



---

# Principais Mecanismos de Danos em Caldeiras

Eng. Marcelo Schultz, MSc – Petrobras

Fórum de Integridade de Caldeiras  
Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP  
06-11-2015

**Agradecimento:**  
**Comissão do IBP – GRINSP/RJ**

- 
- **Sumário**
    - **Caldeira Aquatubular**
    - **Importância de uma Caldeira**
    - **Importância da água e do combustível**
    - **Lado água/vapor x lado gases de combustão**
    - **Processos de passivação, desaeração e deterioração**
    - **Principais falhas em tubos, pré-aquecedores de ar e queimadores**
    - **Avaliação de integridade**

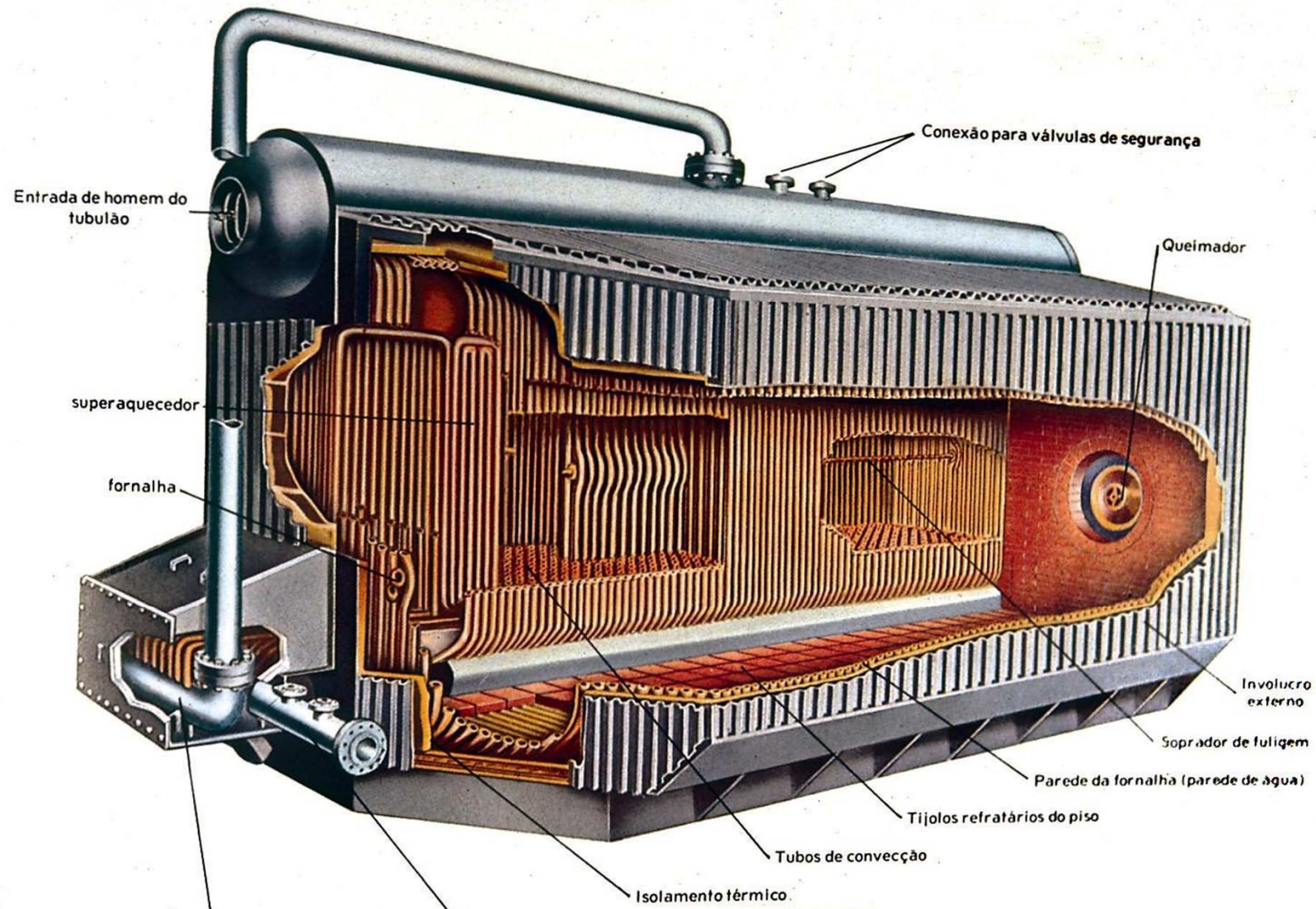
- 
- **Sumário**
    - **Caldeira Aquatubular**

# Caldeira Aquatubular

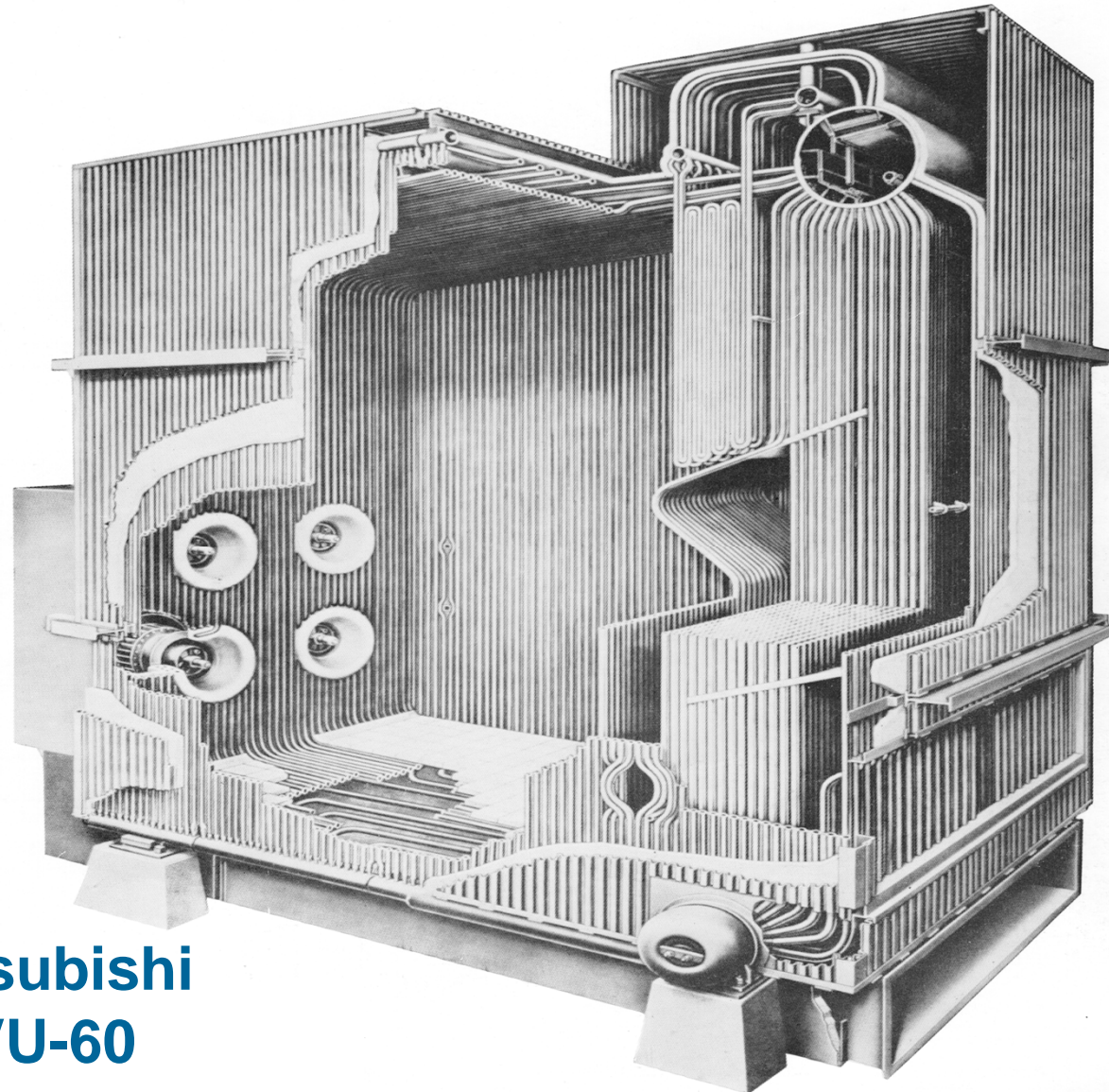


- **Classificação (pressão – lado dos gases)**
  - Negativa
  - Positiva
- **Caldeira de Pressão Negativa**
  - Câmara de combustão (fornalha)  $\rightarrow p < atm$
  - Ventilador = 2
  - Tubos das paredes: não aletados (parede de tijolos + chaparia)
- **Caldeira de Pressão Positiva**
  - Câmara de combustão (fornalha)  $\rightarrow p > atm$
  - Ventilador = 1
  - Tubos das paredes: aletados (lã de rocha + chapa de alumínio)

# Caldeira Aquatubular – $p < atm$



# Caldeira Aquatubular – $p > atm$



**CBC – Mitsubishi**  
**Modelo VU-60**

# Caldeira Aquatubular – $p > atm$



**REDUC - SG-2001**  
**Cap: 365 ton/h**



# Caldeira Aquatubular



---

- **Sumário**

- **Importância de uma Caldeira**

# Importância de uma Caldeira



- **Geração de Vapor**

- **Vapor Saturado [úmido (u)]**

- Hotel, Cozinha Industrial, Lavanderia, etc

- **Vapor Superaquecido [seco(s)]**

- Indústria: Óleo & Gás, Petroquímica, Farmacêutica, etc

- **Geração de Energia Elétrica (s)**

- Turbina a Vapor + Gerador Elétrico

- **Compressão de Gás (s)**

- Turbina a Vapor + Compressor

- **Refino de Petróleo (u)**

- Torres, Vasos, Permutadores, Bombas

# Caldeira Aquatubular



---

- **Sumário**

- **Importância da água e do combustível**

- **Água**
  - Tratamento em estágios
  - Bruta → Desmineralizada/Polida
  - Remoção de sais solúveis (Ca, Mg)
  - Desaeração ( $\downarrow O_2$ ), pH (faixa alcalina), temperatura, pressão
- **Combustível (Óleo / Gás)**
  - Óleo combustível (teor de Enxofre – S)
  - Gás combustível (limpo)
  - Outros: madeira, bagaço de cana, carvão, etc

# Caldeira Aquatubular



---

- **Sumário**

- **Lado água/vapor x lado gases de combustão**

# Lado água/vapor & lado gases de combustão

---



- Qual dos dois circuitos é o mais importante ?
  - Água / Vapor
  - Gases de combustão
  - Ambos são importantes
  - Por quê?
  - Deterioração pode ocorrer em ambos os lados
  - Deterioração:
    - Corrosão eletroquímica (água/vapor) → incrustação/célula oclusa
    - Corrosão química (gases) → fuligem/depósito
    - Deformação do tubo (plástica) → “Laranja”
  - Consequência: parada (programada ou emergência)
    - Parada de um consumidor: equipamento, processo, unidade (US\$ ↑)

# Caldeira Aquatubular



---

- **Sumário**

– **Processos de passivação, desaeração e deterioração**

# Processos de Passivação

- Formação de Óxido de Ferro



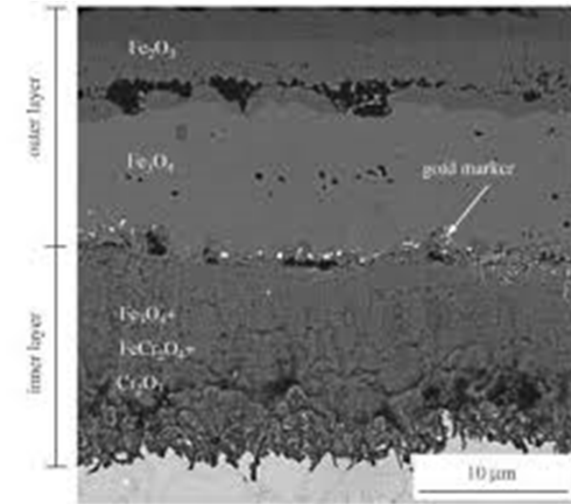
- ferro + água → magnetita + hidrogênio



- ferro + oxigênio → wustita



- hidrazina + hematita → magnetita + água + nitrogênio



(a)

- Formação de Óxido de Cobre



- cobre + oxigênio + água → óxido cuproso + hidrogênio



- hidrazina + óxido cúprico → óxido cuproso + água + nitrogênio



# Processos de Desaeração ( $\downarrow O_2$ )

- Desaeração química



- hidrazina + oxigênio  $\rightarrow$  água + nitrogênio



- hematita + hidrazina  $\rightarrow$  magnetita + nitrogênio + água

- Descontrole na desaeração



- magnetita + oxigênio  $\rightarrow$  hematita

- Desaeração mecânica

- Vaso Desaerador:

- Água desmineralizada/polida x vapor

# Processos de Deterioração

- Quais são os principais processos de deterioração?

- Oxigênio



- Incrustação de sais dissolvidos

- Ca, Mg

- Incidência de chama

- Tubos de parede e/ou Superaquecedor

# Caldeira Aquatubular



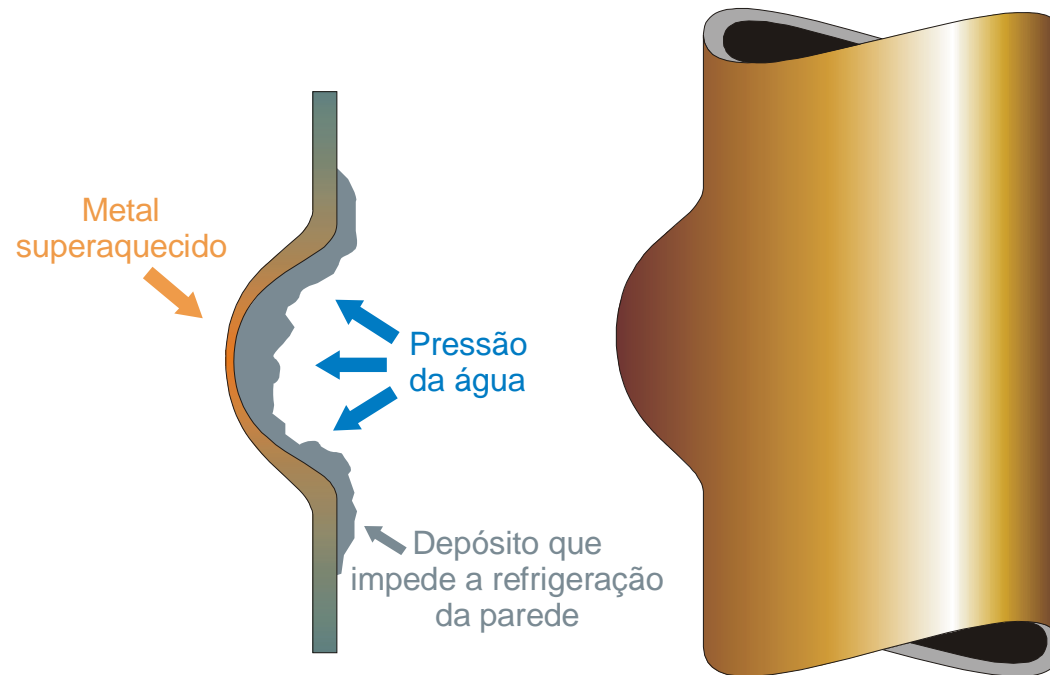
---

- **Sumário**

- **Principais falhas em tubos, pré-aquecedores de ar e queimadores**

# Principais Falhas em Tubos

## Deformação plástica – “Laranja”



# Principais Falhas em Tubos

## Rompimento por sobrepressão



# Explosão de Caldeira



# Principais Falhas em Pré-Aquecedor

## Corrosão ácida em pré-aquecedor de ar fixo

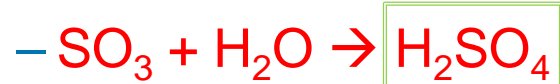
– Oxidação do Enxofre:



– Transformação de  $SO_2$  em  $SO_3$



– Reação do óxido com a água (umidade)



Ácido Sulfúrico

# Principais Falhas em Pré-Aquecedor

## Corrosão ácida em pré-aquecedor de ar fixo





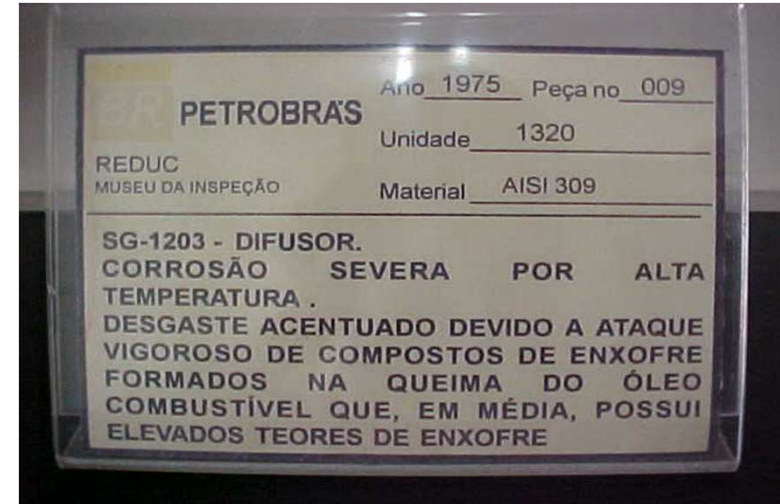
# Principais Falhas em Pré-Aquecedor

## Corrosão ácida em pré-aquecedor de ar rotativo

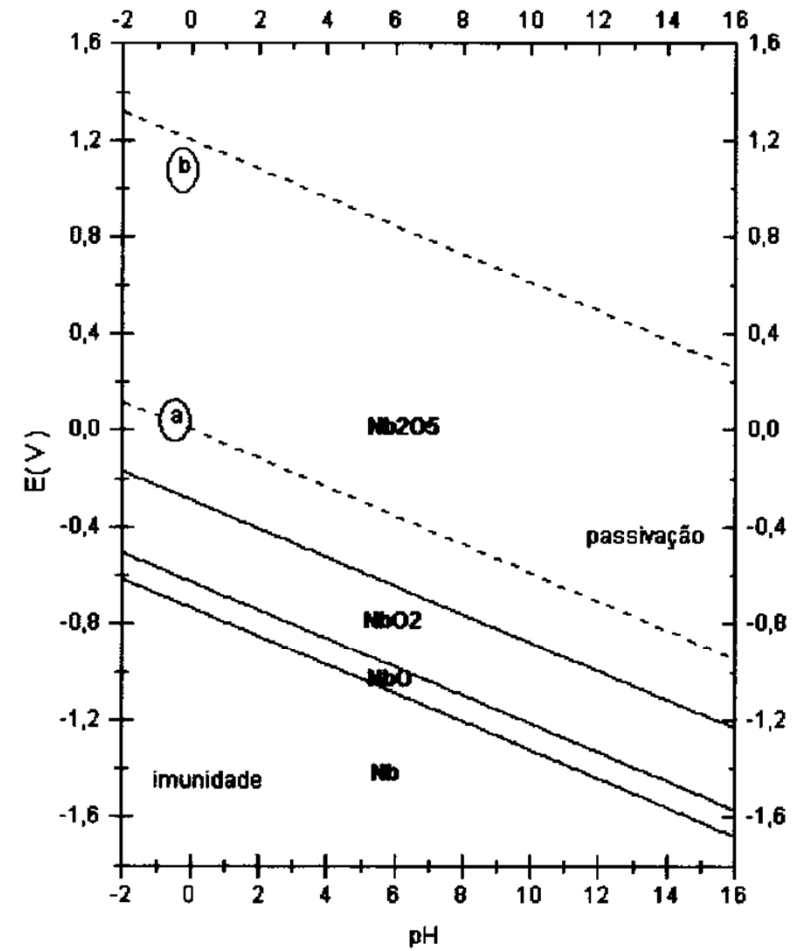
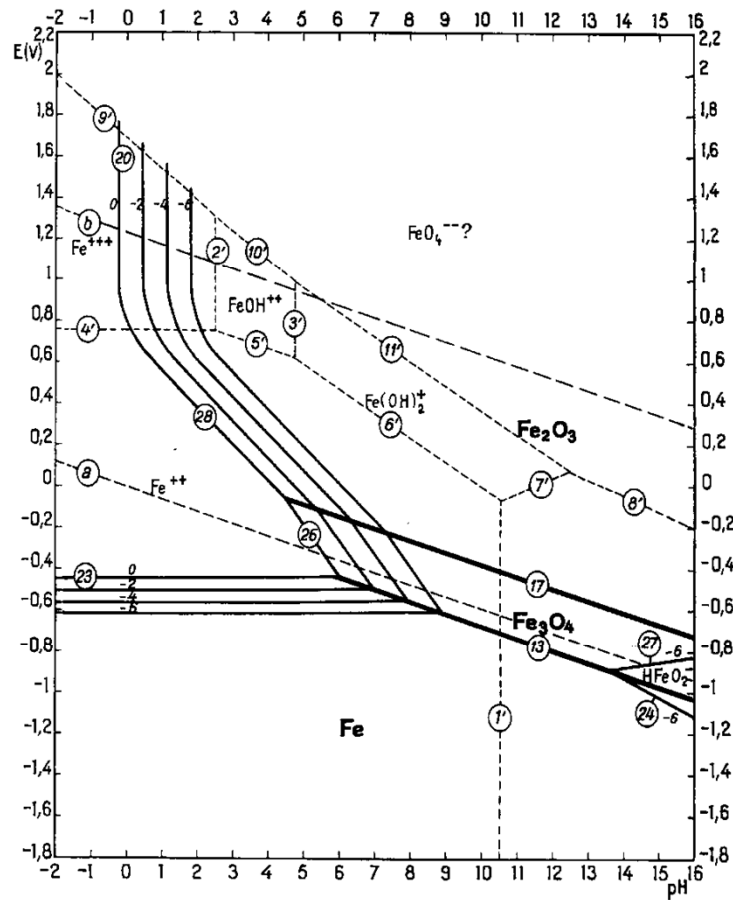


# Principais Falhas em Pré-Aquecedor

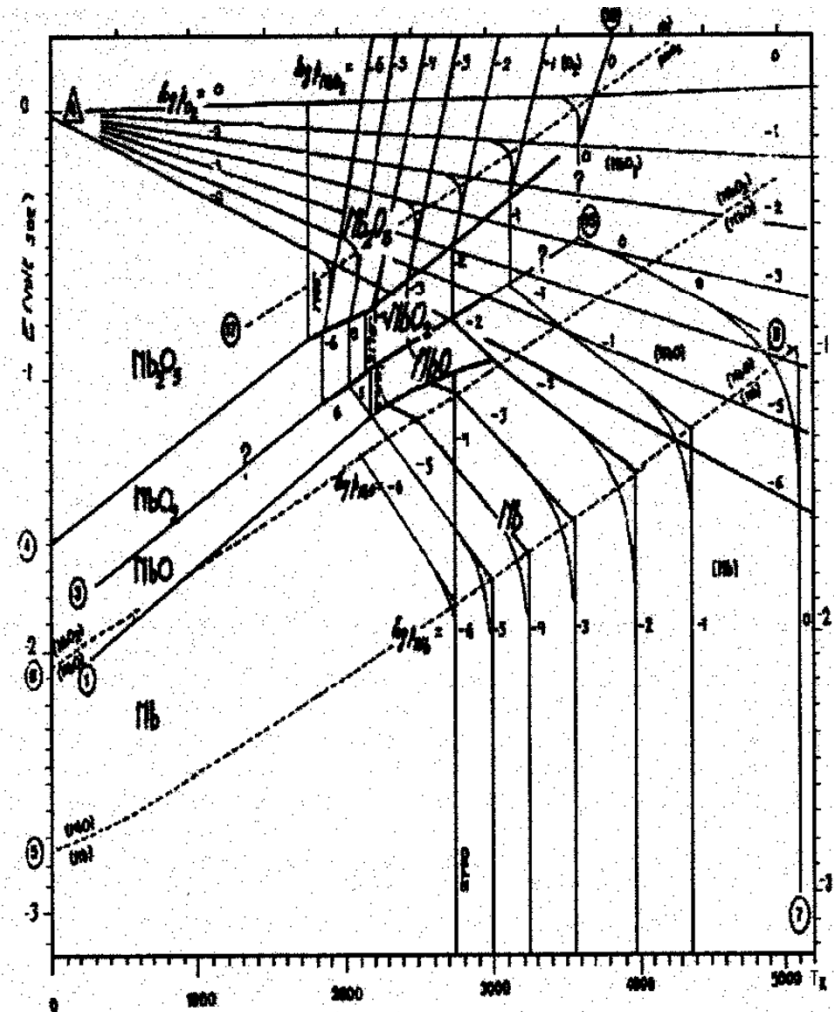
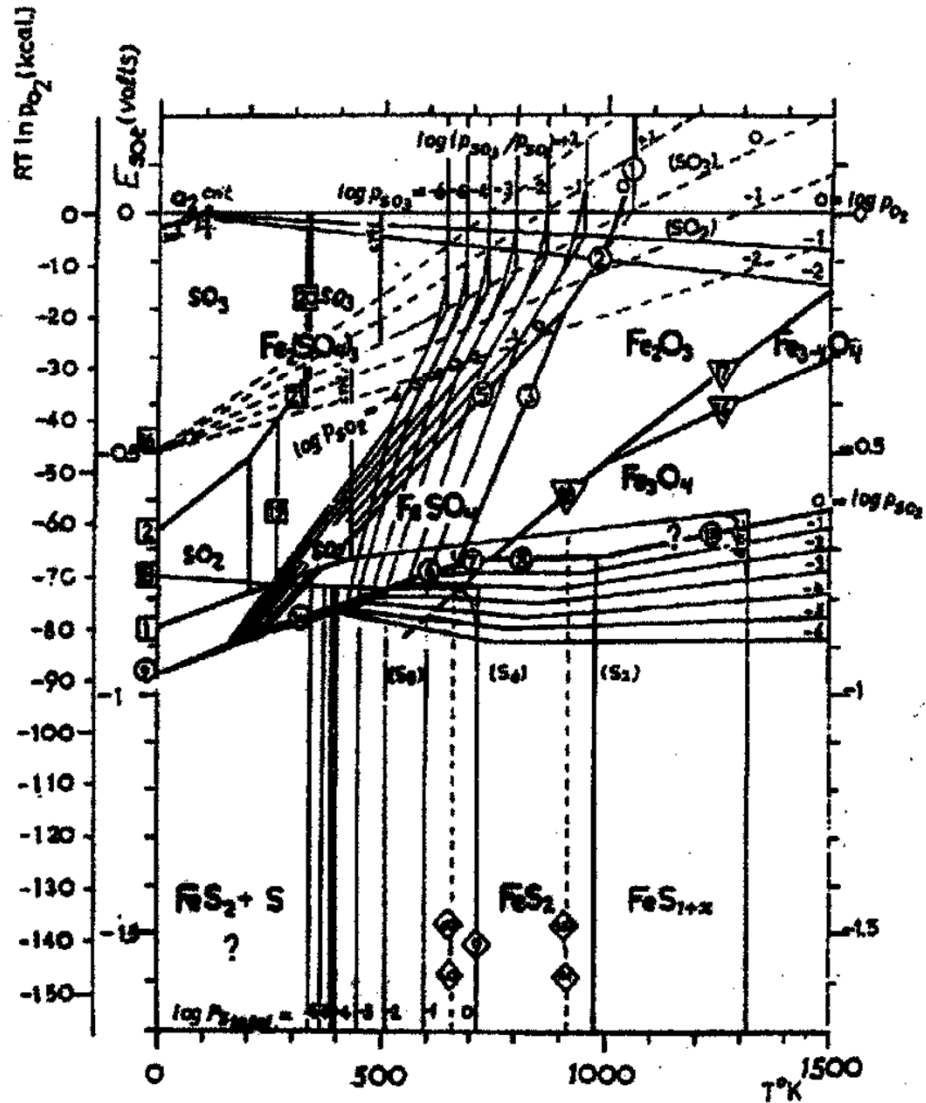
## Corrosão ácida em queimadores



# Diagrama Termodinâmico – Fe & Nb

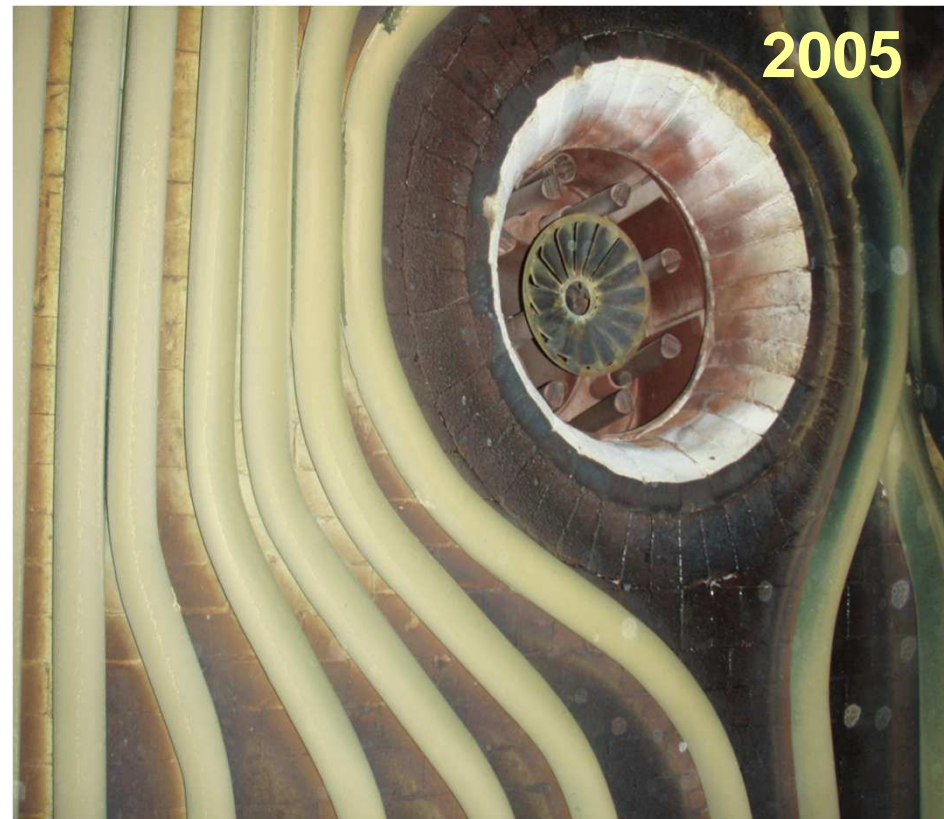


# Diagrama Termodinâmico – Fe & Nb



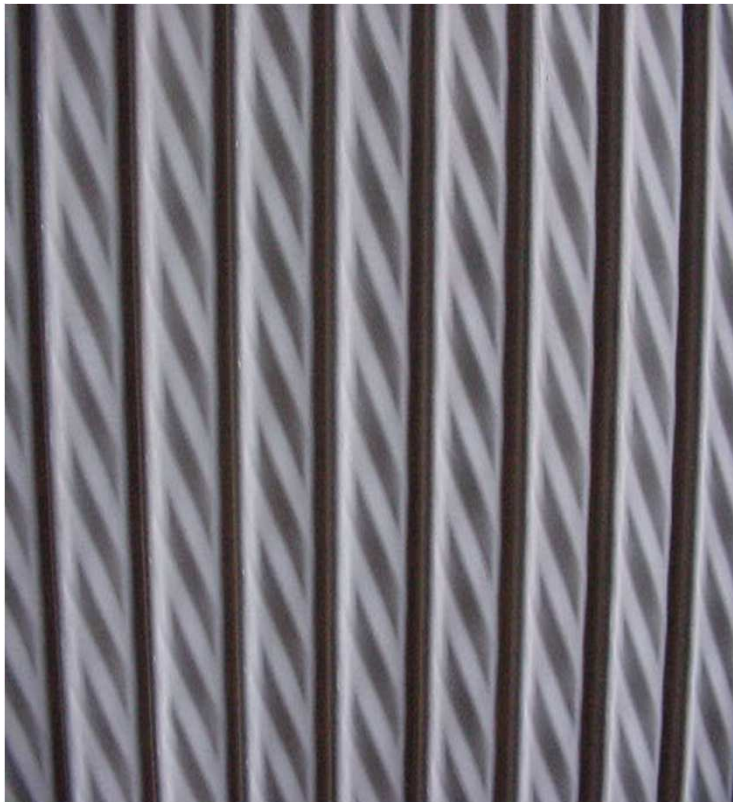
# Metalização – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

## Difusor de ar primário



# Metalização – $\text{Nb}_2\text{O}_5$

## Pré-aquecedor de ar regenerativo – Ljungstrom



# Metalização – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>



# Caldeira Aquatubular



---

- **Sumário**

– **Avaliação de integridade**



# Avaliação de integridade

---



- Norma Regulamentadora – NR-13
- ASME VIII – Div 2
- API-579 – Fitness for Service
- Relatório de Integridade e Análise Vida Residual
  - Anexos END e outros ensaios (rastreadabilidade)
- Relatório de teste das válvulas de segurança – PSVs
  - A frio e a quente

# Caldeira Aquatubular



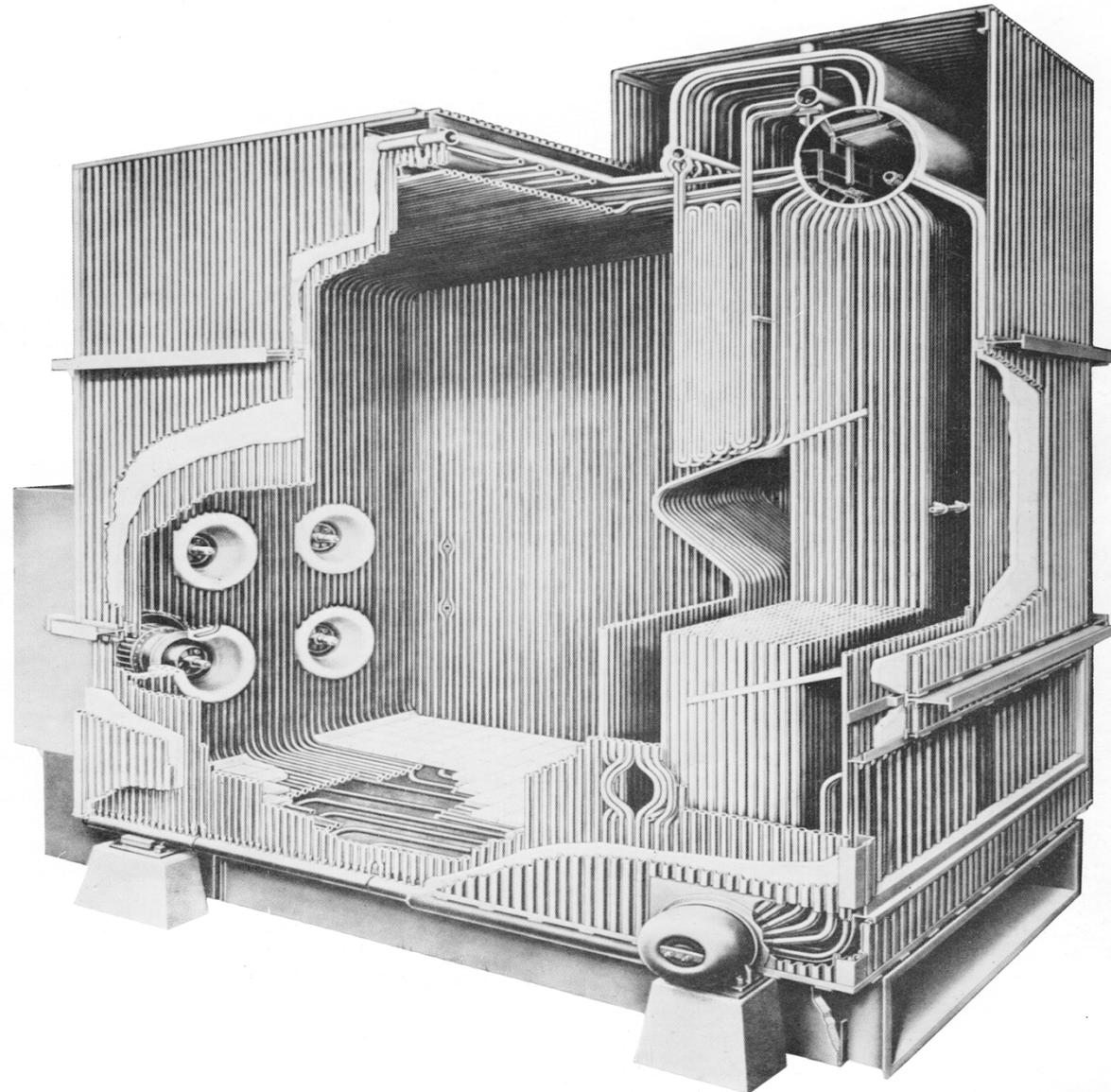
---

- **Sumário**

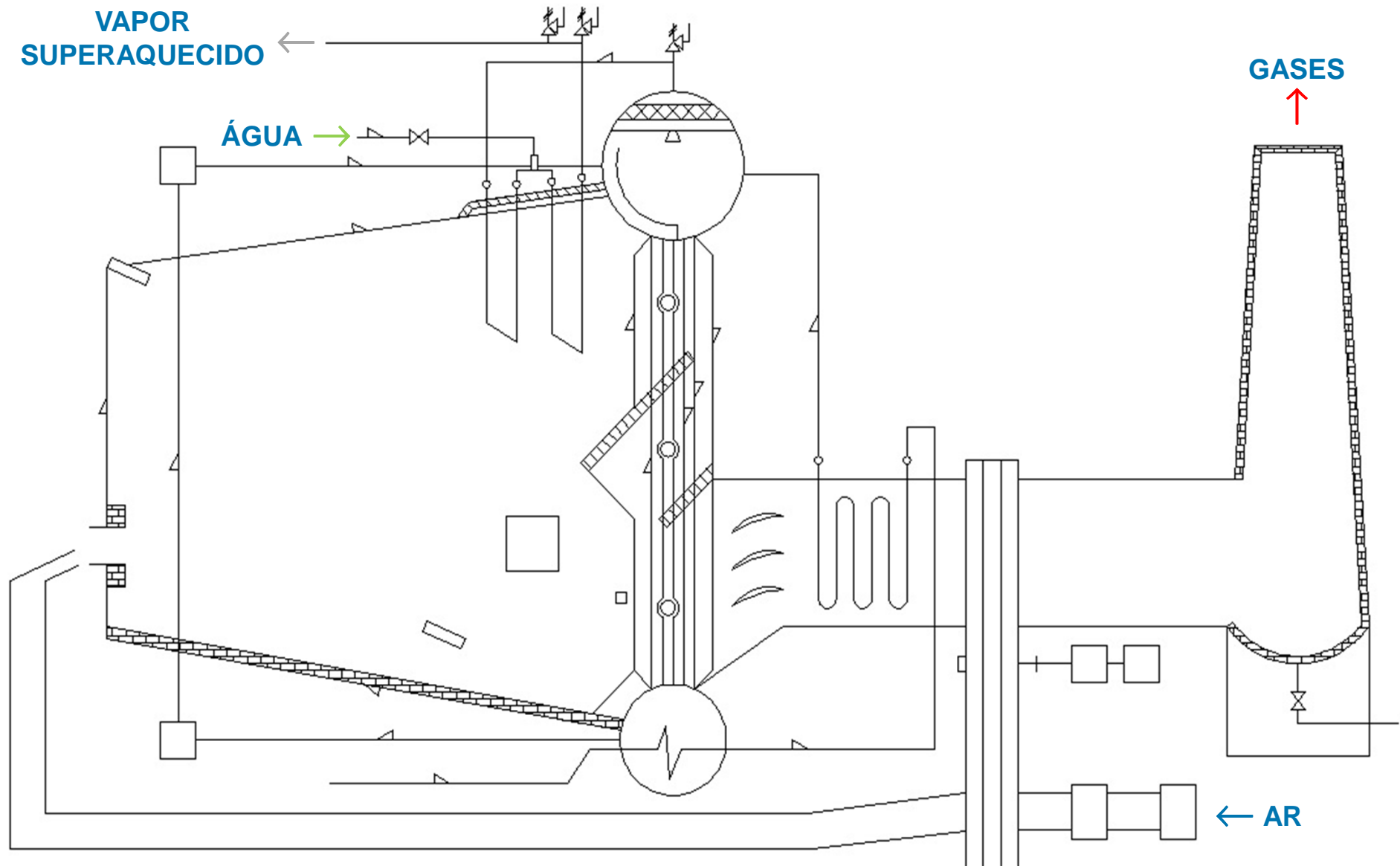
- **Limpeza química**

- **Continuidade operacional x hibernação**

# Caldeira Aquatubular



# Caldeira & Periféricos





**Chico Bento - Na roça é diferente**

**Muito Obrigado**

**Felicidades & Sucesso**



---

# Principais Mecanismos de Danos em Caldeiras

Eng. Marcelo Schultz, MSc – Petrobras

Fórum de Integridade de Caldeiras  
Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP  
06-11-2015