



Congresso Internacional de Pintura e
Revestimentos Anticorrosivos



Ensaio acelerados de corrosão em laboratório Resultados e Interpretação

Leonardo Mukim



Agenda

1. **Visão geral da corrosão**
2. **Por que precisamos de ensaios acelerados de corrosão?**
3. **Métodos de ensaio acelerado**
4. **Interpretação de resultados**
5. **Tipos de falhas**
6. **Correlação com a exposição natural**
7. **Conclusões**

Corrosão – Introdução

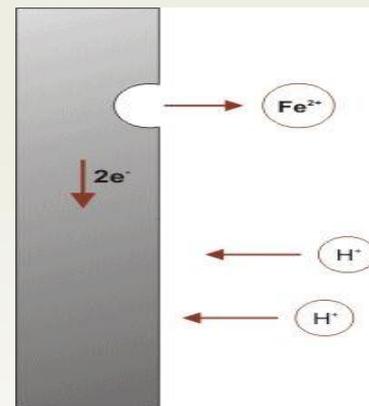
Ferrugem é o termo comum para **corrosão**, geralmente a corrosão do aço, e é composta por uma mistura de óxidos e hidróxidos de ferro.

➤ **O aço é predominantemente feito de ferro e carbono**

O ferro é encontrado naturalmente no minério Hematita, como óxido de ferro (Fe_2O_3) e Pirita (FeS_2).

A ferrugem é formada quando os compostos de ferro são oxidados na presença de oxigênio e água.

➤ **Produção de óxido de ferro (III) – Fe_2O_3 (Ferrugem)**



Corrosão – Química da Ferrugem

A química da ferrugem pode ser explicada em 3 etapas básicas:

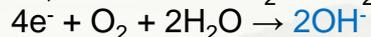
1. A formação de Ferro (II)

O Ferro é oxidado a Ferro (II) ao entrar em contato com a água



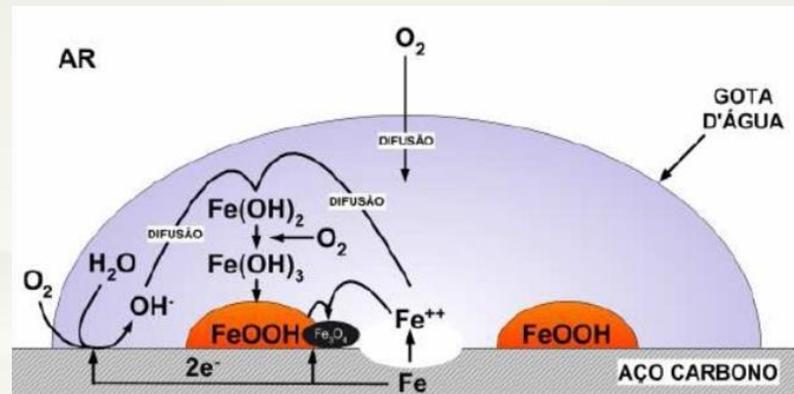
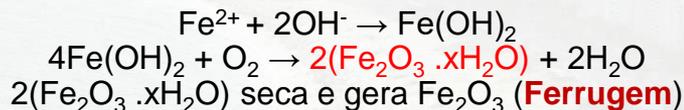
2. A formação de íons hidróxido

Os e^{-} liberados se movem para a borda da interface água/ar, que é rica em O_2 dissolvido, reduzindo o O_2 e a H_2O em **íons hidróxido**



3. Íons hidróxido reagem com o Ferro (II)

Os íons hidróxido reagem com os íons Ferro (II) na presença de O_2 para formar **Óxido de Ferro Hidratado (III)**



Corrosão – Fatores que influenciam

- ✓ Água salgada (água do mar) aumenta a taxa de corrosão, devido à maiores concentrações de íons cloreto, aumentando, portanto, a condutividade da solução (eletrólito) em comparação à água doce.
- ✓ **A corrosão também é acelerada na presença de ácidos.**
- ✓ **A corrosão é inibida por álcalis.**
- ✓ O óxido de ferro hidratado (III) é permeável à água e ao ar, de modo que o metal “limpo” sob a área enferrujada continuará a corroer até que a estrutura de aço se deteriore completamente.
- ✓ **A posição do metal na Série Galvânica.**

Ambiente de serviço – Estresse

Os revestimentos são degradados pela exposição ao estresse induzido pelo ambiente.

Ensaio acelerados devem simular os ambientes de serviço.

Tipos de estresse incluem:

- Luz solar – UV ataca o sistema de resina do revestimento
- Chuva / Umidade – Entrada de umidade
- Poluição do ar – Contaminação acelera a taxa de corrosão
- Contato químico – Degrada o revestimento
- Imersão (água do mar / doce) – Absorção de água
- Ciclo de temperatura – Aumento de estresse

“Efeito Sinérgico”

Por que precisamos de ensaios acelerados de corrosão?

- ✓ A exposição em ambiente natural leva muito tempo, em média de 5 a 10 anos.
- ✓ Falta de track record de novas tecnologias.
- ✓ Crucial para o desenvolvimento de novos produtos.
- ✓ Indica pontos fortes e fracos do revestimento.
- ✓ Permite cronogramas de testes de curto prazo.
- ✓ Fornece confiança em relação ao desempenho.
- ✓ Atende às expectativas do cliente.

“Constrói uma imagem de desempenho”

O que os ensaios acelerados de corrosão podem nos dizer?

Medição de desempenho em relação a um estresse simulado.

As comparações com produtos de “controle”, de desempenho conhecido, são vitais para compreender os resultados.

➤ Classificação

Os tipos de falha produzidos são semelhantes aos vistos no ambiente real?

➤ Correlação Analítica

Ajuda a entender o desempenho em relação à formulação.

➤ Forças / Fraquezas



Corrosão acelerada – Limitações

Nenhum ensaio acelerado único pode ser especificado como uma simulação completa das condições reais do ambiente natural.

- **Não há um “fator de aceleração” mágico.**
- **Condições excessivamente agressivas podem produzir resultados “não realistas”.**
- **Os ensaios geralmente são realizados em condições “ideais” de laboratório.**
- **Nem todos os resultados são reprodutíveis (laboratório para laboratório).**

Métodos de ensaio acelerado

Offshore



Energia



HPI



Infraestrutura



Mineração



Observações importantes – Corrosão atmosférica

Os ensaios acelerados de corrosão em laboratório são projetados para criar condições corrosivas agressivas – **Acelerar a falha do revestimento.**

Testes têm sido utilizados para avaliar o desempenho dos revestimentos nos piores cenários, ou seja, de alta salinidade e alta corrosividade.

- **Áreas costeiras**
- **Offshore**
- **Indústria pesada (energia, mineração, química, etc.)**

Áreas de baixa corrosividade, como as rurais e urbanas, ainda utilizam testes agressivos!

- **Muito agressivo pode ser não realista.**

Tipos de ensaios de corrosão não cíclico e cíclico.

Ensaio não cíclicos de corrosão

- Os testes não cíclicos de corrosão são aqueles em que um painel de teste revestido é exposto a um conjunto predeterminado de condições que não se alteram ao longo do período do teste, isto é, as condições são **estáticas**.
- Câmaras ou cabines são usadas.



Ensaio não cíclicos de corrosão

ISO 9227 – Salt Spray Contínuo (Neutro)

- Tem sido usado por cerca de 80 ou 90 anos.
- A ideia deste teste é simular as atmosferas corrosivas encontradas em ambientes costeiros e offshore.
- Eletrólito 5% NaCl a 35°C.
- pH neutro.



Ensaio não cíclicos de corrosão

ISO 6270 – Condensação Contínua

- A ideia deste teste é simular um ambiente úmido contínuo, no qual se forma condensação na superfície do painel de teste revestido.
- Água aquecida a 40°C.
- As durações variam dependendo da Norma.



Ensaio não cíclicos de corrosão

- Estes 2 testes têm a vantagem de serem fáceis e de baixo custo de execução, com o uso de equipamentos prontamente disponíveis, e métodos e normas de teste bem estabelecidos.
- A principal desvantagem é que eles não levam em consideração o efeito combinado das variações de temperatura, luz solar, e condições úmidas e secas, conforme observado em padrões naturais do clima.
- Simplificando, não são uma boa simulação do ambiente atmosférico natural.
- **Como consequência, provou-se terem uma fraca correlação com o desempenho real dos revestimentos em serviço.**

Ensaio não cíclicos de corrosão

- Havia claramente uma necessidade de introduzir elementos como flutuação de temperatura e simulação da luz solar, na tentativa de melhorar a correlação com o desempenho de campo.
- Isto trouxe uma abordagem alternativa para a realização de testes de corrosão que simulem ambientes atmosféricos, os **ensaio cíclicos de corrosão**.



Ensaio cíclicos de corrosão

- Os ensaios cíclicos de corrosão têm sido descritos como uma simulação mais realista da exposição atmosférica natural, pois levam em consideração todos os elementos do intemperismo em uma repetição cíclica.
- O período de secagem nestes testes permite que a umidade saia do revestimento, e seja reabsorvida durante o tempo de umedecimento subsequente.
- Para ter todos os elementos naturais, é necessário ser capaz de simular a **luz solar natural**.



Ensaio cíclicos de corrosão

Corrosão / Intemperismo combinados

- À medida que o revestimento se degrada com a exposição aos raios UV, sua capacidade de proteção contra a corrosão é reduzida.



Ensaio cíclicos de corrosão

- No ensaio de envelhecimento da **ISO 12944-9**, há uma variação de temperatura entre **-20°C** e **60°C**.
- Submeter os sistemas de revestimentos a um ciclo térmico levará a um “estresse térmico” mais rigoroso, que pode provocar craqueamento.
- Qualquer umidade retida no filme, devido à condição cíclica, sofrerá expansão volumétrica à medida que congela.



Salt Spray Contínuo – Não Cíclico

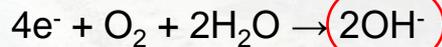


Alquídico

Salt Spray Contínuo

- Aparente corrosão e bolhas na região da incisão
- Resultado **ruim?** após 216 h de exposição

Cortesia:
Fernando Fragata

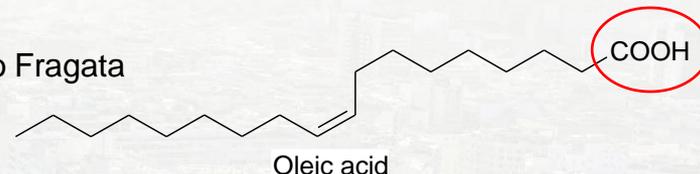


Alquídico

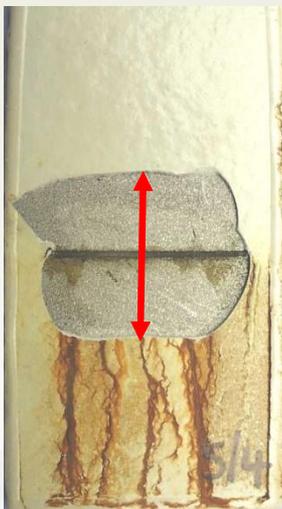
Atmosfera Marinha

- 8,5 meses de exposição
- Muito bom desempenho

Cortesia:
Fernando Fragata



Salt Spray Contínuo – Não Cíclico



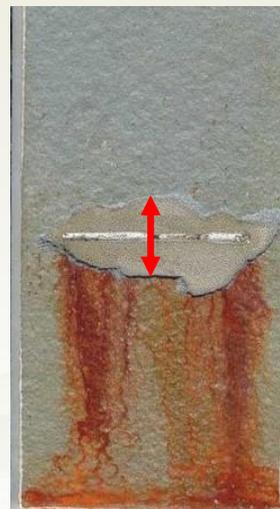
Epóxi de Altos Sólidos

Tipo de falha

- > 20 mm de “descolamento” do revestimento
- Resultado ruim? após 4000 h de ensaio

Desempenho de Campo (C5)

- > 10 anos de Track Record
- Nenhuma falha de descolamento observada
- Muito bom desempenho



Epóxi de AS com flocos de vidro

Tipo de falha

- > 15 mm de “descolamento” do revestimento
- Resultado ruim? após 4000 h de ensaio

Desempenho de Campo (C5)

- > 20 anos de Track Record
- Nenhuma falha de descolamento observada
- Muito bom desempenho

Salt Spray Contínuo – Não Cíclico



Poliuretano Acrílico

Salt Spray Contínuo

- Formação de bolhas na região da incisão
- Resultado **ruim?** após 1990 h de exposição

Empolamento Catódico

Cortesia: Fernando Fragata

Ambiente de baixa corrosividade (rural / urbano)



Sistema de revestimentos para áreas de baixa corrosividade (150 μm)

- 500 h de ensaio de Salt Spray Contínuo
- Formação severa de bolhas e corrosão
- **Resultado muito ruim**
- *Tipo de falha difere da observada na exposição atmosférica*
- *Sistema de revestimentos apresenta bom desempenho no ambiente real de serviço*
- **Não há correlação analítica com a exposição de campo**

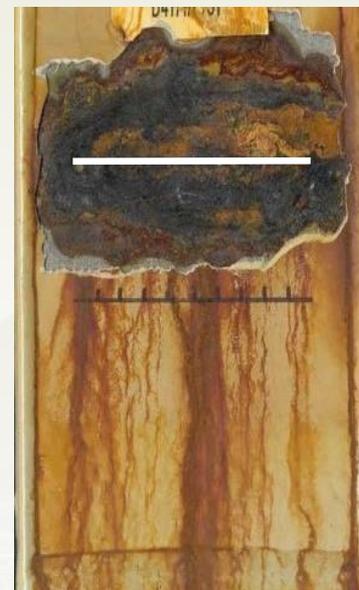
A importância da incisão

Incisão nos painéis de teste para simular um dano ao revestimento

- A incisão fornece informações valiosas relacionadas às propriedades anticorrosivas do sistema de revestimentos.
 - **Capacidade de prevenção do avanço de corrosão**
- Foco da degradação do revestimento em muitos testes.
- Permite **CLASSIFICAÇÃO** dos sistemas de revestimentos quanto ao desempenho.
- Permite **CORRELAÇÃO** com desempenho de campo.

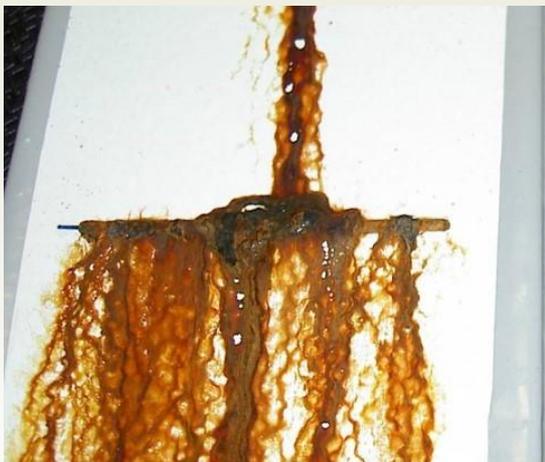


Falhas de corrosão devido ao dano (incisão)



Avanço de corrosão / Avanço de corrosão sob o filme

Tipo de falha na incisão



Salt Spray Contínuo

Sem bolhas na incisão



Ensaio Cíclico

Bolhas na incisão



Exposição Natural

Bolhas na incisão

Ensaio não cíclicos de corrosão (área atmosférica)



Salt Spray Contínuo
ISO 9227, ASTM B 117

Painel de teste exposto a um conjunto de condições “estáticas”.

➤ Umidade, eletrólito e temperatura são constantes.

Vantagens:

- Fácil de operar e de baixo custo.
- Equipamentos prontamente disponíveis.
- Métodos de teste bem estabelecidos.

Desvantagens:

- Sem “efeito sinérgico”.
- Sem ciclo úmido / seco, e de temperatura.
- Sem exposição aos raios UV.

Ensaio cíclicos de corrosão (área atmosférica)



Congelamento
ou
Secagem ao ar



Painel de teste **“alterna”** em condições diferentes.

- Efeito sinérgico de umidade, temperatura, UV, eletrólito, etc.

Vantagens:

- Inclui condições úmidas / secas, quentes / frias.
- Inclui exposição aos raios UV.
- Simulação aprimorada do “efeito sinérgico” do ambiente natural.

Desvantagens:

- Aumento do custo para executar os testes – vários equipamentos necessários, além de mão de obra.

Resumindo...

Não Cíclico	Cíclico
<p>Interpretação dos resultados</p> <p><i>Condições estáticas podem causar:</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Fraca correlação com o tipo de falha de campo• Classificação do sistema de revestimentos pode ser difícil	<p>Interpretação dos resultados</p> <p><i>Condições sinérgicas fornecem:</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Correlação aprimorada com o tipo de falha de campo• Melhor classificação do sistema de revestimentos
<p>Consequências para novas tecnologias</p> <ol style="list-style-type: none">1. Muito pouca confiança nos resultados2. Formulações <u>não devem</u> ser alteradas com base nos resultados	<p>Consequências para novas tecnologias</p> <ol style="list-style-type: none">1. Maior confiança nos resultados2. Modificações nas formulações podem ser realizadas com base nos resultados

Validação de corrosão / intemperismo

A SSPC testou:

- **15 sistemas diferentes**
- **Exposição natural x acelerada**
 - 31 meses
- **Ensaio acelerados**
 - Salt Spray Contínuo
 - Prohesion
 - 2 tipos de ensaio cíclico de imersão
 - Ensaio combinado de corrosão e intemperismo (cíclico)



Resultados de Testes SSPC

Método de Teste de Laboratório	Correlação com o Ambiente Marítimo Severo
Salt Spray Contínuo	-0,11
Prohesion	0,07
Ensaio Cíclico de Imersão	0,48
Ensaio Cíclico de Imersão com UV	0,61
Ciclo Combinado de Corrosão e Intemperismo	0,71

Resultados indicam o coeficiente de classificação de Spearman:

1,0 = correlação perfeita; 0 = randômico; -1,0 = correlação reversa perfeita

Conclusões

- Nos últimos anos, houve uma melhoria significativa nos métodos e na qualidade dos ensaios acelerados de corrosão em laboratório.
- De maneira geral, os métodos atuais (cíclicos) fornecem uma boa correlação na classificação dos revestimentos, comparado ao que é observado no ambiente natural. Entretanto, deve ser enfatizado que ainda não fornecem necessariamente uma correlação analítica direta com o tempo de vida dos revestimentos no ambiente real de serviço.
- Sempre haverá oportunidades de melhoria quanto à realização de ensaios acelerados cada vez mais realistas dos sistemas de revestimentos.

PERGUNTAS?



Ensaio acelerados de corrosão em laboratório

Resultados e Interpretação

Leonardo Mukim

E-mail: leonardo.moraes@jotun.com.br

Telefone: (21) 3147-3812

LinkedIn



Obrigado