risco de desabamento da linha de transmissão em questão. Diante disso, torna-se importante o estudo mais aprofundado sobre o avanço do processo de corrosão em pinos de isoladores de alta tensão, objetivando propor soluções viáveis para atenuar este problema.

Assim, resumidamente, este trabalho abordará como a corrosão e as condições atmosféricas deterioram os metais e como o campo elétrico das redes intensifica este processo nos pinos de aço de isoladores de vidro. Posteriormente apresentará os métodos e recursos utilizados e/ou aprimorados que irão mitigar os efeitos ambientais e elétricos sobre a superfície dos pinos de isoladores, apresentando, em seguida, os resultados alcançados e/ou esperados com as propostas. Além disso, ressaltará as etapas e procedimentos realizados em um ensaio de corrosão atmosférica e os resultados revelados pelo mesmo.

### **1.1 Justificativa**

A corrosão é um dos principais fatores que geram prejuízos na ordem de milhões de reais para as grandes empresas industriais. Dentro deste contexto, está inserida a empresa Eletronorte, a qual sofre grande influência com os elevados custos de manutenção das suas linhas de transmissão decorrentes de prejuízos causados pela corrosão dos pinos de aço carbono, de isoladores do tipo disco de vidro, que são utilizados em suas redes de distribuição de energia.

Estes prejuízos se devem ao fato de que, para evitar o rompimento dos isoladores, e por consequência, o desabamento da linha de transmissão em

questão, a Eletronorte faz a manutenção preventiva das mesmas. Esta ação demanda numerosas substituições de isoladores em linha viva, o que eleva os custos de manutenção para a empresa.

De 2005 a 2011, por exemplo, ocorreram cinco desligamentos não programados em linhas de transmissão da Eletronorte por causa de defeitos de fabricação e/ou corrosão dos isoladores das linhas. Estes fatos contabilizaram prejuízos globais da ordem de R\$ 7.600.000,00 (ELETRONORTE, 2013).

Focado nestes elevados prejuízos da empresa Eletronorte, este trabalho buscou, principalmente: desenvolver um dispositivo de proteção eletrostática para pinos de isoladores e avaliar a aplicação de revestimento super-hidrofóbico em isoladores do tipo disco de vidro temperado, no intuito de mitigar a corrosão nesta classe de isoladores elétricos de alta tensão.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar o processo corrosivo nos pinos metálicos de isoladores de alta tensão do tipo disco de vidro temperado e propor soluções para mitigar o problema.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver um dispositivo para proteção eletrostática da superfície do pino que fica exposta às condições ambientais e elétricas, e comprovar experimentalmente a sua eficácia;
- Aplicar e avaliar a utilização de revestimento super-hidrofóbico no disco de vidro dos isoladores;
- Fazer um ensaio atmosférico de perda de massa (por corrosão e sem a influência de campo elétrico) com um corpo de prova de aço carbono.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo “Referencial Teórico” será enfatizado o estudo do processo corrosivo em metais, com foco na corrosão atmosférica do aço carbono. Também mostrará a influência do campo elétrico das linhas de transmissão na intensificação dos processos de corrosão em pinos de isoladores, e por fim, ressaltará a fundamentação teórico-metodológica que embasou as etapas de desenvolvimento do dispositivo de proteção eletrostática e justificou utilização de revestimento super-hidrofóbico na solução da problemática em questão.

Em seguida, “Materiais e Métodos” mostrará as etapas de desenvolvimento do dispositivo para proteção eletrostática de pinos de isoladores, os materiais necessários e os recursos utilizados para comprovação da eficácia do dispositivo. Além disso, abordará o tipo do revestimento utilizado, o local onde foi aplicado nos isoladores, o que se almeja com esta ação e o procedimento recorrido para validação dos benefícios do revestimento. Por fim, apresentará as normas e procedimentos utilizados em um ensaio atmosférico de perda de massa, no qual se utilizou um pino de aço carbono (corpo de prova) que ficou, durante um ano, submetido às condições ambientais da cidade de Abaetetuba.

“Resultados e Discussões” mostrará os resultados alcançados com a utilização do dispositivo para proteção eletrostática em pinos, bem como, com a aplicação do revestimento super-hidrofóbico em isoladores de disco de vidro. Além disso, apresentará os resultados obtidos com o ensaio atmosférico de perda de massa do corpo de prova de aço carbono exposto às condições ambientais da cidade de Abaetetuba e como estes resultados podem ser correlacionados com a corrosão em pinos de isoladores.

Em “Conclusões” serão sumarizados os resultados obtidos com as propostas feitas durante o trabalho e como poderão auxiliar na resolução da problemática em questão. E, por fim, serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Corrosão: uma abordagem geral

A corrosão pode ser caracterizada pela deterioração de um material devido sua interação com o meio ambiente. É importante ressaltar que o termo “corrosão” pode ser aplicado para plásticos, cerâmicos e concretos, porém é mais utilizado quando se reporta a metais, uma vez que este processo pode ser facilmente visualizado quando um metal está enferrujado (NUNES, 2007).

Assim, a corrosão metálica, que será bastante discutida neste trabalho, pode ser definida como a deterioração de um metal por ação química ou eletroquímica que acontece na superfície do mesmo, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos e onde o metal é convertido a um estado não metálico, principalmente em óxidos, os quais vão se tornar a interface entre a superfície do metal e o meio ambiente (GENTIL, 2011).

A oxidação e a dissolução de um metal em um meio aquoso são exemplos bastante comuns de corrosão. Desta forma, sempre que um elemento químico perde ou cede um ou mais elétrons, pode-se dizer que ele oxidou, e sempre que um elemento químico recebe ou ganha um ou mais elétrons, pode-se afirmar que ele se reduziu. Assim, uma reação de oxidação ou de redução sempre está relacionada com transferência de elétrons, e ao ocorrerem simultaneamente, estamos diante de um processo de corrosão (GEMELLI, 2001).

Além disso, pode-se ressaltar que um elemento químico já oxidado pode aumentar seu grau de oxidação ao ceder mais elétrons, ou diminuir seu grau de oxidação ao receber mais elétrons. Uma reação de corrosão nada mais é do que a transferência de elétrons entre um elemento químico do material e outro elemento químico do meio, sendo que, como já ressaltado anteriormente, essa transferência de elétrons pode ser por mecanismo químico, o que dará origem à corrosão química, ou por mecanismo eletroquímico, o que dará origem à corrosão eletroquímica (FONTANA, 1987).

A corrosão por ação química se dá quando a transferência de elétrons se faz diretamente entre as duas espécies químicas envolvidas, ou seja, há reações

químicas diretas entre o material metálico e o meio corrosivo, não havendo geração de corrente elétrica, visto que o doador e o receptor se localizam no mesmo ponto na superfície do metal (GEMELI, 2001).

Segundo Gentil (2011), alguns exemplos de processos corrosivos por mecanismo químico são:

- A. Corrosão de material metálico, em temperaturas elevadas, por gases ou vapores e em ausência de umidade, chamada de corrosão seca;
- B. Corrosão em solventes orgânicos isentos de água;
- C. Corrosão de materiais não metálicos.

Na corrosão por ação eletroquímica, a transferência de elétrons ocorre de forma indireta, ou seja, os elétrons difundem-se através da superfície do sólido até um ponto onde são recebidos pelo elemento responsável pela oxidação (elemento oxidante) presente no meio, uma vez que, neste caso, o doador e o receptor de elétrons se encontram em pontos diferentes de uma mesma superfície. Este processo faz com que haja geração de corrente elétrica na interface sólido/meio corrosivo, visto que na superfície do metal irão existir regiões chamadas de anodos, onde ocorre oxidação, e outras regiões chamadas de cátodos, onde os elétrons serão consumidos (GENTIL, 2011).

A corrosão metálica, portanto, é caracterizada principalmente por quatro simples processos: o processo anódico (passagem dos íons do metal para a solução eletrolítica), o deslocamento de elétrons na superfície do metal, o deslocamento de íons na solução eletrolítica e o processo catódico (recepção de elétrons nas áreas catódicas pelos íons ou moléculas existentes na solução eletrolítica) (GEMELLI, 2001).

Segundo Gentil (2011), alguns exemplos de processos corrosivos por mecanismo eletroquímico são:

- A. Corrosão em água ou soluções aquosas;
- B. Corrosão atmosférica;

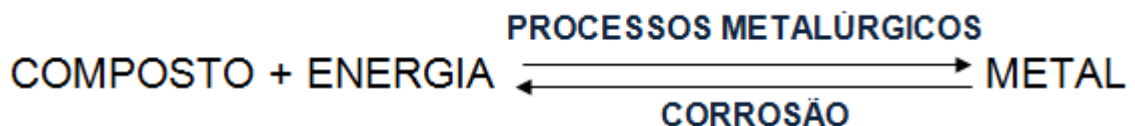
C. Corrosão no solo;

D. Corrosão em sais fundidos.

Assim, pode-se afirmar que todo tipo de corrosão que ocorre com a presença de umidade ocorre por mecanismo eletroquímico, a qual atinge principalmente os metais expostos em ambientes que ficam em contato com o ar atmosférico, submersos no solo, na água de rios e mares e no subsolo (GEMELI, 2001).

Do ponto de vista termodinâmico, a corrosão metálica nada mais é do que o decréscimo energético do material, visto que o metal raramente é encontrado puro na natureza (exceto metais nobres, como o ouro), mas sim na forma de minérios, os quais são, na verdade, formas oxidadas de metal e que vão precisar de energia para se transformar em metal puro, a qual é cedida através de processos metalúrgicos. Assim, pode-se dizer que a corrosão metálica é a tendência espontânea do metal puro retornar ao seu estado original, de mais baixa energia (FONTANA, 1987), como mostrado na Figura 1:

**Figura 1 - Ciclo dos Metais**



Fonte: O próprio autor

Para efeitos de aprofundamento, este trabalho fará um maior enfoque na corrosão dos metais por reações eletroquímicas, visto que a maioria destas ocorre por processos eletroquímicos, os quais são semelhantes aos que ocorrem em pilhas e baterias, pois envolvem a presença de um eletrólito como importante componente para ocorrência da corrosão. Além disso, dará ênfase ainda maior na corrosão atmosférica, um caso particular de corrosão por mecanismos eletroquímicos.

## 2.2 Processo de corrosão dos metais: mecanismo eletroquímico

Para compreender de forma mais satisfatória o processo de corrosão dos metais por mecanismo eletroquímico é de grande importância fazer um estudo prévio sobre as pilhas eletroquímicas e os potenciais de eletrodo padrão.

### 2.2.1 Pilhas eletroquímicas

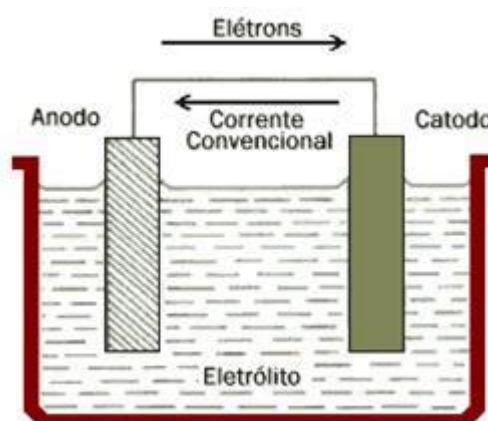
Para o estudo da corrosão, entender o funcionamento das pilhas eletroquímicas é de fundamental importância para a compreensão do processo de oxidação dos metais em sua grande maioria.

Segundo Gentil (2011), uma pilha eletroquímica é um sistema composto por dois eletrodos, os quais estão em contato por um fio condutor, e que estão imersos em um eletrólito (condutor iônico), sendo basicamente formada pelos seguintes componentes:

- Anodo: Eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Cátodo: Eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito ou o eletrodo no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução;
- Eletrólito: Condutor, geralmente um líquido, o qual contém íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o cátodo;
- Circuito metálico: Ligação metálica entre o anodo e o cátodo por onde fluem os elétrons, no sentido anodo-cátodo.

Observe a Figura 2 para visualizar cada componente de uma pilha eletroquímica:

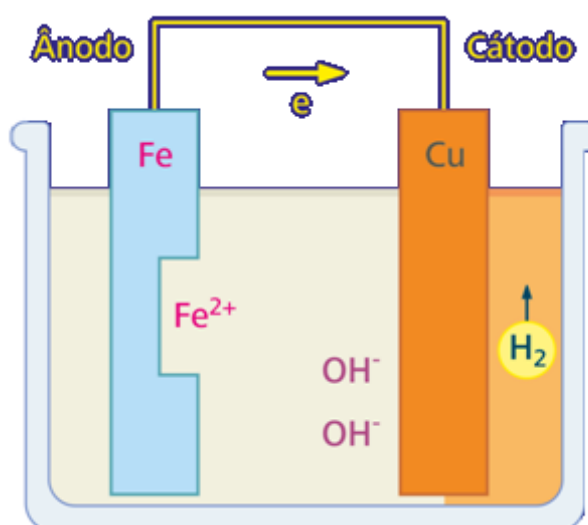
Figura 2 - Componentes de uma pilha eletroquímica



Fonte: Gentil, (2011, p. 34)

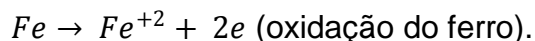
A transferência de elétrons da região anódica para a região catódica pode ser facilmente representada por um sistema onde há um eletrodo de ferro em contato elétrico com um eletrodo de cobre e ambos imersos em solução de HCl. Com isso, passará a ocorrer exclusivamente na superfície do ferro, a chamada reação anódica, e, simultaneamente, ocorrerá sobre a superfície do cobre, a denominada reação catódica. Os elétrons liberados no anodo pela oxidação do ferro passarão pelo fio condutor externo em direção ao cátodo (eletrodo de cobre), no qual serão consumidos pela reação catódica (GEMELLI, 2001). A Figura 3 mostra o fluxo de elétrons na pilha eletroquímica formada por Fe – Cu:

Figura 3 - Pilha eletroquímica entre o ferro e o cobre



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012, p. 57)

Na superfície do ferro irá ocorrer a reação anódica do tipo:



Esta reação fará com que o eletrodo de ferro perca massa e, conseqüentemente, espessura, devido a passagem de íons  $Fe^{+2}$  para a solução.

Na superfície do cobre ocorrerá a reação catódica, a qual pode ser representada da seguinte maneira:



A reação catódica ocorre mais facilmente na superfície do cobre do que na superfície do ferro, visto que cada metal possui uma tendência característica para ceder ou doar elétrons (GEMELLI, 2001). Fato que será detalhado a seguir.

### 2.2.2 Potencial de eletrodo padrão

O funcionamento das pilhas eletroquímicas, ou pilhas de corrosão, envolve uma importante grandeza que se denomina Potencial de Eletrodo Padrão (ou simplesmente “potencial”, como se costuma dizer na prática). Para o caso dos metais, por exemplo, verificou-se experimentalmente que os mesmos apresentam diferentes tendências à oxidação, ou seja, diferentes potenciais. Assim, notou-se, por exemplo, que o ferro, em presença de ar e umidade, tem maior tendência a se oxidar do que o níquel (GENTIL, 2007).

A explicação para o aparecimento deste potencial se baseia num princípio geral segundo o qual sempre que se tem um metal em contato com um eletrólito, desenvolve-se entre o metal e o eletrólito uma diferença de potencial elétrico que pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo do metal e das espécies presentes no eletrólito, além de outras variáveis (FONTANA, 1987).

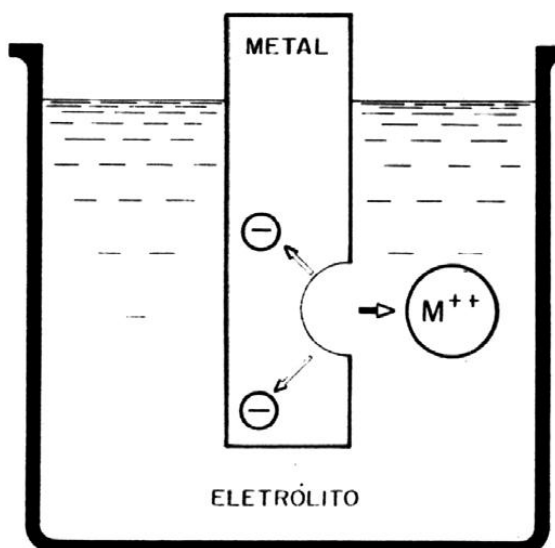
Para entender melhor, considere um metal no vácuo. Para se trazer uma carga unitária do infinito até este metal será necessário exercer um trabalho, pois haverá uma interação entre a carga unitária e as cargas da estrutura eletrônica do metal. Porém, cada metal (ou material) possui uma distribuição de suas cargas que é característica do material. Desta forma, o trabalho para se trazer uma carga

unitária do infinito para o interior de um metal X é diferente para o caso de um metal Y e para todos os outros materiais. Este trabalho se traduz numa energia absoluta característica de cada material (FONTANA, 1987).

Assim, um material que não se encontra no vácuo, mas sim imerso num eletrólito, também terá uma energia característica para se trazer uma carga unitária do infinito para o interior da solução, a qual dependerá, entretanto, da concentração de íons metálicos na solução (FONTANA, 1987).

Como consequência, tem-se um sistema composto por um eletrólito e um metal, havendo uma diferença de potencial absoluto entre as duas fases, a qual é, simultaneamente, de natureza elétrica e de natureza química, e por isso se denomina **diferença de potencial eletroquímico**, o qual funciona como uma força motriz para as reações de corrosão. Este fenômeno é observado fisicamente pela tendência natural da maioria dos metais passarem para a solução eletrolítica na forma iônica (GENTIL, 2011), fato que ocorre segundo a reação anódica ilustrada na Figura 4:

Figura 4 - Reação de passagem de íons metálicos para a solução



Fonte: Nunes (2007, p. 6)

Com isso, torna-se imprescindível para o estudo dos processos corrosivos a caracterização dos metais em uma tabela que indique a ordem preferencial de cessão ou doação de elétrons, na qual se tem como referencial o eletrodo de

hidrogênio (H<sub>2</sub>), que possui potencial igual a zero. Esta tabela é conhecida como **tabela de potenciais de eletrodo padrão**, e pode ser visualizada na Tabela 1.

**Tabela 1 - Tabela de potenciais de eletrodo padrão**

Meia-reação	E <sup>0</sup> /V
Li <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Li (s)	-3,05
K <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → K (s)	-2,93
Ba <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Ba (s)	-2,90
Sr <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Sr (s)	-2,89
Ca <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Ca (s)	-2,87
Na <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Na (s)	-2,71
Mg <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Mg (s)	-2,37
Be <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Be (s)	-1,85
Al <sup>3+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup> → Al (s)	-1,66
Mn <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Mn (s)	-1,18
2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> (g) + 2OH <sup>-</sup> (aq)	-0,83
Zn <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Zn (s)	-0,76
Cr <sup>3+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup> → Cr (s)	-0,74
Fe <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Fe (s)	-0,44
Cd <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Cd (s)	-0,40
PbSO <sub>4</sub> (s) + 2e <sup>-</sup> → Pb (s) + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq)	-0,31
Co <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Co (s)	-0,28
Ni <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Ni (s)	-0,25
Sn <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Sn (s)	-0,14
Pb <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Pb (s)	-0,13
<b>2H<sup>+</sup> (aq) + 2e<sup>-</sup> → H<sub>2</sub> (g)</b>	<b>0,00</b>
Sn <sup>4+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Sn <sup>2+</sup> (aq)	+0,13
Cu <sup>2+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Cu <sup>+</sup> (aq)	+0,15
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (aq) + 4H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → SO <sub>2</sub> (g) + 2H <sub>2</sub> O	+0,20
AgCl (s) + e <sup>-</sup> → Ag (s) + Cl <sup>-</sup> (aq)	+0,22
Cu <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Cu (s)	+0,34
O <sub>2</sub> (g) + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> → 4OH <sup>-</sup> (aq)	+0,40
I <sub>2</sub> (s) + 2e <sup>-</sup> → 2I <sup>-</sup> (aq)	+0,53
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq) + 2H <sub>2</sub> O + 3e <sup>-</sup> → MnO <sub>2</sub> (s) + 4OH <sup>-</sup> (aq)	+0,59
O <sub>2</sub> (g) + 2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (aq)	+0,68
Fe <sup>3+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Fe <sup>2+</sup> (aq)	+0,77
Ag <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Ag (s)	+0,80
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → 2Hg (l)	+0,85
2Hg <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (aq)	+0,92
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq) + 4H <sup>+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup> → NO (g) + 2H <sub>2</sub> O	+0,96
Br <sub>2</sub> (l) + 2e <sup>-</sup> → 2Br <sup>-</sup> (aq)	+1,07
O <sub>2</sub> (g) + 4H <sup>+</sup> (aq) + 4e <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O	+1,23
MnO <sub>2</sub> (s) + 4H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Mn <sup>2+</sup> (aq) + 2H <sub>2</sub> O	+1,23
Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> (aq) + 14H <sup>+</sup> (aq) + 6e <sup>-</sup> → Cr <sup>3+</sup> (aq) + 7H <sub>2</sub> O	+1,33
Cl <sub>2</sub> (g) + 2e <sup>-</sup> → 2Cl <sup>-</sup> (aq)	+1,36
Au <sup>3+</sup> (aq) + 3e <sup>-</sup> → Au (s)	+1,50
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq) + 8H <sup>+</sup> (aq) + 5e <sup>-</sup> → Mn <sup>2+</sup> (aq) + H <sub>2</sub> O	+1,51
Ce <sup>4+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Ce <sup>3+</sup> (aq)	+1,61
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (aq) + 2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O	+1,77
Co <sup>3+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Co <sup>2+</sup> (aq)	+1,82
O <sub>3</sub> (g) + 2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → O <sub>2</sub> (g) + H <sub>2</sub> O	+2,07
F <sub>2</sub> (g) + 2e <sup>-</sup> → 2F <sup>-</sup> (aq)	+2,87

Fonte: <http://oi64.tinypic.com/2nbdbt3.jpg>

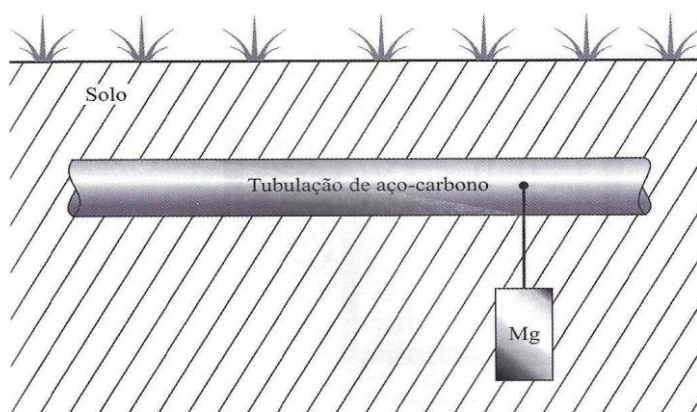
### 2.2.3 Pilha Galvânica

Um dos tipos mais comuns de pilhas eletroquímicas é a chamada pilha galvânica, a qual ocorre quando dois metais ou ligas diferentes estão em contato

elétrico e imersos num mesmo eletrólito. Considerando, por exemplo, o caso do ferro e do cobre ressaltado anteriormente e ilustrado na Figura 3, pode-se dizer que formam uma pilha desta natureza, na qual o metal mais ativo na tabela de potenciais de eletrodo, neste caso o ferro, funciona como anodo da pilha, ou seja, cede elétrons e é corroído. O cobre, por sua vez, funciona como o cátodo da pilha, visto que, em relação ao ferro, possui menor tendência de doar elétrons e passar para a solução na forma de íons, ficando protegido da corrosão. Assim, é importante ressaltar que foi a partir do princípio de funcionamento de uma pilha galvânica que se desenvolveu o “Mecanismo de proteção catódica com anodos de sacrifício ou galvânico” (GENTIL, 2011).

Um exemplo da utilização do mecanismo de proteção catódica pode ser ilustrado quando se liga, por exemplo, um eletrodo de magnésio numa tubulação de aço-carbono, estando o sistema enterrado (GENTIL, 2011), conforme se pode observar na Figura 5:

**Figura 5 - Mecanismo de proteção catódica em tubulação de aço-carbono com anodo de magnésio**



Fonte: Gentil (2011, p. 37)

De acordo com a tabela de potenciais de eletrodos padrão, tem-se que o magnésio é mais ativo de que o aço-carbono no que diz respeito à cessão de elétrons e, conseqüentemente, se oxida com mais facilidade, logo, o magnésio funciona como anodo e corrói preferencialmente, e o ferro funciona como catodo, ficando protegido (GENTIL, 2007).

Outro exemplo de proteção catódica é o processo de galvanização do ferro, o qual consiste na aplicação de uma camada de zinco na superfície do material por mergulho a quente, ou seja, a superfície do ferro ficará totalmente revestida por uma fina camada de zinco. A partir de então, o zinco passará a funcionar como o anodo, visto que é mais ativo do que o ferro, e o ferro funcionará como cátodo, ficando protegido, a princípio, do processo de corrosão (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2013). A Figura 6 ilustra o processo de galvanização do ferro por mergulho a quente:

**Figura 6 - Galvanização do ferro por mergulho a quente**



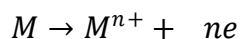
Fonte: <http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2011/02/galvanizacao.jpg>

#### 2.2.4 Mecanismo eletroquímico de corrosão dos metais

De uma forma geral, a grande maioria dos processos de corrosão dos metais ocorre devido a reações eletroquímicas que acontecem na superfície dos mesmos quando em contato com o meio ambiente. Um caso particular e muito importante de corrosão por processo eletroquímico é a corrosão atmosférica, a qual é de grande incidência no nosso dia a dia, e que ocorre devido à condensação de umidade na superfície do metal (PANNONI, 2011).

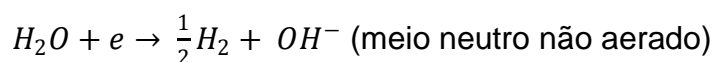
A teoria eletroquímica descreve o processo de corrosão metálica como a combinação de uma reação de oxidação (anódica), como a dissolução metálica, com uma reação de redução (catódica), tais como a redução do oxigênio ou do hidrogênio. A existência do processo de corrosão está associada com a ocorrência simultânea dessas duas reações. Na reação anódica, ocorre produção de elétrons, que são consumidos pela reação catódica. Além disso, deve-se ressaltar que a passagem de elétrons do anodo para o cátodo durante o processo deve ser através de um eletrólito para que possa ser caracterizado como eletroquímico (FONTANA, 1987).

Generalizando para um metal qualquer, pode-se representar a reação anódica (oxidação de um metal M) da seguinte maneira:

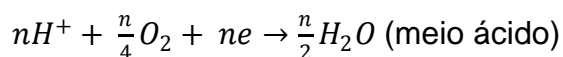
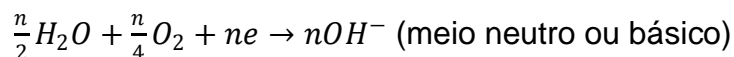


Alguns exemplos de reações catódicas são a redução do íon  $H^+$  e a redução do oxigênio em diferentes meios, as quais podem ser representadas, respectivamente, da seguinte maneira:

- Redução do hidrogênio:



- Redução do oxigênio:



Além disso, uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada à passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica. Esta passagem de corrente envolve o movimento de partículas carregadas - íons, elétrons ou ambos. Dessa forma, na maioria das reações que se manifestam na presença de uma superfície metálica, ocorre a passagem de corrente através do metal e de íons através do eletrólito presente na

superfície metálica, assim, a reação é eletroquímica em sua natureza (PANNONI, 2011).

Outro ponto a se destacar é que na maioria das reações eletroquímicas os íons se movimentam através de um eletrólito líquido. No entanto, em reações de oxidação, tais como a reação à temperatura elevada entre um metal e o oxigênio atmosférico, não se tem eletrólito líquido e o movimento de íons ocorre através da película de óxido metálico que se forma na superfície do metal. Este óxido funciona como um eletrólito sólido e garante a natureza eletroquímica da reação (PANNONI, 2011).

Além disso, deve-se frisar que “locais catódicos” e “locais anódicos” são distribuídos aleatoriamente por toda a superfície metálica e conectados eletricamente pelo substrato do metal. Assim, íons metálicos e hidroxilas são formados através de reações eletroquímicas e se difundem superficialmente. Quando se encontram, precipitam produtos que originarão a ferrugem, que nada mais é do que óxidos de ferro em diferentes estados de oxidação (GENTIL, 2007).

Vários são os fatores que determinam a criação e a distribuição de “regiões anódicas” e “regiões catódicas” na superfície do metal. A existência de diferenças de composição química, de microestrutura, de concentração, de velocidade de eletrólitos, de tensões residuais, dentre outras, determinam a formação de “locais catódicos” ou “locais anódicos” de forma aleatória na superfície do metal (GEMELLI, 2001).

É importante ressaltar, ainda, que conforme as áreas anódicas se corroem, um novo material, de diferente composição (a ferrugem), vai se precipitando na superfície do metal. Este novo material causa alterações dos potenciais elétricos entre as áreas anódicas e catódicas, causando mudança do local das mesmas. Assim, o que era anodo passa a ser catodo, e vice-versa. E com o tempo, toda a superfície metálica acaba se corroendo de modo uniforme (PANNONI, 2011).

## 2.3 Corrosão atmosférica

### 2.3.1 Fatores que influenciam a corrosão atmosférica

Existem diversos meios que influenciam diretamente o processo de corrosão dos metais, como a atmosfera, as águas naturais e o solo (GENTIL, 2011). Porém, será apenas enfatizada a influência atmosférica, visto que é exatamente na corrosão atmosférica do aço-carbono que este trabalho vai focar o seu estudo.

Segundo Shreir (1978) *apud* Gentil (2011), a corrosão atmosférica pode ser classificada em função do grau de umidade na superfície metálica exposta. Daí, ele subdividiu em corrosão seca, úmida ou molhada.

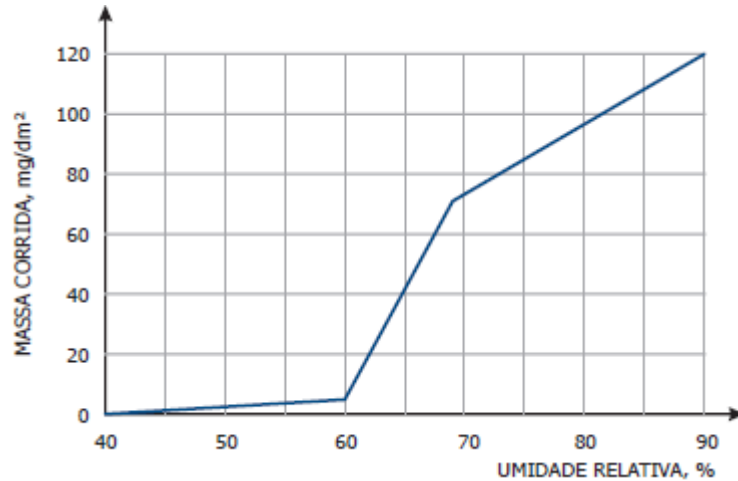
A corrosão atmosférica seca ocorre em atmosfera isenta de umidade, sem qualquer presença de filme de eletrólito na superfície metálica. Neste caso, tem-se uma lenta oxidação com formação de produtos de corrosão, podendo o mecanismo ser considerado puramente químico, como o “caso da mancha” (Do inglês *tarnishing*), o qual é caracterizado pelo escurecimento de prata ou de cobre por formação de  $\text{Ag}_2\text{S}$  e  $\text{CuS}$ , respectivamente, devido à presença de gás sulfídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ , na atmosfera ou meio ambiente. Já quando os materiais estão em contato com uma atmosfera com cerca de 100% de umidade relativa, ocorre condensação na superfície metálica e tem-se o processo de corrosão atmosférica molhada. E por fim, quando a atmosfera apresenta umidade relativa menor que 100%, um fino filme de eletrólito se forma sobre a superfície metálica causando um processo de corrosão atmosférica úmida.

A velocidade do processo corrosivo dependerá da umidade relativa, dos constituintes da atmosfera, dos poluentes atmosféricos e da solubilidade dos produtos de corrosão (GEMELLI, 2001).

A umidade relativa da atmosfera tem grande impacto na corrosão dos metais, visto que, por exemplo, o ferro em atmosfera de baixa umidade relativa praticamente não sofre corrosão. Porém, em umidade relativa acima de 70%, o processo corrosivo é acelerado, uma vez que os sais depositados na superfície podem se dissolver com a presença da umidade, aumentando assim a condutividade do eletrólito, e, por consequência, a velocidade da corrosão (GENTIL, 2007). A Figura 7 mostra a

influência que a umidade possui em relação à intensificação do processo de corrosão:

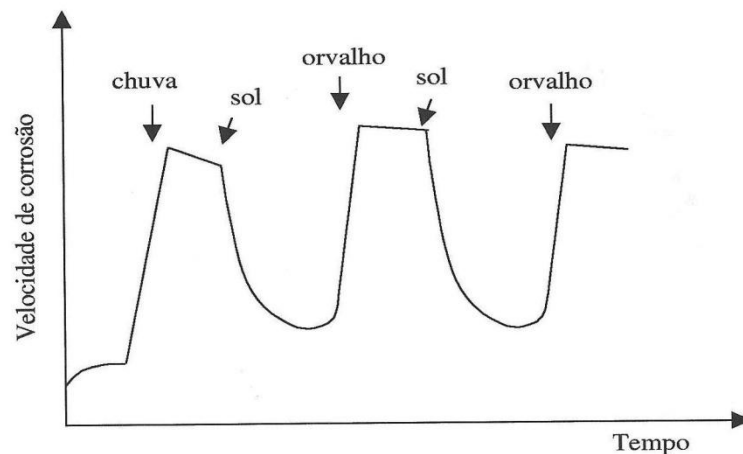
**Figura 7 - Variação da massa corroída do aço em função da umidade relativa**



Fonte: Pannoni (2011, p. 14)

Como a umidade relativa do ar varia em função da temperatura e das condições climáticas, a corrosividade da atmosfera e a velocidade de corrosão variam em consequência. Assim, durante um período com sol, por exemplo, a velocidade de corrosão diminui, porém, durante um período chuvoso, a velocidade de corrosão aumenta (GEMELLI, 2001). Observe a Figura 8 que mostra a variação da velocidade de corrosão em função das condições climáticas:

**Figura 8 - Figura esquemática mostrando a variação da velocidade de corrosão em função das condições climáticas**



Fonte: Gemelli (2001, p. 91)

Com relação aos produtos da corrosão atmosférica, eles podem ser solúveis ou insolúveis. Os produtos de corrosão solúveis podem aumentar as taxas de corrosão, pelo fato, por exemplo, de aumentarem a condutividade do eletrólito sobre a superfície metálica. Por outro lado, os produtos de corrosão insolúveis geralmente reduzem a taxa de corrosão, por atuarem como uma barreira entre a atmosfera e a superfície metálica (FONTANA, 1987).

No que diz respeito aos constituintes da atmosfera, pode-se dizer que possuem concentração relativamente constante, com exceção do vapor de água, que segue as variações climáticas, estação do ano e localização. Entre os outros constituintes, o  $O_2$  e o  $CO_2$  são importantes do ponto de vista de corrosão. O oxigênio dissolvido no eletrólito é o reagente catódico nos processos de corrosão. A influência do  $CO_2$  é importante apenas no caso de uns poucos metais, como, por exemplo, na corrosão do Zn e, em uma extensão menor, na corrosão dos aços (GEMELLI, 2001).

E, no que concerne às concentrações dos principais contaminantes da atmosfera, temos entre eles os óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, íons cloreto e poeira. Os óxidos de nitrogênio se formam durante a combustão a temperaturas elevadas, principalmente em motores de automóveis. Os íons cloretos ( $Cl^-$ ) aparecem principalmente nas regiões marinhas, uma vez que são transportados pelos ventos que carregam gotículas de água salgada. A poeira surge naturalmente ou é proveniente de fontes de poluição. E, por fim, dentre os óxidos de enxofre, o dióxido de enxofre é o poluente mais importante do ponto de vista da corrosão. As duas principais fontes de dióxido de enxofre na atmosfera são a oxidação atmosférica do ácido sulfídrico, produzido pela decomposição de compostos orgânicos contendo enxofre, e a queima de combustíveis contendo enxofre, tais como o petróleo e o carvão (GEMELLI, 2001).

Dentre os contaminantes mais agressivos do ponto de vista da corrosão atmosférica, destacam-se o dióxido de enxofre de atmosferas industriais e os íons cloretos de atmosferas marinhas. O dióxido de enxofre é absorvido pela superfície metálica, e na presença de oxigênio e umidade, forma o ácido sulfúrico (altamente corrosivo), gerando, desta maneira, um eletrólito na superfície do metal cuja condutividade aumenta de acordo com o teor de enxofre. Os íons cloretos ( $Cl^-$ ), por

sua vez, são extremamente agressivos aos metais, uma vez que, em conjunto com a umidade, aumenta consideravelmente a condutibilidade do eletrólito na superfície metálica, fator que intensifica o processo de corrosão (FONTANA, 1987). A Tabela 2 mostra a concentração das principais impurezas presentes na atmosfera:

**Tabela 2 - Concentração das principais impurezas na atmosfera**

IMPUREZA	CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	REGIÃO INDUSTRIAL	REGIÃO RURAL
Dióxido de enxofre	100 - 350	40 - 100
Trióxido de enxofre	1 - 3,5	0,4 - 1
Ácido sulfídrico	1,5 - 90	0,15 - 0,45
Amônia	4,8	2,1
Cloreto	2,7 - 8,2	5,4
Partículas de fumaça	100 - 250	15 - 60

Fonte: Ponte (2003, p. 97)

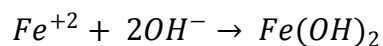
### 2.3.2 Mecanismo da Corrosão Atmosférica do aço-carbono

Aço carbono são ligas de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% a 2,11% de carbono (baixo teor de carbono e alto teor de ferro), este é o motivo pelo qual se usa o elemento Ferro (Fe) nas equações de corrosão atmosférica do aço carbono (PANNONI, 2011).

Segundo Gentil (2011), a corrosão atmosférica do aço-carbono pode ser representada pelas seguintes reações:

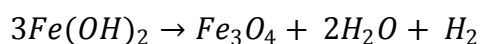
- Reação anódica:  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$
- Reação catódica:  $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e \rightarrow 2OH^-$

Os íons metálicos de  $Fe^{+2}$  migram em direção às áreas catódicas da superfície do metal e os íons  $OH^-$  migram em direção às áreas anódicas, também existentes aleatoriamente na superfície do metal. Ambos, ao se cruzarem em uma região intermediária, formam o  $Fe(OH)_2$ , hidróxido de ferro (II) através da equação:

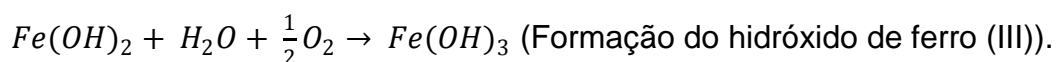


É importante ressaltar que na corrosão por mecanismo eletroquímico o metal se oxida na região anódica, o agente causador da corrosão se reduz na região catódica, e o produto de corrosão se forma em regiões intermediárias. Sendo que todas essas regiões se localizam aleatoriamente por toda a superfície do metal exposto ao meio (GENTIL, 2011).

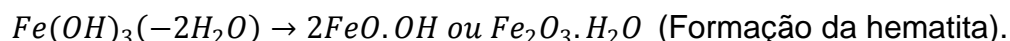
Também segundo Gentil (2011), o  $Fe(OH)_2$  formado sofre transformação de acordo com o teor de oxigênio presente no meio, visto que em deficiência de  $O_2$ , há a formação de magnetita ( $Fe_3O_4$ ) através da equação:



Porém, quando o  $Fe(OH)_2$  está inserido em um meio aerado, que é o caso mais frequente, observa-se a oxidação do hidróxido de ferro (II), resultando em hidróxido de ferro (III) ou hidróxido férrico ( $Fe(OH)_3$ ), como se pode observar na equação abaixo:



E o hidróxido de ferro (III), ao se desidratar, irá formar o principal produto da corrosão, o  $FeOOH$  ou  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , estruturas as quais se formam a partir da reação mostrada a seguir:



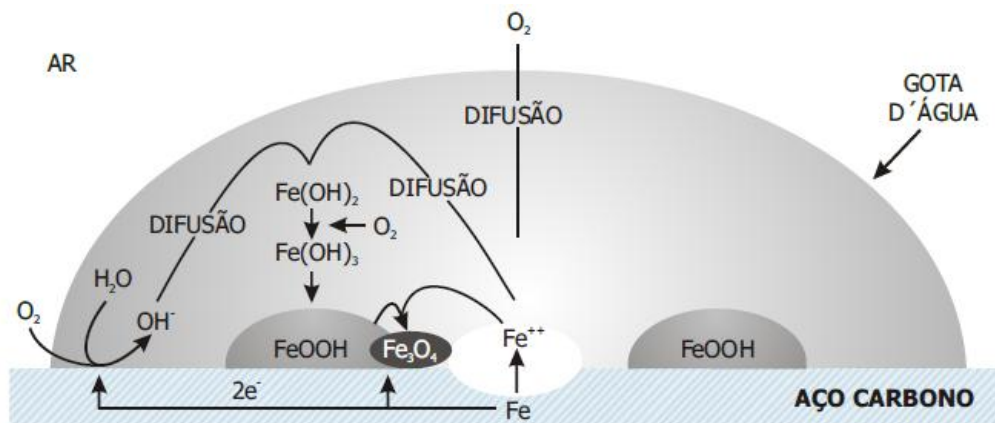
Estas reações explicam as colorações encontradas na corrosão atmosférica do ferro e suas ligas, visto que a ferrugem, na parte em contato com o metal, é formada por magnetita ( $Fe_3O_4$ ), e na parte superior, aquela em contato com mais oxigênio, apresenta coloração alaranjada ou castanho-avermelhada típica do  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$  (hematita).

Evans (1963) *apud* Gentil (2011) propôs que o ferro ou o aço já com camada de  $Fe_2O_3$  ou  $FeOOH$ , sofre corrosão em presença de um filme de umidade atmosférica, conforme as etapas mostradas a seguir:

- Reação anódica:  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$
- Reação catódica (redução de  $Fe_2O_3$  a  $Fe_3O_4$ , em presença de umidade e com deficiência de oxigênio):  $4Fe_2O_3 + Fe^{2+} + 2e \rightarrow 3Fe_3O_4$

A Figura 9 apresenta basicamente o mecanismo da corrosão atmosférica do aço-carbono:

Figura 9 - Esquemática do processo de corrosão do aço carbono



Fonte: Pannoni (2007, p. 16)

Segundo Gentil (2011), o  $Fe_2O_3$  pode se apresentar não hidratado, sob a forma  $\alpha - Fe_2O_3$ , que é conhecido como hematita, ou pode se apresentar hidratado, sob as formas:

**$\beta - FeOOH$  (akaganeíta)**

**$\gamma - FeOOH$  (lepidocrocita)**

**$\alpha - FeOOH$  (goetita)**

Assim, pode-se dizer que a ferrugem é uma mistura complexa de diferentes fases, cristalinas e amorfas, de óxidos e hidróxidos de ferro, tais como,  $Fe_3O_4$ ,  $\alpha - FeOOH$ ,  $\beta - FeOOH$ ,  $\gamma - FeOOH$ ,  $Fe(OH)_2$  e  $Fe(OH)_3$  (GEMELLI, 2001).

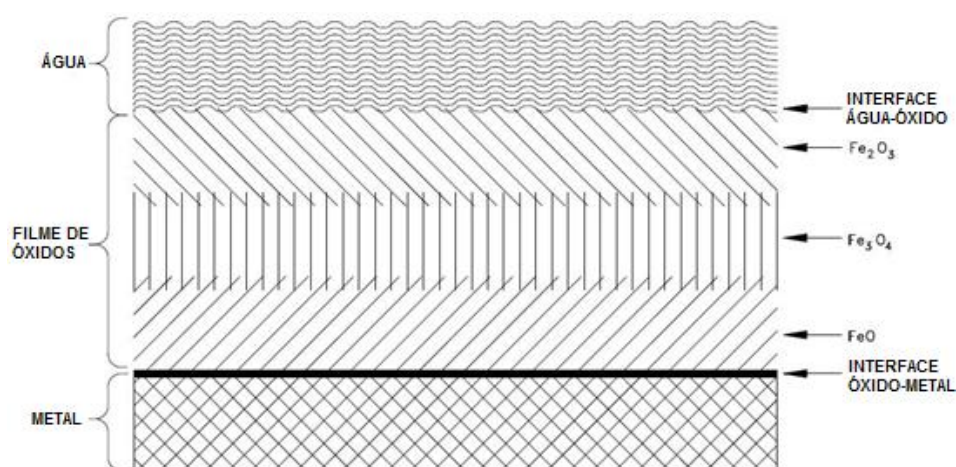
Além disso, a composição da ferrugem varia em função das condições climáticas e do tempo de exposição à atmosfera. A parte exterior da camada oxidada é geralmente porosa e desagregada, sendo constituída principalmente de  $\alpha - FeOOH$  (goetita) e  $\gamma - FeOOH$  (lepidocrocita) e a parte interior, adjacente ao metal, é, em geral, relativamente densa e mais aderente, sendo formada por

magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e fases amorfas de  $\text{FeOOH}$  (GEMELLI, 2001). Gentil (2011), generalizando os principais constituintes da ferrugem, afirma:

A ferrugem pode ser constituída de três camadas de óxidos de ferro hidratados, em diferentes estados de oxidação:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , da superfície do ferro para a atmosfera. (p. 56).

A composição da ferrugem na superfície do metal pode ser visualizada na Figura 10:

**Figura 10 - Constituintes básicos da ferrugem**



Fonte: <http://www.corrosionist.com/corrosion%20of%20iron.jpg>

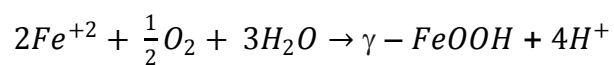
As diferentes fases da ferrugem contêm íons de sulfato e de cloreto, fator este que influencia a velocidade de corrosão, como já foi ressaltado anteriormente. A fase  $\beta$  –  $\text{FeOOH}$ , por exemplo, contém uma pequena concentração de cloreto em atmosferas marinhas (GEMELLI, 2001). Além disso, Gemelli (2001) afirma que a ferrugem pode influenciar de duas formas a velocidade de corrosão atmosférica. Segundo ele,

A ferrugem influencia a velocidade de corrosão atmosférica de duas maneiras. Por um lado, a porosidade aumenta a superfície exposta à atmosfera com relação à superfície geométrica inicial do corpo de prova. O número de “sítios” (posições) de absorção aumenta então consideravelmente. Com isso, os poluentes aderem em maior quantidade à superfície e a água condensa mais facilmente. A ferrugem cria então condições favoráveis à corrosão. Por outro lado, as camadas de ferrugem diminuem a velocidade de corrosão, pois diminuem em parte a superfície reativa e a velocidade de transporte de oxigênio. (p. 93).

Ou seja, a velocidade de corrosão diminui com o tempo de exposição, uma vez que no início do processo tem-se uma barreira de ferrugem muito fina que propicia o processo corrosivo, mas que posteriormente cresce e vai impedindo cada

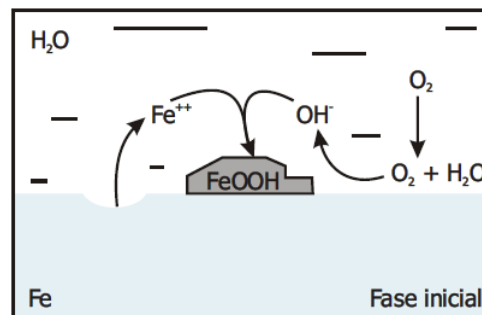
vez mais a difusão de oxigênio até interface óxido-metal, diminuindo a superfície metálica ativa em contato direto com o eletrólito (GEMELLI, 2001).

O lado corrosivo da ferrugem formada no aço-carbono começa quando o oxigênio contido no ar se difunde através da película de eletrólito líquida e é reduzido a íons  $\text{OH}^-$  na superfície metálica, enquanto que o ferro é oxidado a íon  $\text{Fe}^{+2}$ , o qual passa ao eletrólito. Os íons ferrosos em solução reagem com as hidroxilas, formando, após uma série de reações, a  $\gamma - \text{FeOOH}$  (lepidocrocita) segundo a reação (PANNONI, 2011):



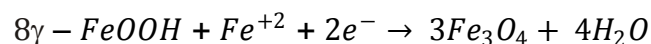
A Figura 11 ilustra este processo:

Figura 11 - Fase inicial do processo corrosivo



Fonte: Pannoni (2007, p. 24)

Desse modo, a camada de  $\gamma - \text{FeOOH}$  (lepidocrocita) vai sendo desenvolvida, recobrendo a superfície e levando à diminuição dos “sítios” ativos onde ocorre a oxidação do ferro a íons ferrosos. Ao mesmo tempo, a difusão do oxigênio é limitada por esta barreira formada. Quando a concentração de oxigênio se torna suficientemente pequena, a lepidocrocita ( $\gamma - \text{FeOOH}$ ) reage, por sua vez, com os íons  $\text{Fe}^{+2}$  em fase “úmida”, gerando uma camada de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), segundo a reação a seguir (GEMELLI, 2001):



A Figura 12 ilustra o processo de transformação da lepidocrocita ( $\gamma - \text{FeOOH}$ ) em magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ):



Se poluentes, tais como o  $\text{SO}_4^{-2}$ , estiverem presentes na fase aquosa, o consumo de metal será acelerado na fase “úmida”, havendo a precipitação de  $\text{FeSO}_4$  no fundo da cela de corrosão durante a fase “seca”, conforme também se pode observar na Figura 13 (GEMELLI, 2001).

Assim, os ciclos de umedecimento e secagem alternados da corrosão atmosférica do aço, exercem, desse modo, uma forte influência na velocidade média de corrosão do mesmo (PANNONI, 2011).

## **2.4 Corrosão em isoladores de linhas de transmissão de energia**

As linhas de transmissão de energia são o meio físico capaz de transmitir eletricidade gerada nas usinas, sejam elas térmicas, hidráulicas, eólicas, etc., até os centros urbanos. Assim, ao sair dos centros geradores, a energia é transportada através de cabos aéreos, os quais são sustentados por altas torres de metal por meio de isoladores de vidro ou porcelana, os quais fazem a interligação e sustentação entre pontos com diferentes potenciais elétricos, impedindo descargas elétricas durante o trajeto. A esse conjunto de componentes que permitem a transmissão de energia (fios condutores metálicos, isoladores e torres metálicas) dá-se o nome de linhas de transmissão de energia ou redes de energia elétrica (ASSOCIAÇÃO, 2011).

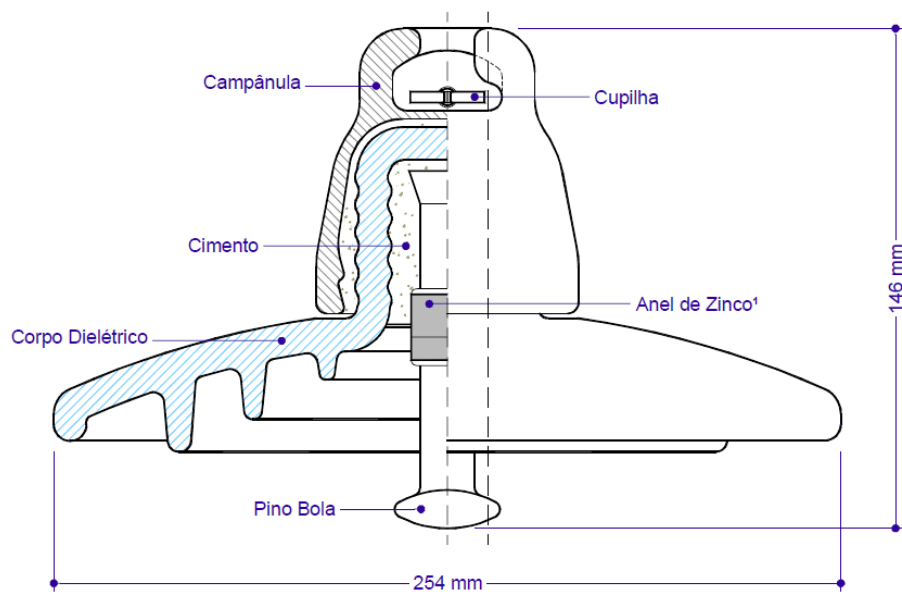
No Brasil, as linhas de transmissão são classificadas de acordo com o nível de tensão de sua operação, mensurado em kV (Quilovolts ou milhares de volts). Para cada faixa de tensão, existe um código que representa todo um conjunto de linhas de transmissão de mesma classe. O código A1 representa o conjunto de linhas de transmissão com tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV, a qual é conhecida como rede básica. O código A2 representa as linhas com tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV. E por fim, o código A3 é referente às linhas com tensão de fornecimento igual a 69 kV (ASSOCIAÇÃO, 2011).

### **2.4.1 Isoladores de disco utilizados em linhas de transmissão de energia**

Isoladores de linhas de transmissão de energia são equipamentos responsáveis por efetuar o isolamento elétrico entre as mesmas e fazer o suporte

mecânico da linha, uma vez que deve ser capaz de suportar cargas de tração decorrentes da sustentação dos cabos elétricos de alta tensão. Um dos modelos mais utilizados pelas concessionárias de energia (ex: Eletronorte) são os **isoladores de disco de vidro ou porcelana**, materiais estes responsáveis pelo isolamento elétrico característico dos isoladores. A Figura 14 representa as partes constituintes de um Isolador de disco.

**Figura 14 - Partes constituintes de um isolador de disco**



Fonte: Companhia (2007, p. 8)

Pode-se observar na Figura 14 que o isolador de disco possui o corpo dielétrico com forma semelhante a um sino, o qual é cimentado para que possam ser acoplados os dispositivos metálicos de ligação, que são:

a) A campânula na parte superior formada por aço ou ferro, a qual possui uma cavidade que serve para acoplar o Pino Bola de outro isolador;

b) E o pino na parte interna, sendo o outro elemento metálico de ligação formado por aço, que, juntamente com a campânula, irá permitir com que vários isoladores se acoplem para formar as cadeias de isoladores. É importante ressaltar que a cupilha é o dispositivo responsável por travar e apertar o Pino Bola de um isolador no interior do orifício da campânula de outro, fazendo com que as cadeias

de isoladores formadas ofereçam mais segurança, estabilidade e capacidade de isolamento às linhas de transmissão.

O anel de zinco de sacrifício presente na parte intermediária do pino do isolador é o recurso utilizado para atenuar o processo de corrosão, uma vez que é nessa região onde o processo corrosivo é mais acentuado, fato que será mais bem explicado no próximo tópico.

Para efeito de aprofundamento, este trabalho focou-se ao estudo do Isolador do tipo disco de vidro temperado, identificado por:

50-000-015-725: ISOLADOR DISCO AZS VIDRO 254 MM 120 kN. Descrição: Isolador tipo disco de vidro temperado, pino bola com anel de zinco de sacrifício, engate concha e bola, classe mecânica 120 kN, diâmetro 254 mm, passo 146 mm (COMPANHIA, 2007).

Observe a imagem deste tipo de isolador na Figura 15:

**Figura 15 - Isolador de disco de vidro temperado**



Fonte: O próprio autor

Dentro desse contexto, vale ressaltar que a junção (acoplamento) dos isoladores, para formar as cadeias, tem como principal objetivo aumentar a capacidade de isolamento, ou seja, quanto maior for o número de isoladores presentes na cadeia, mais elevado será o nível de tensão suportável entre os dois extremos da mesma. Por exemplo, uma cadeia reduzida e normalizada formada por cinco isoladores, com classe mecânica de 120 kN, passo de 146 mm e sem o anel de zinco, deve suportar uma diferença de potencial de no mínimo 410 kV (ASSOCIAÇÃO, 2009).

Desta maneira, vários tipos de isoladores vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo com o objetivo de executar a dupla função, a de isolamento elétrico e a de

suportar o peso da linha, fatores estes que tornam o projeto de um isolador extremamente complexo, pois levam em consideração três variáveis fundamentais: o esforço mecânico e elétrico, e as condições ambientais (MOUTON, 2012).

Assim, um isolador deve ser capaz de suportar a tensão normal de serviço e a sobretensão do sistema tanto em condições secas, quanto em condições molhadas. Além disso, deve ser resistente ao incremento de tensão vindo de forma repentina, tais como os raios (MOUTON, 2012). Observe a Figura 16 para entender como as cadeias de isoladores operam nas linhas de transmissão:

**Figura 16 - Cadeias de isoladores sendo substituídas em linhas de transmissão**

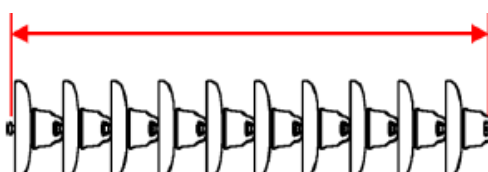


Fonte: [https://www.sinait.org.br/arquivos/noticias/Noticia\\_10359\\_8847.jpg](https://www.sinait.org.br/arquivos/noticias/Noticia_10359_8847.jpg)

Diante disso, a forma e as dimensões dos isoladores ou cadeias de isoladores determinam suas capacidades mecânicas e elétricas, características que podem ser verificadas através de alguns parâmetros mostrados a seguir:

a) Comprimento da cadeia ou seção de isoladores: Comprimento mais curto entre os dois extremos da cadeia de isoladores. Este comprimento dita o quanto de tensão a cadeia será capaz de suportar (MOUTON, 2012).

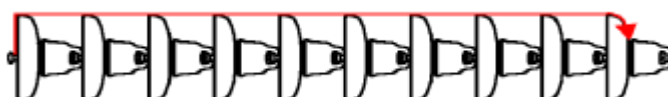
**Figura 17 - Comprimento da cadeia de isoladores**



Fonte: Mouton (2012, p. 8)

b) Distância de arco seco: Distância mais curta que o ar percorre entre os dois pontos pertencentes da cadeia de isoladores com a maior diferença de potencial. Esta distância é importante uma vez que determina a frequência de alimentação da linha e as voltagens das descargas que ocorrem ao redor do isolador quando este está limpo (MOUTON, 2012).

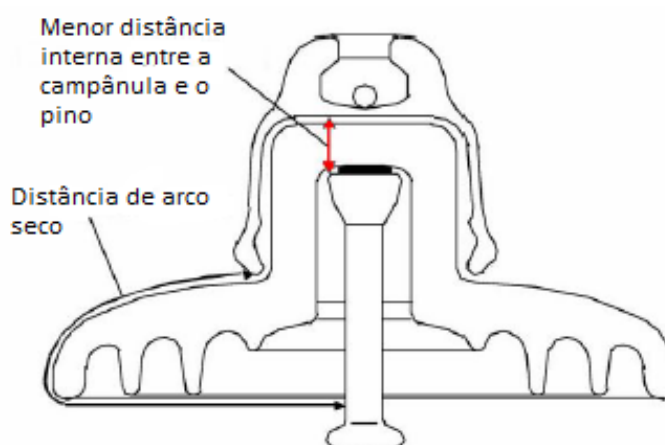
**Figura 18 - Distância de arco seco**



Fonte: Mouton (2012, p. 9)

c) Distância interna entre a campânula e o pino (Distância de Perfuração): Menor distância entre dois pontos pertencentes ao isolador que operam com elevada diferença de potencial entre si. O estudo mais detalhado sobre esta distância durante a fase de projeto de um isolador é de extrema importância para evitar que o mesmo adquira um prejuízo estrutural ou funcional permanente se confrontado com picos inesperados de tensões adicionais, tais como os raios (MOUTON, 2012).

**Figura 19 - Distância de Perfuração**



Fonte: Mouton (2012, p. 9)

d) Distância de dispersão ou de escoamento: É a soma da distância, ao longo da superfície do isolador, entre duas partes condutoras, as quais geralmente possuem uma grande diferença de potencial entre si (MOUTON, 2012).

**Figura 20 - Distância de dispersão ou escoamento das correntes de fuga para um único isolador**



Fonte: Mouton (2012, p. 11)

A distância de escoamento é um parâmetro muito importante utilizado para os casos em que a poluição atmosférica atinge consideravelmente a superfície dos isoladores, uma vez que permite a mensuração da tensão das eventuais descargas elétricas que ocorrem na superfície da camada de poluição. Isso é explicado pela relação direta entre a tensão da descarga, os extremos da superfície de escoamento e o comprimento característico do caminho percorrido pela corrente de fuga (MOUTON, 2012).

Além disso, as descargas causadas pelos poluentes depositados na superfície dos isoladores são diretamente relacionadas à resistência superficial desta camada de poluição eletrolítica. Com isso, torna-se necessário utilizar o formato do isolador como um dos parâmetros para se fazer o cálculo da resistência gerada na superfície poluída das partes isolantes. Assim, a forma também possui sua importância durante o projeto e desenvolvimento de novos tipos de isoladores, já que traduz se o perfil do novo isolador proporcionará uma maior ou menor resistência à camada de poluição que se depositará na superfície (MOUTON, 2012).

#### 2.4.2 Descargas elétricas fracas ou parciais (*spark-overs*) e descargas fortes ou integrais (*flashovers*)

Um dos principais problemas a ser levado em consideração a respeito dos isoladores é a camada de poluição atmosférica que se deposita na superfície dielétrica dos mesmos, uma vez que permite a formação de uma camada eletrolítica,

a qual propiciará, inicialmente, o advento de correntes de fuga na superfície isolante dos isoladores, e posteriormente, a ocorrência de descargas elétricas inesperadas, que colidem diretamente com a região intermediária dos pinos dos isoladores, podendo comprometer a integridade e a confiabilidade dos sistemas de energia, já que estas descargas intensificarão o processo corrosivo neste elemento do isolador, tanto por colisão mecânica, quanto pelo aumento de reações catódicas necessárias para a ocorrência da corrosão, fato que será mais bem explicado na próxima seção. A Figura 21 mostra um isolador com uma considerável camada de poluição em sua superfície e com o pino deteriorado pela corrosão atmosférica e colisão com descargas elétricas.

**Figura 21 - Isolador do tipo disco de vidro com poluição em sua superfície e com o pino comprometido**




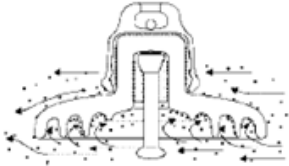

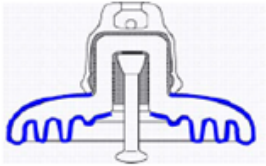
Fonte: O próprio autor

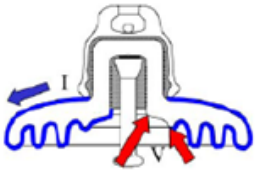
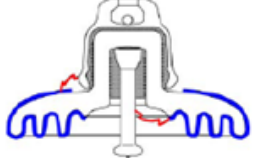
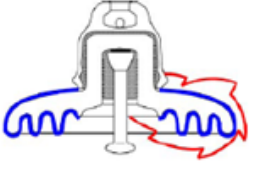
Deve-se ressaltar, no entanto, que a camada de poluição que se deposita na superfície dielétrica dos isoladores não é um problema sob condições secas, porém, sob condições molhadas torna-se uma das principais questões a ser solucionada, visto que os sais presentes na poluição terão condições de se dissolver para formar a camada condutora sobre a superfície de vidro do isolador. Por exemplo, um dos poluentes mais comuns encontrados em regiões costeiras é o sal ( $\text{NaCl}$ ), o qual se deposita na superfície de isoladores através dos ventos, e ao entrar em contato com a água da chuva, forma uma solução extremamente condutora, gerando **correntes de fuga** na superfície dielétrica dos isoladores, as quais podem danificar as linhas de transmissão a curto, médio ou longo prazo, dependendo da intensidade e

quantidade de ocorrências das mesmas, uma vez que é a partir das correntes de fuga que surgem os **spark-overs** e/ou **flashovers** (MOUTON, 2012).

De uma forma geral, a presença de camadas condutoras sobre uma superfície isolante energizada gera correntes de fuga na superfície do isolador, fato que eleva a temperatura da camada condutora nas áreas de elevada densidade de corrente, ocasionando a evaporação da água presente no eletrólito e, conseqüentemente, a formação de manchas secas (conhecidas como “bandas secas”) nessas áreas. Quando as bandas secas formam-se, a distribuição de tensão ao longo do isolador torna-se não uniforme, com a maior parte da tensão concentrada sobre tais bandas. Esta elevada concentração de tensão sobre as bandas secas pode causar um *spark-over*, e dependendo da condutividade da camada de poluição, a descarga parcial (*spark-over*) pode crescer e abranger todo o isolador, gerando descargas mais intensas, conhecidas como *flashovers*. Estas etapas que terminam com a formação dos *flashover* são resumidas e sintetizadas na Tabela 3:

**Tabela 3 - Etapas antecedentes a ocorrência dos *flashovers***

	Descrição e Mecanismos	Fatores que influenciam	
	1. Superfície do isolador limpa	Nenhum	
A cumulação de contaminantes	2. Contaminação depositada a. Partículas em suspensão b. Névoa salina OBS: Sob condições secas, a superfície isolante continua efetuando um bom isolamento	a. Propriedades aerodinâmicas b. Propriedades de superfície c. Tipos de contaminantes d. Campo elétrico (principalmente DC)	
	3. Limpeza (remoção da contaminação) a. Chuva b. Vento	a. Perfil do isolador b. Orientação da cadeia de isoladores c. Tipo e intensidade das chuvas	
Umedecimento	4. Umedecimento da camada de contaminação a. Condensação b. Nevoeiro c. Chuva d. Absorção e. Difusão química	a. Tipo de contaminação (ex: solubilidade do sal) b. Perfil do isolador c. Propriedades de superfície d. Tipo de umedecimento	

Descargas parciais e Flashover	<p><b>5. Formação de bandas secas</b></p> <p>a. Fluxo de corrente de fuga na superfície</p> <p>b. Aumento da temperatura nas regiões de altas densidade de correntes de fuga</p> <p>c. Bandas secas se formam nas regiões em que a temperatura se eleva</p>	<p>a. Resistência de superfície</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade do ar</li> <li>- Taxa de pluviosidade</li> <li>- Nível de contaminação</li> </ul> <p>b. Distribuição da contaminação na superfície do isolador</p> <p>c. Geometria do isolador</p>	
	<p><b>6. Arco de banda seca</b></p> <p>a. Bandas secas interrompem o fluxo das correntes de fuga</p> <p>b. Surgem tensões entre os extremos das bandas secas</p> <p>c. Ar/Superfície não conseguem manter esta diferença de potencial</p> <p>d. Arcos se formam entre os pontos extremos das bandas secas</p> <p>e. Correntes de fugas surgem quando os arcos são formados</p>	<p>a. Propriedades de superfície</p> <p>b. Grau de umedecimento</p> <p>c. Nível de contaminação</p> <p>d. Tamanho das bandas secas</p>	
	<p><b>7. Crescimento e extinção dos arcos de bandas secas</b></p> <p>a. O aumento da temperatura nas raízes do arco resseca a camada de contaminação, aumentando o tamanho das bandas secas e, portanto, o comprimento do arco</p> <p>b. A resistência da superfície diminui com o aumento do comprimento dos arcos, resultando numa maior magnitude da correntes de fuga</p> <p>c. Os arcos crescem e por isso podem se extinguir pois tornam-se demasiadamente grandes para se manterem</p> <p>d. Arcos também podem ser extintos por precipitação pluviométrica</p>	<p>a. Resistência de superfície</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade do ar</li> <li>- Taxa de pluviosidade</li> <li>- Quantidade e tipo de contaminação</li> <li>- Propriedades de superfície</li> </ul> <p>b. Perfil do isolador</p>	
	<p><b>8. Flashover</b></p> <p>a. Se um arco de banda seca transpor o comprimento crítico do isolador, há a ocorrência de um <i>flashover</i></p> <p>b. Vários arcos podem se aglutinar</p> <p>c. Um único arco pode crescer até ultrapassar o tamanho de toda a superfície isolante</p>	<p>a. Resistência de superfície</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade do ar</li> <li>- Taxa de pluviosidade</li> <li>- Quantidade e tipo de contaminação</li> <li>- Propriedades de superfície</li> </ul> <p>b. Perfil do isolador</p>	

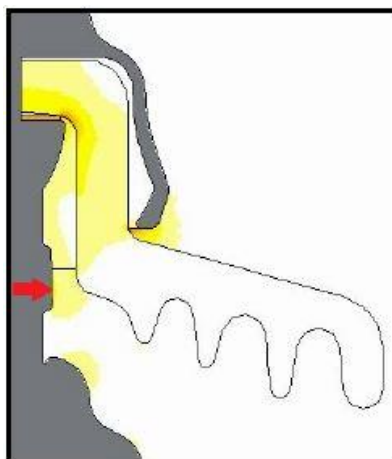
Fonte: Adaptado de Mouton (2012, p. 37)

#### 2.4.3 Corrosão nos pinos de isoladores de rede elétrica

Para efeito de aprofundamento, este trabalho ressalta apenas a degradação causada pelos efeitos **ambientais e elétricos** sobre os isoladores do tipo disco de vidro, já especificados anteriormente. Dentro desse contexto, deve-se ressaltar que a corrosão da região intermediária do pino dos isoladores é acelerada pelos *spark-overs* e/ou *flashovers* que incidem sobre esta área do pino, danificando a camada protetora do anel de zinco e deixando o mesmo totalmente exposto às condições ambientais que aceleram o processo de corrosão do aço, tais com a névoa salina de regiões costeiras, ou o ácido sulfúrico presente nas atmosferas industriais.

Além dessas condições, deve-se ressaltar que a região intermediária do pino possui uma grande concentração de cargas elétricas devido à intensidade do campo elétrico nesta região, conforme se pode observar na Figura 22, a qual mostra uma simulação da distribuição de campo elétrico sobre a superfície de um isolador submetido às mesmas condições reais de operação em uma linha de transmissão.

**Figura 22 - Simulação de campo elétrico em um isolador de disco de vidro**



Fonte: Meloni et al (2003, p. 71)

Observe na Figura 22 que a seta vermelha está indicando a região intermediária do pino que, além de estar diretamente exposta às condições ambientais, também está submetida à forte influência do campo elétrico, o qual permite que grandes concentrações de cargas elétricas, advindas das correntes de fuga, se acumulem nesta região, favorecendo, desta maneira, a incidência (colisão) dos *spark-overs* e *flashovers* sobre a mesma.

O acúmulo de cargas elétricas na região intermediária dos pinos intensifica a ocorrência das reações de corrosão nesta área, uma vez que, como já ressaltado anteriormente, os elétrons são um dos reagentes nas reações catódicas do mecanismo de corrosão eletroquímica dos metais, conforme se pode observar a seguir:

Reação anódica da pilha de corrosão:  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$  (Oxidação do  $Fe$ )

Reação catódica da pilha de corrosão:  $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e \rightarrow 2OH^-$  (Redução do  $O_2$ )

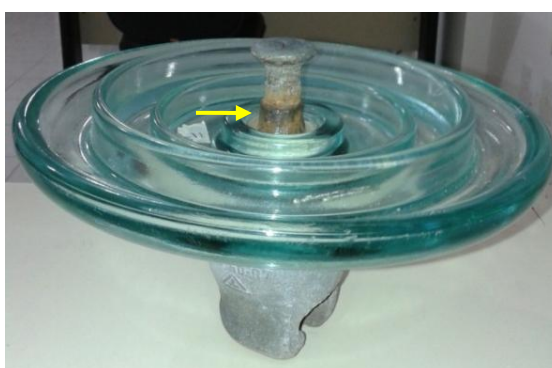
---

$Fe^{+2} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$  (Equação global de formação da ferrugem)

Perceba que na reação catódica necessária para a ocorrência da corrosão, o elétron é um dos reagentes indispensáveis para a redução do oxigênio. Assim, quanto maior for o número de elétrons concentrados na superfície exposta do pino, maior será a ocorrência de reações catódicas da pilha de corrosão, e por consequência, maiores serão as condições para intensificação da degradação do pino. Isso pode ser explicado por um dos Princípios de Le Chatelier, o qual ressalta que, durante uma reação, se a concentração de um ou mais reagentes aumentar, a concentração dos produtos também aumentará. Desta forma, para o caso da reação global de formação da ferrugem, ressaltada anteriormente, tem-se que a grande quantidade de elétrons na superfície do pino (devido ao campo elétrico e as correntes de fuga) fará aumentar a concentração de  $OH^-$  sob a mesma, o que levará a um aumento dos produtos de corrosão, conforme afirma o princípio supracitado.

Desta maneira, o avanço do processo de corrosão atmosférica no pino do isolador pode reduzir consideravelmente a espessura do mesmo, tornando-o extremamente enfraquecido a ponto de romper por não conseguir mais suportar o peso da linha de transmissão na qual está alocado, o que causará prejuízos imensuráveis à concessionária de energia responsável pelo mesmo. Observe a Figura 23 para visualizar os efeitos da corrosão no pino de um isolador e perceber o quanto sua espessura foi reduzida na região indicada pela seta amarela.

**Figura 23 - Isolador com a base do pino corroída**



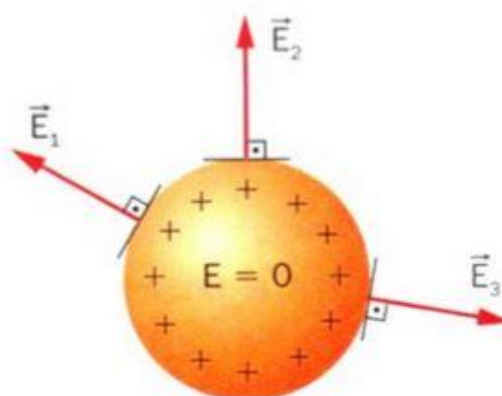
Fonte: O próprio autor

Perceba na Figura 23 que em relação a toda superfície do pino que fica exposta às condições ambientais, a **região mais corroída** é exatamente aquela que sofre maior influência do campo elétrico, como se pôde observar na Figura 22. Observe também que esta é a região com maior incidência (colisão) dos *spark-overs* e *flashovers*, como também se pôde observar na Tabela 3.

## 2.5 Gaiola de Faraday: blindagem eletrostática

Segundo Halliday (2009), se uma carga elétrica em excesso for introduzida em um material condutor, esta carga se concentrará na superfície do mesmo e o interior do condutor continuará sendo neutro. Este comportamento dos condutores é condizente com a teoria de atração e repulsão das cargas, uma vez que cargas de mesmo sinal se repelem. Assim, as cargas em excesso na superfície de um condutor buscarão manter-se afastadas o máximo possível uma das outras, como mostra a Figura 24:

**Figura 24 - Distribuição das cargas na superfície de um condutor carregado**



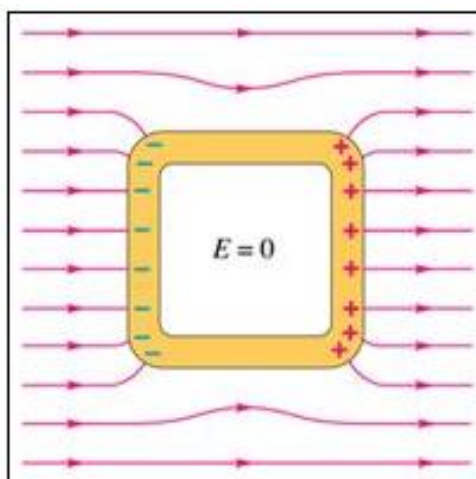
Fonte: <http://player.slideplayer.com.br/3/1256702/data/images/img4.jpg>

Pode-se observar na Figura 24 que o campo elétrico no interior da esfera metálica é nulo, uma vez que, caso contrário, o mesmo exerceria uma força sobre os elétrons de condução (elétrons livres, os quais estão sempre presentes em um material condutor), e isso produziria uma corrente elétrica. Como não pode haver uma corrente perpétua em um condutor que não faz parte de um circuito elétrico, o campo elétrico no interior do condutor deve ser nulo (HALLIDAY, 2009).

Este mesmo princípio serve para materiais condutores que apresentam cavidades internas, tais como: uma casca esférica ou cilíndrica (metálicas) e uma esfera de aço com um furo no centro, ou seja, toda superfície condutora oca. Assim, as cargas em excesso se distribuirão por toda a superfície e o interior da casca permanecerá nulo, com campo elétrico igual a zero. Se houver uma carga externa

próxima, gerando um campo elétrico externo, as cargas na superfície da casca se redistribuirão de modo que o campo elétrico interno permanecerá nulo. Mesmo que a casca seja neutra, cargas negativas ou positivas irão se acumular na superfície interna da mesma, mas ainda assim o campo interno continuará anulado. Diante disso, observa-se que a região interna da casca é completamente livre de influências elétricas externas, ou seja, qualquer campo elétrico externo produz uma nova distribuição de cargas na superfície externa da casca que anula o campo na parte interna da mesma (HALLIDAY, 2009). Observe a Figura 25 que ilustra este processo:

**Figura 25 - Casca metálica oca exposta a um campo elétrico externo**



Fonte: <http://afsystem.com.br/images/e01x.jpg>

Este princípio é conhecido como blindagem eletrostática, fenômeno que ocorre quando uma superfície metálica engloba um determinado volume no espaço, tornando-se conhecida como Gaiola de Faraday, uma vez que, em 1836, Michael Faraday demonstrou este fato construindo uma gaiola metálica que anulava a influência de campos elétricos ou magnéticos externos, estáticos e alternados. Ele próprio ficou no interior de sua gaiola metálica quando energizada, provando que realmente estava protegido de descargas elétricas externas. Observe a Figura 26 para compreender a experiência feita por Michael Faraday:

**Figura 26 - Gaiola metálica protegendo um homem de uma descarga elétrica**



Fonte: [http://www.brasilecola.com/upload/e/electricidade\\_thumbnail.jpg](http://www.brasilecola.com/upload/e/electricidade_thumbnail.jpg)

## 2.6 Superfícies super-hidrofóbicas

A característica de super-hidrofobicidade (aversão à água) de algumas superfícies está presente naturalmente em vários seres da natureza, como forma de proteção contra o acúmulo de água, a presença de micro-organismos e a sujeira do ambiente. O exemplo mais conhecido de superfície super-hidrofóbica é a Flor de Lótus, uma vez que sua superfície possui micro e nano estruturas que geram este efeito, não permitindo o acúmulo de água e de poluição (sujeira) devido à característica autolimpante que toda superfície desta natureza possui. (OLIVEIRA, 2012). Observe a Figura 27 que mostra a característica autolimpante de uma Flor de Lótus.

**Figura 27 - Flor de Lótus com gotas de água escorrendo em sua superfície**



Fonte: Adaptado de Darmanin e Guittard (2015, p. 274)

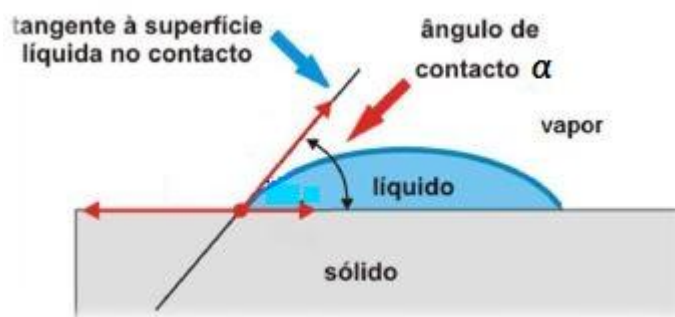
Observa-se na Figura 27 que a água, quando em contato com uma superfície super-hidrofóbica, irá rolar rapidamente, sendo arremessada para fora da mesma.

Isso faz com que a superfície permaneça sempre limpa e seca, uma vez que as gotas de água levam consigo as impurezas adsorvidas na superfície (OLIVEIRA, 2012).

O principal fator que caracteriza a super-hidrofobicidade de algumas superfícies é a morfologia das mesmas. Para o caso da Flor de Lótus, por exemplo, as ceras (misturas complexas de lipídeos) presentes na flor e as saliências (nervuras/rugosidades) com 10 a 20 nanômetros (nm) de altura e 10 a 15 nm de largura, são os fatores que tornam esta superfície super-hidrofóbica, com uma baixa taxa de molhabilidade (tendência que um líquido possui ou não de se espalhar em uma determinada superfície), e com elevada tendência à autolimpeza (DARMANIN e GUITTARD, 2015).

Para se determinar o grau de molhabilidade de uma superfície deve-se fazer a mensuração do ângulo de contato ( $\alpha$ ) entre uma gota de água e a própria superfície. A Figura 28 mostra o ângulo de contato formado por uma gota de água sobre uma superfície:





Figura 28 - Ângulo de contato entre uma gota de água e uma superfície sólida



Fonte: Adaptado de Ferreira (2013, p.5)

Observe que o ângulo  $\alpha$  é definido entre a superfície sólida e a tangente à superfície líquida exatamente no ponto de contato com o sólido. A partir deste valor é possível fazer a classificação da superfície na qual o líquido está suspenso. A Tabela 4 mostra o perfil de cada gota com seu respectivo ângulo de contato formado, evidenciado para cada tipo de superfície e caracterizando-as de acordo com seus graus de afinidade com a água (FERREIRA, 2013).

**Tabela 4 - Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e seus respectivos ângulos de contato**

Regime	Super-hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Super-hidrofóbico
Diagrama da gota				
Ângulo de Contacto	$\theta < 10^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta > 90^\circ$	$\theta > 150^\circ$

Fonte: Ferreira (2013, p.6)

Cada tipo de superfície, como mostrado na Tabela 4, possui um determinado grau de molhabilidade, o qual diminui à medida que o caráter hidrofóbico aumenta. Este grau de aversão ou não à água é extremamente dependente da rugosidade que a superfície possui.

Assim, a característica super-hidrofóbica de várias superfícies presentes na natureza chama bastante atenção da comunidade científica, uma vez que fornece inspiração para a criação de novas tecnologias, tais como os revestimentos super-hidrofóbicos, os quais possuem uma vasta gama de aplicações na indústria e nos serviços (FERREIRA, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

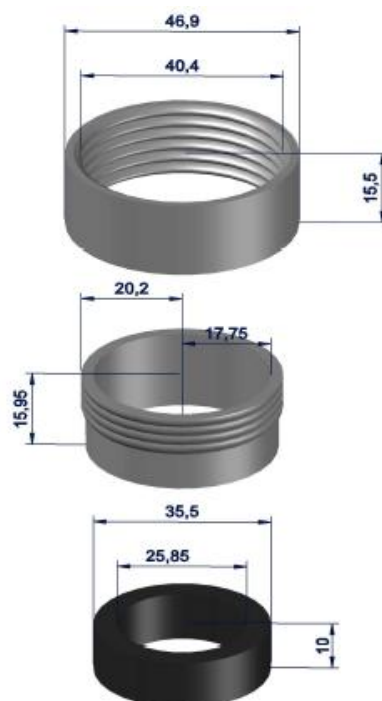
#### 3.1 Gaiola de Faraday para pinos de isoladores de disco de vidro

Partindo do princípio de blindagem eletrostática da Gaiola de Faraday, foi desenvolvido um modelo de gaiola para proteger (blindar) a parte exposta dos pinos de isoladores de linhas de transmissão contra as correntes de fuga, o campo elétrico, e os *spark-overs* e *flashovers* que incidem em suas superfícies e intensificam o processo corrosivo nos mesmos.

Para o desenvolvimento da “gaiola” foram feitas, com o auxílio de um paquímetro, algumas medições em um isolador do tipo disco de vidro, no intuito de que posteriormente se fizesse a modelagem das peças através do auxílio de um programa computacional de desenho industrial em 3D.

A Figura 29 mostra o projeto final das peças constituintes da “gaiola” projetada para pinos de isoladores, a qual foi chamada de “**Dispositivo anticorrosivo do tipo Gaiola de Faraday**”. Observe que o dispositivo será constituído por uma bucha de material isolante e por dois anéis metálicos, um com rosca externa e o outro com rosca interna, os quais serão unidos através do rosqueamento entre ambos.

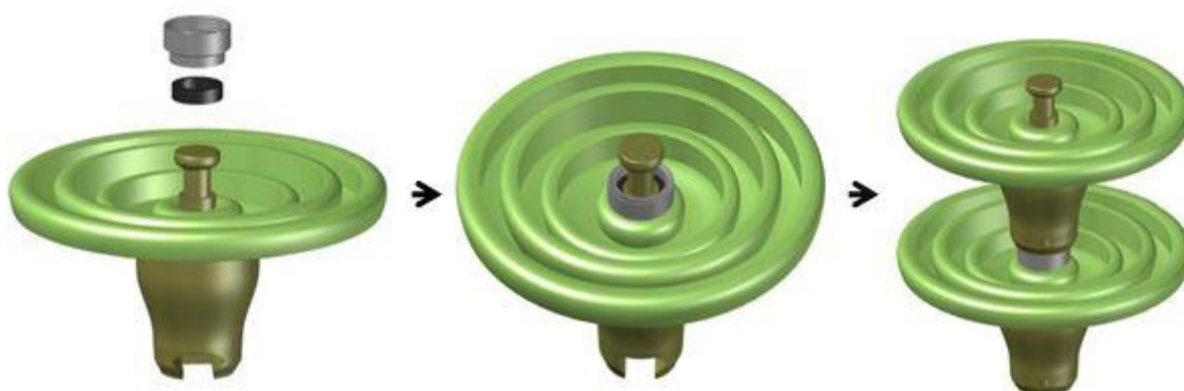
**Figura 29 - Projeto final das peças constituintes do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos**



Fonte: O próprio autor

As peças representadas na cor cinza devem ser feitas com material condutor, e a bucha representada na cor preta deve ser de material isolante, mais especificamente de borracha rígida. É importante ressaltar que apenas as duas peças metálicas mostradas na Figura 29 são as que protegerão os pinos de isoladores contra influências elétricas (fazendo o papel de uma Gaiola de Faraday), uma vez que a bucha feita de material isolante servirá apenas para proporcionar maior estabilidade ao conjunto e para centralizar os anéis de modo que o pino fique exatamente no centro, conforme mostrado na Figura 30:

**Figura 30 - Representação de como o “Dispositivo anticorrosivo” será acoplado nos isoladores de disco de vidro**



Fonte: O próprio autor

Para a usinagem do primeiro protótipo do “Dispositivo anticorrosivo” utilizou-se o aço inoxidável 304 devido ser resistente à corrosão, uma vez que possui alto teor de cromo e níquel na sua liga e elevado coeficiente de expansão térmica; e para a confecção da bucha de material isolante utilizou-se borracha vulcanizada. Na Tabela 5, destaca-se a composição dos aços inoxidáveis 304:

**Tabela 5 - Composição química dos aços inoxidáveis**

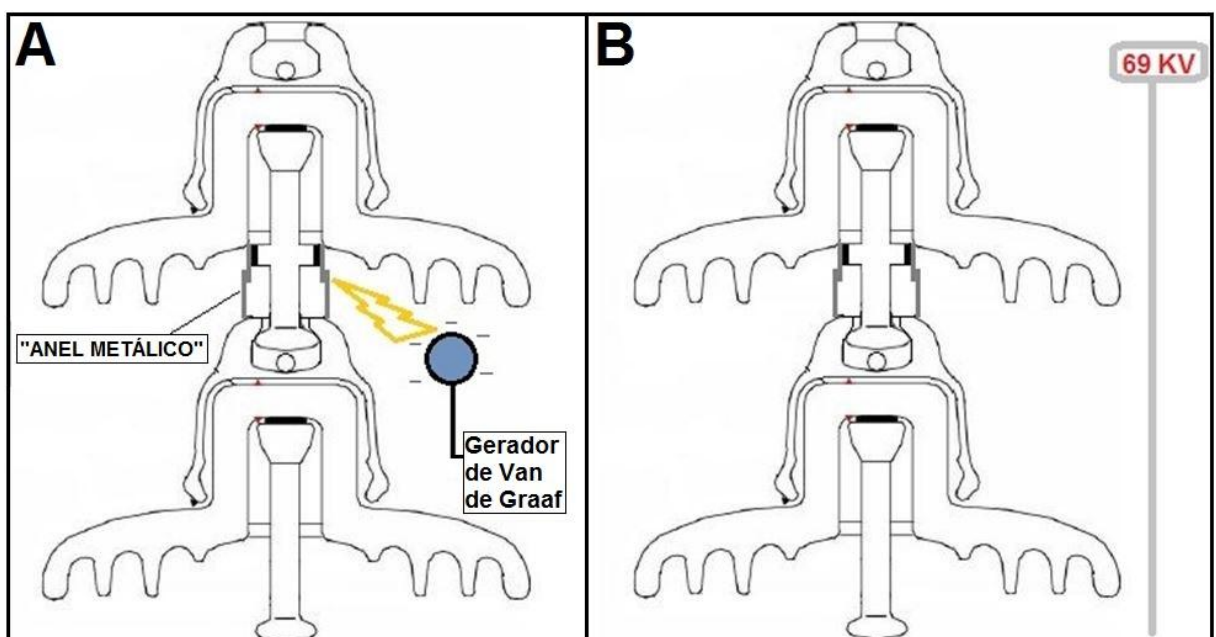
Tipo	Composição Química (%)								
	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	N <sub>2</sub> máx.
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	6,00 a 8,00		0,10
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 a 20,00	8,00 a 10,50		0,10
304L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 a 20,00	8,00 a 12,00		0,10
316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,10
316L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,10

Fonte: Kloeckner Metals (2011, p. 64)

Para a comprovação da função de blindagem eletrostática do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores, utilizou-se um Gerador de Van de Graaf para simular a incidência de descargas elétricas na superfície do pino após o acoplamento dos anéis metálicos. Desta forma, pôde-se observar o caminho feito pelas descargas elétricas, as quais alcançaram valores na ordem de 20 a 60 KV. A Figura 31(A) ilustra o procedimento utilizado para comprovar a eficácia do dispositivo em evitar a colisão de descargas elétricas na superfície do pino.

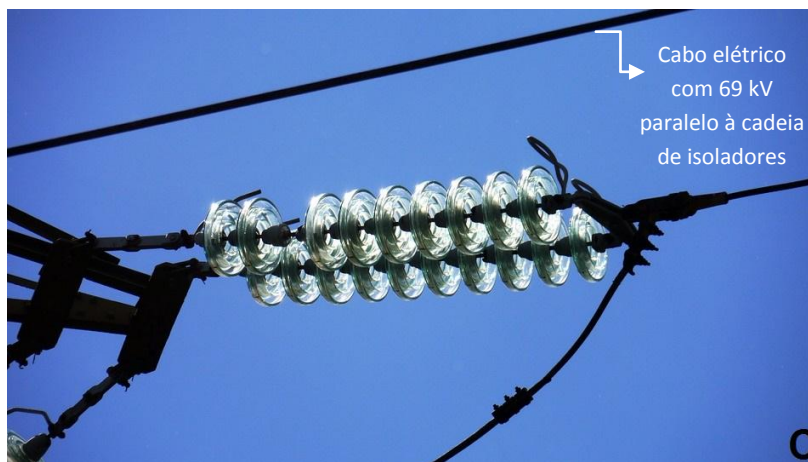
Além disso, foi realizada uma simulação de campo elétrico para comprovar que o dispositivo consegue anular a influência de campos elétricos externos sob a superfície do pino. Nesta simulação, feita com o auxílio de um programa computacional que utiliza o Método dos Elementos Finitos, utilizou-se a configuração mostrada na Figura 31(B), na qual se mostra uma cadeia com dois isoladores e um cabo de transmissão de energia, com tensão de 69 KV, o qual gera um campo elétrico que atinge a superfície dos isoladores que estão paralelos e próximos a ele. A Figura 31(C), por sua vez, mostra a situação real que justificou a utilização dos parâmetros apresentados na Figura 31(B), uma vez que a cadeia de isoladores está paralela a um dos cabos de transmissão.

**Figura 31 – A) Procedimento feito para simular descargas elétricas e comprovar a eficácia do “Dispositivo anticorrosivo”. B) Condições utilizadas para a simulação de um campo elétrico externo sob a superfície de isoladores**



Fonte: Adaptado de Mouton (2012, p.37)

**Figura 31 - C) Situação real utilizada como base para a definição dos parâmetros da simulação apresentados na Figura 31(B)**

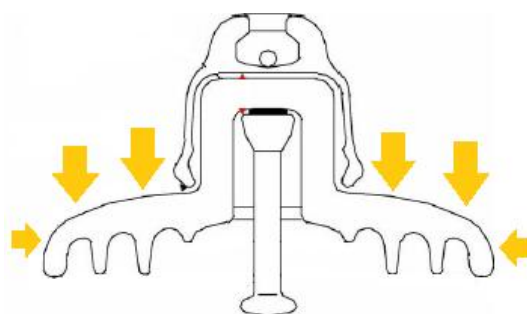


Fonte: [https://pixabay.com/static/uploads/photo/2013/05/20/19/07/transmission-line-112331\\_960\\_720.jpg](https://pixabay.com/static/uploads/photo/2013/05/20/19/07/transmission-line-112331_960_720.jpg)

### **3.2 Utilização de revestimento super-hidrofóbico na superfície dielétrica de isoladores de linhas de transmissão de energia**

Um tipo de revestimento disponível no mercado, conhecido como NeverWet®, (composição química a ser mostrada na Tabela 6), o qual forma uma camada super-hidrofóbica nas superfícies em que é aplicado, foi utilizado para **revestir a parte superior do disco de vidro de isoladores**, com o objetivo de torná-la aversiva às gotas de água da chuva e, conseqüentemente, autolimpante. Observe na Figura 32 a parte da superfície dielétrica do isolador onde foi aplicado o revestimento super-hidrofóbico, conforme indicam as setas amarelas:

**Figura 32 - Parte da superfície dielétrica do isolador onde se aplicou o revestimento super-hidrofóbico**



Fonte: Adaptado de Mouton (2012, p.37)

Com isso, essa parte do isolador ficaria com um baixo grau de molhabilidade e não acumularia a poluição ambiental que se depositaria no mesmo, evitando, assim, a formação das soluções iônicas que favorecem a ocorrência das correntes de fuga, as quais intensificam a deterioração dos pinos de isoladores uma vez que propiciam a ocorrência de descargas elétricas (*spark-overs* e *flashovers*) na superfície dos mesmos.

**Tabela 6 - Composição química do revestimento super-hidrofóbico conhecido como NeverWet®**

	<b>NOME DO COMPONENTE</b>	<b>%</b>
<b>Componentes da primeira camada do revestimento a ser aplicada</b>	Gás liquefeito de petróleo	de 20 à 35
	Xileno	de 12,5 à 20
	Acetato de n-butil	de 0 à 15
	4-metilpentan-2-ona	de 10 à 20
	Acetato de metil	de 10 à 15
	Acetato de etil	de 5 à 10
	Hidroxifenilbenzotriazol	de 0,25 à 1
	Pentametil-4-piperidilo	de 0 à 0,25
<b>Componentes da segunda camada do revestimento a ser aplicada 30 minutos após a aplicação da primeira camada</b>	acetona	de 50 à 75
	Gás liquefeito de petróleo	de 25 à 35

Fonte: Adaptado de Rust-Oleum (2013)

A Tabela 6, como ressaltado anteriormente, mostra a composição do revestimento super-hidrofóbico aplicado na superfície dielétrica de isoladores do tipo disco de vidro. Observe que inicialmente deve-se aplicar uma primeira camada, a qual é conhecida como “camada base”, para que, posteriormente, após um período mínimo de 30 minutos seja aplicada a segunda camada, conhecida como “camada superior”. Depois da realização dessas etapas, a superfície torna-se super-hidrofóbica, ou seja, o ângulo de contato entre uma gota de água e a superfície revestida torna-se maior que 150°. Para comprovar a eficácia deste revestimento com relação a tornar super-hidrofóbicas as superfícies em que é aplicado, foram realizados alguns passos, que são detalhados a seguir:

1) O revestimento super-hidrofóbico foi aplicado em uma superfície teoricamente lisa, plana e branca;

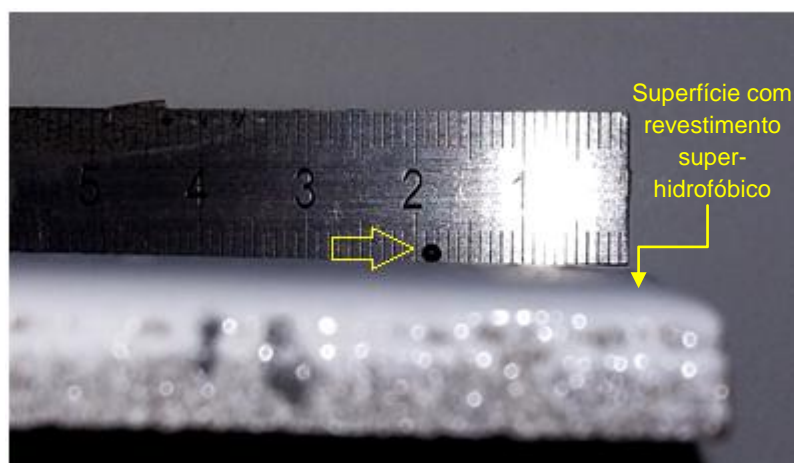
2) Sobre esta superfície, já revestida, jogou-se uma pequena gota de água misturada com tinta preta, para dar contraste com a superfície branca;

3) Uma fotografia rasante (paralela à superfície revestida) foi capturada para que fosse possível calcular o ângulo de contato formado entre a superfície e a gota de água;

4) A fotografia foi exportada para o programa computacional **ImageJ 1.49**, o qual auxiliou no cálculo do ângulo de contato e, por consequência, ajudou a comprovar se o revestimento é ou não super-hidrofóbico.

A Figura 33 mostra a fotografia capturada que foi utilizada para o cálculo do ângulo de contato e comprovação da eficácia do “NeverWet®”.

**Figura 33 - Fotografia rasante de uma superfície com o revestimento super-hidrofóbico sob a qual há uma pequena gota de água misturada com tinta preta**



Fonte: O próprio autor

Para comprovar a característica autolimpante do “NeverWet®”, primeiramente ele foi aplicado na parte superior do corpo dielétrico de um isolador do tipo de disco de vidro, conforme mostrado na Figura 32. Posteriormente, este mesmo isolador foi unido a outros dois, formando uma cadeia com três isoladores, a qual foi exposta nas condições ambientais da atmosfera da UFPA de Abaetetuba. Por fim, foi aspergido grafite em pó (fornecido pela Nacional do Grafite) sobre o dielétrico revestido, com granulometria inferior a 150  $\mu\text{m}$ , objetivando verificar mais rapidamente o processo de autolimpeza no decorrer do tempo. A Figura 34 mostra este procedimento utilizado para a comprovação da característica autolimpante do revestimento super-hidrofóbico aplicado no isolador.

**Figura 34 - Cadeia com três isoladores exposta na UFPA de Abaetetuba, na qual apenas o isolador do meio está com parte do corpo dielétrico revestido com a película super-hidrofóbica e sujo com pó de grafite**



Fonte: O próprio autor

Vale ressaltar que o pó grafite foi utilizado apenas por questões didáticas (ser bastante visível e possuir alto grau de aderência na superfície), uma vez que, sob condições reais de operação nas linhas de transmissão, os isoladores ficam expostos a outros tipos de partículas, provenientes da poluição atmosférica.

### **3.3 Ensaio atmosférico de perda de massa de um pino de aço carbono exposto às condições ambientais da cidade de Abaetetuba**

Durante o desenvolvimento do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores de alta tensão, também foi realizado um estudo de perda de massa causada pela corrosão atmosférica em um pino de aço carbono (corpo de prova, com teor de carbono na liga menor que 0,3%, cuja composição química é equivalente a dos pinos de isoladores) que foi exposto às condições ambientais da cidade de Abaetetuba (Local: Campus da UFPA). Este estudo paralelo, apesar de

não colocar o corpo de prova sob as mesmas condições que um pino de um isolador de linha de transmissão fica submetido durante condições normais de operação (tais como, influência do campo elétrico e de descargas elétricas que incidem sobre os mesmos), objetivou estimar a taxa de corrosão do aço carbono nas condições ambientais da cidade supracitada, uma vez que esta taxa representará o nível máximo de deterioração de pinos de isoladores caso estes estejam protegidos pelo “Dispositivo anticorrosivo” e operando em um ambiente semelhante ao da cidade de Abaetetuba durante o mesmo período de tempo do ensaio, uma vez que as influências elétricas serão desprezíveis com a presença do dispositivo. Isso significa dizer que a degradação dos pinos de isoladores, que estiverem protegidos eletrostaticamente e operando sob determinadas condições ambientais, será equivalente a degradação atmosférica do aço carbono sob as mesmas condições. Por fim, este ensaio de corrosão classificou o grau de corrosividade da atmosfera da cidade supracitada e revelou a variação da massa do corpo de prova, o qual não ficou submetido a nenhuma influência elétrica durante o período do ensaio.

Para este ensaio foi utilizada a norma ISO 9226:2012, a qual diz que a taxa de corrosão para cada metal é expressa em gramas por metro quadrado por ano ( $\text{g}/\text{m}^2.\text{a}$ ), podendo ser calculada através da expressão:

$$\text{Taxa de corrosão} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{a} \right) = \frac{\Delta m}{A \cdot t}$$

Onde:  **$\Delta m$**  é a variação de massa que foi perdida com a corrosão (em gramas);

**A** é a área da superfície exposta (em metros quadrados); e

**t** é o tempo de exposição do corpo de prova (em anos).

Diante disso, no dia 25/08/2014 iniciou-se o ensaio atmosférico de perda de massa com um pino de aço carbono que foi fixado em um poste de energia localizado no Campus da UFPA de Abaetetuba. A massa inicial do corpo de prova era de 106,1467 gramas, como se pode observar na Figura 35:

**Figura 35 - A) Massa inicial do corpo de prova; B) Pino de aço carbono (corpo de prova) no primeiro dia de exposição**



Fonte: O próprio autor

Durante 1 ano de exposição, foram feitas mais quatro pesagens do corpo de prova, com intervalos de três meses entre cada pesagem. No último dia do ensaio (exatamente 1 ano após o início), fez-se a última pesagem do pino. Após isso, foi utilizada a norma ISO 8407: 1991 para que se fizesse a remoção, de forma correta, dos produtos de corrosão da superfície do corpo de prova, e posteriormente se pudesse calcular o valor da massa perdida em decorrência da corrosão atmosférica do pino de aço carbono.

A norma ISO 8407:1991 explana que um dos métodos para a remoção dos produtos de corrosão de corpos de prova de aço carbono pode ser feito através da imersão do mesmo em uma solução com 500 mililitros de ácido clorídrico (HCl) com concentração de  $\rho=1,19$  g/ml, misturado com 3,5 gramas de Hexametilenotetramina ( $C_6H_{12}N_4$ ), os quais devem ser diluídos com água destilada até que seja obtido uma quantidade exata de 1 litro de solução. O tempo de imersão do corpo de prova deve ser de aproximadamente 10 minutos.

Por fim, para fazer a caracterização do grau de agressividade da atmosfera da cidade de Abaetetuba utilizou-se a norma ISO 9223:1992 como parâmetro. Esta norma apresenta a média da taxa de corrosão atmosférica de alguns metais por um período de tempo. A Tabela 7 mostra a classificação de corrosividade atmosférica segundo a média da taxa de corrosão do aço carbono (material constituinte do corpo de prova utilizado neste estudo):

Tabela 7 - Taxas de corrosão para o aço segundo a norma ISO 9223:1992

<b>Média da taxa de corrosão do aço durante o período de um ano em (g/m<sup>2</sup>.a) segundo a ISO 9223</b>	<b>Classificação da agressividade atmosférica segundo a ISO 9223</b>
taxa de corrosão $\leq 10$	Corrosividade <b> muito baixa</b>
$10 < \text{taxa de corrosão} \leq 200$	Corrosividade <b> baixa</b>
$200 < \text{taxa de corrosão} \leq 400$	Corrosividade <b> média</b>
$400 < \text{taxa de corrosão} \leq 650$	Corrosividade <b> alta</b>
$650 < \text{taxa de corrosão} \leq 1500$	Corrosividade <b> muito alta</b>

Fonte: Adaptado de Rieder et al (2009, p. 1004)

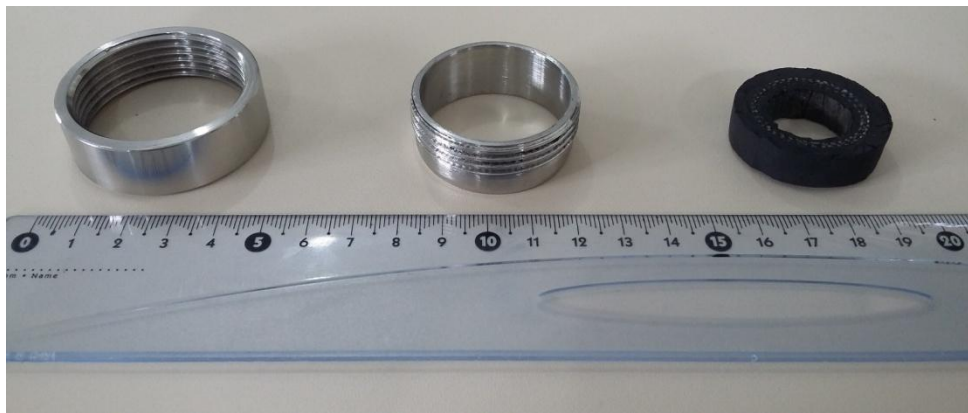
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados com o “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores

#### 4.1.1 Protótipo e especificações para acoplamento nos isoladores

A Figura 36 mostra as peças do primeiro “Dispositivo anticorrosivo” que foi usinado de acordo com as especificações mostradas na Figura 29:

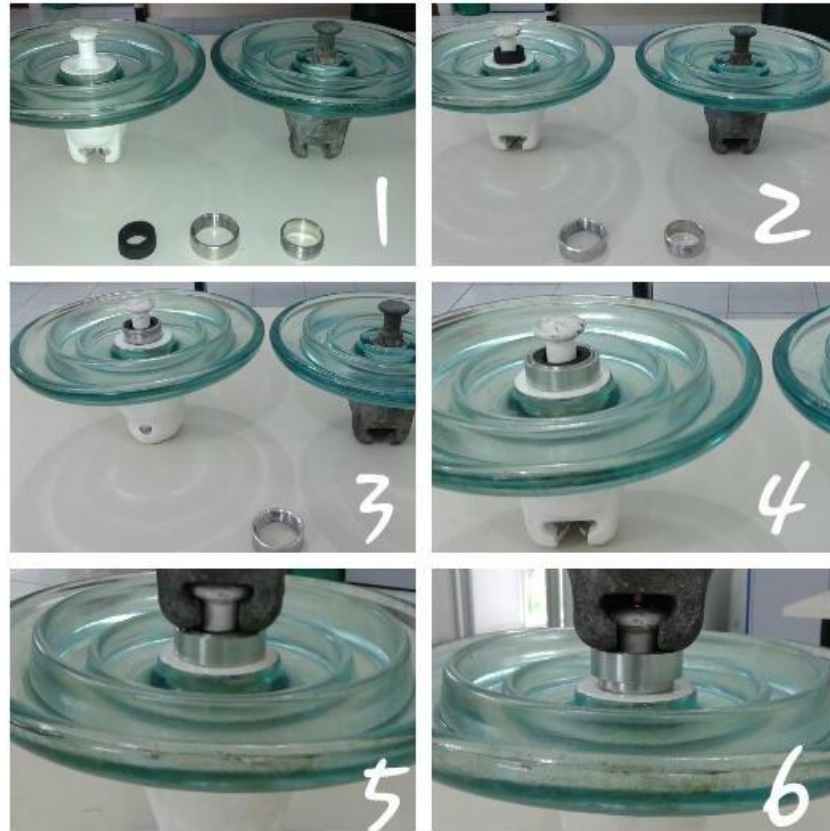
**Figura 36 - Protótipo das peças constituintes do “Dispositivo anticorrosivo”**



Fonte: O próprio autor

Agora observe na Figura 37 a ilustração dos passos de acoplamento das peças mostradas na Figura 36 entre dois isoladores do tipo de disco de vidro, formando, desta maneira, uma região eletrostaticamente protegida.

**Figura 37 - Passos de acoplamento das peças para a formação do “Dispositivo anticorrosivo” para pinos de isoladores**



Fonte: O próprio autor

1) A imagem 1 da sequência acima mostra dois isoladores de disco de vidro e as peças constituintes do “Dispositivo anticorrosivo”;

2) A imagem 2 mostra que a bucha de borracha vulcanizada é a primeira peça a ser acoplada na base exposta do pino;

3) A imagem 3 mostra que a peça metálica de menor diâmetro e que possui rosca externa deve ser fixada ao redor da bucha de borracha;

4) A imagem 4 mostra que a peça metálica de maior diâmetro e que possui rosca interna deve ser rosqueada na outra peça metálica (sentido horário) até encostar no vidro;

5) A imagem 5 mostra o momento em que se deve acoplar o outro isolador com o objetivo de formar cadeias;

6) A imagem 6 mostra que a bucha metálica de maior diâmetro deve ser novamente rosqueada, só que agora no sentido inverso em relação ao rosqueamento inicial (anti-horário).

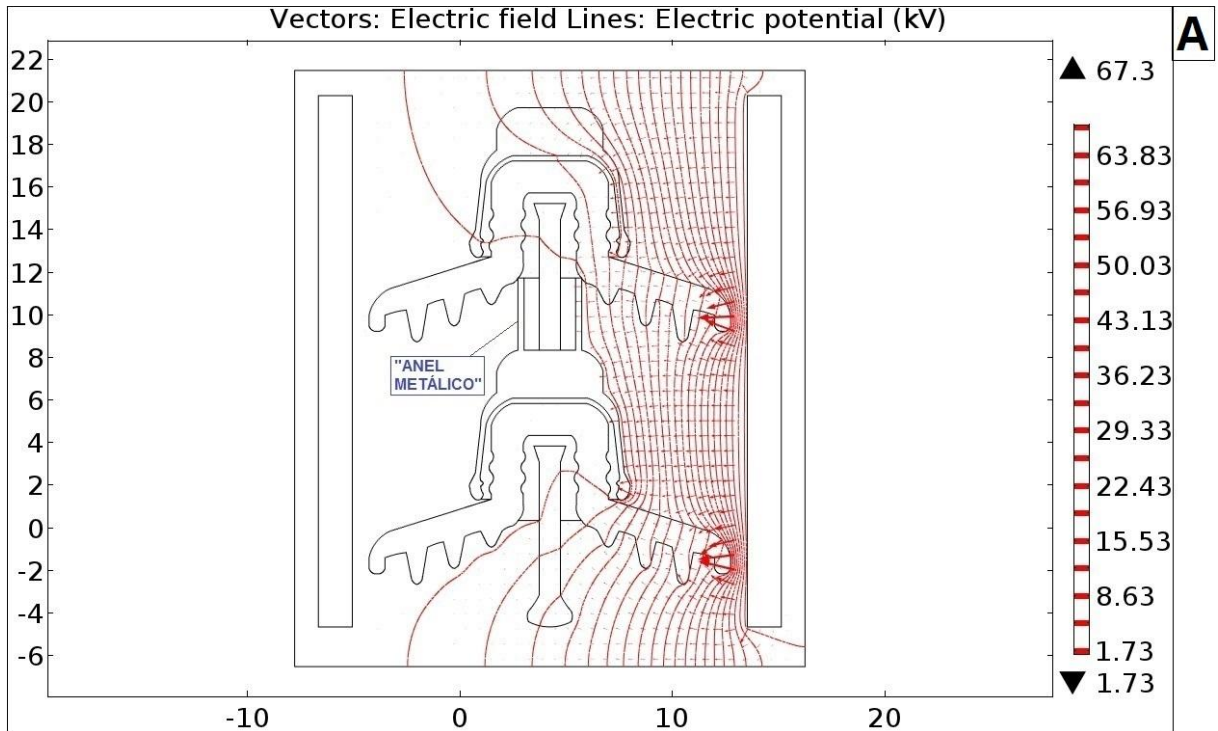
É importante destacar na Figura 37 que a última etapa do processo de acoplamento das peças entre dois isoladores se dá através do rosqueamento entre as duas partes metálicas, com o intuito de **alongá-la**, aumentando sua altura e, com isso, proporcionando maior estabilidade ao conjunto, uma vez que os anéis ficarão bem ajustados entre os dois isoladores, pressionando tanto o isolador superior quanto o inferior e desempenhando de forma mais eficaz a blindagem eletrostática da superfície do pino que fica exposta às condições atmosféricas e elétricas.

#### 4.1.2 Simulação de campo elétrico e nova distribuição das cargas elétricas após a proteção do pino pelo “Dispositivo anticorrosivo”

A Gaiola de Faraday (“Dispositivo anticorrosivo”) desenvolvida para pinos de isoladores anula a presença de qualquer campo elétrico que influencia no acúmulo de elétrons na superfície do pino, conforme mostra os resultados da simulação apresentados na Figura 38(A), na qual se percebe claramente que as linhas de campo são anuladas na superfície metálica do “Dispositivo anticorrosivo”. Isso significa que a superfície do pino fica protegida eletrostaticamente, ou seja, os elétrons que antes se acumulavam na superfície do pino (Figura 38(B)) ficarão, com a presença dos anéis metálicos, retidos apenas nas paredes metálicas dos mesmos, conforme mostrado na Figura 38 (C).

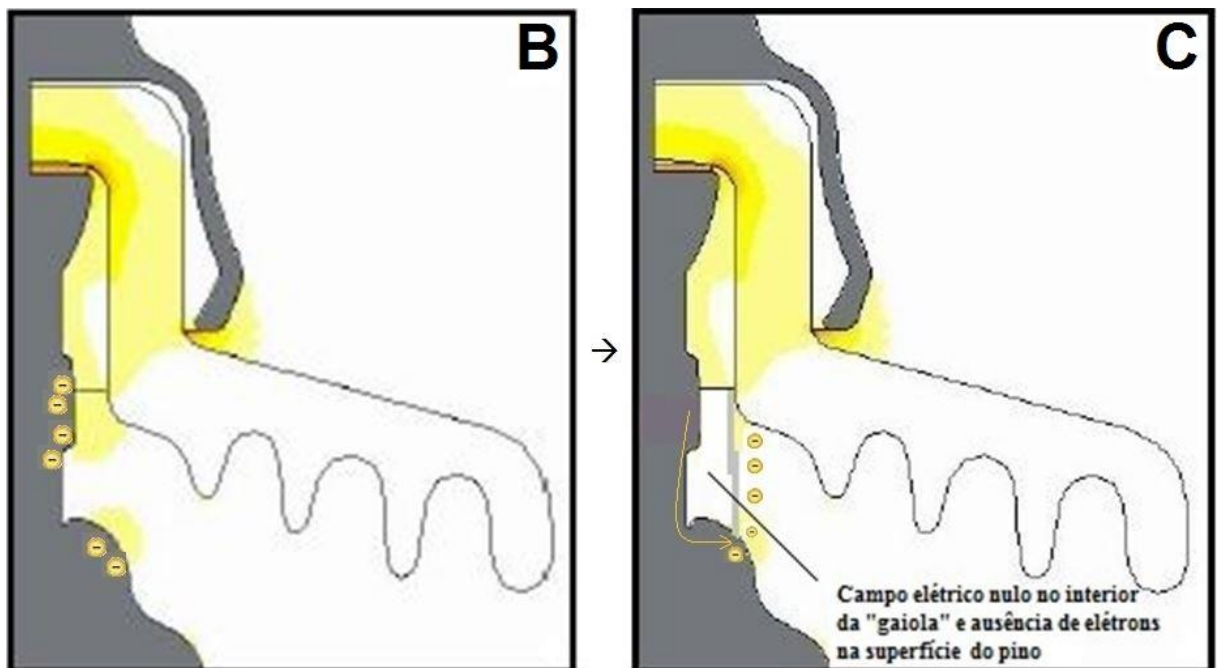
Os resultados da simulação (Figura 38(A)) também mostram que o pino que não está protegido pelo “Dispositivo anticorrosivo” é diretamente influenciado pelos efeitos elétricos característicos das linhas de transmissão, uma vez que as linhas de campo atravessam a sua superfície.

Figura 38 - A) Simulação de campo elétrico na superfície de dois isoladores após a proteção de um dos pinos pelos anéis metálicos do "Dispositivo anticorrosivo"



Fonte: O próprio autor

Figura 38 - B) Distribuição das cargas elétricas na superfície do pino de um isolador que está sob influência do campo elétrico de uma linha de transmissão. C) Nova distribuição das cargas elétricas após o acoplamento do "Dispositivo anticorrosivo", com o isolador submetido às mesmas condições anteriores

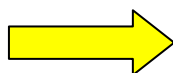


Fonte: Adaptado de Meloni (2003, p.71)

Desta maneira, deve-se ressaltar que, os elétrons, que são um dos principais elementos que permitem a ocorrência das reações catódicas da corrosão eletroquímica (redução do oxigênio) na superfície do pino, irão, com a presença dos anéis metálicos, sempre se acumular na superfície dos mesmos, mudando, assim, o local onde vão ocorrer as reações de redução do oxigênio, uma vez que não haverá mais elétrons na superfície do pino, conforme mostra o esquema da Tabela 8.

**Tabela 8 - Mudanças causadas pelo "Dispositivo anticorrosivo"**

SEMI REAÇÕES ELETROQUÍMICAS DE CORROSÃO	ISOLADOR EM OPERAÇÃO NA LINHA DE TRANSMISSÃO	
	SEM O "DISPOSITIVO ANTICORROSIVO"	COM O "DISPOSITIVO ANTICORROSIVO"
Oxidação do ferro $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$	Haverá oxidação do ferro na superfície do pino do isolador	Não haverá oxidação do ferro na superfície do pino
Redução do oxigênio $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e \rightarrow 2OH^-$	Haverá redução do oxigênio na superfície do pino do isolador	A redução do oxigênio passará a ocorrer na superfície da "gaiola"
	<b>RESULTADO: Haverá corrosão na superfície do pino</b>	<b>RESULTADO: Não haverá corrosão na superfície do pino</b>



Fonte: O próprio autor

Observe que a semi-reação catódica da pilha de corrosão (redução do oxigênio) necessita da presença de elétrons na superfície do pino para acontecer. Sem a presença do "Dispositivo anticorrosivo", haverá elétrons em abundância na superfície do pino, provenientes da oxidação do ferro e das influências elétricas que a cadeia está submetida, ocorrendo, desta forma, a corrosão da superfície em questão. Porém, com a presença dos anéis metálicos do dispositivo, todos os elétrons presentes no sistema serão deslocados para a superfície dos mesmos, e a semi-reação catódica necessária para a ocorrência da corrosão não irá mais ocorrer na superfície do pino, mas sim na superfície dos anéis metálicos.

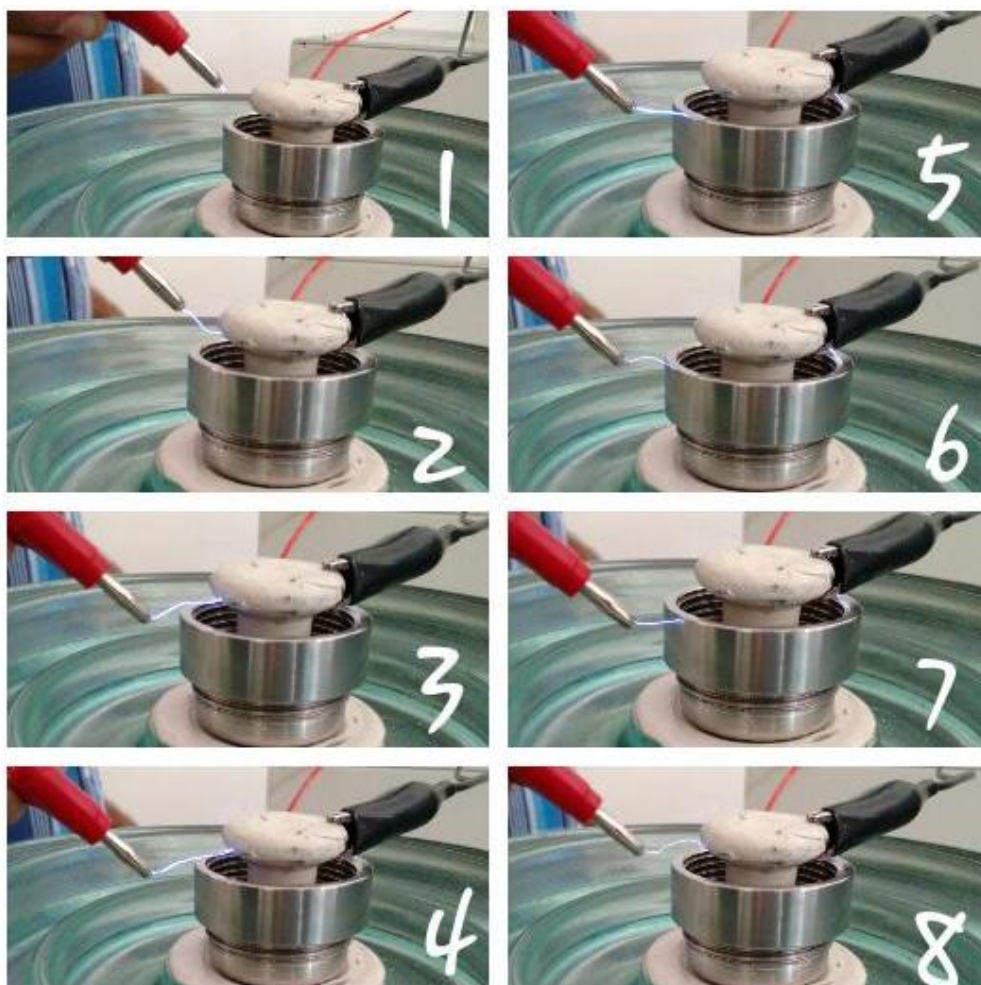
Assim, a corrosão começará primeiramente a danificar o material metálico que forma os anéis, os quais possuem maior resistência à corrosão atmosférica (aço inoxidável 304) em relação ao aço que forma o pino. Logo, a superfície do pino que fica exposta às condições ambientais ficará por muito mais tempo protegida contra

os danos causados pela corrosão, uma vez que, o “Dispositivo anticorrosivo” evitará o surgimento de “locais anódicos” e “locais catódicos” na superfície do pino. Além disso, é importante frisar que por mais que ocorra a perfuração anéis metálicos pela corrosão, estes continuarão desempenhando a função de blindagem eletrostática até o momento em que forem totalmente corroídos.

#### 4.1.3 Proteção contra os *spark-overs* e *flashovers*

Após submeter um isolador de rede elétrica, com o seu pino protegido pelo “Dispositivo anticorrosivo”, a descargas elétricas da ordem de 20 a 60 KV oriundas de um gerador de Van de Graaf de laboratório, comprovou-se experimentalmente a sua eficácia em blindar eletrostaticamente a região do pino que fica exposta às condições ambientais e elétricas. Observe a Figura 39 para visualizar estes resultados:

**Figura 39 - Blindagem eletrostática da superfície do pino que fica exposta às condições ambientais e elétricas**



Fonte: O próprio autor

Observe na sequência mostrada na Figura 39 que a descarga elétrica nunca atinge a região interna do pino que está envolta pelos anéis. Ou seja, por mais que se tente posicionar o emissor da descarga elétrica o mais próximo possível superfície do pino que está no interior da “gaiola”, a faísca nunca irá adentrar ou atingir o volume interno formado pelas duas peças metálicas do “Dispositivo anticorrosivo”. Desta forma, pode-se afirmar que os *spark-overs* e/ou *flashovers* não irão colidir com a base do pino, e por consequência, não ocorrerá a danificação do anel de zinco por descargas elétricas inesperadas, o qual é o anodo de sacrifício que evita a semi-reação de oxidação do ferro na superfície do pino.

Agora observe na Figura 40 que ilustra o mesmo procedimento mostrado anteriormente, porém aplicado a dois isoladores acoplados e com a presença do “Dispositivo anticorrosivo” entre os mesmos.

**Figura 40 - Blindagem eletrostática após a junção de dois isoladores, entre os quais se encontra o “Dispositivo anticorrosivo”**



Fonte: O próprio autor

Perceba nesta imagem que mesmo após a junção de dois isoladores do tipo disco de vidro (entre os quais está a “gaiola”), ainda há uma região do pino que **não** fica envolta pelos anéis metálicos, parte que fica contida no interior do orifício de acoplamento da campânula, o qual também desempenha a função de blindagem eletrostática dessa outra parte do pino, dando “**continuidade**” às peças metálicas que protegem eletrostaticamente a base do pino. Observe que mesmo havendo uma abertura, a descarga elétrica não consegue adentrar e colidir com qualquer parte da superfície do pino, já que uma parte desta superfície está envolta pelo “Dispositivo anticorrosivo” e a outra parte está envolta pelo orifício de acoplamento da campânula. Isso explica o que foi dito na seção anterior, na qual se ressaltou que os

anéis metálicos só irão parar de desempenhar sua função quando forem totalmente corroídos.

Assim, por mais que se tente aproximar o emissor de descarga elétrica da superfície do pino visível na Figura 40, a descarga sempre se direcionará ou para a superfície do “Dispositivo anticorrosivo”, ou para as bordas externas do orifício da campânula.

## 4.2 Resultados com o revestimento super-hidrofóbico

Após a análise da imagem mostrada na Figura 33 através do programa computacional **ImageJ 1.49**, pôde-se confirmar a eficácia do revestimento disponível no mercado (conhecido como “NeverWet®”) em tornar super-hidrofóbicas as superfícies em que aplicado, uma vez que o ângulo de contato formado entre a superfície revestida e uma pequena gota de água ser de aproximadamente  $155,55^\circ$ , conforme mostra a Figura 41:

**Figura 41 - Ângulo de contato, mensurado com o auxílio do programa ImageJ, entre uma superfície com revestimento super-hidrofóbico e uma pequena gota de água**



Fonte: O próprio autor

### 4.2.1 Com relação ao princípio autolimpante do revestimento

Após dois meses de exposição de um isolador, às condições ambientais da cidade de Abaetetuba, que teve parte do seu corpo dielétrico revestido com produto

super-hidrofóbico e sujo com pó de grafite, pôde-se confirmar o caráter autolimpante de superfícies super-hidrofóbicas, conforme mostra a Figura 42:

**Figura 42 - Princípio de autolimpeza do revestimento super-hidrofóbico**



Fonte: O próprio autor

É importante destacar que o pó de grafite, mesmo sendo altamente aderente à superfície revestida, foi quase que totalmente eliminado da mesma, devido ao princípio de autolimpeza característico do revestimento, o qual é explicado pelo baixo grau de molhabilidade de superfícies super-hidrofóbicas, conforme mostrado na Figura 43:

**Figura 43 - Simulação de incidência de chuva sobre a superfície dielétrica de um isolador revestido com “NeverWet®”**



Fonte: O próprio autor

Observe que a característica autolimpante dos revestimentos super-hidrofóbicos se deve ao fato de que as gotas rolam e levam consigo as impurezas da superfície em questão. Assim, este princípio, aplicado ao corpo dielétrico de isoladores de rede elétrica, servirá para evitar o acúmulo de poluição na superfície vítrea dos mesmos, diminuindo, desta maneira, a ocorrência das correntes de fuga, as quais propiciam a ocorrência de *spark-overs* e *flashovers* na superfície do pino.

### 4.3 Resultados com o ensaio atmosférico de perda de massa do pino de aço carbono exposto na cidade de Abaetetuba (Local: Campus da UFPA)

#### 4.3.1 Variação da massa do corpo de prova após um ano de exposição

Após um ano de exposição do corpo de prova de aço carbono às condições ambientais da cidade de Abaetetuba observou-se um crescente aumento da massa do mesmo, conforme se mostra na Figura 44:

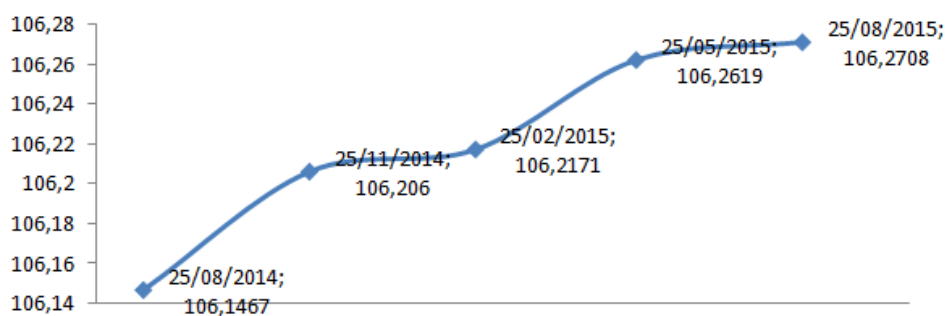
Figura 44 - Variação da massa do corpo de prova



Fonte: O próprio autor

Como se pôde observar na Figura 44, no decorrer do tempo a massa do corpo de prova aumentou gradativamente. A explicação deste fato é que apesar de haver consumo do aço nas reações de corrosão, também há a formação dos produtos de corrosão, os quais ficam adsorvidos na superfície metálica e acabam aumentando a massa do conjunto. Todavia, é importante ressaltar que a espessura do aço carbono diminuiu mesmo com esse aumento de massa do objeto de estudo, fato que será comprovado na próxima seção. O Gráfico 1 mostra a variação da massa do corpo de prova durante um ano de exposição às condições ambientais da cidade de Abaetetuba.

**Gráfico 1- Variação da massa do corpo de prova durante um ano de exposição**



Fonte: O próprio autor

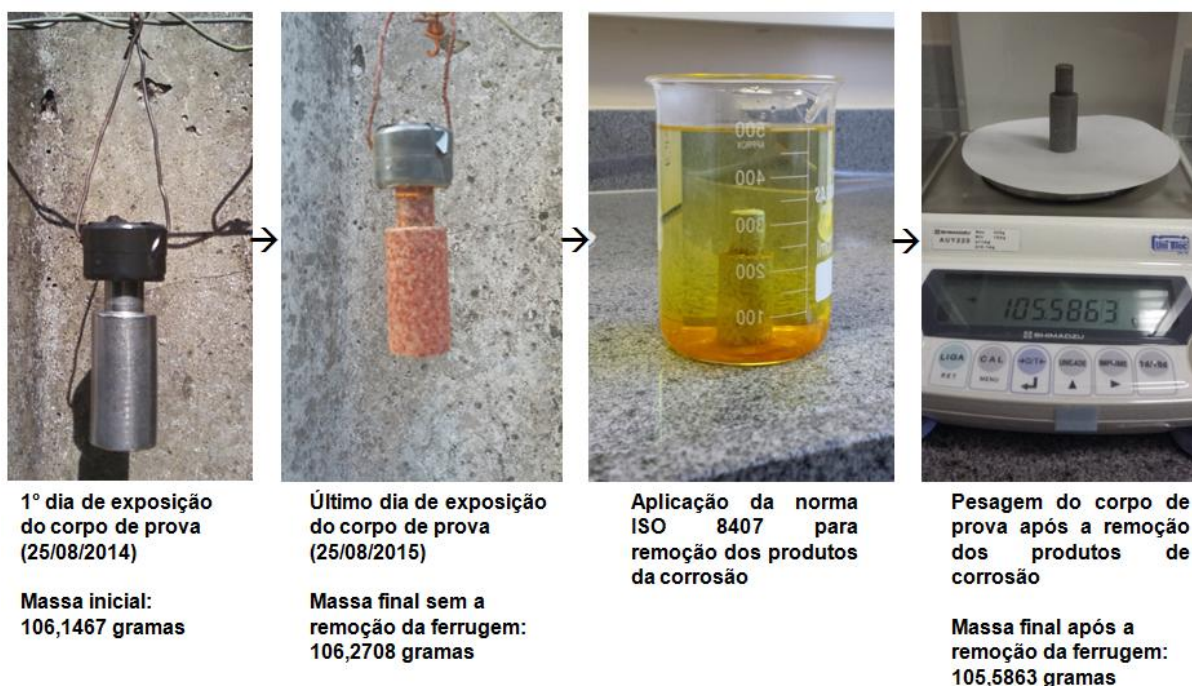
Vale ressaltar que o período de um ano é muito curto para se observar níveis elevados de redução da espessura do corpo de prova, uma vez que num curto intervalo de tempo e com ausência de influências elétricas, os produtos de corrosão ficam adsorvidos na superfície do metal. Assim, não foi perceptível a redução do diâmetro do corpo de prova de aço carbono neste ensaio de perda de massa.

#### 4.3.2 Taxa de corrosão do corpo de prova de aço carbono e o grau de corrosividade do ambiente da cidade de Abaetetuba

Para o cálculo da taxa de corrosão foi necessário descobrir a variação da massa do metal em si. Para isso, foram retirados todos os produtos de corrosão da superfície do metal com o auxílio da norma ISO 8407:1991. O resultado obtido pode ser visualizado na Figura 45:

**Figura 45 - Variação da massa do aço**

$$\text{Variação da massa do aço} = 106,1467 \text{ g} - 105,5863 \text{ g} = 0,5604 \text{ g}$$



Fonte: O próprio autor

Através da variação da massa de aço do corpo de prova, pôde-se calcular a taxa de corrosão da atmosfera da cidade de Abaetetuba, que é aproximadamente  $154,21 \left( \frac{g}{m^2} \cdot a \right)$ . Desta forma, baseando-se na norma ISO 9223:1992 (Tabela 7), concluiu-se que a corrosividade da atmosfera da cidade de Abaetetuba é **baixa**. Além disso, se verificou que a variação da espessura do corpo de prova foi na ordem de  $0 < x < 1$  mm.

Por fim, vale ressaltar que neste estudo paralelo, de perda de massa por corrosão atmosférica de um corpo de prova de aço carbono, apenas os efeitos ambientais influenciaram para a deterioração do aço. Com isso, pode-se inferir que: uma cadeia de isoladores, operando em uma linha de transmissão num ambiente semelhante ao da cidade de Abaetetuba, apresentará taxas de corrosão dos seus pinos muito mais elevadas do que os revelados no ensaio, sofrendo assim, maior redução de espessura. Nesse sentido foi que este trabalho buscou comprovar a eficácia do “Dispositivo anticorrosivo” e avaliar a utilização de revestimento super-hidrofóbico no intuito de mitigar as influências elétricas que catalisam a deterioração dos pinos de aço carbono de isoladores de linhas de transmissão.

## 5 CONCLUSÕES

As análises, simulações e ensaios, realizados anteriormente, mostraram resultados satisfatórios para o objetivo final de mitigar os efeitos elétricos e ambientais sofridos pelos pinos de isoladores nas linhas de transmissão, uma vez que, o “Dispositivo anticorrosivo”, desenvolvido a partir do princípio da blindagem eletrostática, juntamente com o princípio de autolimpeza característico de revestimentos super-hidrofóbicos, ambos aplicados em isoladores de disco de vidro, se revelaram complementares a alcançar um mesmo objetivo: retardar a corrosão em pinos de isoladores, uma vez que os anéis metálicos do dispositivo conseguirão proteger a superfície do pino contra as influências elétricas que catalisam o processo de corrosão neste elemento. E o revestimento super-hidrofóbico, por sua vez, irá reduzir a ocorrência das descargas elétricas sobre a superfície dos anéis metálicos, pois evitará a formação de soluções eletrolíticas na superfície dielétrica do isolador, as quais propiciam a formação dos *spark-overs* e/ou *flashovers*. Desta forma, espera-se que os pinos dos isoladores que estiverem protegidos pelo “Dispositivo anticorrosivo” fiquem preservados por mais tempo, uma vez que a corrosão tenderá a atacar primeiramente os anéis do dispositivo.

Por fim, após a análise dos resultados do ensaio de corrosão em um corpo de prova de aço carbono, pode-se concluir que: se isoladores de vidro estiverem operando em linhas de transmissão sob as condições ambientais da cidade de Abaetetuba, os seus pinos, que também são constituídos de aço carbono, apresentarão uma taxa de corrosão maior que  $154,21 \text{ (g/m}^2\cdot\text{a)}$ , uma vez que as influências elétricas catalisam o processo de corrosão. Porém, se esta mesma cadeia de isoladores, estiver sob as mesmas condições ambientais ressaltadas anteriormente e com os seus pinos protegidos pelos anéis metálicos do “Dispositivo anticorrosivo”, as influências elétricas serão desprezíveis, e a taxa de corrosão desses pinos será menor ou equivalente à revelada pelo ensaio, a qual é considerada uma taxa de corrosão baixa, conforme dita a norma ISO 9223:1992 (Tabela 7). Assim, pode-se afirmar que a utilização do “dispositivo anticorrosivo” em isoladores de disco reduzirá a degradação dos seus pinos a um nível menor do que a corrosão atmosférica do aço carbono na região em questão.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se uma avaliação comparativa, em condições reais de operação, entre pinos de isoladores protegidos eletrostaticamente pelos anéis metálicos do “Dispositivo anticorrosivo” com outros sem a proteção dos anéis, com o objetivo de mensurar os ganhos operacionais e monetários que as empresas do setor elétrico terão com a utilização do dispositivo. Também se sugere o desenvolvimento de outros revestimentos super-hidrofóbicos baseados em nanomateriais, os quais possivelmente proporcionarão maior eficácia na função de autolimpeza e de proteção contra corrosão.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Entenda a Indústria de Energia Elétrica**. Brasília: ABRADÉE, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Isolador de disco de porcelana ou vidro - Dimensões e características**: NBR 7109. Rio de Janeiro, 2009.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering**: an Introduction. Ninth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ ENERGIA. **Isoladores de Disco**: Vidro e Porcelana. Campinas, 2007.

DARMANIN, Thierry; GUITTARD, Frédéric. Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature. **Materials Today**, Nice, v. 18, n. 5, p. 273-285, jun. 2015.

ELETRONORTE. Desenvolvimento de Revestimento Nanoestruturado para a prevenção da corrosão e ruptura de pinos das campânulas das cadeias de isoladores, **Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento**, n.0230, 2013.

FERREIRA, Lúcia Marisa Vieira. **Revestimentos Hidrofóbicos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

FONTANA, Mars G. **Corrosion Engineering**. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1987.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

\_\_\_\_\_. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de Física** - Volume 3: Eletromagnetismo. Tradução e revisão técnica de Ronaldo Sérgio de Biasi. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9223:1992**. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, 1992.

\_\_\_\_\_. **ISO 9226:2012**. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity, 2012.

\_\_\_\_\_. **ISO 8407:1991**. Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens, 1991.

KLOECKNER METALS. Manual Técnico de Aço Inoxidável, **Catálogo Técnico**, São Paulo, n. 09, p. 59-70, maio 2011.

MELONI, Alexandre E. M. et al. Desenvolvimento de novo isolador antipoluição com perfil aberto. In: II CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2003, Salvador. **Anais...** Brasília: ANEEL, 2003. p. 67-72.

MOUTON, Gerton N. J. **An Evaluation of Different Material Line Insulators under High Voltage AC and Bipolar DC Excitation in a Marine Polluted Environment**. 2012. Thesis (Master of Science in Engineering) - Department of Electrical & Electronic Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2012.

NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. São Paulo: Editora Interciência, 2007.

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. **Corrosão e tratamento de superfície**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 4. ed. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2007.

\_\_\_\_\_. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5. ed. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2011.

PONTE, Haroldo de Araújo. **Fundamentos da Corrosão** (Disciplina: Eletroquímica aplicada e corrosão - TQ-417). Paraná: UFPR, 2003.

RIEDER, E.S. et al. A. Investigação dos principais processos de corrosão em estações de energia elétrica do Estado do RS. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 1000 -1014, 2009.

RUST-OLEUM. **Safety Data Sheet Neverwet Topcoat and Basecoat**, 2013.

**APÊNDICE – COMPROVANTE DE DEPÓSITO DE PATENTE**

Universidade Federal do Pará – UFPA.  
Agência de Inovação Tecnológica – UNIVERSITEC.  
Coordenadoria de Propriedade Intelectual – CPINT/EDA.

**DECLARAÇÃO**

Declaramos para os devidos fins, que o Sr. JOSÉ EDUARDO RIBEIRO DA SILVA, figura como um dos inventores de um pedido de obtenção de patente denominada “DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO À CORROSÃO DE PINOS DE ISOLADORES DE DISCO DE ALTA TENSÃO”, depositada em 29/02/2016, sob o Número de Processo: BR 10 2016 004491-0, junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual – INPI, cujo titular é a UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA.

Belém (PA), 01 de março de 2016

Rosângela Rita Miranda Cavaleiro  
Coordenadora de Propriedade Intelectual  
CPINT/UNIVERSITEC/UFPA  
Portaria nº 3320/2014-Reitoria