

II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE CORROSÃO INTERNA DE DUTOS E EQUIPAMENTOS

13 DE JUNHO - RIO DE JANEIRO

TÉCNICAS DE PROTEÇÃO E MONITORAÇÃO DE
DUTOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS CORROSIVOS

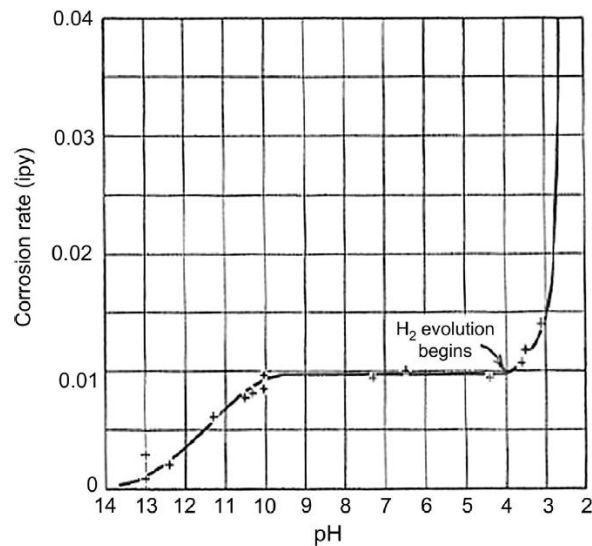
João Paulo Klausling Gervásio

- Introdução
- Proteção anticorrosiva
- Monitoração da corrosão
- Ações de controle

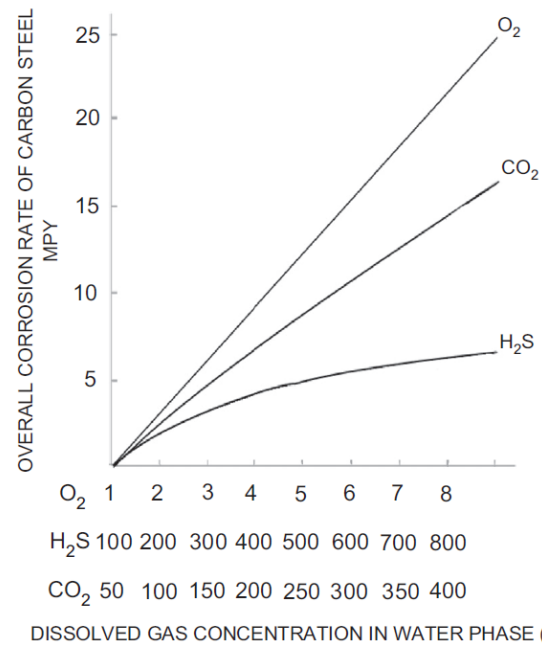
- Principais fatores que influenciam a corrosão na indústria de petróleo:
 - Vazão;
 - Óleo;
 - Água;
 - CO₂;
 - H₂S;
 - O₂;
 - Sólidos;
 - Microrganismos;
 - Pressão;
 - Temperatura;
 - pH.



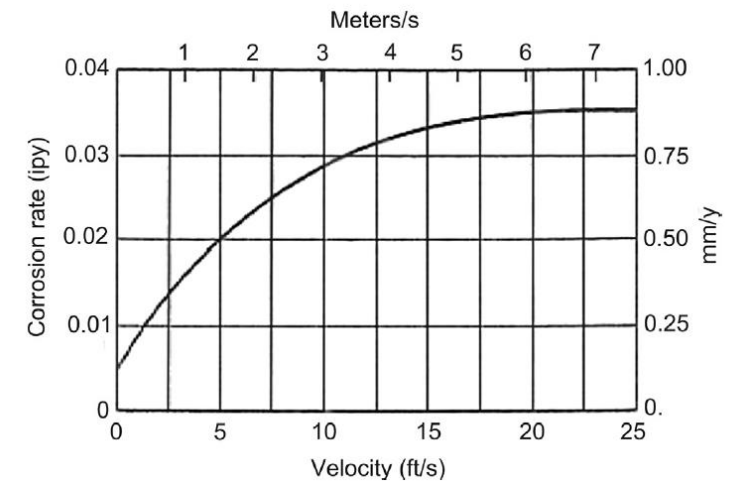
- Exemplos de variação da taxa de corrosão com o meio:



Taxa de corrosão do aço em meio aerado, em função do pH a temperatura ambiente

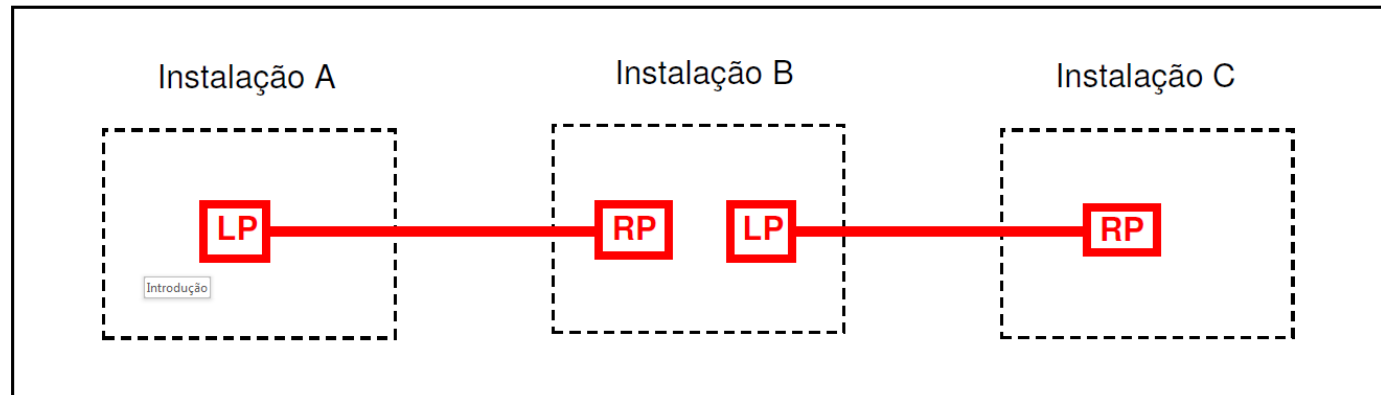


Taxa de corrosão do aço na presença de O₂, CO₂ e H₂S



Efeito da velocidade relativa na taxa de corrosão do aço

Duto de transporte:



Legenda da abrangência



Lançador de Pigs



Receptor de Pigs



Duto Genérico

- Principais tipos de corrosão interna em dutos:
 - Uniforme;
 - Relacionada ao hidrogênio;
 - Microbiológica;
 - Corrosão-erosão;
 - *Pitting*.



Linha de incêndio corroída

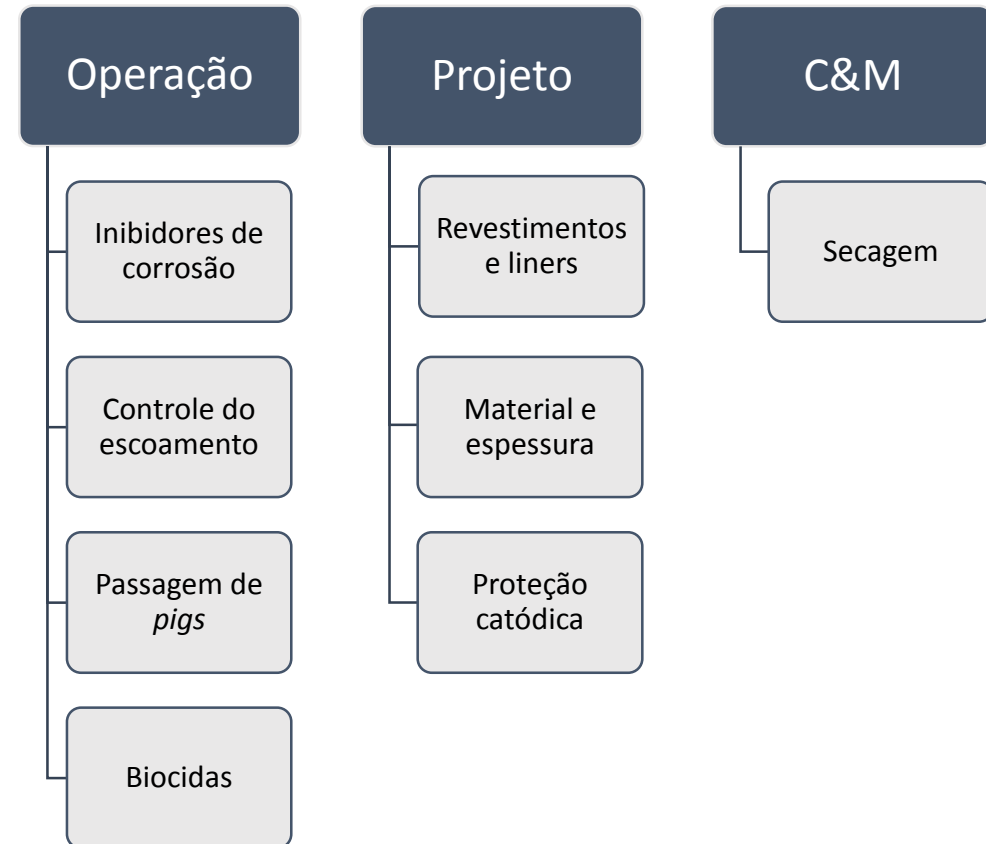
- Locais críticos à ocorrência da corrosão interna em dutos:
 - Geratriz inferior;
 - Curvas;
 - Trechos ascendentes (acúmulo de água);
 - Trechos descendentes (alta velocidade de fluxo).



Depósito de resíduos na geratriz inferior

- Introdução
- **Proteção anticorrosiva**
- Monitoração da corrosão
- Ações de controle

- Material do duto e espessura;
- Controle do escoamento;
- Passagem de *pigs*;
- Secagem;
- Inibidores de corrosão;
- Biocidas;
- Revestimentos e *liners*;
- Proteção catódica.

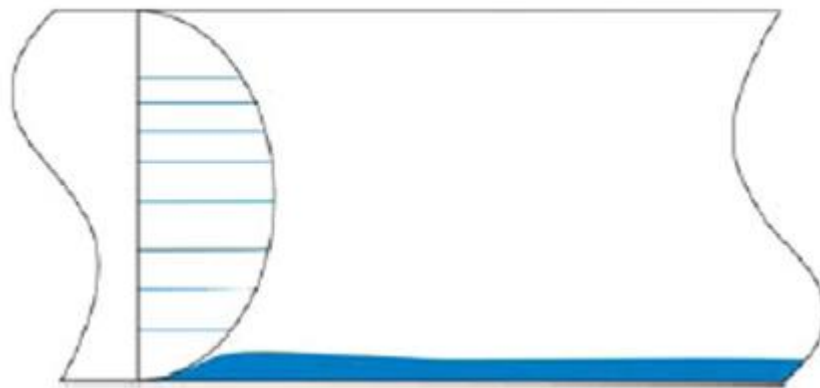


- Definição durante o projeto básico (CAPEX x OPEX):
 - Aço-carbono:
 - Resistência;
 - Tipo de serviço.
 - Materiais não-metálicos;
 - Ligas resistentes à corrosão.
- Aspectos importantes:
 - Meio envolvido;
 - Experiência de campo.







Tubo de aço x tubo de fibra de vidro

- Controle da velocidade mínima do fluido e da concentração de água.
- Operação intermitente x contínua



Acúmulo de água na geratriz inferior

Flow pattern	Superficial oil velocity V_0 (ft s ⁻¹)
 Water drops in oil	1.95
 Oil in water concentric	1.11
 Oil slugs in water	0.682
 Oil globules in water	0.200

Superficial water velocity
 $V_w = 0.682$ ft s⁻¹

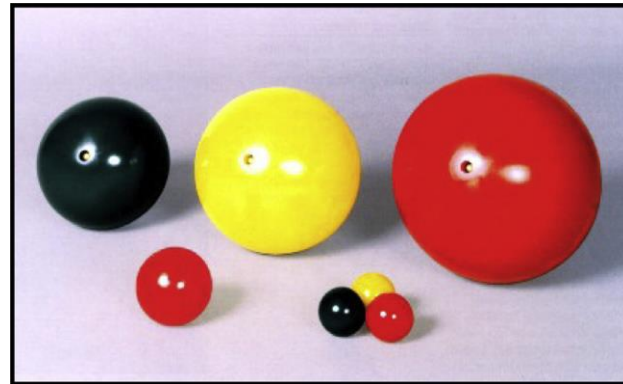
Exemplos de regimes de vazão óleo/água

- *Pigs* de limpeza + *pigs* selantes: Podem ser usados em sequência para minimizar a corrosão interna.



Proteção anticorrosiva – Passagem de *pigs*

Exemplos de *pigs* selantes e de limpeza:

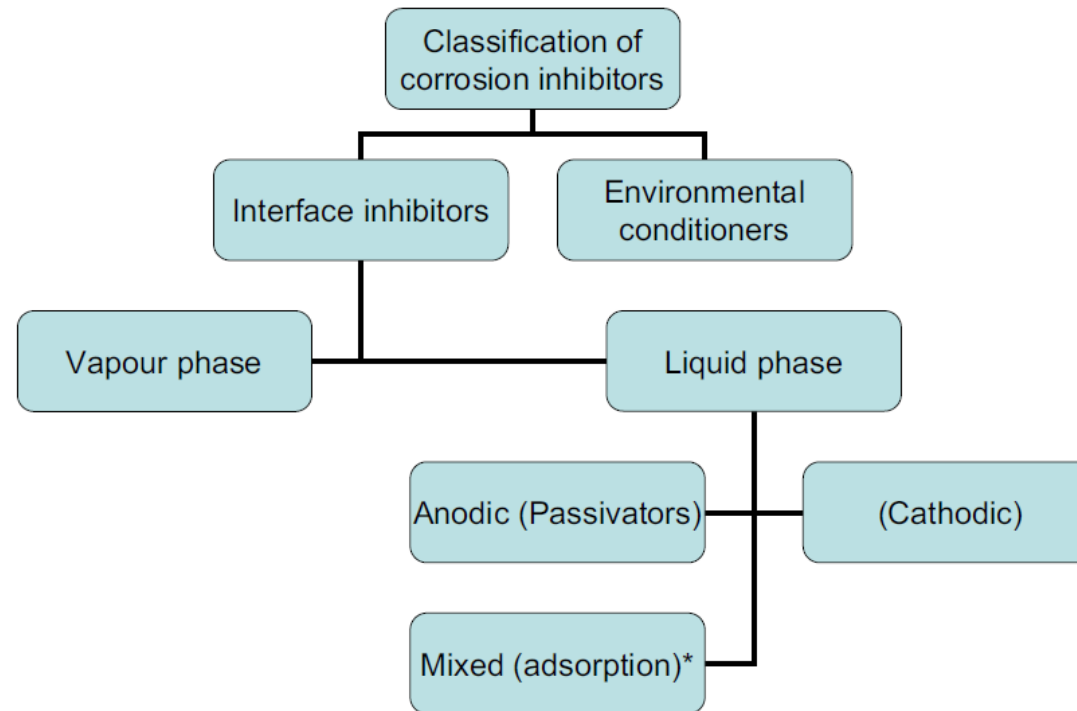


- Medida particularmente importante durante a construção (após o teste hidrostático).
- Principais processos de secagem:
 - Injeção de glicol;
 - Secagem a vácuo;
 - Uso de gás inerte (geralmente nitrogênio).

- Substância química que, quando adicionada em pequenas concentrações a um meio, minimiza a corrosão.
- Um inibidor é eficiente quando produz o efeito desejado de forma econômica e ambientalmente segura.
- Sem inibidores, o uso do aço-carbono poderia ser inviabilizado em diversas situações.



Classificação dos inibidores de corrosão:



*(Most inhibitors used in the oil and gas industry are of this type)

Classificação dos inibidores de corrosão:

Classe	Fase	Mecanismo	Tipo de interação
Interface	Líquida	Anódico	Controle da reação anódica, reforçando a camada passiva
	Líquida	Catódico	Controle da reação catódica
	Líquida Vapor	Combinado	Adsorção física Adsorção química Filmes protetores
Meio			Reduz/elimina elementos corrosivos do meio

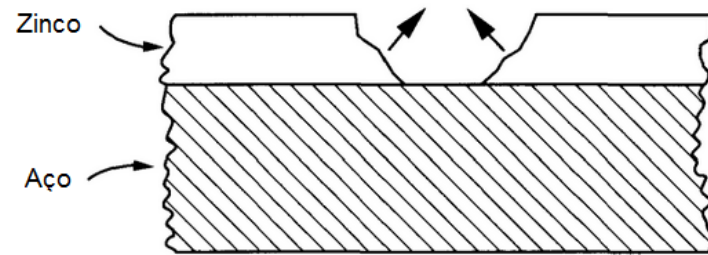
- Fatores importantes na seleção dos inibidores:
 - Eficiência;
 - Dispersão;
 - Concentração ótima;
 - Estabilidade/persistência do filme;
 - Solubilidade;
 - Toxicidade;
 - Compatibilidade com outros aditivos e materiais.

- Trabalha em conjunto com os *pigs* no combate a corrosão microbiológica.
- Classificação:
 - Oxidantes;
 - Tóxicos;
 - Bio-competitivos.

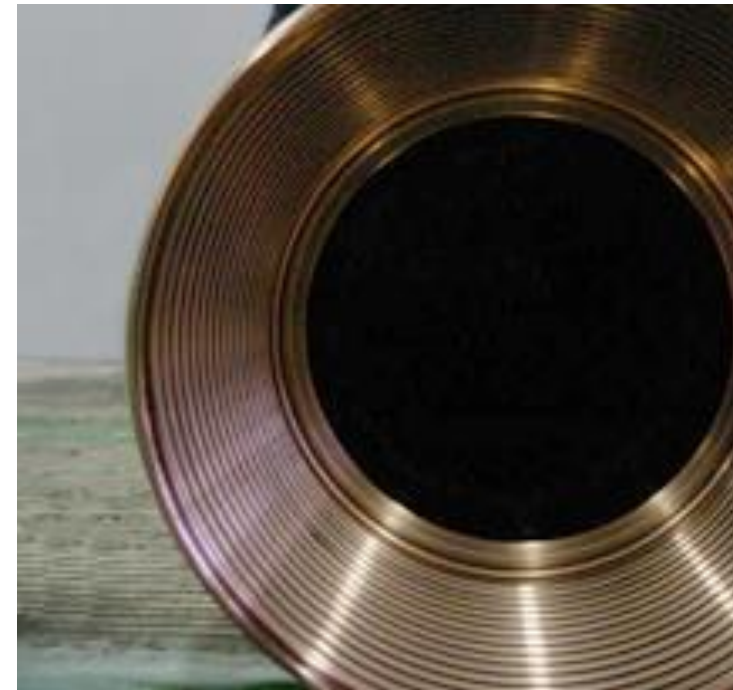


- Orgânicos:
 - Agem como uma barreira protetora, isolando o material e o meio.
 - Aplicação em fábrica
 - Instalação de liners
- Metálicos:
 - *Cladding* (aplicação de um liga resistente à corrosão);
 - Aplicação de liga anódica.

Proteção anticorrosiva – Revestimentos metálicos



Aplicação de liga anódica



Aplicação de liga resistente à corrosão

Proteção anticorrosiva – Revestimentos orgânicos

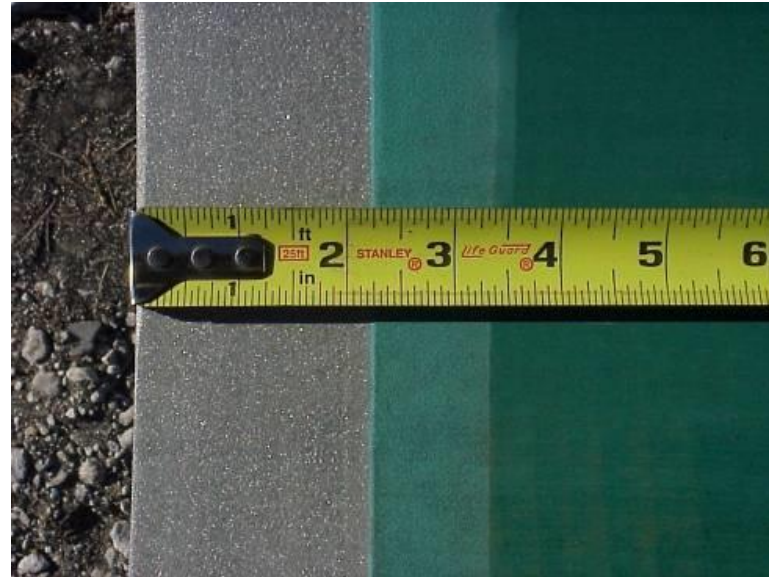


Revestimento em fábrica



Instalação de *liner*

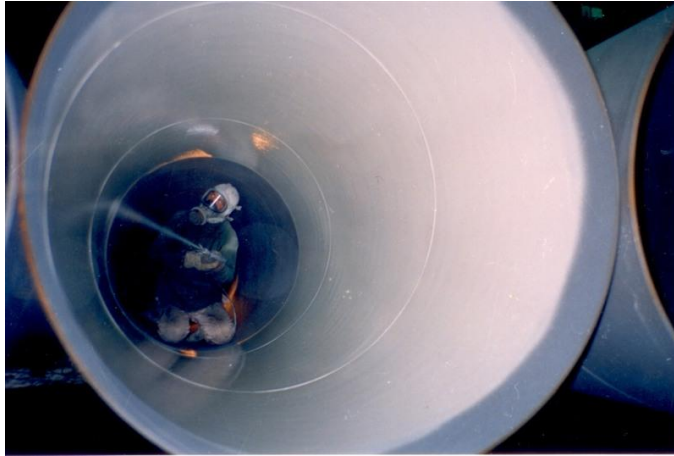
Problema do revestimento de fábrica:



Colarinho ou *cutback*

- O que fazer para proteger o colarinho? Considerações: custo, dificuldade de implantação, produtividade, possibilidade de inspeção e eficiência da solução.
- Alternativas:
 - Pintura (manual, com haste extensora ou com robô);
 - Luva interna;
 - Proteção catódica:
 - Anodos internos;
 - Aspersão térmica.

Proteção anticorrosiva – *Cutback*



Pintura



Luva interna

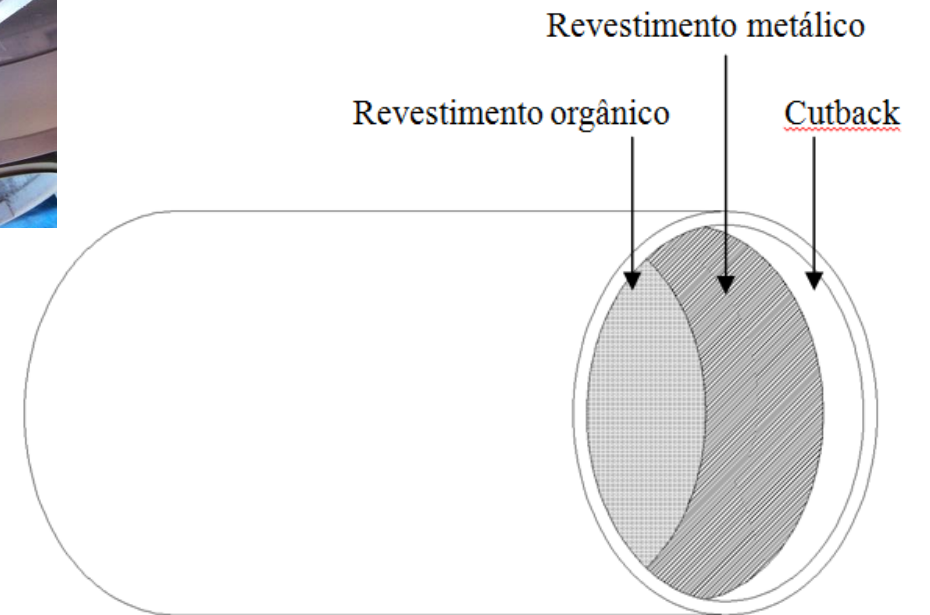


Anodos

Proteção anticorrosiva – *Cutback*



Metalização: anodo aspergido

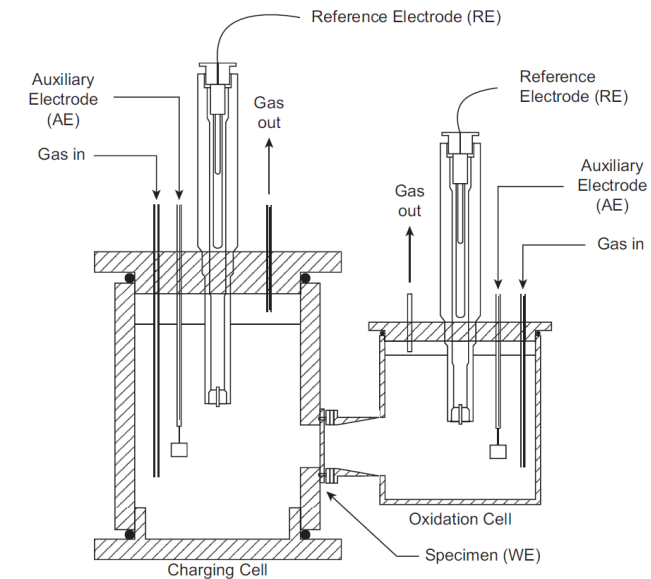


- Introdução
- Proteção anticorrosiva
- **Monitoração da corrosão**
- Ações de controle

- Medidas em laboratório (projeto e operação):
 - Seleção de materiais;
 - Avaliação de inibidores;
 - Técnicas eletroquímicas.

- Medidas/inspeção de campo (operação):
 - Amostragens de fluidos e resíduos;
 - Cupons (perda de massa, ER, biocupom);
 - *ILI Pigs* (ultrassom, magnético);
 - Técnicas não-intrusivas.

- Ensaios:
 - Simulação de diversas condições;
 - Análises de perda de massa;
 - Análises eletroquímicas.
- Exemplos de ensaios (Normas ASTM):
 - G1. *Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens;*
 - G5. *Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements;*
 - G16. *Guide for applying statistics to analysis of corrosion data;*
 - G31. *Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals;*
 - G44. *Standard practice for exposure of metals and alloys by alternate immersion in neutral 3.5 % sodium chloride solution;*
 - G46. *Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion;*
 - G148. *Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique*



Célula de permeação de hidrogênio

- Amostragem de fluidos/resíduos:
 - BSW;
 - Sulfetos;
 - CO₂;
 - H₂S;
 - O₂;
 - Ferro;
 - Cloretos;
 - Bactérias (BRS, BANHT).

Tabela 16 - Classificação do Potencial através de Análises de Fluido e Resíduo

Parâmetros	Potencial de corrosividade		
	Severo	Moderado	Baixo
Teor de oxigênio dissolvido	> 50 ppb	20 ppb < O ₂ < 50 ppb	≤ 20 ppb
pH simulado (ver Nota 4)	< 5,6	5,6 - 6,9	7,0 - 12,0
Pressão parcial de H ₂ S no gás (ver Nota 1)	pH ₂ S > 0,75 psia	0,01 psia < pH S < 0,75 psia	pH ₂ S < 0,01 psia
Pressão parcial de CO ₂ para T < 60 °C	pCO ₂ > 15 psia, independente da V	4 psi < pCO ₂ < 15 psia, V < 5 m/s	pCO ₂ < 4 psia, V < 5 m/s
	4 psia < pCO ₂ < 15 psia, e V > 5 m/s	pCO ₂ < 4 psia 5 m/s < V < 10 m/s	-
Bactérias em resíduo ou cupom de corrosão (NMP/g ou cm ²) (ver Notas 2 e 3)	BRS > 10 ⁵ BANHT ≥ 10 ⁷ e Tempo de crescimento: 1 a 6 dias	BRS < 10 ⁵ BANHT < 10 ⁷ e Tempo de crescimento: 7 a 14 dias	BRS < 10 ⁵ BANHT < 10 ⁷ e Tempo de crescimento: > 14 dias
Corrosividade de derivados segundo a NACE TM0172 (ver Nota 6)	Classificação C, D e E	Classificação B e B ⁺	Classificação A e B ⁺⁺

- Monitoração x Inspeção:
- Monitoração: técnica aplicada em um local para determinar a corrosão durante um período de tempo
- Inspeção: técnica que determina a integridade de uma infraestrutura em vários pontos em um determinado período de tempo.

Monitoração da corrosão – Técnicas de campo

Técnica	Tipo de corrosão	Monitoração ou Inspeção	Intrusiva ou não intrusiva	Cupom ou estrutura
Perda de massa	Uniforme, localizada, erosão	Monitoração	Intrusiva	Cupom
Sonda de resistência elétrica (ER)	Uniforme, erosão	Monitoração	Intrusiva	Cupom
Ultrassom	Uniforme, localizada, erosão	Monitoração Inspeção (ILI)	Não intrusiva Intrusiva (ILI)	Estrutura
Fluxo magnético (MFL)	Uniforme, localizada, erosão	Monitoração Inspeção (ILI)	Não intrusiva Intrusiva (ILI)	Estrutura
Campo elétrico	Uniforme, localizada, erosão	Monitoração	Não intrusiva	Estrutura

- Cálculo da taxa de corrosão e taxa de pite
- Modelos: disco ou haste
- Caracteriza a forma, indica a perda de massa no período de exposição (valor médio)
- Caracteriza o resíduo formado
- Dutos com variação de parâmetros operacionais: não há como ver qual a situação mais agressiva



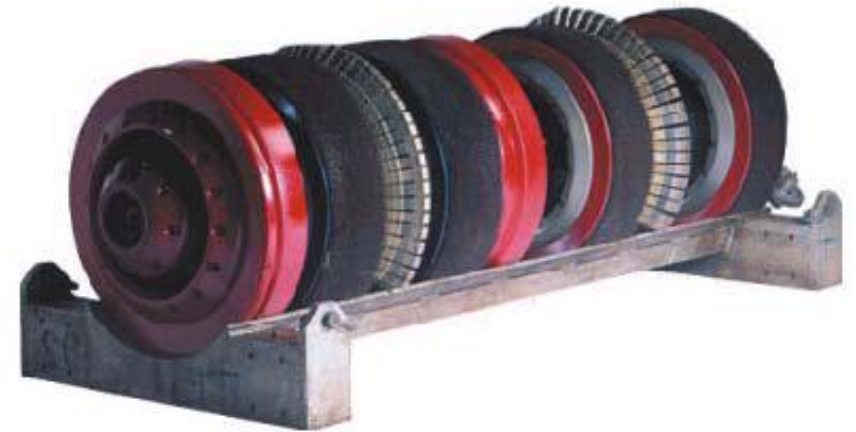
- Cálculo da taxa de corrosão através da perda da seção transversal do sensor exposto ao meio, aumentando sua resistência.
- Mede taxas em tempo real, podendo ser interligados a sistemas *online*.
- Sensores tangenciais ou transversais.
- Pouca sensibilidade à corrosão localizada.
- Sensível à temperatura.



- Baseadas nas tecnologias de ultrassom ou na variação do campo elétrico
- Soluções específicas por fabricante:
 - Variação de sensibilidade
 - Medição por ponto x medição por área
 - Softwares proprietários
- Segurança operacional
- Resposta em tempo real



- *Pigs* instrumentados: ultrassom, magnético
- Sensibilidade / resolução
- Controle da velocidade da corrida
- Necessidade de validação dos resultados
- Acoplamento líquido
- Identificação corrosão interna/
externa



- Introdução
- Proteção anticorrosiva
- Monitoração da corrosão
- Ações de controle

Tabela 20 - Ações Quando o Potencial de Corrosividade for Severo

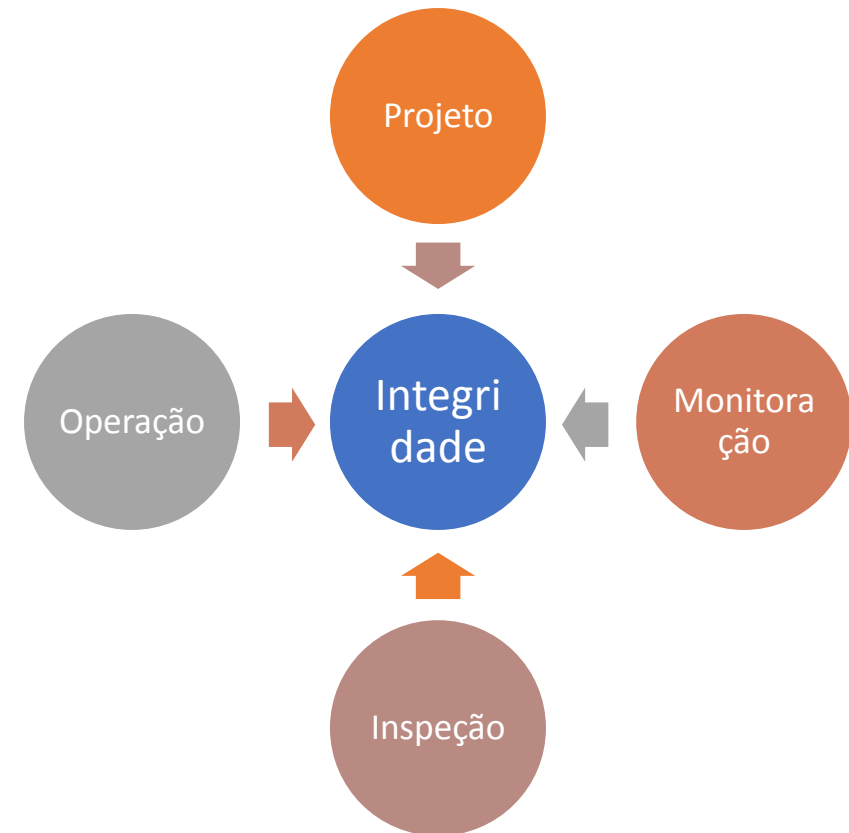
Ação	Observação
Identificar as causas fundamentais do processo corrosivo.	-
Em caso de fluxo intermitente, efetuar a passagem de “pig” para a remoção de líquido a cada início de operação.	Adequar a periodicidade de passagem em função da redução da taxa de corrosão.
Estudar a possibilidade de aumentar a vazão de forma a ser superior à velocidade de arraste, exceto para gasodutos.	Anexo G.
Efetuar a passagem de “pig” para araste de líquidos em oleodutos (petróleo e derivados) que operam em regime laminar e para os gasodutos que escoem com padrão de escoamento bifásico do tipo estratificado ou intermitente (golfadas ou plugues) que possibilitem acúmulo de condensado aquoso ao longo do duto (ver Notas 1, 2 e 3).	Periodicidade máxima: quinzenal.
Efetuar passagem de “pig” para remoção de sólido (ver Nota 4).	Periodicidade máxima: mensal.
Incluir, quando viável, um ponto de monitoração da corrosão no local com maior perda de espessura indicado por uma inspeção.	-

Monitoração da corrosão – Ações de controle

Tabela 21 - Ações de Controle para Oleodutos

Causa fundamental			Controle		Observação (para ações de curto prazo)
			Curto prazo	Médio prazo	
CO ₂			1° - Evitar a intermitência do escoamento	Realizar estudo para definir o método de controle a ser adotado.	Esta ação deve ser feita no caso do fluxo ser mantido laminar, mesmo após redução do BSW e/ou bombeio intermitente. Quando houver contaminação por oxigênio, o inibidor selecionado deve ser compatível com o teor deste contaminante.
			2° - Injetar inibidor de corrosão conforme Anexo C		
H ₂ S	Verificar se é originado no duto	Sim:	Adotar as mesmas ações indicadas para bactérias	Realizar estudo para definir o método de controle a ser adotado.	-
		Não:	Adotar as mesmas ações indicadas para o CO ₂		
O ₂			1° - Impedir sua entrada no sistema	Realizar estudo para definir o método de controle a ser adotado.	Verificar a selagem de vasos, bombas, compressores e outros pontos passíveis de entrada de O ₂ .
			2° - Injetar sequestrante de O ₂		Avaliar previamente a eficiência do sequestrante e sua compatibilidade com os ânions e cátions presentes.
Bactérias			1° - Aumentar a velocidade de escoamento (ver Nota)	Realizar estudo para definir o método de controle a ser adotado.	Avaliar a eficiência da ação em função da inibição da atividade das bactérias.
			2° - Aumentar a frequência de passagem de "pig" raspador		
			3° - Injetar biocida e/ou dispersante		

- A integridade de um duto começa antes mesmo dele sair do papel.
- A monitoração e inspeção são ferramentas fundamentais para definir ações de controle da corrosão.



- Cheng DCH, Heywood NI. *Flow Basics. Piping Design Handbook*. 1992.
- Revie RW, Uhlig HH. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. 2008.
- Obeyesekere Nihal. *Oil Sands Water Usage Workshop*. 2004.
- Whitman GW, Russell RP, Altieri VJ. *Effect of Hydrogen-Ion Concentration on the Submerged Corrosion of Steel*. 1924.
- Resolução ANP nº 6/2011. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres (RTDT).
- Jones, AD. *Principles and prevention of corrosion*. 1996.
- Emmanuel, JI. *Application of 5-M Approach to Control Internal Corrosion for Crude Oil Transmission Pipelines*. 2016.
- Cameron G. *Maintenance Pigging Selection Guidelines*. 2009.
- Papavinasam S. *Corrosion Inhibitors*. 2011.
- ASTM G148. *Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique*.
- PETROBRAS N-2785. Monitoração, interpretação e controle da corrosão interna em dutos.
- Paulo RVM. Curso PID e *pigs* instrumentados.