



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM INSPEÇÃO DE
EQUIPAMENTOS E DE SOLDAGEM**

JULIANO NASCIMENTO DA PAIXÃO

**ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CORROSÃO EM
CHAPAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA**

Salvador
2009

JULIANO NASCIMENTO DA PAIXÃO

**ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CORROSÃO EM
CHAPAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia SENAI-Cimatec, como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Inspeção de Equipamentos e de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Carreira Neto

Salvador
2009

P142e

Paixão, Juliano Nascimento da

Estudo da ocorrência de corrosão em chapas utilizadas na indústria automobilística / Juliano Nascimento da Paixão. -Salvador, 2009.

56 fl.; Il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Carreira Neto
Monografia (graduação) – Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, 2009.

1. Corrosão. 2. Indústria automotiva. 3. Aço carbono.
4. Galvanização I. Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec II. Carreira Neto, Manoel. III. Título.

CDD 620.11223

JULIANO NASCIMENTO DA PAIXÃO

**ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CORROSÃO EM
CHAPAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia SENAI-Cimatec, como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Inspeção de Equipamentos e de Soldagem.

Banca Examinadora

Charles Chemale Yurgel – Coordenador _____
Mestre em Processos de Fabricação por Conformação Mecânica pela
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
SENAI-CIMATEC

Manoel Carreira Neto – Orientador _____
Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo.
SENAI-CIMATEC

Ivo Andrei de Oliveira Lino Lima _____
Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina.
SENAI-CIMATEC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, minha família, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por acompanhar meus passos.

Ao meu orientador Manoel Carreira pelos conhecimentos transmitidos e por me incentivar a ser cada dia melhor.

A minha família pela paciência, compreensão e apoio constante.

Aos meus amigos e colegas, e em especial a Ingrid, Manoel Orlando, Hugo Diego, pelo incentivo e apoio.

Ao professor e coordenador, Charles Chemale, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

Ao corpo docente da faculdade SENAI Cimatec, pelo empenho e habilidade na formação de bons profissionais.

A Raphael Rezende pelo apoio na execução dos ensaios de corrosão.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

RESUMO

Este trabalho faz uma revisão com relação a corrosão e formas de proteção de chapas de aço carbono com e sem revestimento de galvanização utilizadas na indústria automotiva. Ensaios de corrosão acelerada em névoa salina foram realizados e os resultados obtidos foram comparados com dados de corrosão em campo e com ensaios cíclicos. As análises mostraram que o ensaio de névoa salina não é suficiente para prever o desempenho em serviço, pois, os componentes são expostos a muitas outras condições além da névoa salina.

Palavras - chave: Corrosão, formas de proteção, névoa salina, aço carbono, indústria automotiva, galvanização.

ABSTRACT

This work do a review concerning corrosion and protection forms of low carbon steel plates zinc coated and uncoated, used in automotive industry. Accelerated corrosion tests in salt spray was realized and the obtain results was compared with corrosion in service and cyclic tests data. The analysis showed that the salt spray test is not sufficient to forecast the performance in service, because, the components are exposed to others conditions beyond salt spray.

Keywords: Corrosion, protection forms, salt spray, carbon steel, automotive industry, zinc coat.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CÉLULA DE CORROSÃO BIMETÁLICA.	15
FIGURA 2: IONIZAÇÃO DOS ÁTOMOS DE FERRO NA SUPERFÍCIE METÁLICA.....	17
FIGURA 3: POTENCIAIS DE CORROSÃO EM ÁGUA DO MAR EM MOVIMENTO (2,5 A 4,0 M/S), TEMPERATURA ENTRE 10 E 27°C.	21
FIGURA 4: ACOPLAMENTO GALVÂNICO ESQUEMÁTICO.....	22
FIGURA 5: CORROSÃO POR FRESTAS. A) FRESTA RESULTANTE DA UNIÃO DE DUAS CHAPAS DE AÇO E B) FRESTA DEVIDO A GAXETA ENTRE DOIS TUBOS FLANGEADOS.	29
FIGURA 6: CAMADAS DE REVESTIMENTO UTILIZADAS EM CHAPAS DE AUTOMÓVEIS... 	33
FIGURA 7: ESQUEMA DAS CAMADAS DO REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO.....	38
FIGURA 8: ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA AÇÃO GALVÂNICA DE SACRIFÍCIO DO REVESTIMENTO METÁLICO.	39
FIGURA 9: CROQUI DAS CHAPAS UTILIZADAS NO ENSAIO.....	45
FIGURA 10: DISPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NA CÂMARA DE CORROSÃO.	46
FIGURA 11: A) CHAPA GALVANIZADA PREPARADA PARA O ENSAIO E B) DETALHE DA MARCAÇÃO NA CHAPA AUMENTO DE 40X.....	47
FIGURA 12: CABINE DE CORROSÃO UTILIZADA NO ENSAIO.	48
FIGURA 13: EVOLUÇÃO DA CORROSÃO NOS CORPOS DE PROVA SEM GALVANIZAÇÃO. A) CP ANTES DA EXPOSIÇÃO, B) CP COM MENOS DE 24 HORAS DE EXPOSIÇÃO E C) CP COM 130 HORAS DE EXPOSIÇÃO.	49
FIGURA 14: EVOLUÇÃO DA CORROSÃO NOS CORPOS DE PROVA GALVANIZADOS. A) CP ANTES DA EXPOSIÇÃO, B) CP COM MENOS DE 24 HORAS DE EXPOSIÇÃO E C) CP COM 130 HORAS DE EXPOSIÇÃO.....	50
FIGURA 15: CP COM 130 HORAS DE EXPOSIÇÃO COM ELEVADA QUANTIDADE DE PRODUTOS DE CORROSÃO.	50
FIGURA 16: COMPONENTES DE AÇO GALVANIZADO NA REGIÃO DO MOTOR. A) BRACKET DO ACELERADOR COM UM ANO DE USO E B) TERMINAL CABO DE ATERRAMENTO COM UM ANO DE USO.	51
FIGURA 17: CHAPA DE AÇO PINTADA NA REGIÃO DO MOTOR COM UM ANO DE USO. ...	52

FIGURA 18: CORPO DE PROVA DE AÇO NÃO GALVANIZADO SUBMETIDO A ENSAIO CÍCLICO (8 CICLOS)..... 53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: REQUISITOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA AÇO ASTM A 619M.....	44
TABELA 2: PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS DO AÇO ASTM A 619M	45
TABELA 3: CICLO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO CÍCLICO AUTOMÁTICO.	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. DEFINIÇÃO DE CORROSÃO	14
3.2. CUSTOS DA CORROSÃO	14
3.3. PROCESSOS DE CORROSÃO	15
3.3.1. POTENCIAL DE ELETRODO	18
3.4. FORMAS DE CORROSÃO.....	19
3.4.1. CORROSÃO GENERALIZADA	20
3.4.2. CORROSÃO GALVÂNICA	20
3.4.3. CORROSÃO ATMOSFÉRICA	22
3.4.3.1. UMIDADE RELATIVA	23
3.4.3.2. PRESENÇA DE UMIDADE.....	24
3.4.3.3. TEMPERATURA.....	24
3.4.3.4. VENTO	25
3.4.3.5. PRESENÇA DE CONTAMINANTES	25
3.4.3.6. CICLOS ÚMIDOS/SECOS	26
3.4.3.7. PH DO MEIO	26
3.4.3.8. NATUREZA DOS PRODUTOS DE CORROSÃO	26
3.4.3.9. CORROSÃO ATMOSFÉRICA DO ZINCO	27
3.4.4. CORROSÃO POR FRESTAS	28
3.5. FORMAS DE PROTEÇÃO	31
3.6. REVESTIMENTOS.....	33
3.6.1. REVESTIMENTOS ORGÂNICOS	34
3.6.2. REVESTIMENTOS INORGÂNICOS	35
3.6.3. REVESTIMENTOS METÁLICOS	35
3.6.3.1. PROCESSOS DE GALVANIZAÇÃO	36
3.6.3.1.1. GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE	37
3.6.4. AÇÃO GALVÂNICA DA CAMADA DE REVESTIMENTO	38
3.7. ENSAIOS DE CORROSÃO	39
3.7.1. OBJETIVO DOS ENSAIOS	40
3.7.2. ENSAIO DE NÉVOA SALINA (SALT SPRAY)	41
3.7.3. ENSAIO CÍCLICO (CYCLIC TESTS)	42
3.7.4. CABINES	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1. MATERIAIS.....	44
4.2. MÉTODOS	46
4.3. EQUIPAMENTO.....	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1. ENSAIO DE NÉVOA SALINA	49
5.2. COMPARAÇÃO COM COMPONENTES EM SERVIÇO	51
5.3. COMPARAÇÃO COM OUTROS ENSAIOS.....	53
6. CONCLUSÕES	54

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

A deterioração causada pela corrosão representa alterações prejudiciais indesejáveis tais como variações químicas ou modificações estruturais tornando o material inadequado para o uso, afetando negativamente os diversos setores da sociedade.

Uma das formas de medir a importância de um determinado fenômeno é pelo custo imposto à sociedade pela sua ocorrência. Sob este aspecto, a corrosão ocupa uma posição de destaque, onde o montante de recursos anualmente despendidos no seu combate e implantação dos sistemas de proteção é elevado. Este fato caracteriza também a constante busca de materiais com maior resistência à corrosão e menor custo para satisfazer o desempenho necessário quando submetido aos mais variados meios.

A indústria automotiva é um dos setores mais impactados pela corrosão, o que causa gastos principalmente, com a depreciação dos veículos.

Contudo os gastos em corrosão podem ser minimizados. Pode parecer um paradoxo, mas a melhor forma de minimizar os gastos em corrosão é através do investimento em materiais e procedimentos resistentes a corrosão, uma vez que os gastos envolvendo manutenção e de depreciação são muito maiores (ROBERGE, 2000).

O combate a corrosão no setor automotivo inicia na fase de projeto e a verificação da eficiência deste dimensionamento torna-se bastante complexa, uma vez que a corrosão é um fenômeno relativamente lento. A fim de se contornar esta dificuldade, ensaios acelerados de corrosão são realizados. Existem muitos tipos de ensaios acelerados de corrosão, mas de uma maneira geral estes ensaios buscam uma correlação entre os danos causados pela corrosão nos ensaios e o tempo necessário para esta corrosão ocorrer em campo.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão com relação a corrosão e formas de proteção na indústria automotiva, bem como a correlação entre os ensaios acelerados de corrosão e a ocorrência deste tipo de falha em campo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. DEFINIÇÃO DE CORROSÃO

Corrosão é um ataque destrutivo do material por uma reação com o ambiente em que este está exposto (ROBERGE, 2000, SHREIR et. al, 2000, ASM METALS, 1992a). As sérias conseqüências dos processos corrosivos tornaram-se um problema com significância mundial. Assim todo dia são encontradas estas formas de degradação e suas diversas conseqüências como: parada emergencial de plantas, dispêndio de recursos, perda ou contaminação de produtos, redução da eficiência dos equipamentos, manutenção onerosa, e altos custos com super dimensionamentos. Isto também coloca em risco a segurança e inibe o progresso da tecnologia. Os aspectos de multidisciplinaridade dos problemas de corrosão combinado com a distribuição de responsabilidade associado com tal problema somente acrescenta a complexidade do assunto (ROBERGE, 2000).

3.2. CUSTOS DA CORROSÃO

Embora os custos atribuídos aos danos por corrosão de todos os tipos serem estimados como sendo da ordem de 3 a 5% do produto interno bruto (PIB) dos países (ROBERGE, 2000), as responsabilidades associadas a estes problemas são às vezes um pouco difusas. Desde o primeiro relatório significativo elaborado por *Uhlig* em 1949, comprovou-se que os custos da corrosão das nações apresentam-se realmente grandes. A conclusão de todos os estudos subseqüentes foram que a corrosão representa uma carga constante para o PIB das nações. Uma conclusão do governo do Reino Unido em 1971, fundamentado pelo trabalho de *Hoar*, foi que uma boa fração das falhas de corrosão poderiam ser evitadas, e que um bom caminho para cuidar da corrosão é a educação com o conhecimento deste fenômeno (ROBERGE, 2000).

É um objetivo essencial quando se faz algum projeto é de produzir estruturas ou produtos manufaturados que atendam perfeitamente suas funções, porém com o máximo de economia em todos os recursos que são aplicáveis à sua construção (TALBOT, 1998).

3.3. PROCESSOS DE CORROSÃO

O processo de corrosão química é bem mais restrito que o da corrosão eletroquímica, e se compõe basicamente da oxidação, sendo caracterizada por uma reação química do metal com o agente corrosivo sem que haja deslocamento de elétrons para outras áreas. O produto da corrosão se forma na superfície do metal exposto ao meio, podendo formar uma película, que depende do metal, do meio e das condições em que se processa a reação (OLIVEIRA, 2008).

Tal processo corrosivo é caracterizado basicamente pela ausência da água no estado líquido, as temperaturas envolvidas são geralmente elevadas e sempre acima do ponto de orvalho da água, e da interação direta entre o metal e o meio corrosivo (OLIVEIRA, 2008).

Segundo ALBERTI, em meio aquoso, a corrosão metálica é um processo essencialmente eletroquímico, e para que ela ocorra é necessário que se estabeleça um complexo composto pôr quatro elementos essenciais que constituem de uma pilha eletroquímica, são eles: superfície anódica, superfície catódica, eletrólito e condutor eletrônico, conforme figura 1.

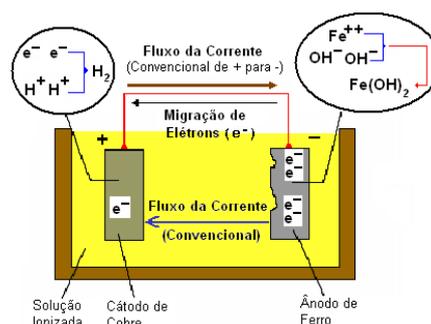


Figura 1: Célula de corrosão Bimetálica. (Adaptado de ABRACO, 2002).

Na superfície anódica é onde devem ocorrer as reações de oxidação do metal, na superfície catódica devem ocorrer as reações de redução das espécies existentes no eletrólito, o eletrólito deve estar em contato simultâneo com ambas as superfícies, e o condutor eletrônico deverá estabelecer o contato elétrico entre os elementos que constituem estas superfícies (ALBERTI, 2004), a pilha eletroquímica e seus componentes podem ser visualizados na figura 1.

Os elementos que constituem individualmente as superfícies anódica e catódica denominamos respectivamente de ânodo e cátodo ou simplesmente eletrodos ficam dispostos em áreas diferentes, geralmente, do mesmo corpo metálico ou podem, cada qual, situar-se em um corpo metálico distinto (ALBERTI, 2004).

Durante a corrosão ocorrem essencialmente dois tipos de reações denominadas respectivamente de reações anódicas e reações catódicas:

A reação anódica consiste na oxidação (corrosão) do metal devido à migração de íons metálicos M^{n+} para o meio corrosivo (eletrólito) segundo a equação:



Onde M representa um átomo metálico do retículo cristalino do ânodo, M^{n+} representa um íon do metal diluído no eletrólito e ne^{-} representa os elétrons livres deixados no metal (ALBERTI, 2004).

Já a reação catódica consiste na redução de íons contidos no eletrólito, na superfície catódica, segundo a equação:



Onde R^{n+} representa uma espécie iônica contida na solução e R a espécie reduzida (ALBERTI, 2004).

Um caso típico é o ferro. Podemos descrever que o átomo de ferro (**Fe**) perde dois elétrons para formar o ferro iônico (**Fe²⁺**) quando imerso em água, conforme a reação:



Esta reação produz os elétrons livres, que passam de dentro do metal a outro local na superfície do metal (o cátodo) onde são consumidos pela reação catódica. Dessa forma, se uma barra de ferro é imersa em água, alguns átomos se ionizam passando para a água como ferro iônico e a barra metálica assume uma característica negativa devido aos elétrons deixados pelos átomos que se ionizaram, conforme ilustrado na figura 2.

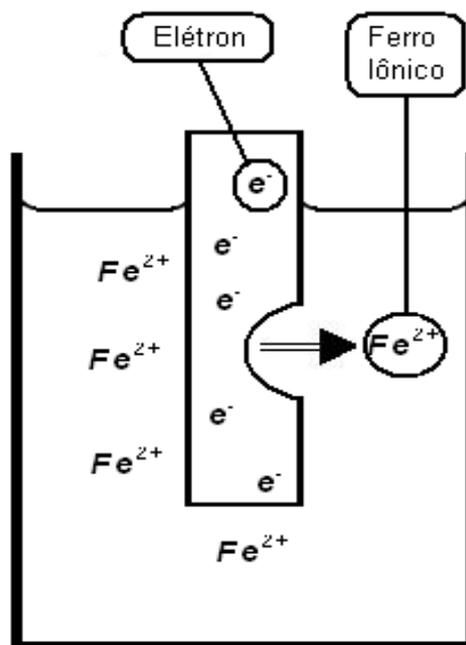


Figura 2: Ionização dos átomos de ferro na superfície metálica.
(Adaptado de GENTIL, 1996)

Para um processo ideal, após a imersão do ferro na água, o sistema manteria um equilíbrio entre os íons de ferro liberados para a água e os elétrons que ficaram na barra metálica, não havendo assim, o consumo destes elétrons na barra. Após o estabelecimento deste equilíbrio entre as cargas negativas retidas na barra e as cargas positivas incorporadas à água, para cada átomo de ferro que se ioniza e passa para a água, um íon de ferro retorna

da água para a barra, estabelecendo assim um equilíbrio dinâmico que, em termos práticos, resulta na paralisação do processo corrosivo, de acordo com a seguinte reação química:



3.3.1. Potencial de eletrodo

Quando um metal entre em contato com um eletrólito, assim uma troca contínua de íons metálicos é iniciada entre a fase cristalina e a fase aquosa. A velocidade de troca em uma direção não será igual ao da outra, desta forma haverá predominância a direção que diminua a energia livre do sistema. A medida com que os íons do metal são dissolvidos na solução carregando-a positivamente, e devido o excesso de elétrons deixados no metal cresce a carga negativa, assim desenvolve entre estes uma diferença de potencial (ddp) na interface metal-solução, que será dependente do metal. Esta diferença crescerá até alcançar um valor no qual a variação da energia de troca dos íons entre metal e solução seja nula. Então, será alcançado o equilíbrio termodinâmico, em que o potencial estável é denominado de equilíbrio termodinâmico do metal no meio (ALBERTI, 2004).

O valor do potencial de equilíbrio será dependente da natureza no metal e do eletrólito em que está submerso. Quando um metal é mergulhado em uma solução que contenha íons deste mesmo metal, ocorrerá que íons de metais nobres, assim como a platina, tenderão sempre a abandonar a solução para se depositar na superfície do metal, que terá um potencial positivo em relação à solução. Por outro lado, nos metais menos nobres, como o ferro e o zinco, seus íons tenderão sempre a passar para a solução, seja qual for a concentração de seus íons, para adquirir potenciais negativos em relação à solução (ALBERTI, 2004).

Com a utilização de técnicas experimentais, a medição direta do potencial de eletrodo é materialmente impraticável, não podendo ser medido diretamente em valores absolutos, porém, pode ser medida a diferença de potencial entre dois eletrodos. Para ser medido o potencial de um eletrodo, que neste caso é considerado um eletrodo de trabalho (Et), utiliza-se de um eletrodo de referência (Er), construindo-se assim uma pilha, cujo potencial seja estável e facilmente reproduzido, e convencionou-se atribuir o valor zero ao potencial de equilíbrio da semi-pilha padrão de hidrogênio. Neste caso pode-se estimar a diferença de potencial formada por pilhas de diferentes metais (OLIVEIRA, 2008).

A diferença entre estes dois potenciais pode ser representada pela equação de Nernst, a qual contém os potenciais padrões das semi-reações dos eletrodos envolvidos. Ao utilizar atividade para as espécies iônicas, a diferença de potencial da pilha formada pode ser escrita pela seguinte equação:

$$ddp = E' - E \quad (5)$$

Onde: **ddp** é o potencial da pilha, **E'** é o potencial da semi-pilha que recebe os elétrons, e **E** é o potencial da semi-pilha que doa elétrons.

Por definição, o potencial padrão de uma pilha é calculado como a diferença entre os valores do potencial padrão da semi-pilha que recebe os elétrons, e o potencial padrão da semi-pilha que doa elétrons, tomados em relação ao potencial padrão da semi-pilha do hidrogênio (OLIVEIRA, 2008).

3.4. FORMAS DE CORROSÃO

A classificação didática da corrosão de acordo com sua forma, mecanismo de ação ou outras formas de caracterização, pode nos trazer informações valiosas com relação às causas da corrosão, como ela começou e formas de controlá-la.

3.4.1. Corrosão generalizada

Este tipo de corrosão refere-se a um tipo de ataque conhecido também como perda de espessura uniforme progredindo sem o aparecimento de degradação localizada. Aços, ferro fundido e ligas de cobre expostos ao tempo são exemplos de materiais que tipicamente apresentam a corrosão generalizada. Em contrapartida, enquanto materiais que formam filmes passivos como aços inoxidáveis ou ligas níquel-cromo, estão geralmente sujeitas a ataques localizados. Vale ressaltar que os modos de degradação podem variar de acordo com as condições em que estes estarão submetidos (ASM METALS, 1992a).

A corrosão generalizada foi dividida em várias formas específicas de degradação, são elas: Corrosão atmosférica, corrosão galvânica, corrosão galvânica por correntes parasitas, corrosão biológica, corrosão em sal fundido, corrosão por metal líquido e corrosão em altas temperaturas. (ASM METALS, 1992a).

Para este estudo serão abordadas somente as formas de corrosão galvânica, atmosférica e por frestas, pois são os tipos de maior incidência nas chapas de automóveis.

3.4.2. Corrosão galvânica

Segundo PEREZ (2004), a corrosão galvânica é também uma forma de corrosão química ou eletroquímica. Sendo que a eletroquímica ocorre devido a diferentes potenciais entre dois materiais diferentes conectados através de um circuito para o fluxo de corrente ocorrer do metal mais ativo (maior potencial negativo) para o metal mais nobre (maior potencial positivo). O acoplamento galvânico é uma célula galvânica onde o ânodo é o metal com menor resistência a corrosão do que o cátodo.

A taxa de corrosão pode ser definida em termos de densidade de corrente, assim como $i=I/A$, onde I é a corrente e A é a área da superfície. Então, quanto menor a área da superfície maior a taxa de corrosão. Deste modo, a força impulsora da corrosão ou fluxo de corrente é o potencial (tensão - E) entre o ânodo e o cátodo. Subseqüentemente, a lei de Ohm, $E=RI$, é aplicável, onde R será a resistência da célula galvânica (PEREZ, 2004).

Além disso, corrosão galvânica pode ser prevista pela utilização da força eletromotriz (FEM) ou através da série galvânica dos metais. Estas reações são reversíveis. O potencial de eletrodo dos metais é medido em comparação ao um eletrodo de hidrogênio padrão, que é um eletrodo de referência que tem um potencial arbitrado igual a zero (PEREZ, 2004).

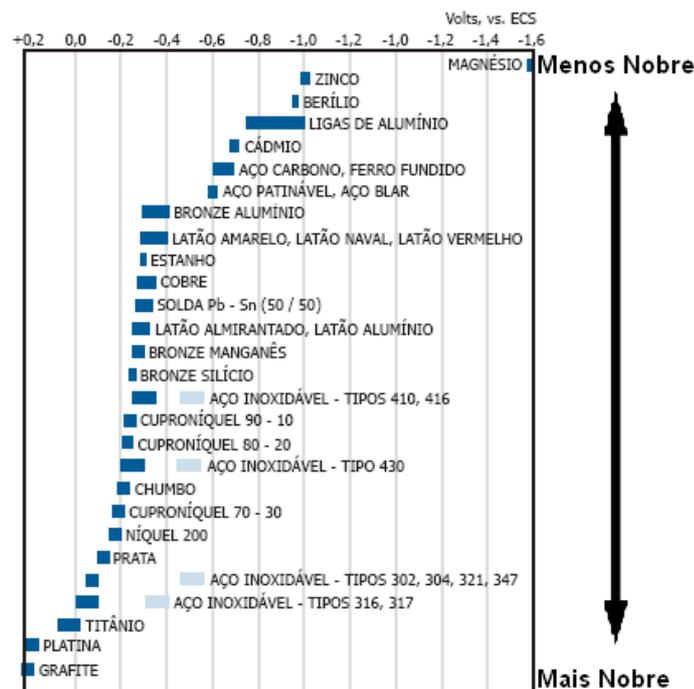


Figura 3: Potenciais de corrosão em água do mar em movimento (2,5 a 4,0 m/s), temperatura entre 10 e 27°C.
(Adaptado de GERDAU, 2004)

Para seleção de dois metais ou duas ligas para um acoplamento galvânico, ambos devem ter potenciais similares ou serem próximos para suprimir a corrosão galvânica (PEREZ, 2004). Na figura 3, pode se observar os metais mais e menos nobres, assim como seus potenciais de corrosão.

Por exemplo, acoplamento de Fe – Cu, ou Cu – Sn (bronze), desenvolvem uma pequena diferença de potencial visto que eles estão próximos um do outro em seus respectivos potenciais de eletrodo. Os potenciais de eletrodo próximos de dois metais o efeito galvânico ocorrerá no mais fraco, de qualquer forma o efeito galvânico é aumentado (PEREZ, 2004).

Eventualmente, o acoplamento galvânico pode ser usado para proteção catódica. A figura 4 ilustra dois casos de acoplamento galvânico, o primeiro em que o cobre (Cu) e o zinco (Zn) podem ser na forma de chapas ou de revestimentos. Vale ressaltar que o ferro (Fe) quando acoplado ao Cu é o ânodo e quando combinado ao Zn é o cátodo. No segundo caso, o Zn transforma-se em um ânodo de sacrifício, que é o princípio de um acoplamento para chapas e tubos de aço galvanizado, e este princípio de proteção é o utilizado nas chapas que serão utilizadas nos ensaios. Por outro lado, se o revestimento de Cu for danificado, o aço é exposto para o eletrólito e torna-se o ânodo, e então, este oxida (PEREZ, 2004).

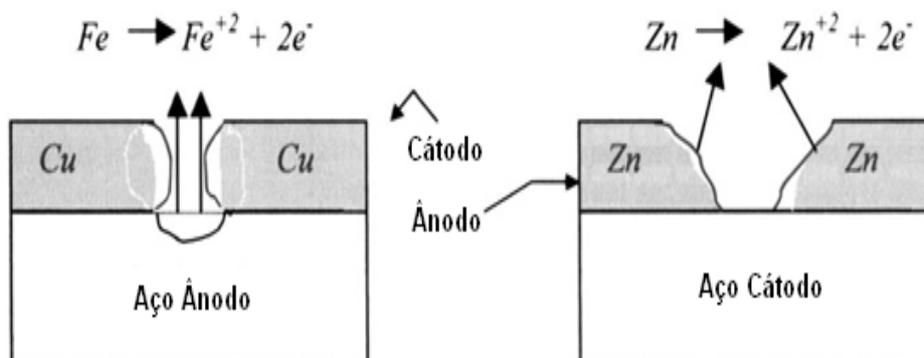


Figura 4: Acoplamento galvânico esquemático (PEREZ, 2004).

3.4.3. Corrosão atmosférica

Segundo VERGÉS, a corrosão atmosférica é definida como a corrosão ou degradação de materiais expostos ao ar e aos seus poluentes sem que estejam imersos em um líquido. Esta é provavelmente a forma mais comum de corrosão, porém ainda pouco compreendida, talvez pelo fato da atmosfera ser

um meio cujas propriedades físico-químicas variam continuamente com o tempo, o que torna difícil generalizar e fazer previsões. Ainda existem numerosas dúvidas sobre os mecanismos que conduzem as reações e as variáveis que influenciam a cinética com que se desenvolvem os processos de corrosão atmosférica.

Uma característica importante da corrosão atmosférica é tratar-se de um processo descontínuo, sendo necessário um filme de eletrólito superficial com uma determinada espessura para que as reações da corrosão (catódicas e anódicas) possam ocorrer. Na atmosfera, o metal não é corroído por grandes quantidades de eletrólitos, e a corrosão geralmente opera de tal forma que toda a superfície metálica funciona como cátodo e ânodo ao mesmo tempo (VERGÉS, 2005).

Os aços, quando são expostos à atmosfera, apresentam uma forte tendência a corroer-se, devido à presença de vários fatores, entre eles: umidade relativa, presença de umidade (chuva, orvalho, névoa) e de contaminantes (cloreto, sulfato, material particulado) sobre a superfície do aço, presença de ciclos úmidos/secos, pH do meio, vento e natureza dos produtos de corrosão. Segundo VERGÉS, a proporção da corrosão é variável segundo a proximidade dessas fontes e as condições climáticas locais, participando ativamente da deterioração dos materiais. Estes fatores que influenciam a corrosão atmosférica serão discutidos a seguir:

3.4.3.1. Umidade relativa

Consiste na relação entre o teor de vapor de água encontrado no ar e o teor máximo que pode ser contido no mesmo a uma mesma temperatura. Para que a corrosão seja significativa, existe um valor de umidade relativa crítica (URC), que depende do tipo de contaminante, rugosidade e presença de material particulado sobre o substrato metálico. O valor de URC pode variar desde 40% na presença de NaCl, até 80 - 85 % na presença de SO₂. Por sua

vez, o vento aumenta a evaporação e, logo, aumenta a URC, enquanto que a rugosidade e a poeira fazem diminuir a URC (CARMONA, 2005).

3.4.3.2. Presença de umidade

A umidade sobre a superfície metálica pode estar na forma de chuva, orvalho ou névoa. Dessas três, a mais comum é a chuva, que facilita a adsorção de contaminantes e influi fortemente no pH do filme do eletrólito que cobre a superfície metálica. Além disso, a chuva limpa os contaminantes salinos solúveis (cloretos e sulfatos) presentes na superfície do aço, diminuindo, assim, a ação deles.

A névoa apresenta um efeito mais severo do que a chuva, pois transporta espécies até a superfície metálica sem possibilidades de lixiviá-las.

Por outro lado, a formação do orvalho acontece quando a temperatura da superfície metálica está abaixo da temperatura da atmosfera, provocando a condensação. Portanto, depende da UR do ar e da mudança de temperatura. Quando existem contaminantes sobre a superfície, o orvalho aumenta a taxa de corrosão (CARMONA, 2005).

3.4.3.3. Temperatura

Os efeitos da temperatura são indiretos, afetando a umidade relativa, ponto de orvalho, tempo de superfície úmida, concentração de oxigênio dissolvido na água e a velocidade das reações eletroquímicas. Um aumento de temperatura pode provocar um aumento da condutividade do eletrólito, quando sobre a superfície estão presentes contaminantes salinos solúveis. Entretanto, pode retardar a corrosão porque diminui a solubilidade do oxigênio na água.

Todos esses fatores terminam afetando as propriedades dos produtos de corrosão formados (CARMONA, 2005).

3.4.3.4. Vento

Seu efeito é indireto, e afetará o tempo de secagem, transporte de material particulado e de poluentes até a superfície metálica exposta (CARMONA, 2005).

3.4.3.5. Presença de contaminantes

Entre os contaminantes, têm merecido uma maior atenção por seu efeito mais marcante, os contaminantes salinos solúveis (SO_2 e NaCl) e, em uma proporção menor, o material particulado e as substâncias sólidas metálicas.

O papel do material particulado, como a sílica (SiO_2) e a fuligem (carvão), limita-se à absorção de umidade por capilaridade ou ao estabelecimento de micro-células de aeração diferencial para o início do processo corrosivo.

A deposição de substâncias sólidas metálicas, diferentes do substrato metálico, leva à corrosão galvânica, corroendo desta maneira o metal mais ativo.

Os contaminantes salinos solúveis afetam especialmente a velocidade de corrosão e o tipo de produto de corrosão formado. O SO_2 está presente em atmosferas industriais e o NaCl em atmosferas marinhas. Em geral, os cloretos são mais corrosivos do que os sulfatos. Os cloretos levam à formação de produtos de corrosão menos compactos e aderentes do que os sulfatos (CARMONA, 2005).

3.4.3.6. Ciclos úmidos/secos

Eles resultam da flutuação da temperatura entre o dia e a noite. Devido à variação na espessura da camada de eletrólito sobre o aço, a taxa de redução do oxigênio varia periodicamente, o que resulta em uma variação periódica do potencial de corrosão (CARMONA, 2005).

3.4.3.7. pH do meio

Afeta as reações envolvidas no processo corrosivo e, conseqüentemente, o tipo de produto de corrosão formado (CARMONA, 2005).

Para valores entre 4 e 10, a taxa de corrosão independe do pH e depende da rapidez com que o oxigênio se difunde para a superfície metálica (CARMONA, 2005).

3.4.3.8. Natureza dos produtos de corrosão

Os produtos de corrosão atmosférica do ferro e suas ligas são conhecidos com o nome genérico de “óxidos de ferro” ou ferrugem e consistem em vários tipos de óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de cor marrom – alaranjada. Eles podem ser amorfos ou cristalinos, sendo as fases amorfas mais compactas do que as cristalinas, diminuindo, assim, a porosidade da camada de ferrugem. Os principais produtos de corrosão são: lepidocrocita, goethita, magnetita, maghemita, akaganeita, feroxita e hematita. Destes óxidos, os mais encontrados na camada de ferrugem são lepidocrocita e goethita. No entanto, pode haver mudanças na composição dos óxidos, dependendo da composição do aço, da intensidade dos fatores, já discutidos anteriormente, e do tempo de exposição do aço (CARMONA, 2005).

3.4.3.9. Corrosão atmosférica do zinco

Como outros materiais o zinco é corroído na atmosfera em um processo descontínuo, de natureza eletroquímica, toda vez que a superfície metálica é exposta a um eletrólito. Estudos anteriores tiveram conhecimento que a temperatura representa somente um papel secundário no processo, porém foi apontado que a importância da temperatura está na variação da umidade na corrosão atmosférica do zinco. Ambos, temperatura do material e o tempo em que permanece umedecido, influenciam a morfologia dos produtos de corrosão formados (FUENTE, 2006).

A concentração de SO_2 na atmosfera é um fator principal no controle da taxa de corrosão do zinco, o filme de corrosão do zinco mostrou uma forte absorção de SO_2 durante a deposição seca. Da mesma forma, a deposição de produtos ácidos condensados produz uma queda no pH e a taxa do ataque do zinco é aumentada. Existe uma aproximação linear relacionada entre a taxa de corrosão e salinidade ou concentração de dióxido de enxofre na atmosfera (FUENTE, 2006).

Um filme de óxido de zinco ZnO é a primeira fina camada para formar a reação do zinco com o oxigênio da atmosfera, este filme também tem efeito de proteção, porém, têm relativamente um menor efeito. O óxido de zinco é o produto de corrosão geralmente detectado. Mas na presença de água, os óxidos são rapidamente transformados em hidróxidos. Muitos estudos aceitam que sob exposição inicial do zinco, rapidamente forma um fino filme de hidróxido de zinco. Em exposições contínuas este filme é transformado em vários outros produtos de corrosão atmosférica (FUENTE, 2006).

Carbonatos são formados como resultado da reação do hidróxido de zinco com o CO_2 atmosférico. Depois dos hidróxidos, o carbonato é o segundo produto de corrosão mais abundante em camadas naturais de zinco. Apesar de vários compostos serem encontrados, os mais comuns são ZnCO_3 (carbonato de zinco) e $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ (carbonato de hidróxido de zinco). O segundo composto é formado quase instantaneamente na superfície do zinco exposta à

atmosfera, e esta formação é promovida pela presença de água (FUENTE, 2006; VELEVA, 2009).

Abaixo, em atmosferas pouco agressivas o filme dos produtos de corrosão é uniforme, um pouco nodular, e finamente granulado. Pequenas ilhas de finas placas são inicialmente formadas, seguido por largas ilhas com maior espessura, e placas mais arredondadas. Estas ilhas ou pedaços gradualmente aumentam em seus tamanhos e se unem para cobrir toda a superfície (FUENTE, 2006).

Quando uma área está exposta a atmosferas agressivas, dissolução em massa e precipitações é imposta na base nodular do material. No caso de atmosfera puramente marinha, a proteção do carbonato de hidróxido de zinco é atacada pelos cloretos, que conduz este para a transformação em hidroxiclreto (simonkolleite) (FUENTE, 2006).

Em casos de atmosferas com poluição por SO_2 , ocorre a formação de sulfatos de zinco e hidroxissulfato de zinco. Diferentes componentes podem ser formados (ZnSO_4 , $\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4$, etc.) e precipitam contribuindo para a inibição da corrosão atmosférica do zinco. Porém os produtos de corrosão são dissolvidos e lavados por chuva ácida (FUENTE, 2006; VELEVA, 2009).

Quando SO_2 está também presente em atmosfera marinha, nota-se que um efeito inibidor é as vezes observado durante para a formação dos produtos de corrosão (FUENTE, 2006).

3.4.4. Corrosão por frestas

Segundo Shreir et. al, corrosão por frestas é uma corrosão localizada intensa, que se estende desde pequenos pites ate uma corrosão abrangente em sobre toda a superfície. Ocorrem geralmente em pequenas frestas que podem ser formadas pela geometria da superfície, (ex.: chapas rebitadas, construção soldada, juntas roscadas), contato de um metal com sólidos não

metálicos, (ex: plásticos, borrachas, vidros), depósitos de areia, sujeira ou produtos de corrosão permeáveis na superfície do metal (este tipo de corrosão por frestas pode ser referenciado como ataque sob depósito), dois tipos de corrosão por frestas são mostrados na figura 5.

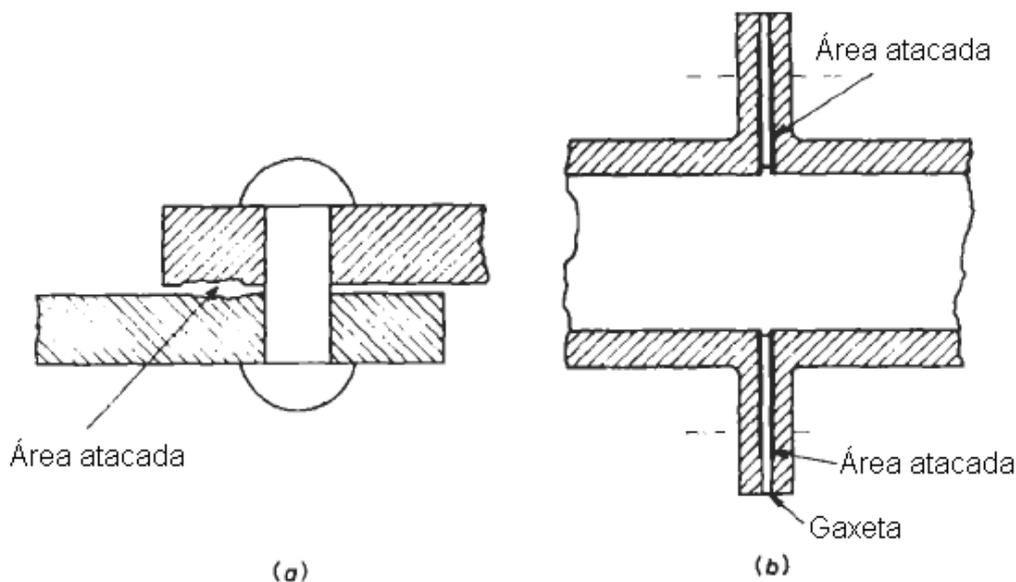


Figura 5: Corrosão por frestas. a) fresta resultante da união de duas chapas de aço e b) fresta devido a gaxeta entre dois tubos flangeados. (SHREIR et. al, 2000)

O fenômeno referido como corrosão por frestas é caracterizado por uma configuração geométrica que o cátodo reagente (usualmente oxigênio dissolvido) pode estar na superfície do metal fora da fresta, enquanto que o acesso para a camada de solução estagnada dentro da fresta é muito mais difícil e pode ser alcançada somente por difusão através de estreita abertura da fresta. Isto conduz para diferença na concentração de cátodo reagente nas duas superfícies, e por esta razão isto é às vezes referido como corrosão por concentração de célula (diferença de aeração). Materiais fibrosos (assim como gaxetas para juntas) que atraem a solução dentro da fresta formada entre a gaxeta e o metal por ação de capilaridade são particularmente conduzidos para corrosão por frestas, e os pites em aços inoxidáveis são invariavelmente estimulados pela presença de uma fresta ou um depósito (SHREIR et AL, 2000).

A corrosão por frestas pode ocorrer com uma variedade de metais e ligas alcançando de metais nobres como prata e cobre até muitos metais eletronegativos assim como alumínio e titânio. Pode também ocorrer ataque quase uniforme na forma de pites na superfície metálica dentro da fresta. Este ataque acontece particularmente com metais e ligas que contam com a passividade para sua resistência a corrosão.

O ambiente pode ser alguma solução agressiva (ácida ou neutra) incluindo águas naturais, mas soluções contendo íons cloreto são mais condutivas para a corrosão por frestas. A fresta deve possuir uma abertura que permita a entrada de solução, mas suficientemente estreita para manter a zona estagnada da solução dentro da fresta de forma que a entrada de reagente catódico e a retirada dos produtos de reação seja muito lenta e ocorre somente por difusão e migração (se as espécies são carregadas). A largura da fresta é geralmente da ordem de 0,025 a 0.1mm. Macro-frestas podem também ocorrer, geralmente associadas a sujeira e sais acumulados na abertura. A mistura retida de forma que o metal é mantido em contato com estes materiais úmidos contendo eletrólitos (SHREIR et. al, 2000).

Muitos casos de corrosão por frestas ocorrem quase em soluções neutras em que o oxigênio dissolvido é o cátodo reagente. No caso de cobre e suas ligas pode ocorrer corrosão por frestas devido a diferenças na concentração de íons de Cu^{2+} , porém o mecanismo aparece diferente, com ataques que ocorrem nas superfícies expostas perto da fresta e não dentro da fresta, na realidade, a parte interna da fresta pode de fato ser catódica e a deposição de cobre é às vezes observada, particularmente em ligas de Cu-Ni. Considerações parecidas aplicam-se em soluções ácidas em que o hidrogênio iônico é o reagente catódico, e novamente o ataque ocorre na superfície exposta perto da fresta (SHREIR et. al, 2000).

3.5. FORMAS DE PROTEÇÃO

Automóveis são construídos para um mercado internacional competitivo que é demandado não somente em desempenho do veículo e preço, mas também na percepção subjetiva do consumidor. Revestimentos resistentes a corrosão para o corpo do carro possui funções de proteção e estéticas, sendo que o aspecto estético aplica-se para aparência inicial de exposição e para evitar o desenvolvimento acelerado de manchas. Por estas razões, a qualidade e consistência dos revestimentos de pintura têm uma influência crucial não somente na durabilidade do veículo, mas também no potencial de venda (TALBOT, 1998).

A proteção contra corrosão do corpo do carro precisa ser durável, mas não ao ponto onde isto causará custos excessivos para manutenção além da expectativa de vida do veículo devido a outros fatores de limitação, assim como a degradação de partes móveis, obsolescência de tecnologia e mudanças no projeto. Todos estes aspectos de durabilidade são sincronizados em um objetivo de vida do projeto que para muitos automóveis é de seis ou sete anos (TALBOT, 1998).

O projeto de corpo de um automóvel é inevitavelmente um compromisso para pacificar diferentes interesses. Estilistas buscam um design atrativo das chapas e juntamente com uma monitoração dos custos para encontrar um preço competitivo. Engenheiros desenvolvem o projeto com tolerância de carregamento na estrutura para obter menor peso das partes contidas, adequadas para montagem robótica de uma linha de produção. Uma solução usual é a soldagem de partes do corpo, estrutura e caixas de seções cortadas e conformadas de chapas de baixo carbono laminadas a frio, promovendo assim resistência e dureza necessárias para utilização (TALBOT, 1998).

O incremento simultâneo da corrosão provocada pelo meio ambiente e do tempo das garantias de pintura do automóvel quer para corrosão cosmética, quer para corrosão perfurante, veio obrigar os fabricantes automóveis a

substituir o aço pelo aço revestido, como substrato de pintura (RAMOS et. al, 2008).

Com o objetivo de proteger o metal contra a corrosão e aumentar a aderência às pinturas e tratamentos subseqüentes, utiliza-se a técnica da fosfatação que consiste num tratamento químico dos metais. Este tratamento provoca o aparecimento de uma fina camada de fosfato insolúvel na superfície do metal (RAMOS et. al, 2008).

A proteção básica é por sistemas de pintura aplicados acima da camada do revestimento de fosfato que também proporciona ao veículo de forma adequada boa aparência. Isto é reforçado por selante plástico ou betuminoso onde experimentos mostram sua necessidade. Este é bastante adequado na maioria dos corpos, mas é preciso de atenção para as características vulneráveis reveladas em experiências em serviços e total avaliação da corrosão do veículo usando ensaios normatizados, assim como a exposição à ensaios de névoa salina (*salt spray*) e câmaras úmidas (TALBOT, 1998).

As chapas da frente e dos lados recebem as exposições mais intensas à danos mecânicos (batidas de pedra) e pulverização. Assim na prática moderna uma solução é usar chapas de aço estampadas revestidas com zinco para a proteção galvânica.

O zinco pode ser depositado eletroliticamente, depositado por imersão a quente (banho de zinco líquido) ou depósito por imersão a quente seguido de tratamento térmico de recozimento para a difusão do ferro e com o zinco (TALBOT, 1998), como será visto no item 3.6.3. A camada de zinco irá atuar como uma base para posterior fosfatação. A decisão de qual tipo de revestimento será utilizado é usualmente feita para a razão mais comum do mundo, o baixo custo (TALBOT, 1998).

Mediante as várias técnicas de proteção contra corrosão, a aplicação de tintas é uma das mais empregadas. Segundo RAMOS E CORREIA a pintura, como técnica de proteção anticorrosiva, apresenta uma série de propriedades

importantes, tais como a facilidade de aplicação e de manutenção, e pode proporcionar outras propriedades em paralelo, como, por exemplo:

- Finalidade estética;
- Impermeabilização;
- Diminuição da rugosidade superficial.

Na figura 6 observar-se um exemplo das camadas de revestimentos utilizadas na pintura de automóveis para a proteção contra corrosão.



Figura 6: Camadas de revestimento utilizadas em chapas de automóveis. (RAMOS et. al, 2008)

3.6. REVESTIMENTOS

Revestimentos de proteção são provavelmente os produtos mais utilizados para o controle da corrosão. Os revestimentos visam, sobretudo, isolar o material do meio que está exposto. São usados para promover um longo período de proteção sob um largo range de condições corrosivas, prolongando para exposição atmosférica que é a maior demanda das condições dos processos químicos (ROBERGE, 2000).

Os revestimentos também podem acrescentar um pequeno acréscimo na resistência estrutural e ainda protegem outros materiais com o objetivo de

preservar suas integridade e resistência. O fato é que revestimentos de proteção ocupam somente uma pequena fração do volume total de um sistema. Um revestimento necessita promover uma barreira do material, e qualquer imperfeição pode gerar um ponto de degradação e corrosão do substrato (ROBERGE, 2000).

A qualidade do revestimento depende de muitos fatores além da natureza dos materiais envolvidos. Operações de acabamento do metal são destinadas a inúmeras necessidades como para aumentar a resistência à corrosão ou abrasão, modificar a aparência, melhorar a adesão de outros materiais no substrato, acréscimo das características de atrito, aumento da dureza, melhoria da soldabilidade, adição de características elétricas, ou aumento da utilidade dos produtos (ROBERGE, 2000).

Revestimentos fundamentalmente fazem referência a uma grande quantidade de conceitos e propriedades. Uma propriedade crítica de uma pintura resistente à sujeira é, por exemplo, a inibição do crescimento de organismos vivos no revestimento. Um revestimento resistente a fogo, por outro lado, poderia resistir ou retardar a queima do substrato. Do ponto de vista da corrosão um revestimento é classificado pela resistência promovida antes da ocorrência da corrosão um ambiente específico, e porque existem muitas variações do ambiente corrosivo, existe também uma grande variedade dos revestimentos de proteção à corrosão. Estes podem ser de um modo geral divididos entre metálicos, inorgânicos e orgânicos (ROBERGE, 2000).

3.6.1. Revestimentos orgânicos

Os revestimentos orgânicos incluem pinturas, plásticos e materiais betuminosos. Estes podem ser divididos em partes levando em consideração a espessura do revestimento. Aqueles com espessura acima de 1mm, e aqueles com pequenas espessuras onde consistem as pinturas e vernizes, que são aplicados como líquidos ou resinas pulverizadas com espessura de aproximadamente 0,5mm (BAECKMANN, 1997).

Todos os revestimentos orgânicos mostram uma variedade de graus de solubilidade e permeabilidade para componentes com corrosão média, que podem ser descritas como a penetração e condutividade iônica. Uma separação absoluta do objeto de proteção não é possível por conta destas propriedades. Certos requisitos têm que ser conhecidos para proteção contra corrosão, que também podem contar com fatores eletroquímicos (BAECKMANN, 1997).

3.6.2. Revestimentos inorgânicos

Revestimentos inorgânicos podem ser produzidos por ação química, com ou sem assistência elétrica. Os tratamentos mudam uma camada da superfície do metal dentro de um filme de oxido metálico ou composto que possui melhor resistência à corrosão em comparação com o filme de óxido natural e promove uma base efetiva para uma proteção suplementar assim como as pinturas. Um exemplo deste tipo de proteção é o processo de anodização realizado em ligas de alumínio. Em algumas instâncias, estes tratamentos podem ser uma preparação antes da pintura como no processo de fosfatação ou ainda uma camada de proteção extra como no tratamento de deposição de camada de conversão com sais de íons como Cr^{3+} (ROBERGE, 2000).

3.6.3. Revestimentos metálicos

Revestimentos metálicos são aplicados em casos especiais onde a ação de proteção tem que ser assegurada por um revestimento ou produtos de corrosão. Proteção eletroquímica adicional pode ser significativa se o revestimento metálico também possuir vantagens fornecendo proteção eletroquímica (BAECKMANN, 1997).

Revestimentos de materiais mais nobres que o substrato metálico, por exemplo, o acoplamento cobre no ferro, estarão protegidos somente quando não existem poros. Em outros casos, corrosão severa localizada ocorre devido a formação de célula, que resultará em corrosão galvânica. Proteção catódica é teoricamente possível. Esta combinação de proteção não é muito eficiente, pois o aço revestido usualmente consome mais corrente de proteção que o aço não revestido. Revestimentos de materiais menos nobres que o substrato metálico, por exemplo, o acoplamento zinco no ferro, estarão protegidos somente se o produto de corrosão do metal revestido limitar o processo de corrosão. Ao mesmo tempo, a formação de células de aeração é impedida pelo metal revestido. Proteção catódica adicional para reduzir a corrosão do metal revestido pode ser vantajosa. Propriedades favoráveis de polarização e baixos requerimentos de corrente de proteção são possíveis, mas, precisam ser testados individualmente. Deve-se atentar a possibilidade de dano devido o empolamento e corrosão catódica (BAECKMANN, 1997).

Apesar de existirem vários tipos de revestimentos metálicos, neste estudo será somente abordado o revestimento com zinco, ou seja, os processos de galvanização.

3.6.3.1. Processos de galvanização

Revestimentos de zinco são geralmente utilizados para proteger aços, e estes satisfazem bem esta proposta porque o zinco possui um preço acessível, o processo de revestimento é fácil e a proteção galvânica é muito efetiva. O processo de eletrodeposição é usado como uma alternativa ao processo de galvanização de banho por imersão a quente onde o custo mais alto é justificado pelas apertadas tolerâncias dimensionais, sendo a eletrodeposição aplicada em roscas de parafusos ou por melhorar a aparência. Depósitos brilhantes são tecnicamente possíveis, mas o custo não freqüentemente justificado pelas aplicações usuais em que os revestimentos de zinco são usados. O zinco também pode ser eletrodepositado por ácidos e por banhos alcalinos, usando anodos consumíveis. A forma de operação é simples, mas

não tem bom desempenho para recobrimento de chapas complexas (TALBOT et. al, 1998).

Aproximadamente metade da produção mundial de zinco é usada para proteger os aços da oxidação. Revestimento de zinco provavelmente é o tipo de revestimento metálico mais importante para a proteção de aços. As razões para sua larga aplicação são: custo relativamente baixo, grandes reservas existentes e um amplo abastecimento de zinco disponível, grande flexibilidade nos procedimentos de aplicação que resulta em diferentes qualidades com bom controle da camada de espessura, promove boa proteção catódica nos aços e muitos sistemas de ligas especiais foram desenvolvidos com melhores propriedades de proteção contra corrosão (SCHWEITZER, 2007).

A habilidade para selecionar uma liga especial ou para especificar uma espessura de revestimento depende do tipo do processo de revestimento usado. Revestimentos de zinco podem ser aplicados de muitas formas (SCHWEITZER, 2007).

Os seis procedimentos comumente utilizados são os seguintes: galvanização por imersão a quente (*hot dipping*), eletrogalvanização (*zinc electroplating*), revestimento mecânico (*mechanical coating*), sherardização (*sherardizing*), revestimento pulverizado termicamente (*thermally sprayed coatings*), pintura de zinco em pó (*zinc dust painting*). O procedimento mais utilizado na indústria automobilística é a galvanização por imersão a quente, assim neste estudo será discutido somente este processo.

3.6.3.1.1. Galvanização por imersão a quente

Este é um processo em que um revestimento aderente de proteção que se compõe de zinco e zinco/ferro sendo desenvolvido em superfícies de produtos de ferro e aço por imersão em um banho de zinco fundido (ASM METALS, 1992xa e b; SCHWEITZER, 2007; TALBOT, 1998). O revestimento de proteção usualmente é constituído de várias camadas como pode ser observado em forma esquemática na Figura 7. As camadas juntas ao metal são

compostas de ferro-zinco, estas, uma após as outras, podem ser cobertas por uma camada externa quase que inteiramente de zinco (ASM METALS, 1992b).

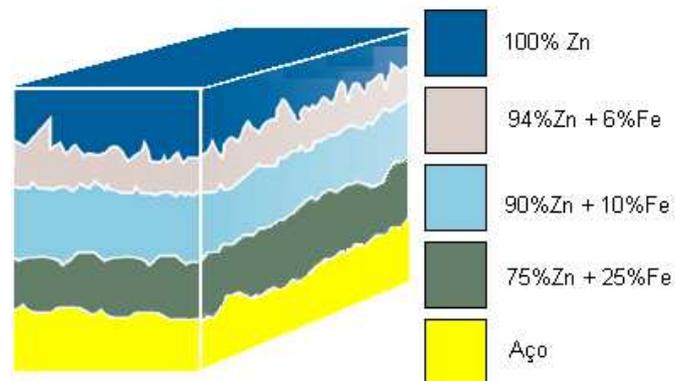


Figura 7: Esquema das camadas do revestimento de proteção.

A estrutura complexa das camadas que englobam um revestimento de galvanização varia muito em composição química e física e propriedades mecânicas, sendo afetadas por atividade química, difusão, e resfriamento subsequente. Pequenas diferenças na composição do revestimento, banho, temperatura, tempo de imersão, a taxa de resfriamento ou resfriamento posterior podem resultar em mudanças significantes na aparência e propriedades do revestimento (ASM METALS, 1992b).

Revestimentos de galvanização por imersão são produzidos em uma variedade de produtos de aço, utilizando métodos de produção em massa totalmente automatizados (ASM METALS, 1992b).

3.6.4. Ação galvânica da camada de revestimento

Revestimentos com metais menos nobres sobre metais mais nobres, se sacrificam para proteger o substrato metálico por meio da ação galvânica. Quando o metal de base é exposto para a atmosfera por resultado de mecanismo de dano ou coisa semelhante, a parte exposta do metal de base é polarizada catodicamente pelo potencial de corrosão da camada de revestimento. Como resultado, de nenhuma maneira a corrosão ocorre na parte exposta do metal. Um par galvânico é formado entre a parte exposta do metal

de base e o revestimento que o envolve. Metais de sacrifício são mais negativos em potencial eletroquímico que outros materiais como o ferro e o aço. Então, o metal de sacrifício age como um cátodo. Este tipo de reação de sacrifício de revestimento metálico é conhecido como galvânico ou como proteção catódica. Além disso, os defeitos são protegidos por uma segunda barreira de produtos de corrosão da camada de revestimento. A figura abaixo ilustra esquematicamente a ação galvânica de sacrifício do revestimento metálico (SCHWEITZER, 2007).

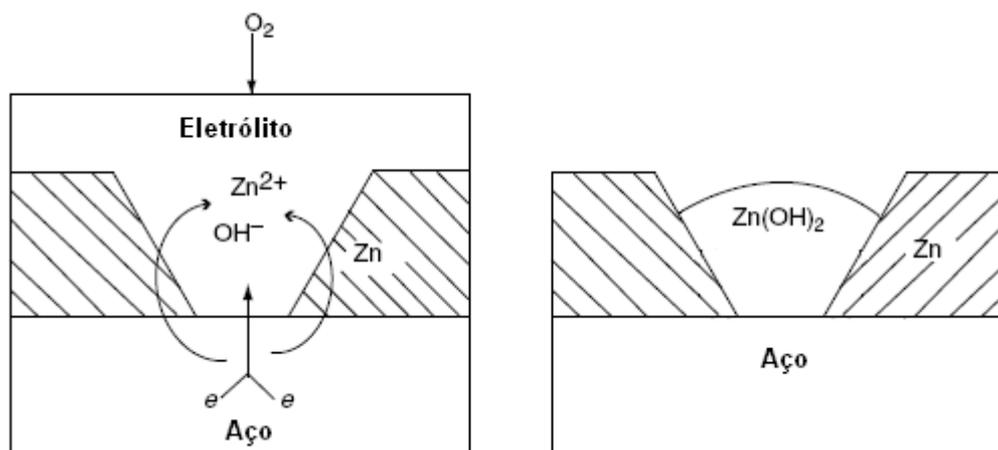


Figura 8: Ilustração esquemática da ação galvânica de sacrifício do revestimento metálico (SCHWEITZER, 2007).

3.7. ENSAIOS DE CORROSÃO

O desenvolvimento da corrosão é uma combinação das propriedades do material e com o meio que este está exposto. Assim, não existe um ensaio para todas as situações que os materiais são expostos quando em serviço. Fatores associados com o material e o meio poderiam ser considerados e controlados, quando necessário, para estabilizar apropriadamente a exposição durante o ensaio (ASM METALS, 1992a).

Ensaio de corrosão corretamente aplicados podem significar uma economia de milhões de dólares, pois, podem evitar o uso de materiais inadequados às condições ou a utilização de materiais mais caros do que

realmente seria necessário. Ensaios de corrosão também podem ajudar no desenvolvimento de novas ligas mais baratas, mais eficientes e mais seguras do que as ligas usadas atualmente para determinadas condições (ASM METALS, 1992a).

Estes ensaios de corrosão podem ser simples sendo realizados em poucos minutos ou horas, ou podem ser complexos, necessitando de uma combinação de trabalhos de um número de pesquisadores ao longo de anos de trabalho (ASM METALS, 1992a).

Um plano cuidadoso é essencial para obter resultados significantes e é gasto tempo para considerações de fatores metalúrgicos, variações do meio, tratamento estatístico, e a interpretação dos resultados dos ensaios acelerados sendo freqüente o máximo aproveitamento dos procedimentos de testes (ASM METALS, 1992a).

3.7.1. Objetivo dos ensaios

Para algumas situações em que se necessita a determinação do melhor material para uma aplicação, testes em condições especiais podem ser aplicados, até em caráter comparativo, para conhecer as condições de serviços em que o material estará exposto.

Depois que um material foi selecionado para uma aplicação, o fabricante e o comprador necessitam saber se a qualidade do material está como especificada. O controle de qualidade por meio dos ensaios de corrosão assegura que o material atente às especificações.

A aplicação dos ensaios de corrosão não requer comparação com o meio em que o material estará exposto em serviço. Isolado, ele não necessariamente revela que a liga será ou não o melhor produto. Ele simplesmente assegura que a qualidade do material possui resistência à

corrosão similar ao material em que os testes foram realizados quando produzidos (ASM METALS, 1992b).

3.7.2. Ensaio de névoa salina (salt spray)

O *Salt Spray* foi o primeiro ensaio de corrosão utilizado, por volta de 1914. Em 1939, o *salt spray* neutro foi incorporado pela *American Society of Testing and Materials (ASTM)* como ASTM B 117. O ensaio tradicional especifica uma exposição contínua em uma névoa salina a 5% a temperatura de 35°C (PAUSCH, 2004).

Este ensaio tem sido usado nos últimos 80 anos como ensaios acelerados para determinar a corrosividade de metais ferrosos e não ferrosos bem como o grau de proteção proporcionado por revestimentos orgânicos, inorgânicos e metálicos em uma base metálica. Este procedimento foi largamente discutido desde o início, porque a variação da reprodutividade e a correlação questionável dos resultados quando comparado com os resultados das condições reais em serviços. O objetivo primário do ensaio é promover um padrão de aceitação para comparar o desempenho de materiais e revestimentos com suas condições de trabalho (ASM METALS, 1992a).

Muitas revisões para os procedimentos de ensaio de *salt spray* e melhorias para as cabines de ensaios foram feitas ao longo dos anos através de esforços comuns do *National Bureau of Standards*, *American Society of Testing and Materials (ASTM)*, produtores de equipamentos, a indústria automotiva, e muitas agências governamentais americanas. Estas revisões foram eliminando variáveis que causavam muitas das críticas nos procedimentos do ensaio, tornando os resultados muito confiáveis e úteis (ASM METALS, 1992a).

3.7.3. Ensaio cíclico (cyclic tests)

Como a demanda para melhorar a proteção da corrosão cresceu, engenheiros e cientistas vêm trabalhando na tentativa de desenvolver procedimentos de testes para prever com exatidão a corrosão dos materiais. Na Inglaterra nos anos de 1960 e 1970, *Harrison and Timmons*, desenvolveram o ensaio cíclico *Prohesion*, que foi criado especialmente para uso da indústria de manutenção de revestimentos. Mais recentemente, a *Society of Automotive Engineers* (SAE) e o *American Iron and Steel Institute* (AISI) pesquisaram ensaios cíclicos para aplicações na indústria automotiva (PAUSCH, 2004).

Ensaio cíclico de corrosão destina-se a ser a maneira mais realista possível para executar ensaio de *salt spray* em comparação ao tradicional estado de exposição fixa. Como a exposição atmosférica alterna as condições úmidas e secas, isto faz sentido para ensaios acelerados padronizados de laboratório, reproduzindo as condições cíclicas naturais, porém de maneira acelerada. Pesquisas indicam que, com ensaios de corrosão cíclica, a taxa de corrosão relativa, estrutura e morfologia são similares aos vistos em ensaios ao ar livre. Conseqüentemente, ensaios cíclicos usualmente proporcionam uma melhor correlação com os ensaios ao ar livre em comparação ao ensaio de *salt spray*. Eles são efetivos para avaliação dos diversos mecanismos de corrosão, incluindo corrosão generalizada, galvânica, e corrosão por frestas (PAUSCH, 2004).

Estes ensaios destinam-se a produzir falhas representativas de um tipo de ambiente corrosivo encontrado ao ar livre. Os corpos de prova são expostos a uma série de diferentes ambientes em um ciclo representativo. Exposições simples como *Prohesion* podem consistir em ciclos entre névoa salina e secagem. Métodos automotivos mais sofisticados requerem múltiplos ciclos que podem incluir imersão, umidade, condensação, junto com névoa salina e secagem a temperaturas elevadas (PAUSCH, 2004).

Originalmente, estes procedimentos de ensaios automotivos foram designados para serem realizados manualmente por pessoal em laboratório alternando a amostra de câmaras de *salt spray* para câmaras de umidade para

as prateleiras de secagem, etc. Mais recentemente, câmaras controladas por microprocessadores estão sendo utilizadas para automatizar estas exposições e reduzir a variação (PAUSCH, 2004).

3.7.4. Cabines

Cabines para ensaios de corrosão vêm sendo utilizadas desde os anos de 1900 como um meio de avaliação do desempenho de revestimentos como uma ferramenta de controle de qualidade para monitoração de processos, e em alguns casos, como um método para acelerar a atividade não só corrosiva mas também de envelhecimento (MEADE, 2005).

Uma cabine para ensaios de corrosão é utilizada para produzir um ambiente que causará a ocorrência de corrosão em amostras. Alguns ambientes corrosivos comuns impostos em amostras para ensaios de corrosão são névoa salina, umidade, temperaturas altas e baixas, exposição ultravioleta, e gases corrosivos. Estes meios podem ser usados individualmente ou em combinação um a outro (MEADE, 2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas todas as condições, materiais e equipamentos utilizados para a realização do ensaio de *salt spray* em chapas com e sem galvanização.

4.1. MATERIAIS

Para a realização dos ensaios de corrosão foram utilizadas chapas de aço laminadas a frio galvanizadas e não galvanizadas, que atendem a especificação da *American Society for Testing and Materials* ASTM A 619M, com composição química de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Requisitos de composição química para aço ASTM A 619M.
(ASTM A 619 / A 619M-97, 1997)

Elemento	Composição Química % por peso
Carbono	0,02 / 0,10
Manganês, Max	0,5
Fósforo, Max	0,02
Enxofre, Max	0,030
Alumínio ^A	...
Silício ^A	...
Cobre, Max ^B	0,20
Níquel, Max ^B	0,20
Cromo, Max ^{B,C}	0,15
Molibdênio, Max ^B	0,06
Vanádio, Max	0,008
Colúmbio, Max	0,008
Titânio, Max	0,008

Notas:

^A - Onde aparecer os três pontos (...) na tabela acima, não existe requisito, mas pode ser registrado na análise.

^B - A soma de cobre, níquel, cromo e molibdênio não pode exceder 0,50% na análise. Quando um ou mais destes elementos é especificado, a soma não é aplicada, no caso, somente os limites individuais dos elementos remanescentes serão aplicados.

^C - Cromo é permitido, na opção do produtor, para 0,25% Máximo quando o carbono é menor ou igual a 0,05%. Neste caso, o limite da soma de quatro elementos na nota ^B não é aplicado.

As propriedades mecânicas deste aço é um item não mandatório de acordo com especificação ASTM A 619M, a chapa pode ser aceitável para a produção de partes com deformações profundas identificadas. O fabricante

pode assumir a responsabilidade para a seleção do aço, controle de processamento, e aptidão do material para produzir partes identificadas dentro dos limites estabelecidos na tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas típicas do aço ASTM A 619M
(ASTM A 619 / A 619M-97, 1997)

Propriedades Mecânicas Típicas ^{A,B}	
Limite de Escoamento (MPa) ^C	170 - 275
Elongação (50mm) (%) ^C	≥ 32
r _m , Valor ^D	1,0 – 1,5
N, Valor ^E	0,17 – 0,21

Notas:

^A – Os valores das propriedades mecânicas apresentadas não são mandatórios. Eles objetivam-se somente para fornecer ao comprador informações como possibilidade de fazer uma correta decisão no aço especificado. Valores fora da faixa especificada não são esperados.

^B – Estas propriedades mecânicas típicas aplicadas para toda a faixa de espessuras das chapas de aço. O limite de escoamento tende a aumentar e alguns valores de plasticidade tende a decrescer quando a espessura da chapa decresce.

^C – O limite de escoamento e alongação são medidos na direção longitudinal de acordo com a especificação ASTM A 370.

^D – Proporção média da deformação plástica como determinado na especificação ASTM E 517.

^E – Expoente do encruamento como determinado na especificação ASTM E 646.

As chapas foram galvanizadas pelo processo de imersão a quente (*hot-dipping*) e atendem a especificação ASTM A 619M, e a galvanização forneceu de 50 gramas de zinco por metro quadrado em ambos os lados da chapa.

As dimensões chapas galvanizadas e não galvanizadas foram as mesmas, 100mm de largura, 100mm de altura e 0,8mm de espessura, conforme croqui da figura 9.

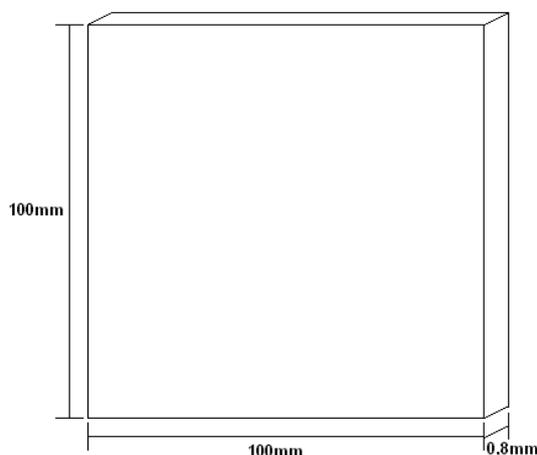


Figura 9: Croqui das chapas utilizadas no ensaio.

4.2. MÉTODOS

O ensaio de corrosão foi realizado conforme os requisitos da norma ASTM B 117.

Com a finalidade de estabelecer uma comparação entre as chapas com e sem revestimentos em um curto espaço de tempo, foi realizado ensaio acelerado de acordo com os requisitos da norma ASTM B 117, obedecendo as seguintes condições:

- Solução salina: cloreto de sódio (NaCl) em água deionizada a 5% (53g/L);
- pH da solução entre 6,5 e 7,2;
- Fluxo de névoa com média de 1-2 mL/hora;
- Temperatura (35 ± 2) °C;
- Inclinação dos corpos de prova entre 15 e 30°.

Foram expostos às condições acima citadas 14 corpos de prova, sendo 7 com galvanização e 7 sem galvanização, estes podem ser vistos na figura 10.



Figura 10: Disposição dos corpos de prova na câmara de corrosão.

Para verificar a capacidade do revestimento de zinco proteger o substrato de aço por ação galvânica foram feitas marcações (riscos) nas peças de aço galvanizado, como pode ser observado nas figuras 11 A e B.

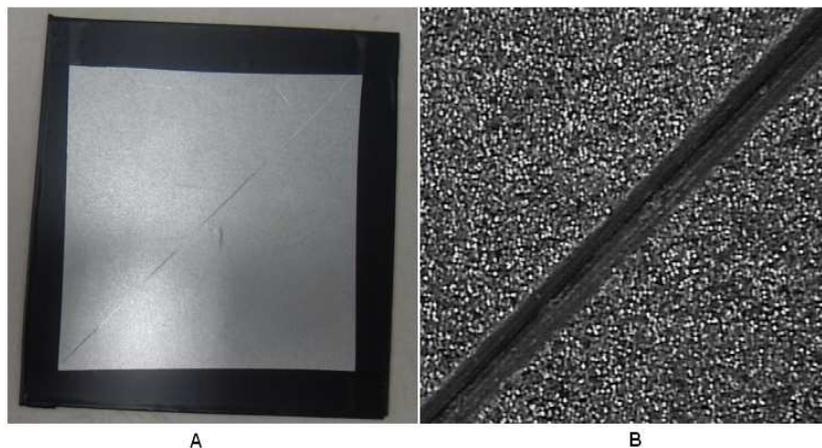


Figura 11: A) Chapa galvanizada preparada para o ensaio e B) Detalhe da marcação na chapa aumento de 40X.

Os parâmetros para a marcação das chapas foram feitos de acordo com os requisitos da norma ASTM D 1654, abaixo segue os parâmetros utilizados para a realização das marcações:

- Ferramenta com ângulo da ponta entre 70 a 90°;
- Somente a ponta da ferramenta deve estar em contato com a superfície;
- O corte deve ser uniforme e em forma de V;
- Quando somente um corte não for suficiente para a remoção do revestimento, o corte seguinte deverá ser feito na mesma direção do anterior;
- As extremidades da marcação devem estar a uma distância de 1,25 cm da margem da chapa.

A ASTM D 1654 diz que as bordas das capas podem ou não estar expostas, assim para este estudo as bordas das chapas galvanizadas foram protegidas com fita adesiva como pode ser visto na figura 11A, para evitar a corrosão nestas áreas, pois, as chapas foram cortadas e nesta região provavelmente não existia a proteção do zinco, o que onde poderia provocar

um ataque localizado não desejado. As chapas sem galvanização foram expostas sem a proteção nas bordas.

Os corpos de prova foram submetidos a limpeza antes da exposição para remoção de qualquer contaminante existente na superfície. Inicialmente os corpos de prova (CP) foram lavados com água corrente e detergente, depois com álcool. Após a lavagem com álcool os CP's foram secos e colocados no dispositivo de fixação para início do ensaio.

4.3. EQUIPAMENTO

Os equipamentos e dispositivos utilizados para a realização do ensaio de corrosão devem atender aos parâmetros estabelecidos pela ASTM B 117. A cabine deve manter a temperatura de $35 \pm 2^\circ$, assim como, ser capaz de fornecer de 1 a 2mL de solução em uma hora.

A figura 12 mostra a cabine de corrosão utilizada para a realização do ensaio.



Figura 12: Cabine de corrosão utilizada no ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de corrosão realizados em chapas com e sem galvanização

5.1. ENSAIO DE NÉVOA SALINA

Realizou-se ensaio de névoa salina (*salt spray*) nas chapas galvanizadas e não galvanizadas por um período de 130 horas.

As chapas sem galvanização, conforme figura 13, em menos de 24 horas de exposição à atmosfera salina, já apresentavam corrosão vermelha em praticamente 100% da superfície, como pode ser visto na figura 13B. Depois que toda a superfície da chapa foi tomada pela corrosão, a inspeção visual não era mais eficaz para a avaliação da severidade da corrosão no CP, por conta dos depósitos acumulados na superfície, como pode ser observado na figura 13C. A inspeção a partir deste ponto poderia ser realizada através da verificação da perda de massa após decação.

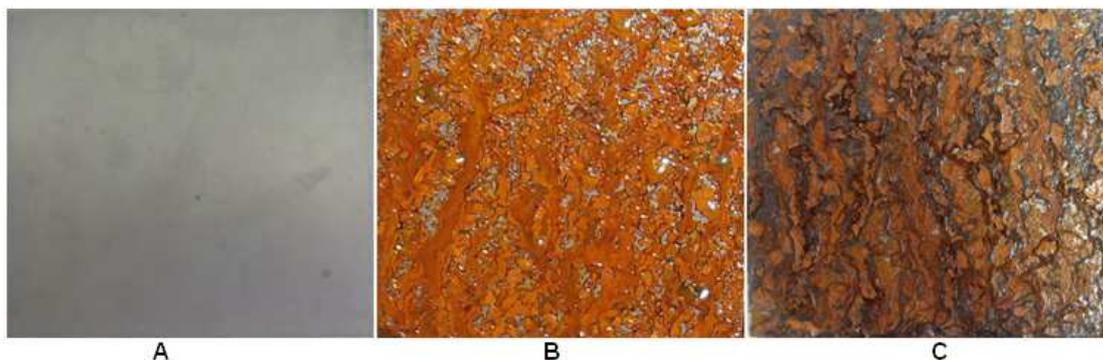


Figura 13: Evolução da corrosão nos corpos de prova sem galvanização. A) CP antes da exposição, B) CP com menos de 24 horas de exposição e C) CP com 130 horas de exposição.

As chapas galvanizadas, conforme figura 14, em menos de 24 horas de exposição à atmosfera salina, não apresentou nenhum vestígio de corrosão vermelha, como foi esperado, porém já apresentavam produtos de corrosão branca, ou seja, a degradação da camada de zinco. Verificou-se também que a marcação realizada no CP desapareceu visualmente, conforme figura 14B, isto provavelmente por conta dos produtos de corrosão acumulados sobre a

mesma encobrendo-a. Como foi explicado na revisão bibliográfica, item 3.4.3.9, o produto de corrosão do zinco adere a superfície do material, diminuindo a taxa de corrosão sobre as camadas inferiores e desta forma protegendo o substrato. A quantidade dos produtos de corrosão gerados foi grande, chegando a escorrer, como pode ser visto na figura 15.

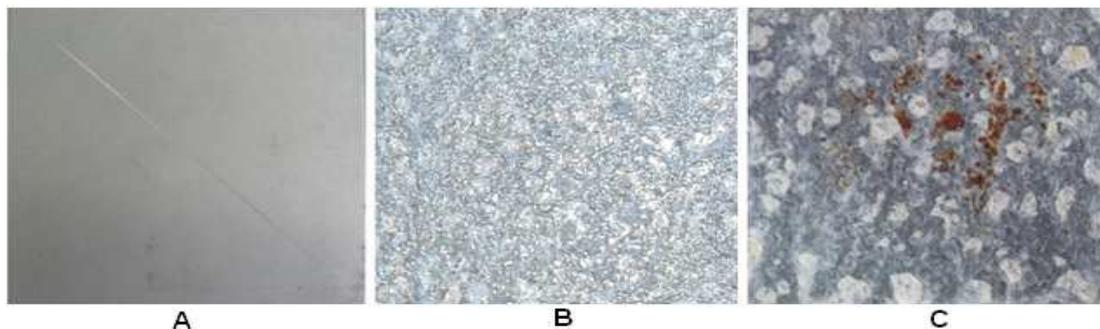


Figura 14: Evolução da corrosão nos corpos de prova galvanizados. A) CP antes da exposição, B) CP com menos de 24 horas de exposição e C) CP com 130 horas de exposição.



Figura 15: CP com 130 horas de exposição com elevada quantidade de produtos de corrosão.

Com o decorrer do ensaio os produtos de corrosão do zinco foram aumentando gradativamente. O ataque antes generalizado passou a ser mais localizado, com a formação de nódulos, como na figura 14C e 15. Estes nódulos inicialmente eram pequenas ilhas e finas placas, mas com o decorrer do ensaio, estas ilhas se tornaram mais largas e as placas mais arredondadas que aumentam de tamanho gradualmente até cobrir toda a superfície metálica.

Nas figuras 14C e 15, pode-se observar as regiões com corrosão vermelha nas chapas galvanizadas. A partir deste indício duas hipóteses podem ser levantadas, uma é que a corrosão atacou o percentual de ferro que existe nos intermetálicos a base de zinco das camadas mais interiores dos revestimentos por imersão a quente como está ilustrado na figura 7. Outra

suposição seria que a camada de revestimento já foi degradada nos pontos onde ocorreu a corrosão vermelha e desta forma o substrato metálico está sendo atacado.

5.2. COMPARAÇÃO COM COMPONENTES EM SERVIÇO

Neste item, os ensaios realizados serão comparados com alguns componentes automotivos em serviço.

Como visto no item anterior, as chapas galvanizadas apresentaram corrosão vermelha em 130 horas de exposição a névoa salina. Abaixo seguem duas fotos de componentes galvanizados (com a mesma espessura de camada das chapas ensaiadas) em automóveis com um ano em serviço localizados na região do motor. Pode-se observar que ambos não apresentam corrosão vermelha, mas mesmo assim apresentam indícios de corrosão branca, ou seja, corrosão da camada de zinco.

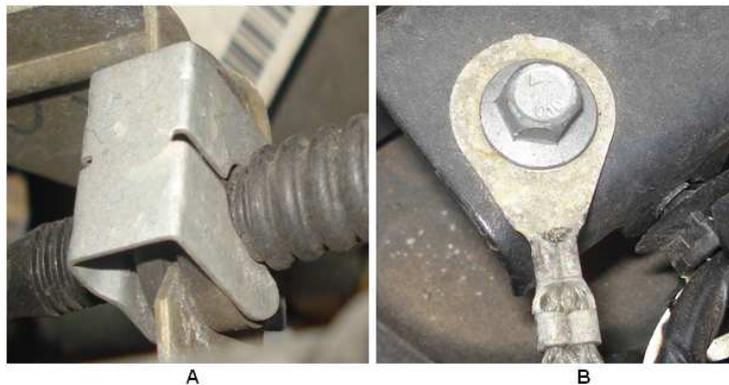


Figura 16: Componentes de aço galvanizado na região do motor. A) Bracket do acelerador com um ano de uso e B) Terminal cabo de aterramento com um ano de uso.

Assim pode-se afirmar que em um ano de exposição, a corrosão dos componentes não se aproxima aos resultados encontrados em 130 horas de exposição em atmosfera salina.

A atmosfera na região do motor pode não ser tão agressiva, mas existem agravantes como a variação constante de temperatura e a

possibilidade da presença de hidrocarbonetos, que podem promover mudanças na atmosfera, que ocasiona no aumento da sua agressividade.

A figura 17 mostra uma chapa de aço não galvanizada, porém pintado por eletro deposição (e-coat), na região do motor, com um ano de uso. Teoricamente este revestimento oferece uma proteção a corrosão superior ao dado nas chapas somente galvanizadas. No entanto, pode ser observada a corrosão vermelha no substrato. Este problema pode ser devido ao posicionamento e formato da chapa que é propícia ao acúmulo de água e resíduos, como areia. Percebe-se que somente a pintura da chapa não foi suficiente para a proteção da região. Comparando com os resultados do ensaio das chapas sem galvanização pode-se dizer que sem a pintura, os níveis de corrosão poderiam estar próximos aos encontrados nas chapas não galvanizadas em 130 horas de exposição salina.



Figura 17: Chapa de aço pintada na região do motor com um ano de uso.

De uma maneira geral, os ensaios acelerados de corrosão e sobre tudo o ensaio de névoa salina, são utilizados para prever a resistência à corrosão em serviço de partes metálicas. Contudo o fenômeno em campo mostra-se bem mais complexo. Sobretudo para veículos e corrosão atmosférica onde existem inúmeras variáveis que dependem desde o ponto de uso, até do clima e salinidade local a que o veículo é exposto. Desta forma o ensaio de névoa salina não se apresenta como um bom meio de previsão de resistência a corrosão em serviço, sendo mais útil na comparação entre tipos diferentes de

proteção ou mesmo de material e informações complementares com relação ao desempenho em serviço.

5.3. COMPARAÇÃO COM OUTROS ENSAIOS

Como foi discutido no item 3.7.3, os ensaios cíclicos visam obter uma taxa de corrosão relativa possível de ser comparada a corrosão em serviço. As empresas montadoras de veículos trabalham no desenvolvimento destes ciclos para satisfazerem suas próprias necessidades. A tabela 3 mostra um exemplo de ciclo misto aplicado por uma destas montadoras.

Tabela 3: Ciclo para realização de ensaio cíclico automático.

Ensaio cíclico automático			
Intervalo	Condições Iniciais de teste	Condições finais de teste	Tempo
1	23°C e UR de 50%	<i>Salt Spray</i> inicial das amostras	1 minuto para molhar as partes
2	23°C e UR de 50%	23°C e UR de 50%, sem spray	4 minutos, intervalo de 1 minuto, 3X
3	23°C e UR de 50%	55°C e UR de 10%	30 minutos
4	23°C e UR de 50%	55°C e UR de 10%	2 horas e 30 minutos
5	55°C e UR de 10%	55°C e UR de 85%	30 minutos
6	55°C e UR de 85%	55°C e UR de 85%	20 horas e 15 minutos

A figura 18 mostra uma foto de um CP de uma peça em aço baixo carbono não galvanizada, submetida a 8 ciclos iguais ao da tabela 3, que resulta em aproximadamente 192 horas de ensaio, tempo superior ao ensaio de *salt spray* realizado, porém com resultado visual comparável, como pode ser visto na figura 13C. Contudo, não é possível afirmar que o resultado é o mesmo. Uma comparação só seria possível com medidas de taxa de corrosão em termos de perda de massa ou de espessura por tempo.



Figura 18: Corpo de prova de aço não galvanizado submetido a ensaio cíclico (8 ciclos).

6. CONCLUSÕES

Levando-se em conta os materiais utilizados e a metodologia empregada, é possível concluir que:

1 - As chapas de aço carbono sem galvanização apresentaram corrosão vermelha em 100% de suas superfícies em menos de 24 horas de exposição à névoa salina.

2 - As chapas com galvanização apresentaram corrosão branca em quase 100% de suas superfícies em menos de 24 horas de exposição à névoa salina.

3 - Os produtos de corrosão do zinco são solúveis em água e aderem a superfície do material protegendo o substrato do ataque corrosivo.

4 - As chapas galvanizadas com 50 gramas de zinco por metro quadrado apresentam os primeiros indícios de corrosão vermelha em ensaio de *salt spray* com 130 horas de exposição.

5 - Apesar da grande utilização do ensaio de *salt spray* na indústria automobilística, é difícil estabelecer uma correlação de seus resultados com o de componentes em serviço.

6 - O desenvolvimento de ensaios cíclicos de corrosão é muito útil, pois possibilita uma melhor previsão da durabilidade de partes metálicas, pois são efetivos para avaliação dos diversos mecanismos de corrosão.

7 - A avaliação da corrosão das chapas por inspeção visual é pouco efetiva, sendo melhor a aplicação de medições de espessura ou da perda de massa.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podemos citar a continuação deste estudo no que se refere a ensaios cíclicos de corrosão e sua relação com os dados de campo bem como as diferenças entre os dados de campo para veículos que rodam em regiões costeira e no interior.

Outra sugestão seria a influência da corrosão na depreciação dos veículos que rodam na região costeira com relação a regiões não influenciadas pela costa.

REFERÊNCIAS

ASM METALS HANDBOOK, **Corrosion**. vol. 13. USA: ASM International Material, 1992a.

ASM METALS HANDBOOK, **Surface Engeneering**, vol. 5, ASM International Material, USA, 1992b.

ASTM A 619 / A 619M-97, **Standard Specification for Non-Killed Forming Steel (NKFS) Sheet, Carbon, Cold-Rolled**, American Society for Test and Materials, 1997.

ASTM B 117 – 07a, **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**, American Society for Test and Materials, 2008.

ASTM D 1654 – 08, **Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments**, American Society for Test and Materials, 2008.

BAECKMANN, W. V., et al, **Handbook of Cathodic Corrosion Protection: Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes**. Gulf Professional Publishing, Houston (1997).

CARMONA, Luz Marina Ocampo, **Influência dos Elementos de Liga na Corrosão de Aços Patináveis**, Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FUENTE, D. DE LA et al., **Long-Term Atmospheric Corrosion of Zinc**, Madrid, 2006.

GENTIL, V.; **Corrosão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1996.

HUHN, R.; **Corrosão em Tubulações** - ABRACO – Associação Brasileira de Corrosão, 2002. Disponível em: < <http://www.abraco.org.br/> >. Acesso em: 01 dez 2009

KOZLIK, Antônio, **Sistemática para Análise de Falha por Corrosão em Componentes Mecânicos Metálicos**, Dissertação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

L. VELEVA, et. al, **Atmospheric Corrosion of Zinc Induced by Runoff**, Merida, 2009.

MEADE, C. L., **Accelerated Corrosion Testing, National Exposure Testing**. Sylvania. Ohio, 2000.

MEADE, Cynthia L., **Corrosion Tests and Standards Manual**, American Society of Tests and Materials, Baltimore, 2005.

OLIVEIRA, Eudes M., **Utilização da Proteção Catódica para Sistema de Dutos e/ou Torres de Transmissão Mediante Geração Fotovoltaica**, Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PANNONI, Fábio D., **Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio**, 2ª Edição, Gerdau, 2004.

PAUSCH, Gerhard, **Introduction to Cyclic Corrosion Testing**, Galvanotechnik, Bad Saulgau, 2004.

PEREZ, Nestor, **Electrochemistry an Corrosion Science**, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.

RAMOS, João, CORREIA, Diva, **Proteção Anticorrosiva na Indústria Automóvel**, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

ROBERGE, P. R., **Handbook of Corrosion Engineering**. The McGraw-Hill Companies, New York (2000).

SCHWEITZER, P. A., **Corrosion of Linings and Coatings: Cathodic and Inhibitor, Protection and Corrosion Monitoring**, CRC Press, Boca Raton (2007).

SHREIR, L.L., JARMAN, R.A., BURSTEIN, G.T., **Corrosion – Metal/Environment Reactions**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

TALBOT, D., TALBOT, J., **Corrosion Science and Technology**. CRC Press, Boca Raton (1998).

VERGÉS, Giseli Ribeiro, **Estudo do Desempenho de Sistemas de Pintura para Materiais das Redes de Distribuição de Energia Elétrica Situadas em Regiões Litorâneas**, Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.