



Congresso Internacional de Pintura e  
Revestimentos Anticorrosivos

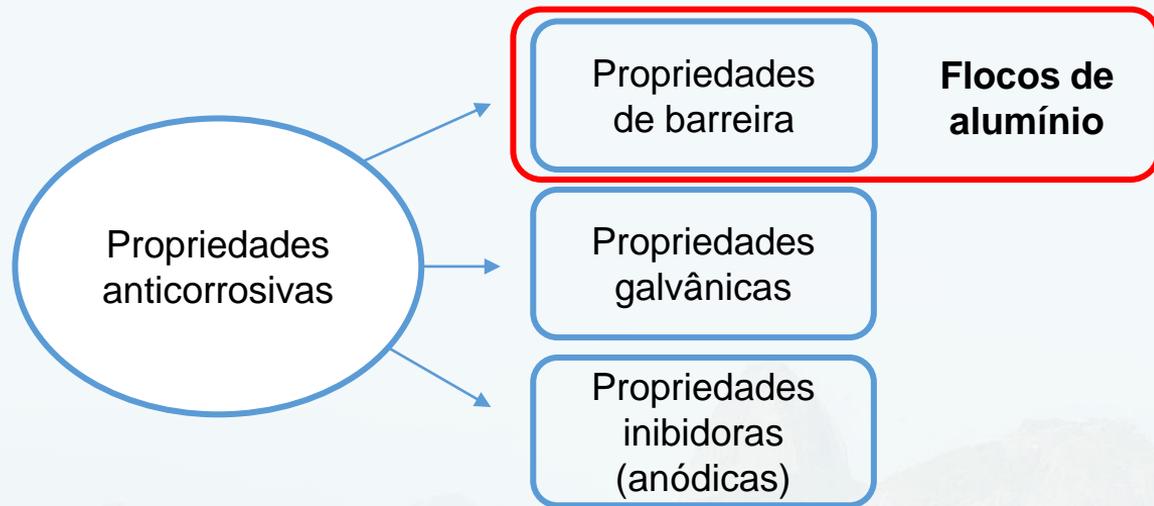


# OS FLOCOS DE ALUMÍNIO SÃO SEMPRE IMPORTANTES COMO PIGMENTOS DE BARREIRA?

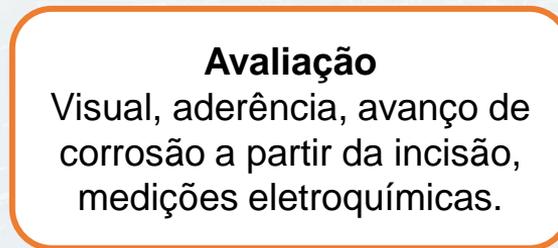
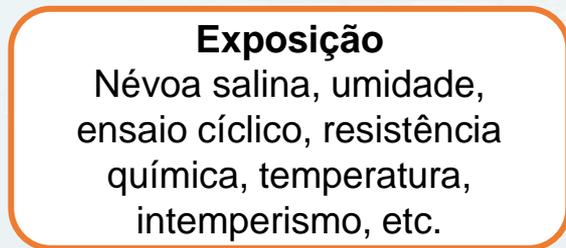
Leonardo Mukim  
Andreas Loken



# Propriedades anticorrosivas e caracterização

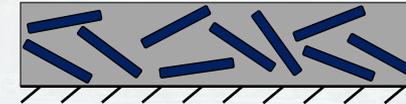
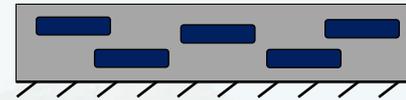
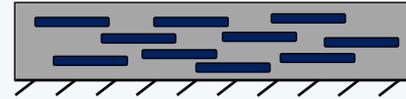


## Caracterização



# O que são propriedades de barreira?

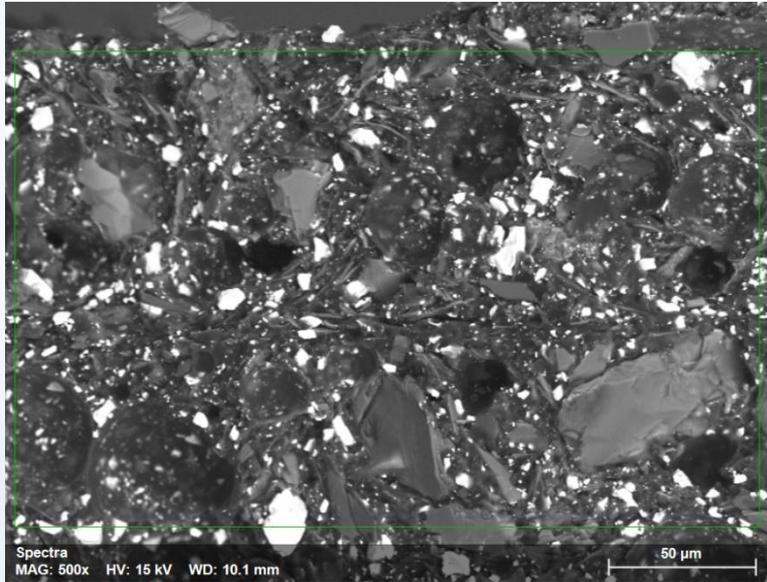
- Obstáculo mecânico para o caminho de agentes corrosivos através do filme.
- Baseia-se em ter pigmentos semelhantes a flocos lamelares, orientados paralelamente ao substrato.
- Pigmentos de barreira mais utilizados:
  - Flocos de vidro
  - Flocos de alumínio
  - Óxido de ferro micáceo (MIO)
- Concentrações específicas de pigmento de barreira podem não resultar em propriedades de barreira semelhantes.



Mesma  
concentração  
de pigmento –  
resultados  
muito diferentes

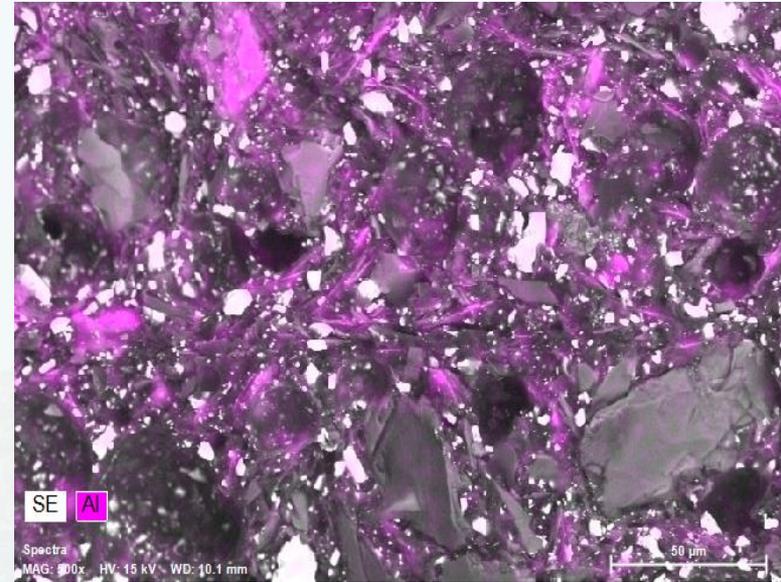
# Imagem de MEV

## MEV



MEV da seção transversal de filme livre (2 x 125 μm) de revestimento epóxi com 9% de Al na composição

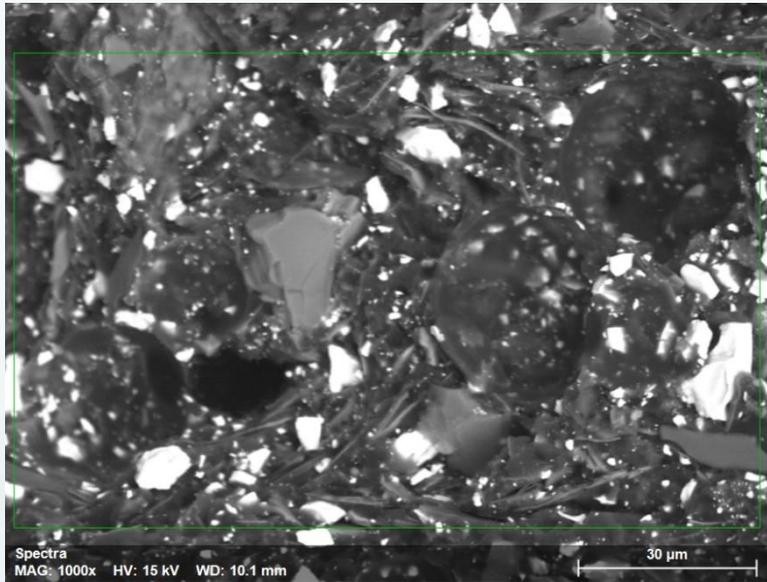
## MEV com EDS



Mapa elemental com imagem MEV correspondente, exibindo apenas Al como o elemento de interesse

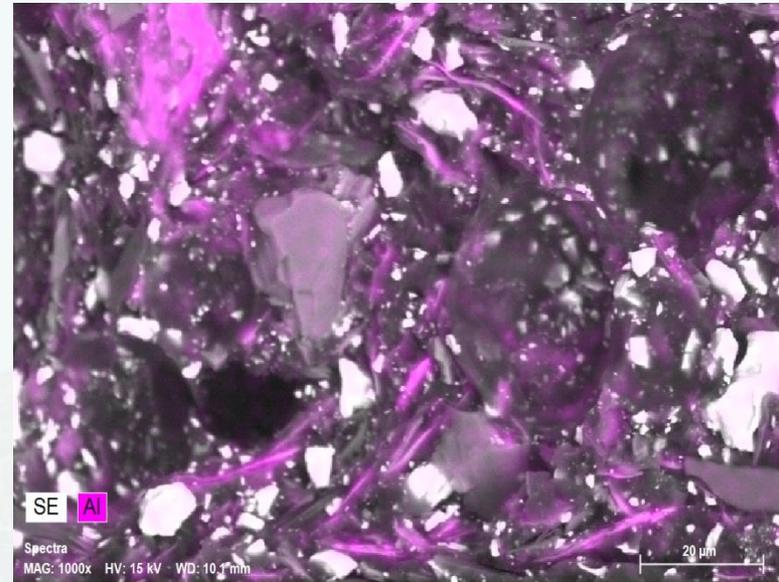
# Imagem de MEV

## MEV



MEV da seção transversal de filme livre (2 x 125 μm) de revestimento epóxi com 9% de Al na composição

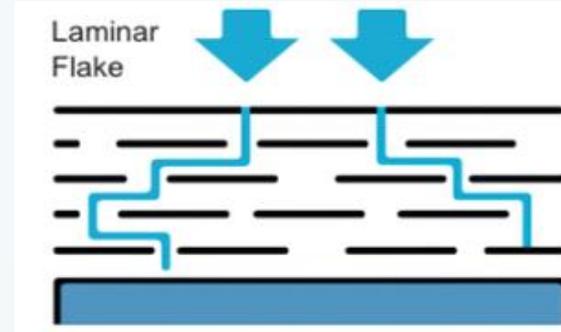
## MEV com EDS



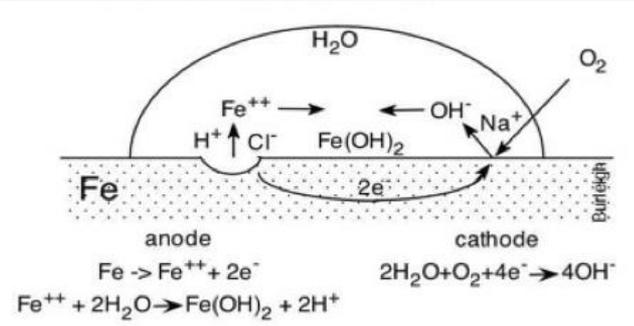
Mapa elemental com imagem MEV correspondente, exibindo apenas Al como o elemento de interesse

# Pigmentos em flocos de alumínio

1. Redução do descolamento catódico

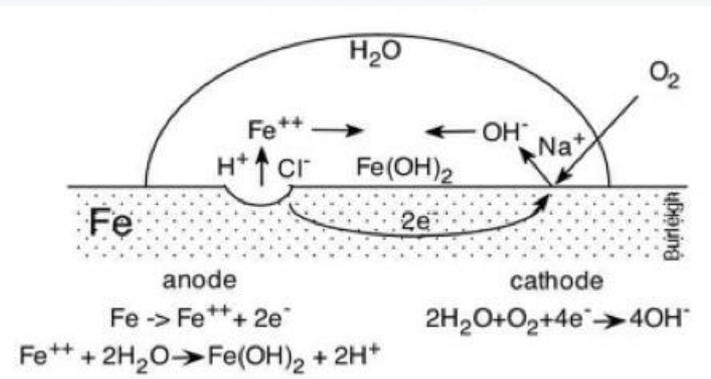


2. Melhoria da propriedade de barreira

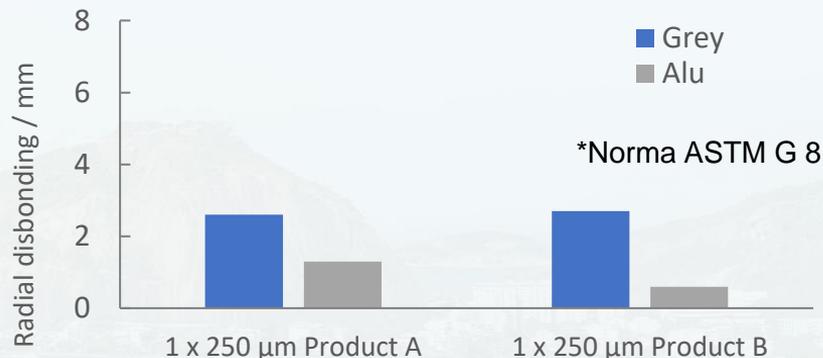


# Pigmentos em flocos de alumínio

## 1. Redução do descolamento catódico



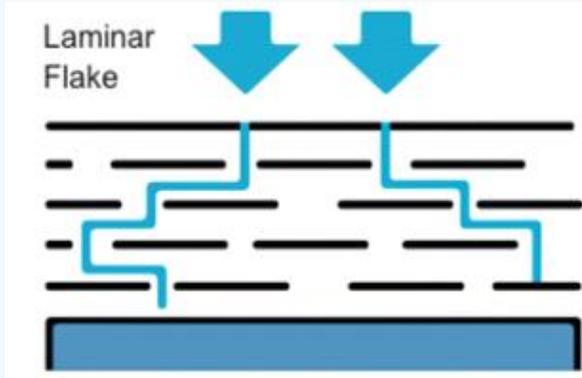
- O descolamento catódico é causado pela formação de hidróxidos (elevada alcalinidade no local).
- O alumínio reduz a extensão do descolamento catódico eliminando hidróxidos do meio [1,2]:



[1] Knudsen, O.Ø. and U. Steinsmo, Journal of Corrosion Science and Engineering, 1999. 2.

[2] Knudsen, O.Ø. and J.I. Skar. CORROSION 2008, Paper no: NACE-08005

# Pigmentos em flocos de alumínio

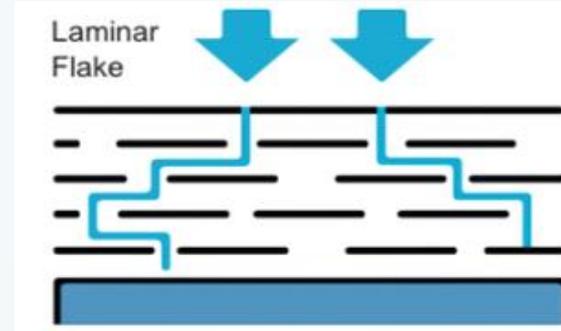


## 2. Melhoria da propriedade de barreira

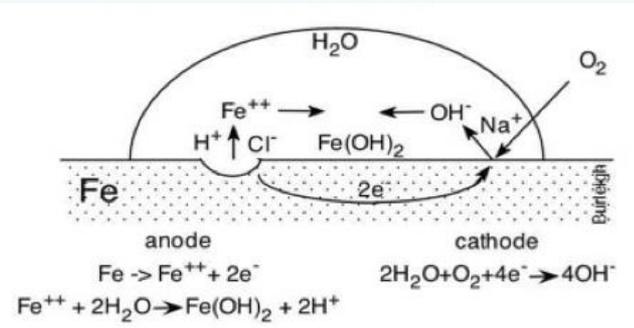
- Nenhum estudo sistemático demonstra, de fato, uma melhoria do efeito de barreira proveniente dos flocos de alumínio.
- Resultados de ensaios extensivos e acelerados em laboratório geralmente são inconclusivos.
  - Difícil determinar como os resultados estão ligados às propriedades de barreira.

# Pigmentos em flocos de alumínio

1. Redução do descolamento catódico



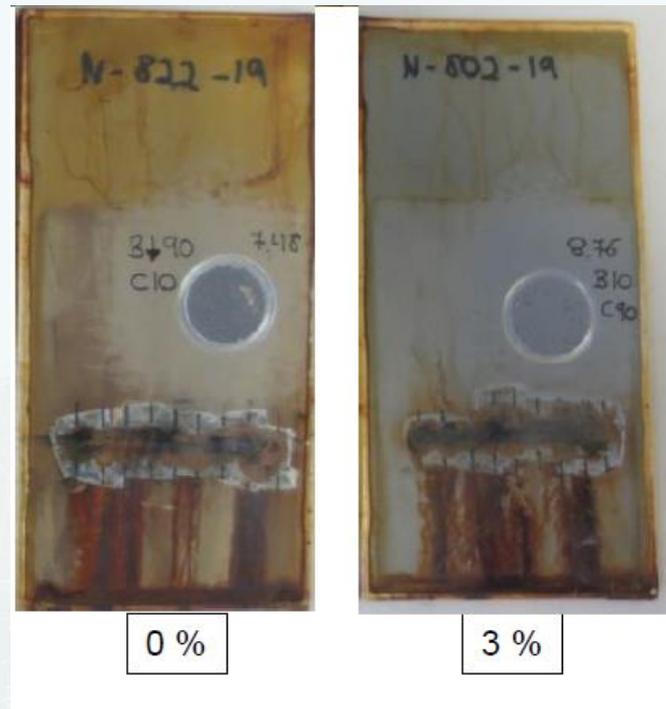
2. Melhoria da propriedade de barreira



# Estudo sistemático de investigação do efeito do alumínio

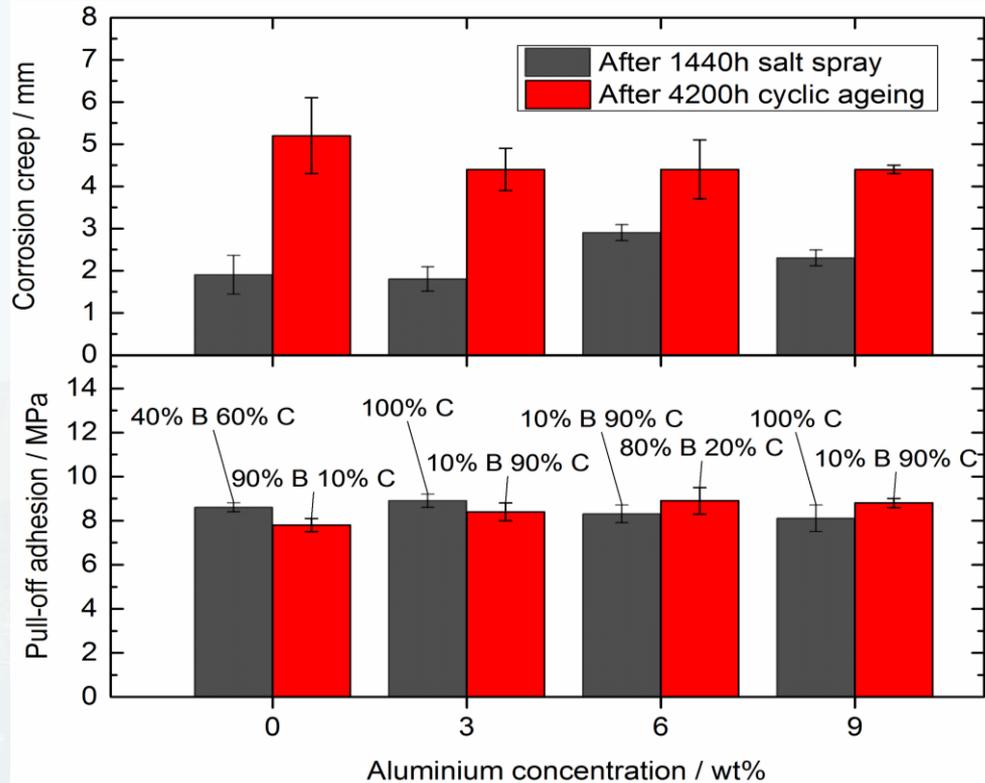
- 4 sistemas de revestimento epóxi com 2 x 125 µm.
- Concentração de alumínio variou sistematicamente:  
**0 → 3 → 6 → 9% em peso**
- Sem alteração no PVC.
- Aplicação via airless em chapas de aço carbono, com preparação de superfície ao padrão Sa 3 (ISO 8501-1).

Ensaio	Norma	Duração
Envelhecimento Cíclico	ISO 12944-9	4200 h
Névoa Salina	ISO 9227	1440 h e 14000 h
Medidas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	ISO 16773-2	Medição contínua (0 – 900 h), e após exposição prolongada
Aderência Pull-Off	ISO 4624	-



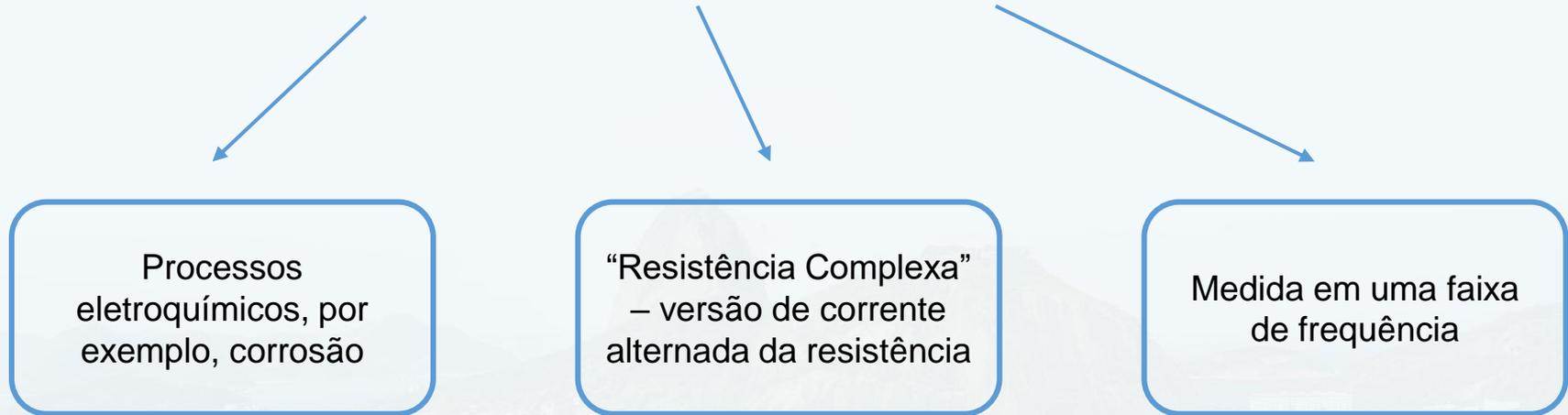
# Resultados de ensaios acelerados em laboratório

- O avanço de corrosão a partir da incisão não variou em função da concentração de alumínio em nenhum dos ensaios de exposição.
- Diferenças insignificantes nos valores de aderência pull-off e naturezas de falha.



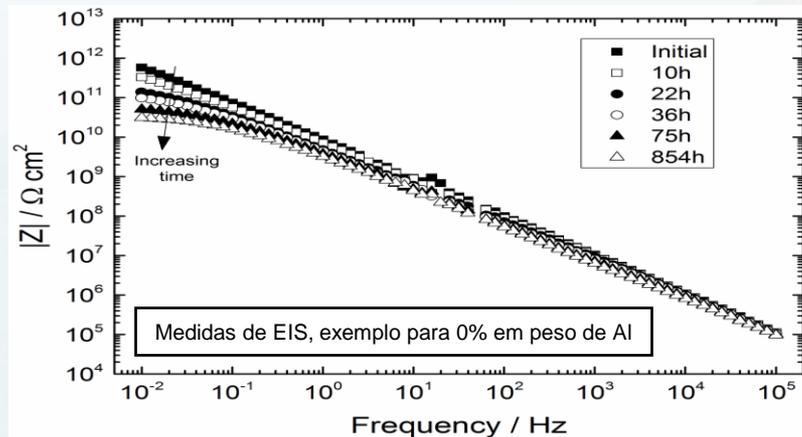
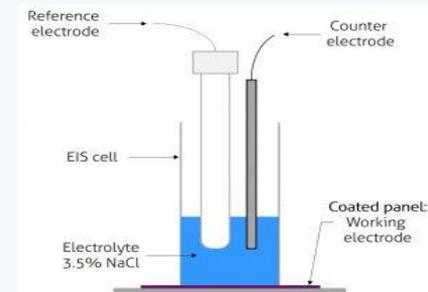
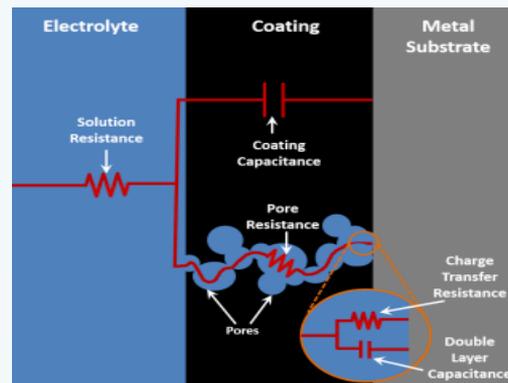
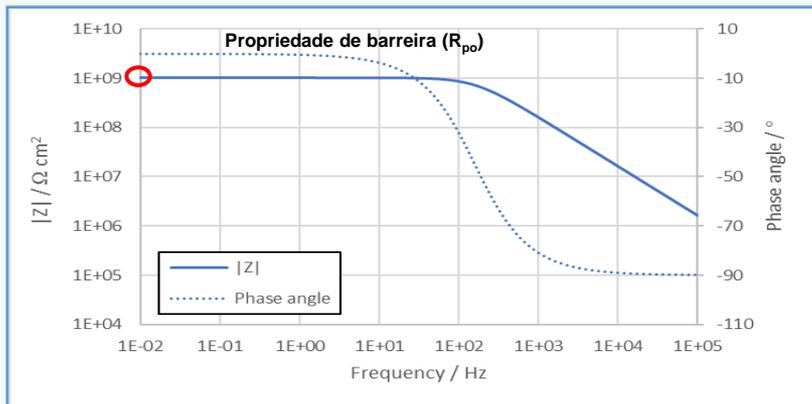
# O que é EIS?

EIS = Electrochemical Impedance Spectroscopy  
(*Espectroscopia de Impedância Eletroquímica*)



**EIS é um método de avaliação,  
não é um método de teste**

# Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)



- EIS mede a impedância do sistema de revestimentos – relacionada à sua propriedade de barreira.
- A modelagem de circuito equivalente produz mais detalhes:

Capacitância do revestimento

Resistência dos poros

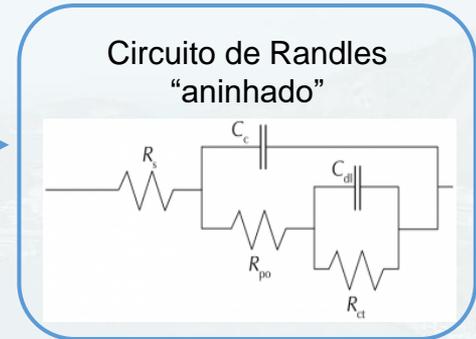
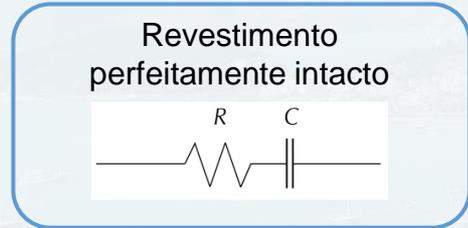
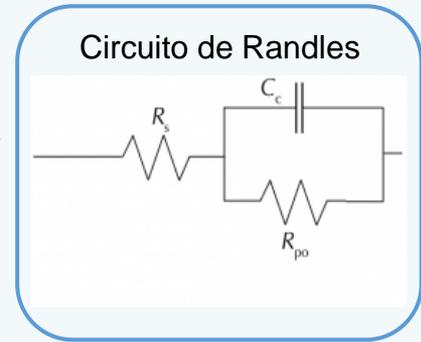
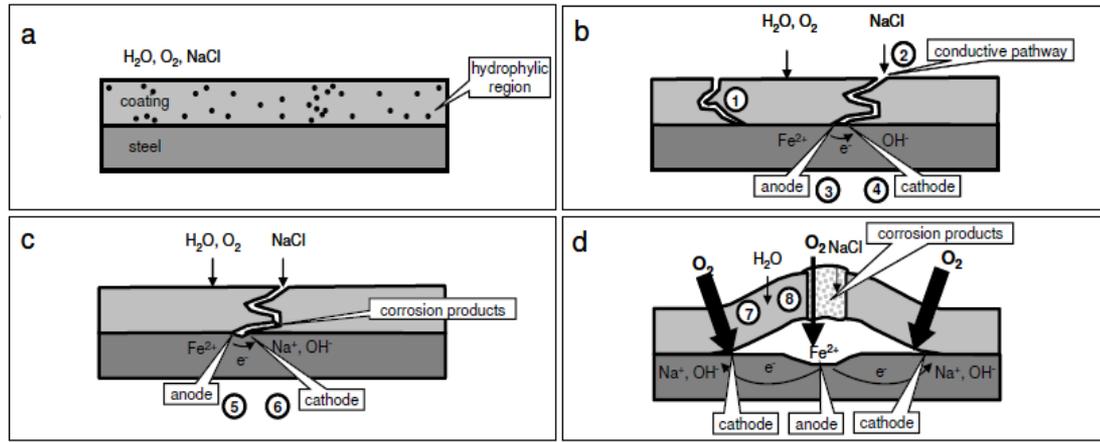
Absorção de água

Difusão de água

Propriedade de barreira

\*Esquema retirado do N. Waters *et al.*, "Electrochemical impedance spectroscopy for coating evaluation using a micro sensor", (Conferência Anual da Prognostics and Health Management Society 2014)

# Interpretação dos dados EIS – Espectros de impedância típicos



# Capacitância do revestimento monitora a permeação de água

Quando submerso, a capacitância efetiva de um revestimento aumentará, devido à permeação/absorção de água.

Mudança mais rápida = maior difusão.

Constante dielétrica do revestimento

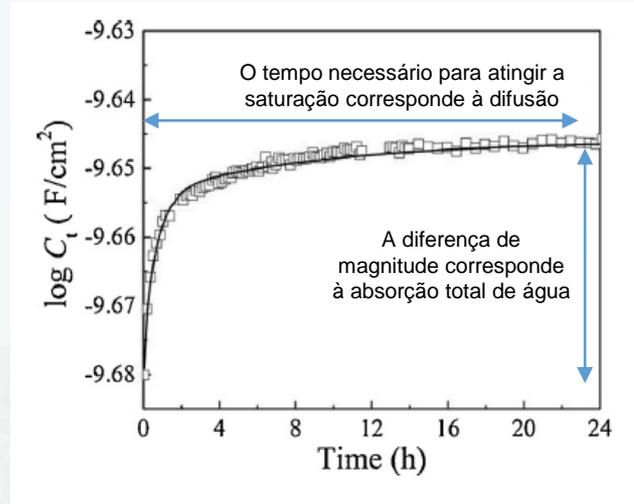
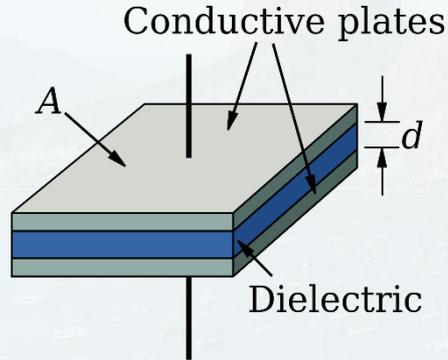
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

Área medida

Espessura do revestimento

$\epsilon_r$  (água) = 80

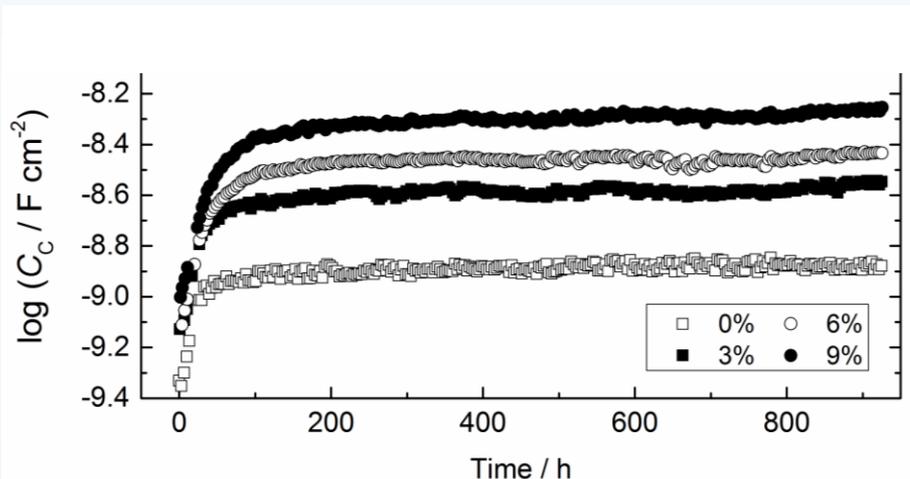
$\epsilon_r$  (revestimento seco) = 1-4



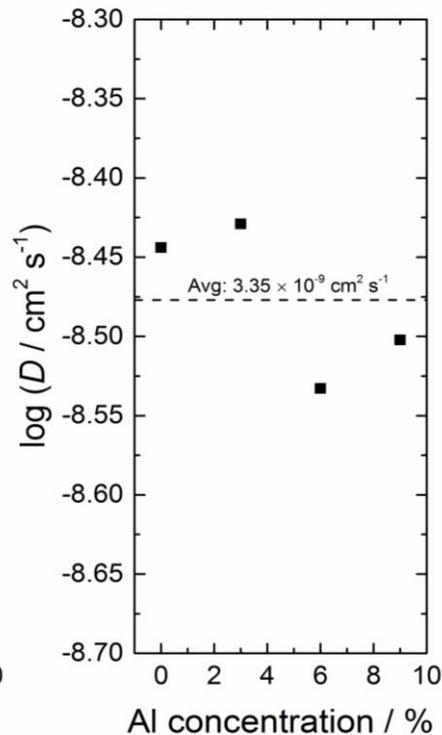
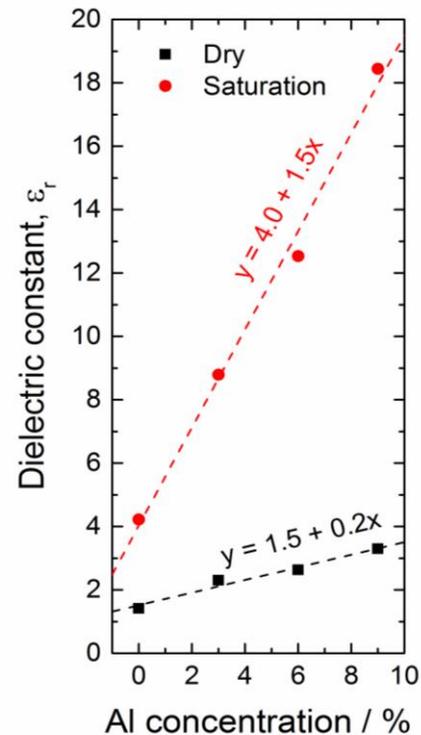
Capacitância do revestimento extraída de medições contínuas de EIS

\*Retirado do: Fen et al., *Progress in Organic Coatings*, 137, 2019, p.105333

# Capacitância do revestimento – Flocos de alumínio

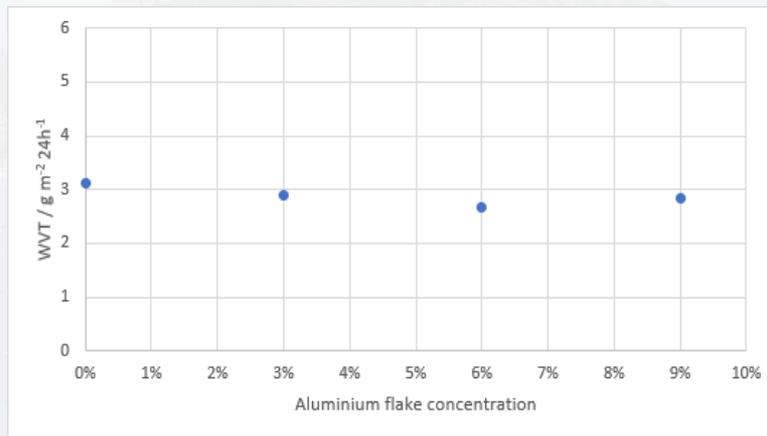
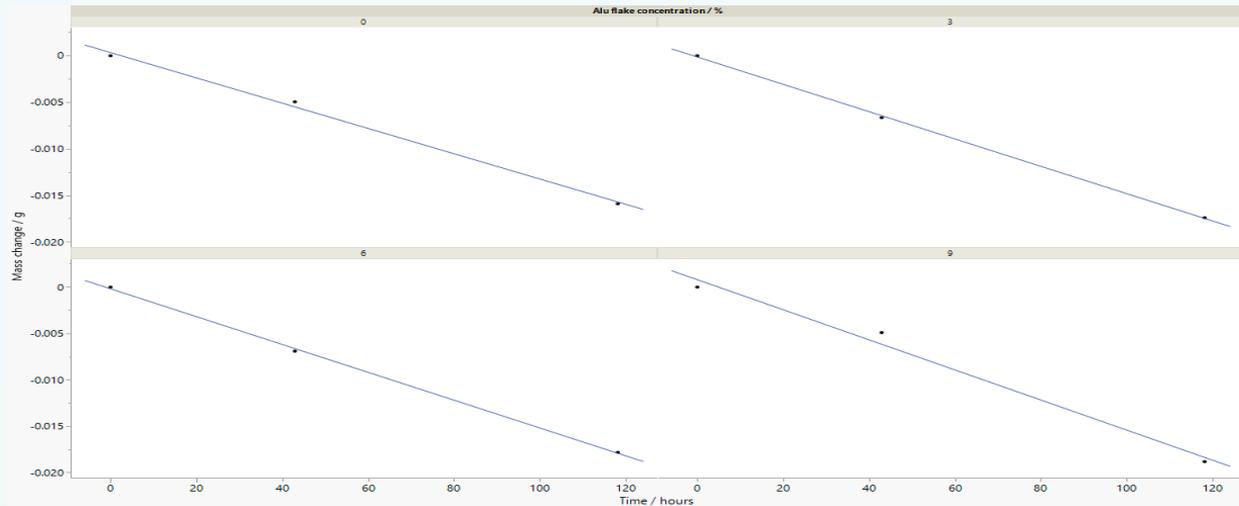


- Maior capacitância inicial com o aumento da concentração de Al –  $\epsilon_r$  varia em função da concentração de Al.
- Variação insignificante na taxa de mudança na capacitância, relacionada à difusão da água.
- Os flocos de alumínio não tiveram efeito na propriedade de barreira dos revestimentos.

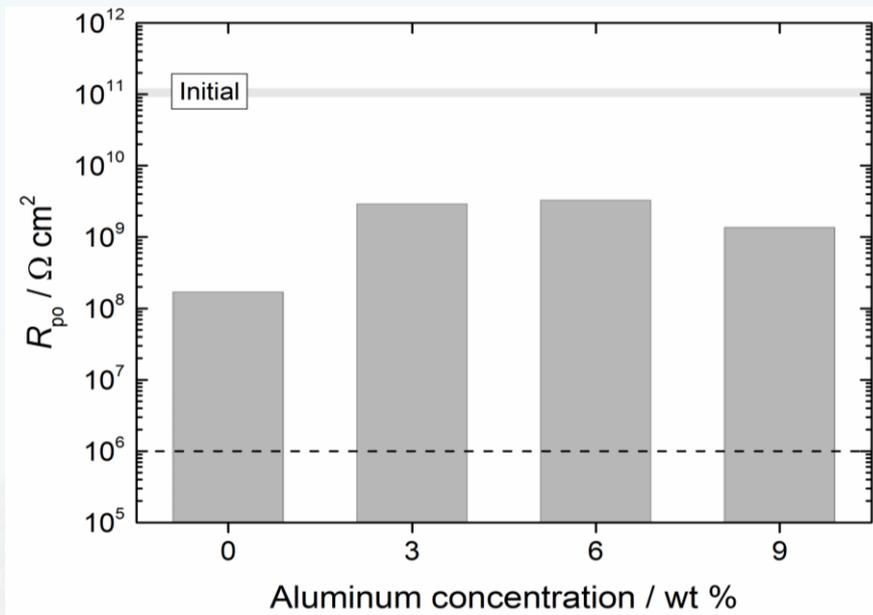
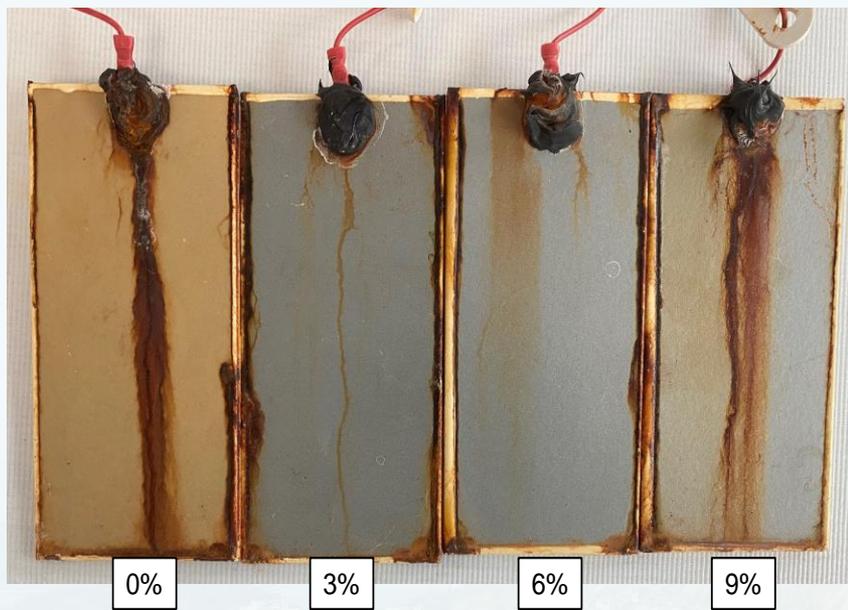


# Taxa de transmissão de vapor d'água

- Ensaio realizado de acordo com a Norma ASTM D 1653, seguindo o método B (copo úmido) e a condição A (23°C e 50% URA).
- Amostras (filmes livres) preparadas em triplicata para cada composição (0, 3, 6 e 9% em peso de alumínio).
- Ensaio em andamento. Em princípio, deve-se medir em torno de 1 semana, no mínimo.



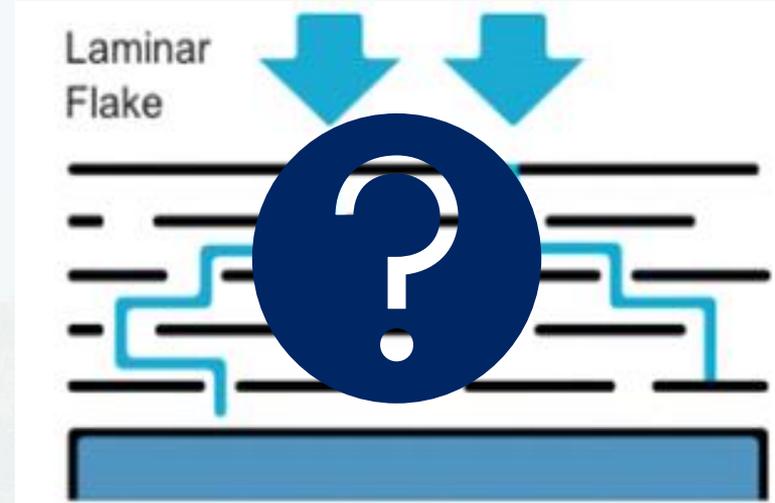
# Exposição prolongada à névoa salina



- ❖ Nenhuma degradação visual, mesmo após 14000 h (> 1 ½ ano), em salt spray neutro!
- ❖ A propriedade de barreira após exposição prolongada não aumentou significativamente com a concentração de alumínio.

# Conclusões

- Os flocos de alumínio demonstraram reduzir o descolamento catódico.
  - **Efeito químico, não um efeito de barreira.**
- O alumínio aumentou a constante dielétrica dos revestimentos, tanto para os revestimentos secos quanto para os totalmente saturados.
- Os flocos de alumínio não afetaram significativamente a propriedade de barreira dos revestimentos avaliados.



# Agradecimentos

- Departamento Global de Testes da Jotun  
(Andreas Loken)
- Professora Isabel Margarit-Mattos  
(POLI / COPPE / UFRJ)

Obrigado

# OS FLOCOS DE ALUMÍNIO SÃO SEMPRE IMPORTANTES COMO PIGMENTOS DE BARREIRA?

**Leonardo Mukim**

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

Ramal: (21) 3147-3812

[LinkedIn](#)

