

FÓRUM TÉCNICO: ANÁLISE DE FALHAS

ANÁLISE DE FALHA NA HASTE DA COMPORTA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ



**Davi Carvalho Moreira
Paulo Thadeo de Andrade
Galeze Moraes dos Santos**



**Heloisa Cunha Furtado
Josélio Sena Buarque
Bruno Reis Cardoso
Roberta Santana
Carlos Frederico Trotta Matt
Gláucio Rigueira**



**Bruno Merlin
Rafael Araujo**

ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO
2. PROBLEMA
3. JUSTIFICATIVAS
4. OBJETIVOS
5. METODOLOGIA
6. RESULTADOS
7. CONCLUSÕES
8. REFERÊNCIAS

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Localizada no município de Tucuruí, cerca de 300 km em linha reta da cidade de Belém, aproximadamente na latitude $3^{\circ}45'S$ e longitude $49^{\circ}41'O$.

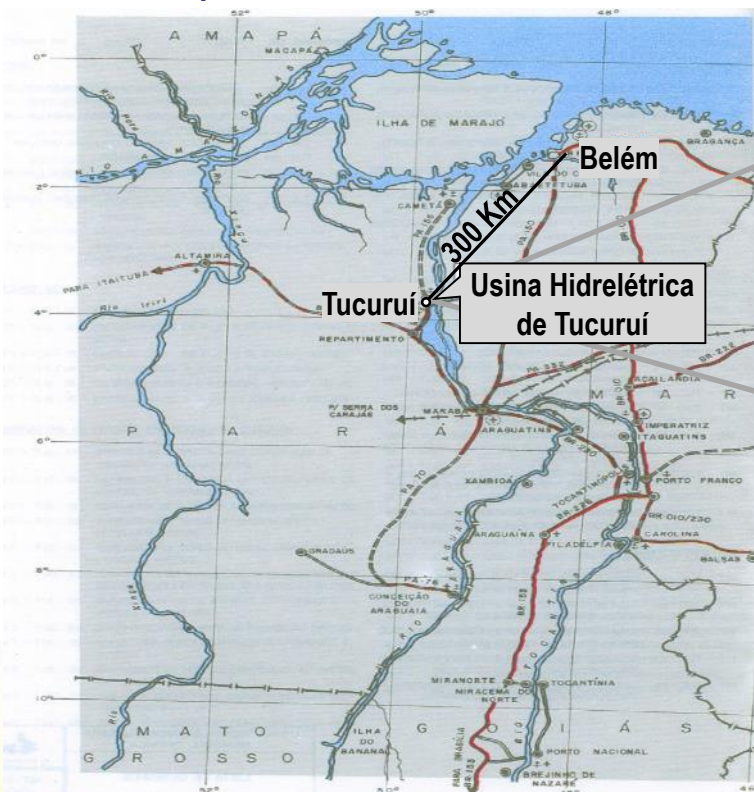


Foto 1 – Usina Hidrelétrica de Tucuruí
Fonte: Próprio Autor

Figura 1 – Localização Geográfica da UHE Tucuruí
Fonte: Memória Técnica da UHE Tucuruí, 1989

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

ARRANJO GERAL DA OBRA

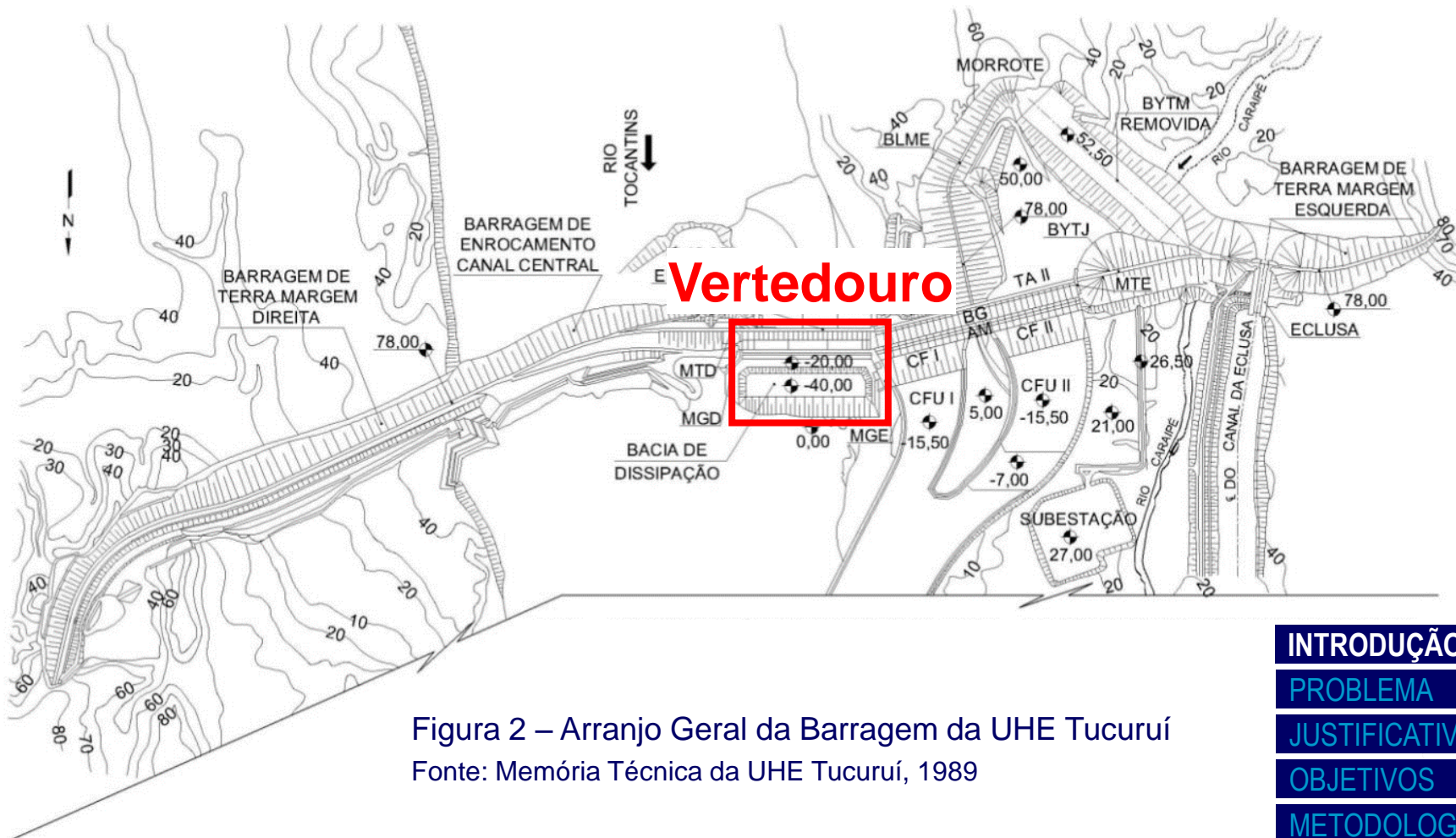


Figura 2 – Arranjo Geral da Barragem da UHE Tucuruí
Fonte: Memória Técnica da UHE Tucuruí, 1989

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

PLANTA BAIXA DO VERTEDOURO

Maior vertedouro do Brasil com vazão de 110.000 m³/s (23 comportas).

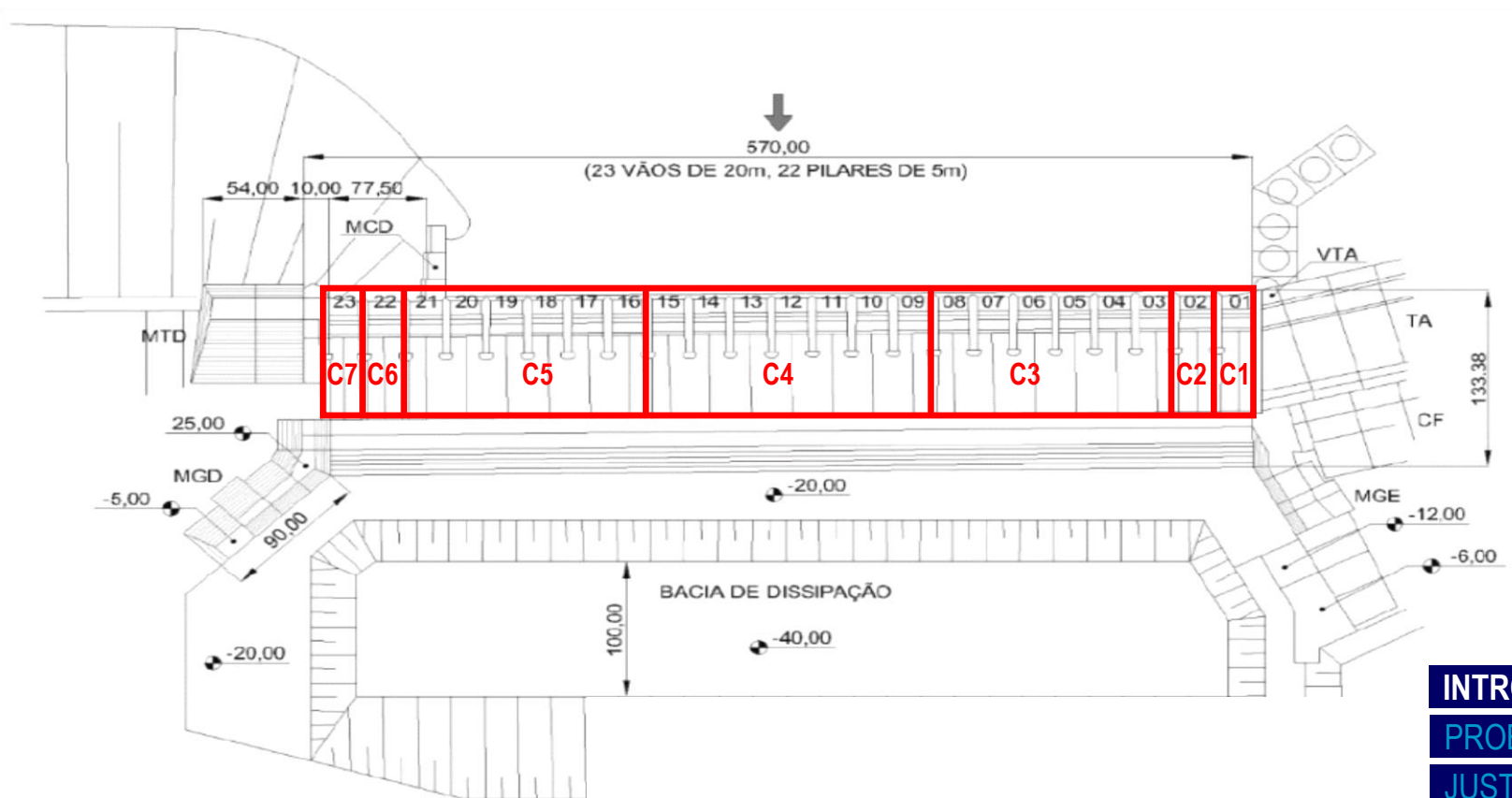


Figura 3 – Planta Baixa do Vertedouro da UHE Tucuruí

Fonte: Memória Técnica da UHE Tucuruí, 1989

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

CORTE LATERAL DO VERTEDOURO

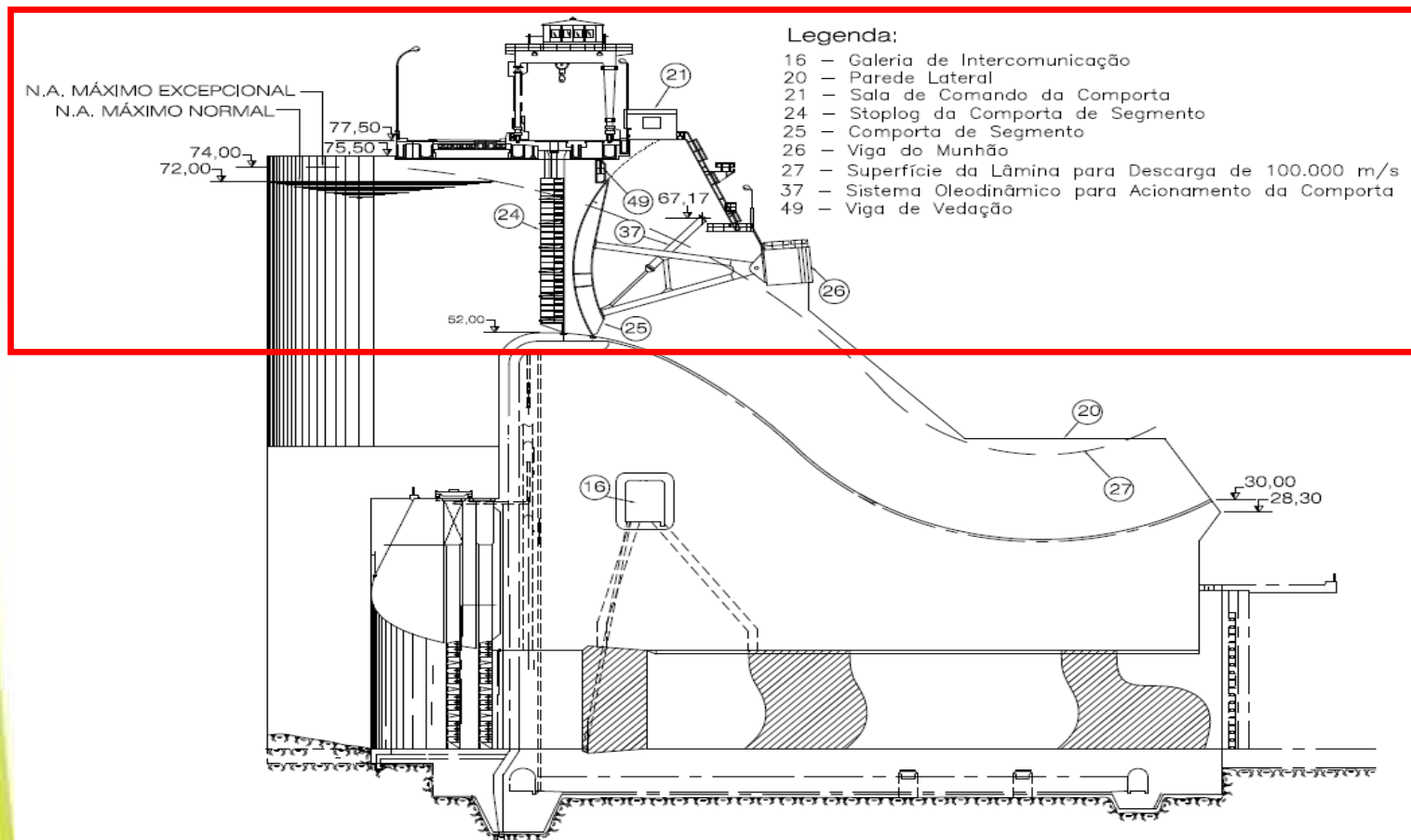


Figura 4 – Corte Lateral da Planta do Vertedouro da UHE Tucuruí

Fonte: Desenho Construtivo TUC-14-2040-R8

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

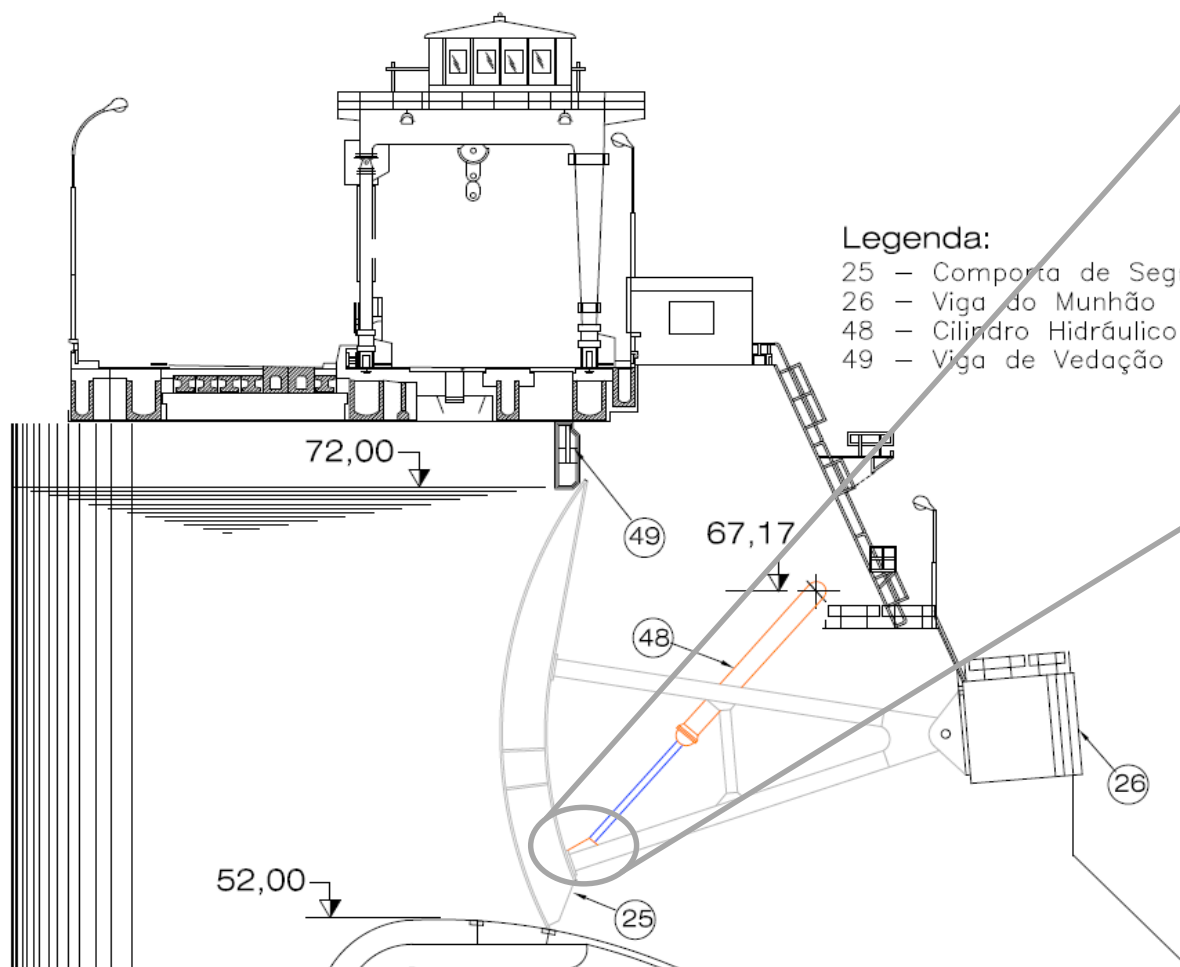
METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

LOCALIZAÇÃO DO PROBLEMA



Legenda:

- 25 - Comporta de Segmento
- 26 - Viga do Munhão
- 48 - Cilindro Hidráulico
- 49 - Viga de Vedação



Foto 2 – Olhal Inferior

Fonte: Próprio Autor

Figura 5 – Detalhe da Comporta de Segmento da UHE Tucuruí

Fonte: Desenho Construtivo TUC-14-2040-R8

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Ruptura nas hastes de movimentação da comporta do vertedouro

Tabela 1 – Sequencial de Eventos de Rupturas e Trincas nas Hastes do Vertedouro

Evento	Descrição	Período
1º	Ruptura na Haste Nº 30 (Comporta 15)	Junho/1995
2º	Trincas nas Hastes Nº 3, 10, 12, 14, 15, 18, 24, 32, 34	Outubro/1997
3º	Ruptura na Haste Nº 3 (Comporta 2)	Janeiro/2013
4º	Ruptura na Haste Nº 37 (Comporta 19)	Fevereiro/2015

Fonte: Próprio Autor



Foto 3 – Haste com Trinca Desbastada

Fonte: Próprio Autor

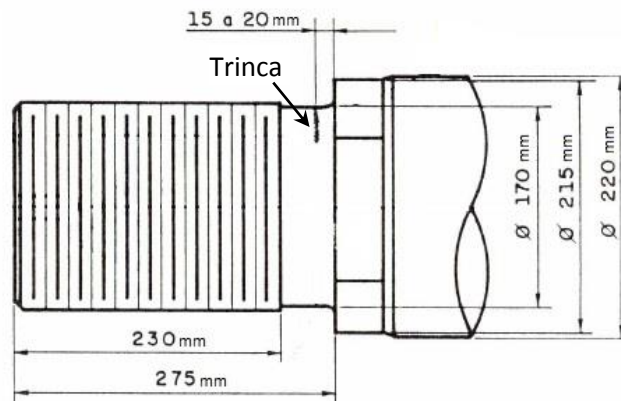


Figura 6 – Croqui da Extremidade Rosqueada da Haste

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

INTERESSE DA ELETRONORTE

- Manter a capacidade nominal de vertimento do vertedouro.
- Manter a operação do vertedouro dentro das condições de projeto.

A operação das comportas do vertedouro deve obedecer a condicionante hidráulica de limitar a diferença de aberturas de comportas entre vãos da mesma calha, **onde possível**, em 1,0 m.

Tabela 2 – Sequencial de Operação Normal das Comportas do Vertedouro

COMPORTAS																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
C1	C2	C3						C4						C5						C6	C7	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0	0

Fonte: Trinta Anos de Operação das 23 Comportas do Vertedouro da UHE Tucuruí - XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2015

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Objetivo Geral

Identificar as causas da ruptura nas hastes dos cilindros hidráulicos das comportas do vertedouro da UHE Tucuruí.

Objetivos Específicos

Propor novos requisitos técnicos do material e projeto da haste.

Fornecer base metodológica para especificação de material e projeto de hastes de outros sistemas, inclusive de vertedouros de outras usinas.

Recomendar ações de manutenção preventiva no sistema de movimentação da comporta.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

HIPÓTESES

- 1ª Hipótese: **Esforços adicionais não previstos** no projeto, principalmente relacionado a resistência ao movimento do olhal inferior.
- 2ª Hipótese: **Falhas no processo de fabricação** do material, principalmente relacionado ao processo de revenimento do aço.
- 3ª Hipótese: **Propriedades mecânicas do material não apropriadas** para essa utilização, principalmente relacionada a tenacidade.
- 4ª Hipótese: **Ataque de corrosão** no local da transição de seção de diferentes diâmetros (**entalhe**).
- 5ª Hipótese: **Coeficientes de segurança** para tensão de ruptura e escoamento **reduzidos** para esforços estáticos, com o mecanismo oleodinâmico em repouso ou em trabalho.
- 6ª Hipótese: **Efeitos da fadiga** devido aos esforços cíclicos causados pela passagem da água pelo vertedouro e/ou pela abertura e fechamento da comporta.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Tabela 3 – Divisão da Investigação

Tópicos	Hipóteses a serem respondidas
ENSAIO EM CAMPO	1ª Hipótese: Esforços adicionais não previstos em projetos
ENSAIOS EM LABORATÓRIO	2ª Hipótese: Falhas no processo de fabricação do material
	3ª Hipótese: Propriedades mecânicas do material não apropriadas
	4ª Hipótese: Ataque de corrosão no entalhe da haste
ANÁLISE NUMÉRICA	5ª Hipótese: Coeficientes de segurança para tensão de ruptura e escoamento reduzidos
	6ª Hipótese: Efeitos da fadiga devido aos esforços cíclicos

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Instalação

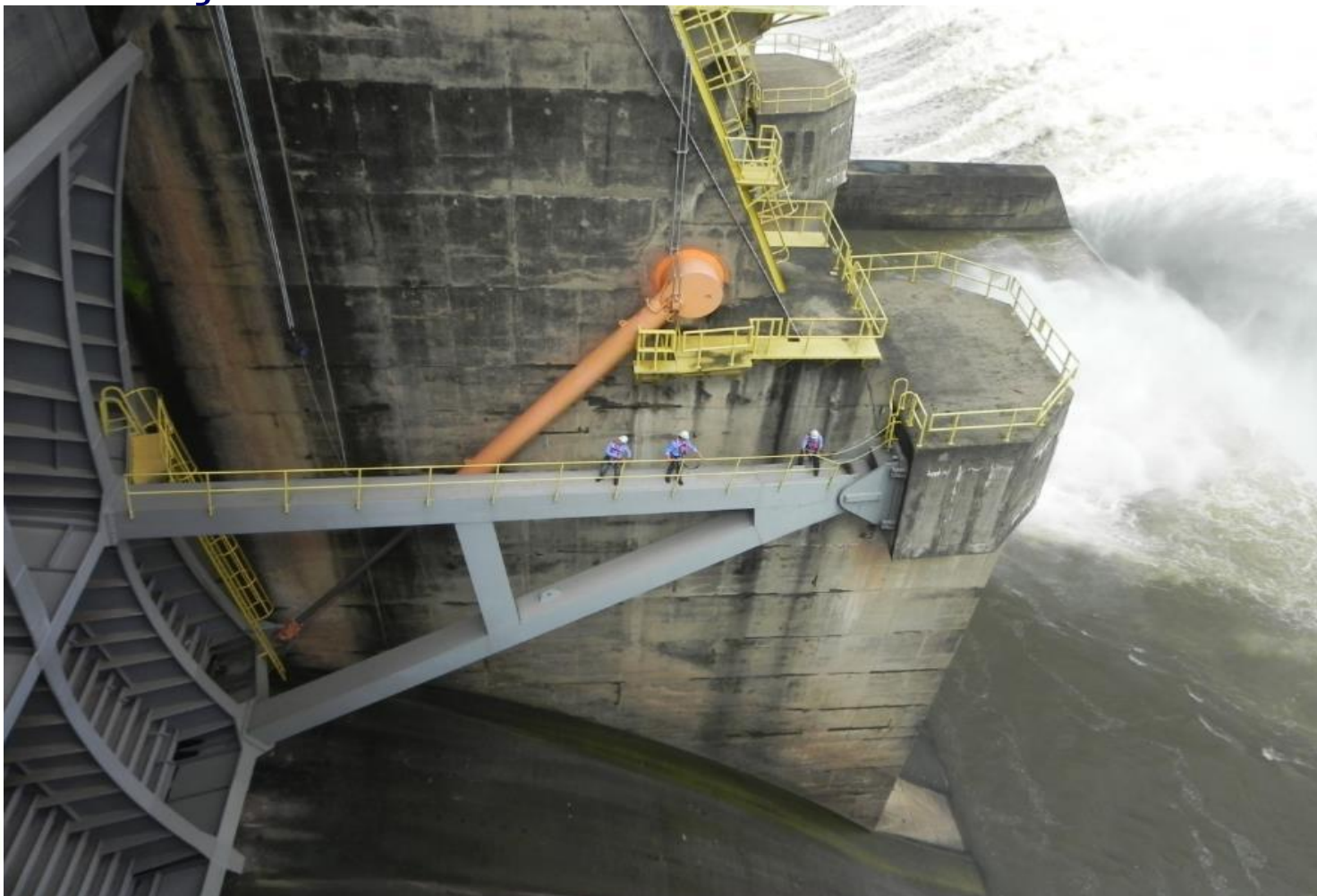


Foto 5 – Deslocamento Sobre a Viga da Comporta de Segmento

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Instalação

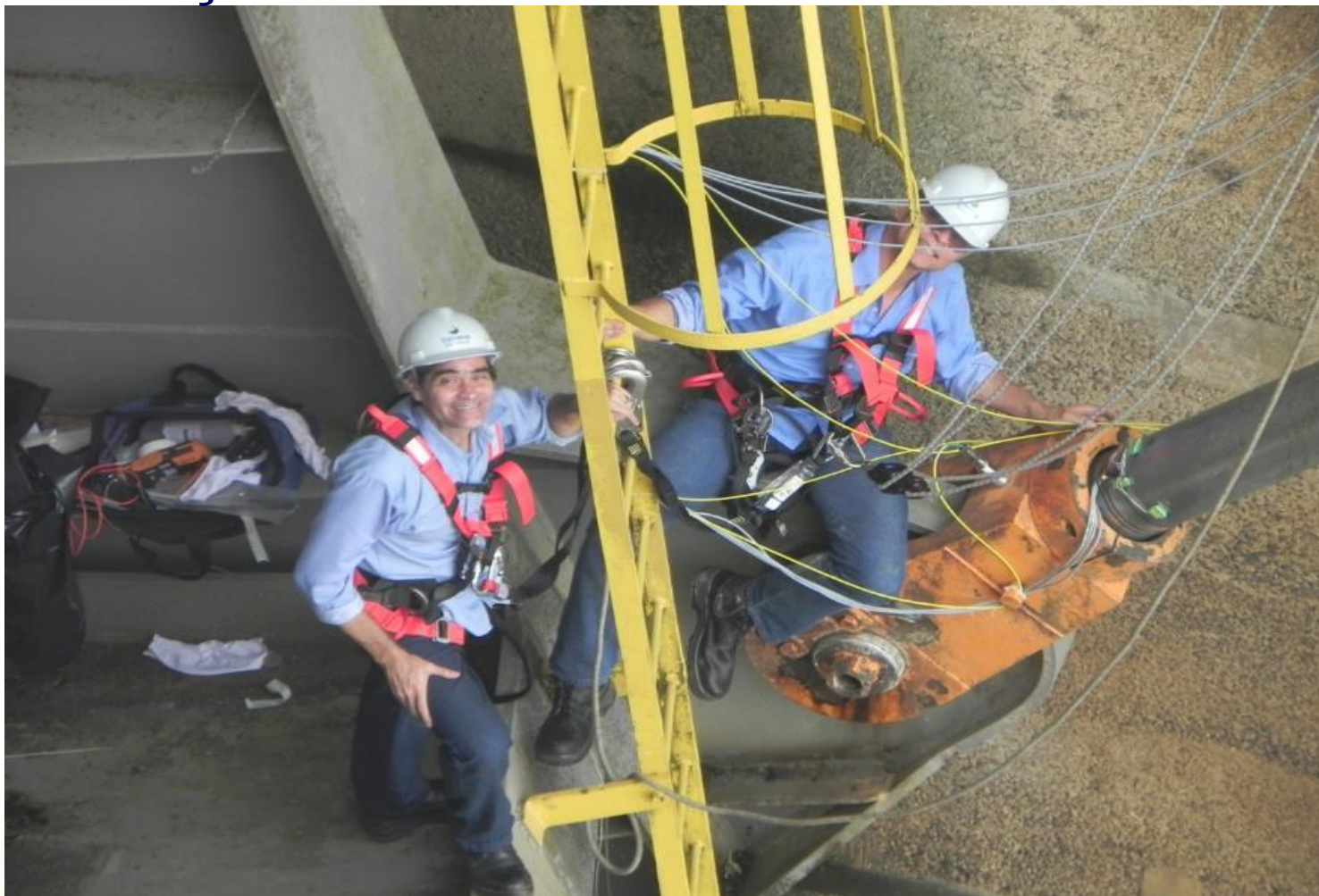


Foto 6 – Instalação dos Extensômetros e Acelerômetros

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Instalação

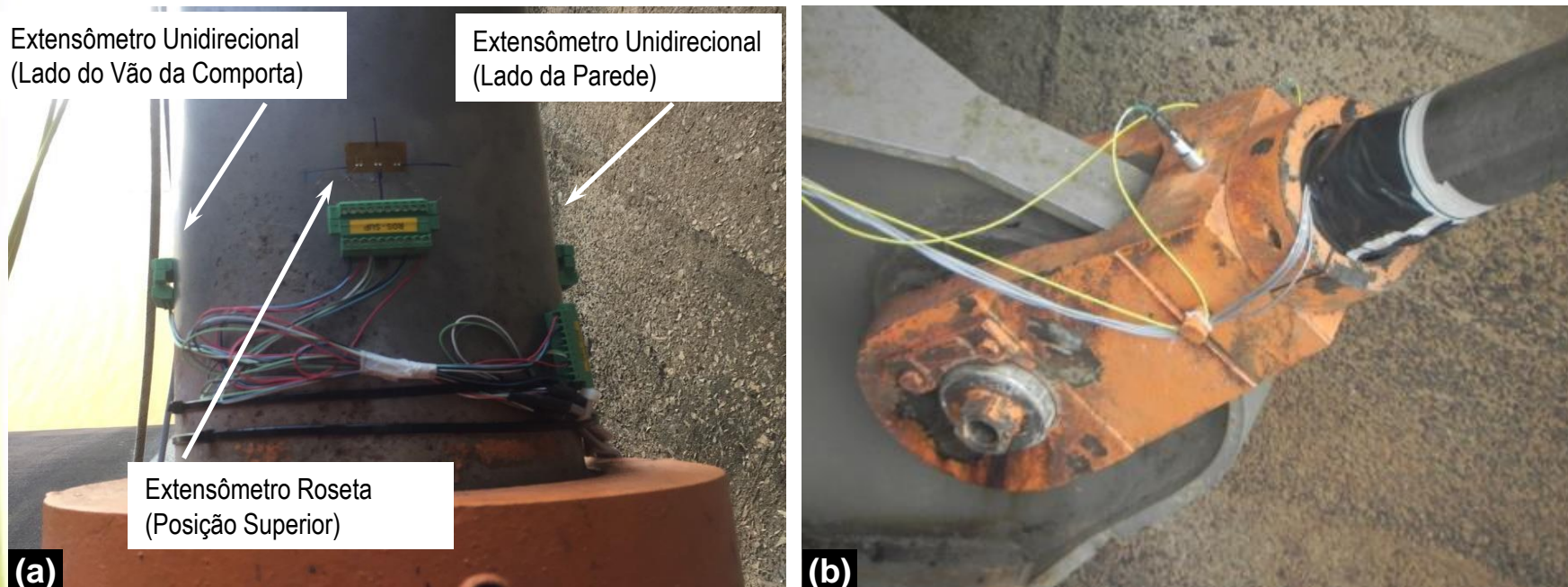


Foto 7 – Instalação dos Extensômetros. (a) Parcial; (b) Final

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS



Foto 8 – Abertura da Comporta com Stop Log

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS



Presença de Água no Olhal Inferior

Foto 9 – Abertura da Comporta sem Stop Log

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Aquisição (MGCplus da HBM)



Foto 10 – Sistema de Aquisição dos Sinais

Fonte: Próprio Autor

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

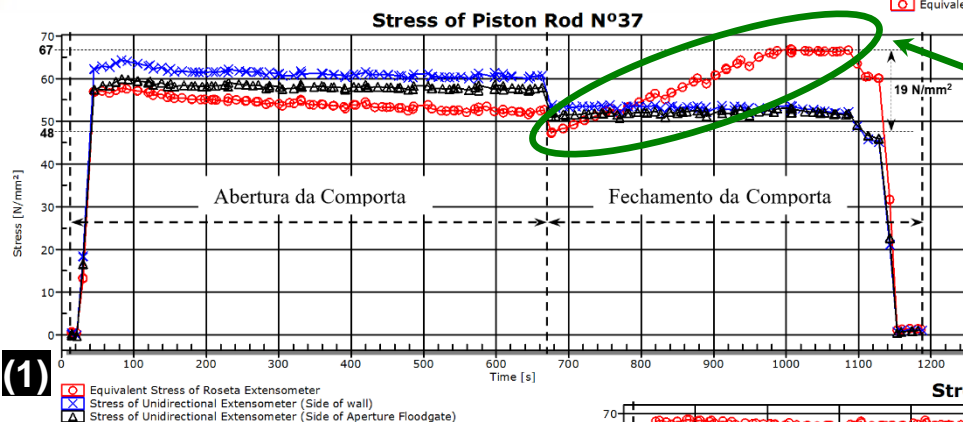
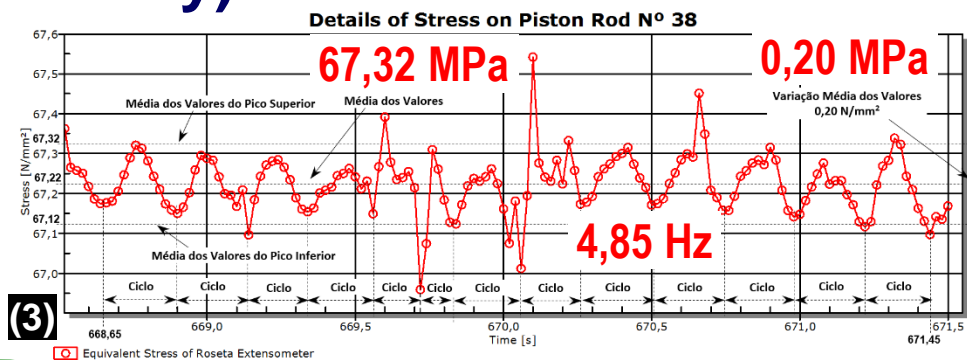
REFERÊNCIAS

Análise dos Dados (catman Easy)

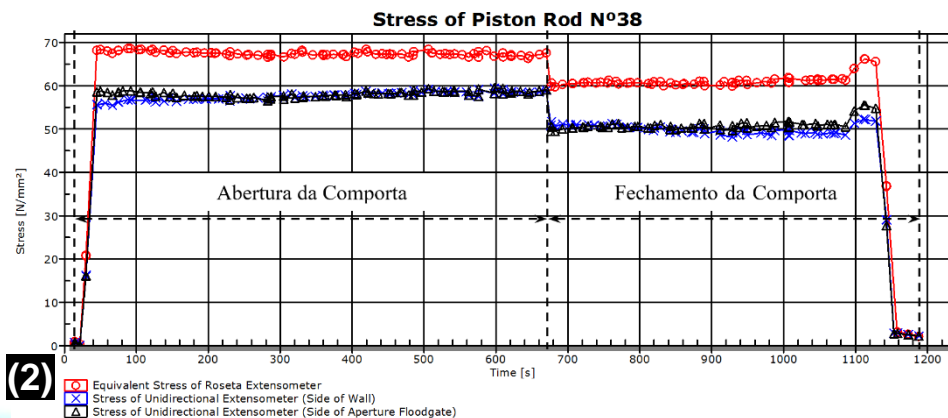
Gráficos:

- (1) Tensão de *von Mises* na Haste Nº 37
- (2) Tensão de *von Mises* na Haste Nº 38
- (3) Variação da Tensão na Haste Nº38

Fonte: Software HBM (catman Easy)



Provável Tensão de Flexão
(Lubrificação do Olhal Inferior)



INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Exame Visual

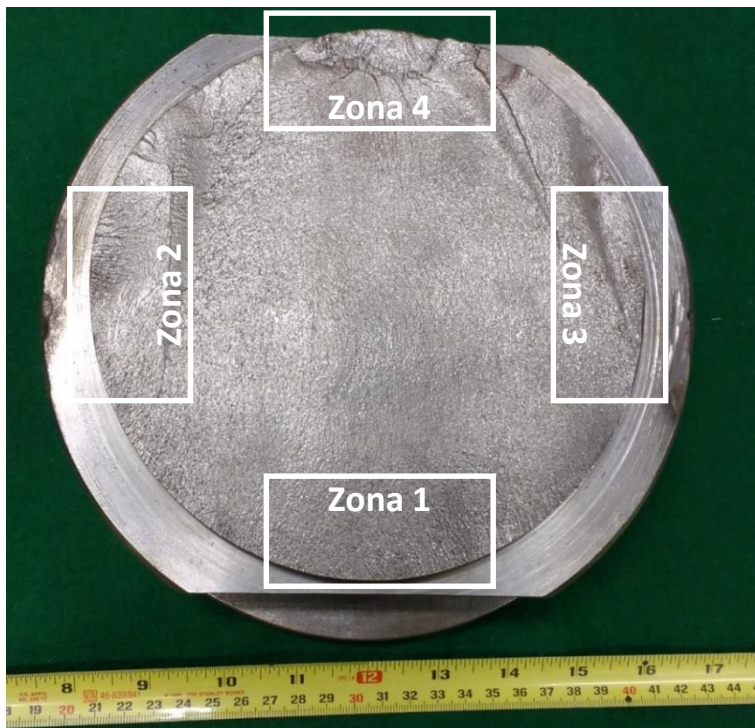


Foto 11 – Superfície fraturada comprometida
Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

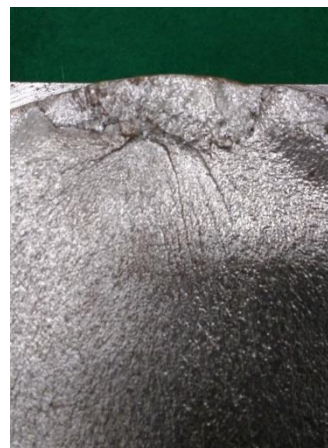


Foto 13 – Detalhe da Zona 4 da superfície de fratura preservada
Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

**Fratura Plana,
Transversal ao Eixo
Típica de Fadiga
Sem Marcas de Praia**



Foto 12 – Superfície fraturada preservada
Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Química

Tabela 4 – Resultados das análises químicas da peça fraturada (wt%)

	C(1)	Mn(4)	P(3)	S (1)	Si (2)	Cr(4)	Ni(4)	Cu(4)	Mo(4)
Amostra 1	0,12	0,86	0,027	0,006	0,43	12,4	0,28	<0,05	<0,05
Amostra 2	0,12	0,86	0,027	0,006	0,43	12,4	0,28	<0,05	<0,05
AISI 410 (ASTM A 276)	0,08-0,15	1 ^{máx}	0,04 ^{máx}	0,03 ^{máx}	1 ^{máx}	11,5-13,5	-	-	-

(1) Combustão direta infravermelho;

(2) Gravimetria e espectrofotometria de absorção atômica;

(3) Volumetria (hidróxido de sódio – acidimetria);

(4) Espectrofotometria de absorção atômica.

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Aço Inoxidável Martensítico ASTM A 276 Tipo 410

Tabela 5 – Resultados das análises químicas de impurezas da peça fraturada (ppm)

	As	Sb	Sn	Sr	Ti
Amostra 1	0,26	<0,02	<0,38	0,004	<0,003
Amostra 2	0,26	<0,02	<0,38	0,004	<0,003

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Fator J de WATANABE = 348 > 100 (API RP 571)
Susceptibilidade à Fragilização ao Revenido

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Ensaio de Dureza e Microdureza

Tabela 6 – Resultados dos Ensaios de Microdureza

	Local de medição	Medida (HV)	Convertida (HRc)
Microdureza	Junto a superfície (concentração de trincas)	288 \pm 14	28
	Matriz	375 \pm 5	38
	Ponta	353 \pm 4	36
	Trinca	277 \pm 4	27
	Ferrita Delta	277 \pm 4	27

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de Dureza

	Local de medição	Medida (HRc)
Dureza	Amostra 1	28 \pm 2
	Amostra 2	26 \pm 2
	Amostra 3	27 \pm 1
	Ponto 1	27 \pm 2
	Ponto 2	27 \pm 1
	Ponto 3	27 \pm 2
	Ponto 4	27 \pm 2

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Dureza ligeiramente acima da faixa (20 a 25 HRc) susceptível a Corrosão Sob Tensão (Hare, 1992).

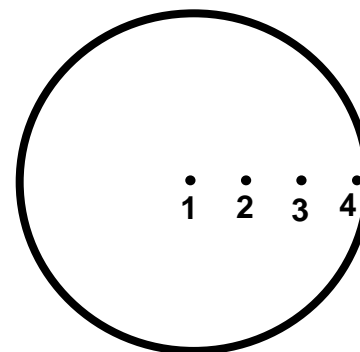


Figura 7 – Esquemático dos Pontos de Medição da Dureza

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

- INTRODUÇÃO
- PROBLEMA
- JUSTIFICATIVAS
- OBJETIVOS
- METODOLOGIA
- RESULTADOS**
- CONCLUSÕES
- REFERÊNCIAS

Ensaio de Tração

Tabela 8 – Resultados dos Ensaios de Tração

	Amostra	Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
Sem Corrosão	CP1	602,8	751,8
	CP2	649,2	713,9
	CP3	517,4	669,4
	CP4	684,9	820,2
	CP5	685,1	837,3
	CP6	688,6	823,2
	CP7	704,5	846,3
Com Corrosão	CP8	556,1	798,4
	CP9	655,2	782,8
AISI 410 Cond. T (ASTM A 276)		≥ 550,0	≥ 690,0

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Aço Inoxidável Martensítico ASTM A 276 Tipo 410 Condição T

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Ensaio Charpy

Tabela 9 – Resultados dos Ensaio Charpy

	Amostra	Energia Absorvida (J)
Transversal	CP1	5,58
	CP2	7,56
	CP3	7,23
	CP4	5,42
	CP5	5,50
Longitudinal	CP6	5,10
	CP7	8,65
	CP8	5,66
	CP9	7,06
	CP10	6,24

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Baixa tenacidade e baixa resistência ao impacto.

Valor mínimo aceitável de 25 J para resistência ao impacto do aço AISI 410 (Hiser, 1989).

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS



Ensaio de Fadiga

Relação de Coffin-Manson (Método ϵ -N)

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_c}{E} (2N)^b + \epsilon_c (2N)^c$$

onde,

$2N$ = Número de Reversões da Tensão até a falha

σ_c = Coeficiente de Resistência à Fadiga

b = Expoente de Resistência à Fadiga

ϵ_c = Coeficiente de Ductibilidade à Fadiga

c = Expoente de Ductibilidade à Fadiga

Tabela 10 – Parâmetros da Curva ϵ -N de Coffin-Manson da Haste Fraturada

		Propriedade do Material	Valor
Parâmetros de Coffin-Manson		Coeficiente de Resistência à Fadiga (σ_c)	880 Mpa
		Expoente de Resistência à Fadiga (b)	-0,043
		Coeficiente de Ductibilidade à Fadiga (ϵ_c)	0,282
		Expoente de Ductibilidade à Fadiga (c)	-0,697

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Metalográfica

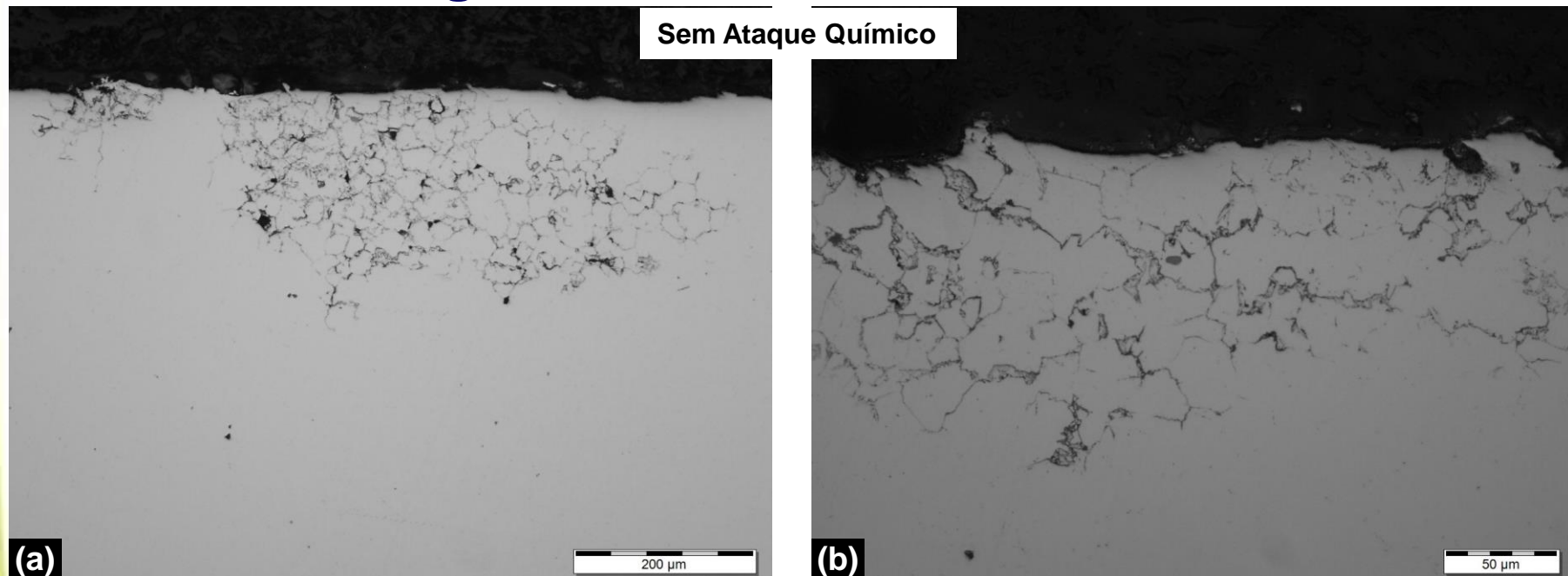


Figura 8 – Corrosão intergranular junto a superfície da peça fraturada.

a) Aumento 200x; b) Aumento 500x

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Corrosão intergranular junto à superfície de fratura.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Metalográfica

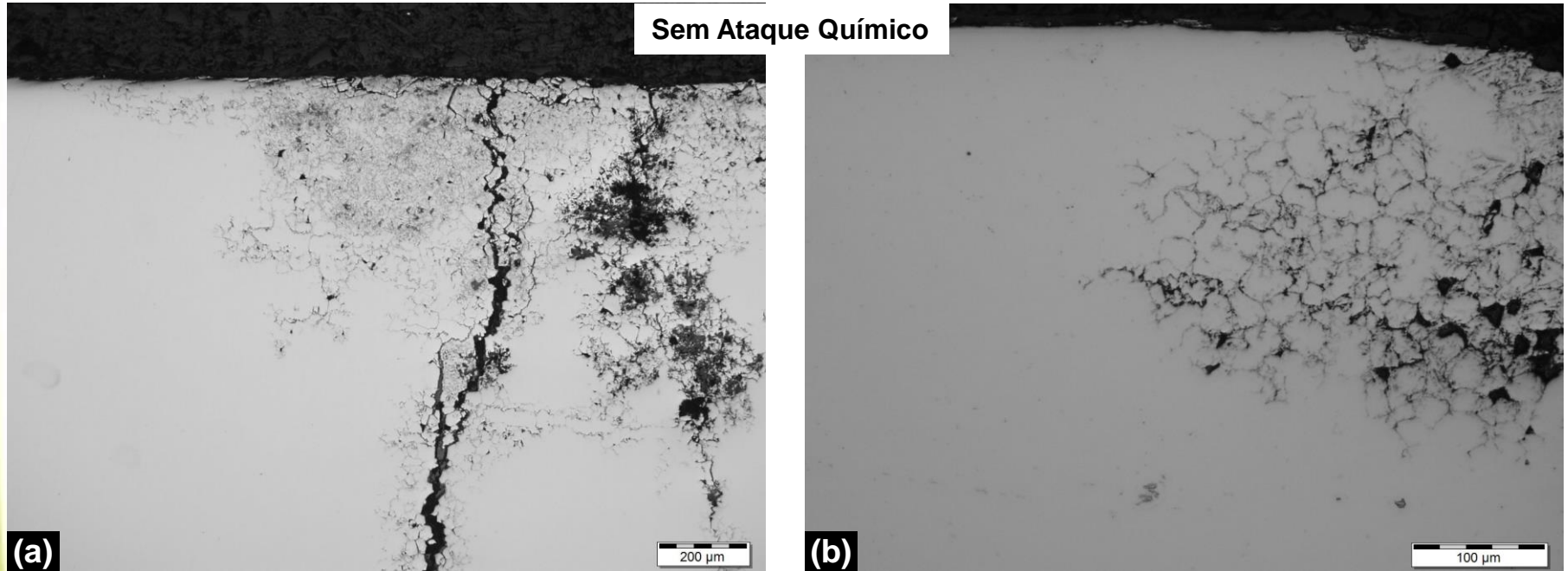


Figura 9 – Propagação intergranular de trincas, arrancamentos de grãos da austenita prévia junto à superfície da peça fraturada. a) Aumento 200x; b) Aumento 500x

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Propagação intergranular de trincas, com trincas secundárias.

Arrancamentos de grãos da austenita prévia.

Região de intensa corrosão intergranular.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Metalográfica

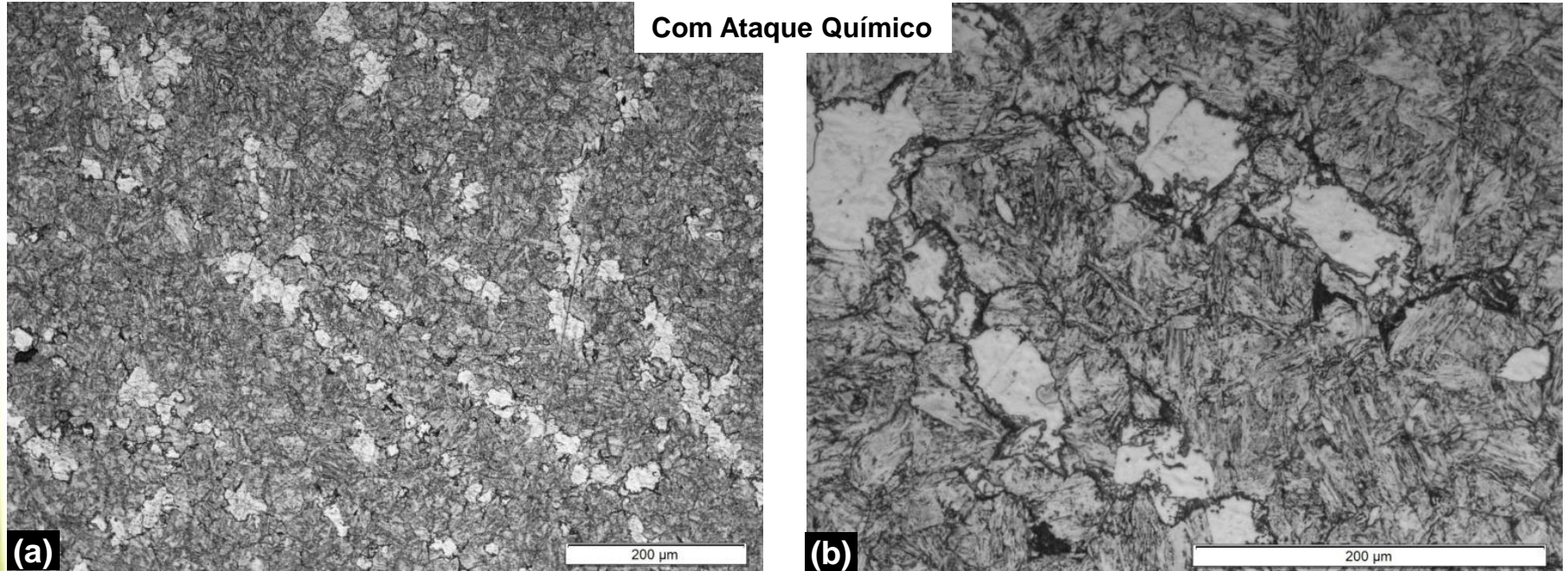


Figura 10 – Estrutura metalográfica formada por martensita revenida e ferrita δ próximo à borda da peça fraturada. a) Aumento 200x; b) Aumento 400x

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Microestrutura totalmente martensítica com regiões de ferrita δ alinhadas.

Contornos de grão de austenita formada anteriormente à transformação martensítica.

Ferrita δ no aço inoxidável martensítico piora suas propriedades mecânicas, diminuindo a tenacidade ao impacto (Sagalevich *et al.*, 1970).

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Metalográfica

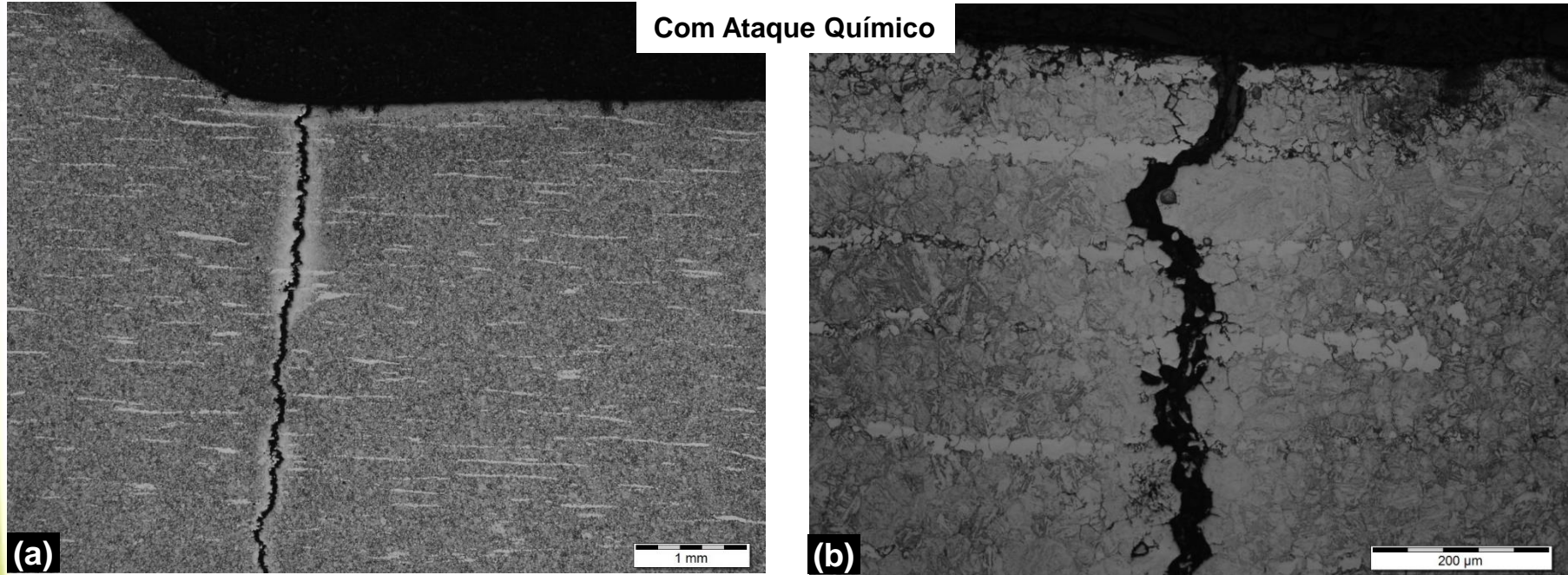


Figura 11 – a) Trincas não acompanham preferencialmente a ferrita δ . Aumento 25x;
b) Trincas acompanham os contornos de grãos. Aumento 200x.

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

Trincas não acompanham preferencialmente a ferrita δ , indicando não ser o agente fragilizador preferencial do material.

Trincas acompanham os contornos de grão em geral, tanto da ferrita δ como da austenita prévia.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

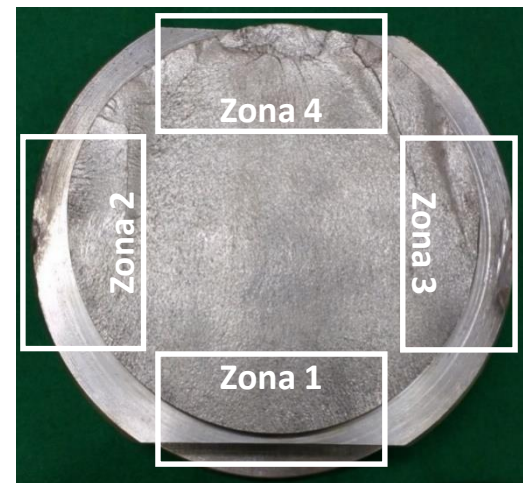
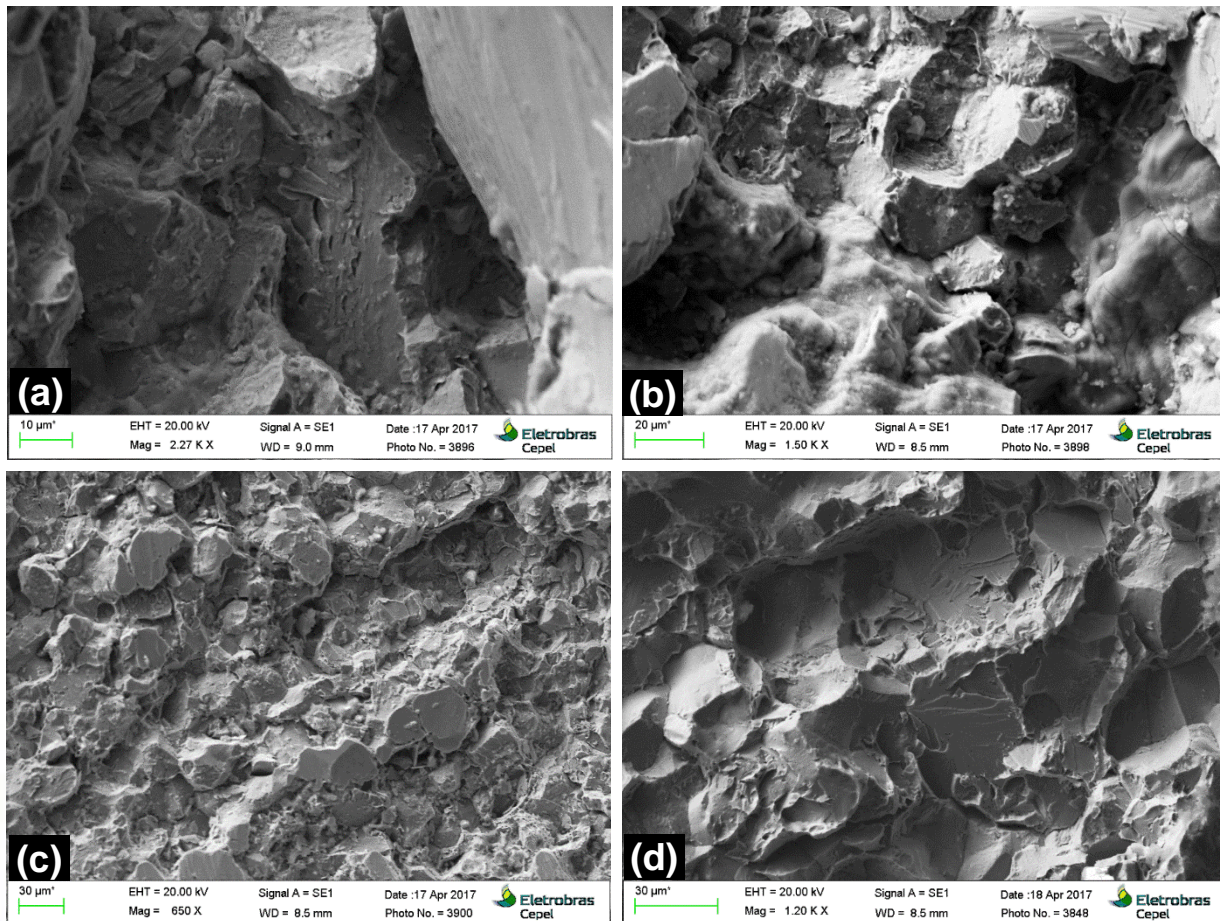
METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Análise Fratográfica



Ruptura intergranular com sinais de clivagem nas 4 zonas.

Figura 12 – Grãos com sinais de clivagem da peça fraturada. a) Zona 1. Aumento 2270x. b) Zona 2. Aumento 1500x. c) Zona 3. Aumento 650x. d) Zona 4. Aumento 1000x.

Fonte: Relatório Técnico 526/2018 (CEPEL)

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Estudo de Convergência

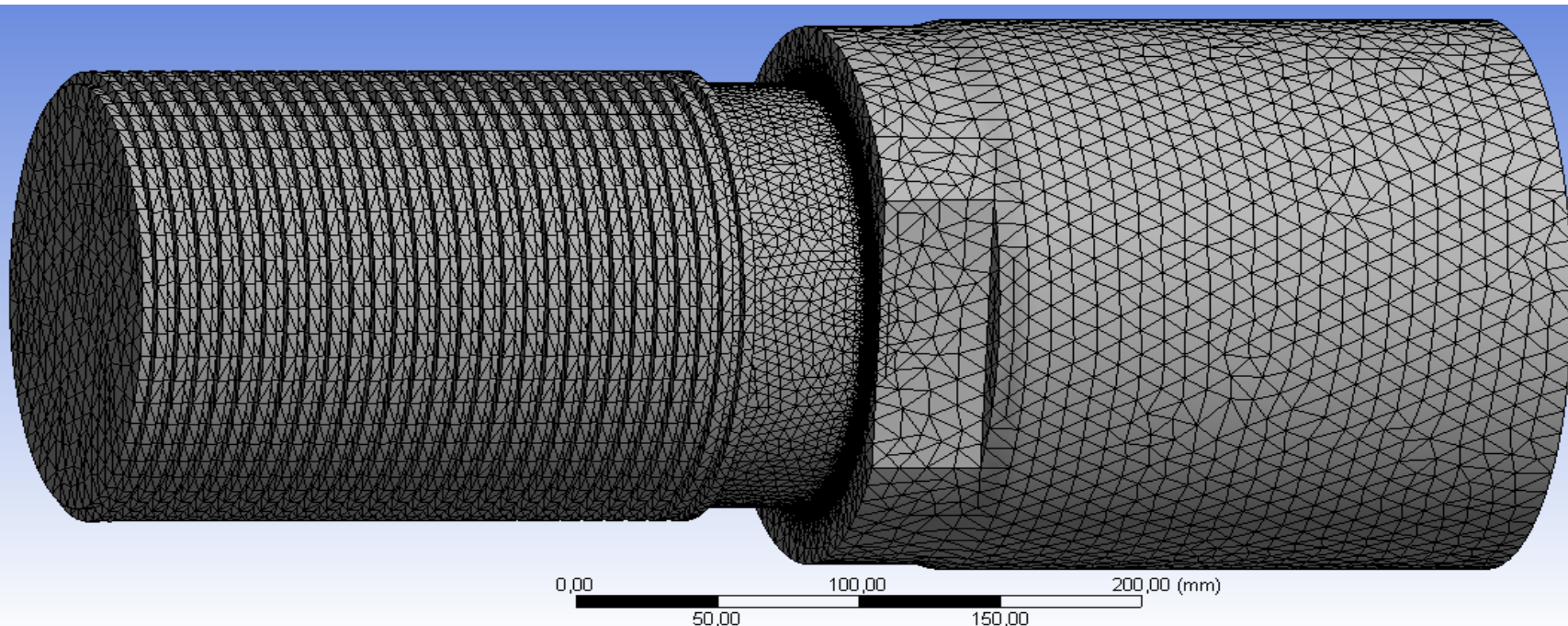


Figura 13 – Malha de Elementos Finitos da Extremidade Rosqueada da Haste.

Fonte: Software ANSYS 17.0 (Arquivo Stress in the Notch.wbpj)

Tabela 11 – Resultado do Estudo de Convergência

	Tensão Máxima (MPa)	Erro (%)	Número de Nós	Número de Elementos
Sem Refinamento	411,29	-	445.303	298.422
Com Refinamento	412,32	0,26	1.116.283	766.336

Fonte: Software ANSYS 17.0 (Arquivo Stress in the Notch.wbpj)

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Concentração de Tensão

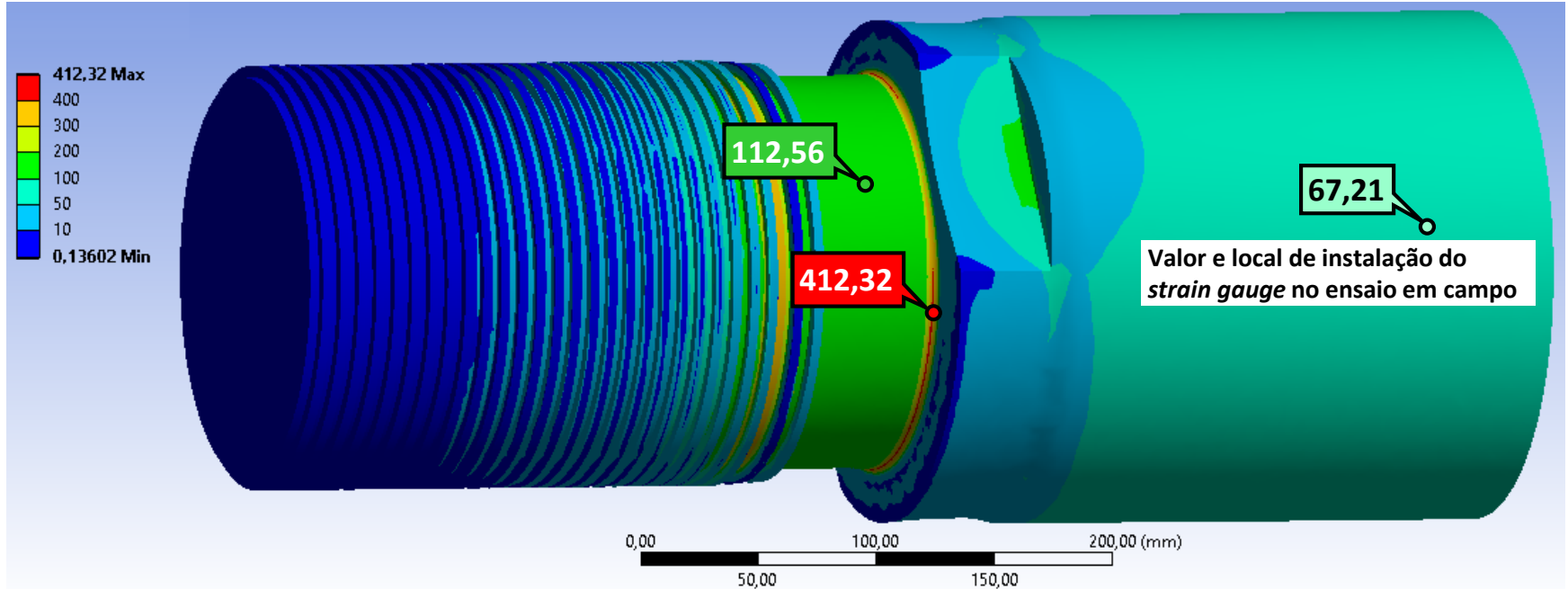


Figura 14 – Tensões Equivalentes de von Mises na Extremidade Rosqueada da Haste.

Fonte: Software ANSYS 17.0 (Arquivo Stress in the Notch.wbpj)

Aparecimento de Corrosão Sob Tensão (CST)

Tensão no entalhe (412,32 MPa) é maior que 63% da tensão de escoamento (média 647,50 MPa).

Baixa tenacidade propicia condições menos severas para o surgimento de CST (ASM, Fractography and Atlas of Fractographs, p. 113);

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Fadiga de Muito Alto Ciclo Passagem da Água pela Comporta

Carregamento senoidal com amplitude variando 99% a 100% da força da nominal do sistema oleodinâmico.

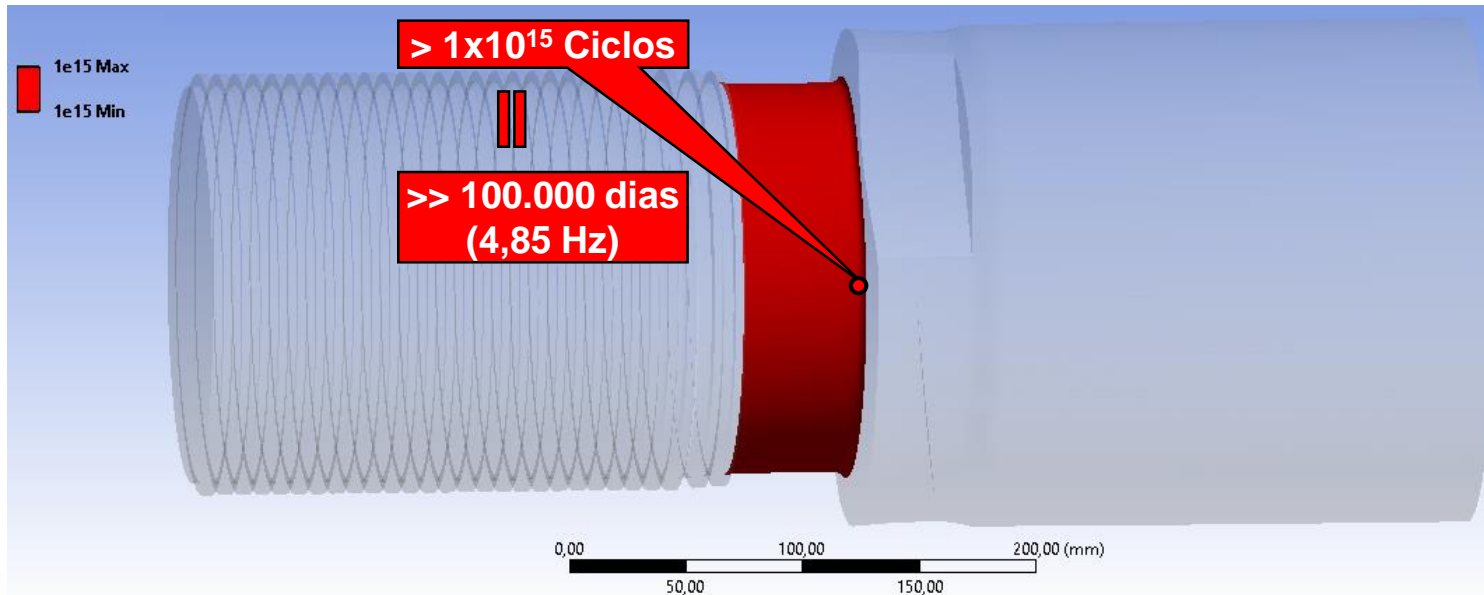


Figura 15 – Distribuição da Vida por Fadiga (Passagem da Água pela Comporta)

Fonte: Software ANSYS 17.0 (Arquivo Stress in the Notch.wbpj)

Média de 2.405 dias de operação do vertedouro no período de 1985 à 2016.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Fadiga de Baixo Ciclo Abertura e Fechamento da Comporta

Carregamento senoidal com amplitude variando 0% a 100% da força da nominal do sistema oleodinâmico.

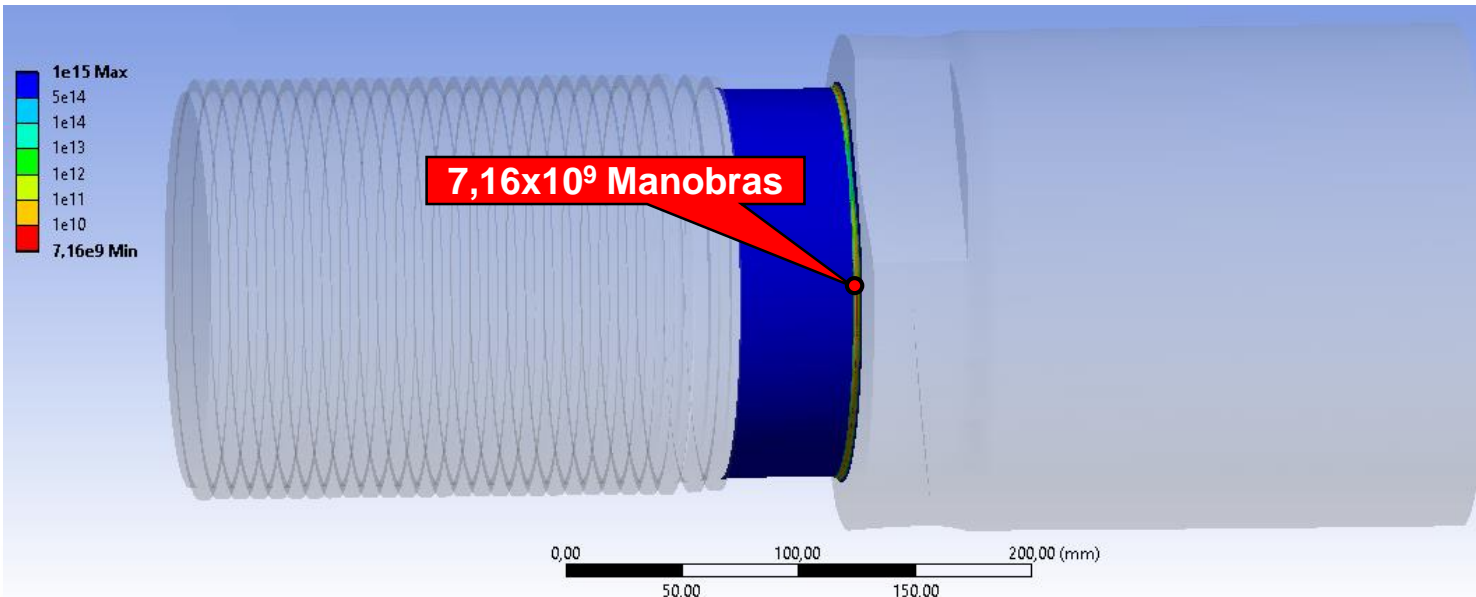


Figura 16 – Distribuição da Vida por Fadiga (Abertura e Fechamento da Comporta)

Fonte: Software ANSYS 17.0 (Arquivo Stress in the Notch.wbpj)

Média de 920 manobras nas comportas do vertedouro no período de 1985 à 2016.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

CONCLUSÕES

A haste rompeu devido a **baixa tenacidade** e **resistência à corrosão do aço**, associada ao efeito de entalhe da zona crítica de transição da seção da haste. Estas condições, propiciaram a nucleação e crescimento de várias trincas de fadiga até a ruptura total, frágil.

O desempenho aço inoxidável martensítico utilizado na confecção da haste decorre do **tratamento térmico inadequado** durante seu processo de fabricação, que resultou em elevado teor de ferrita δ , fragilização ao revenido, baixa tenacidade e susceptibilidade à corrosão sob tensão.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

RECOMENDAÇÕES

Inspeção por **líquido penetrante** todas as hastes que estão em operação no vertedouro.

Aplicação de **graxa** durável e de baixa fluidez (EXBS 64/12 da Mobil Oil) na extremidade rosqueada da haste.

Substituição das hastes pode ser feita nos aços **AISI 410**, AISI 420 ou em aço inoxidável martensítico do tipo 15%Cr-5%Ni, de **alta tenacidade** (mínimo 25 J).

Melhoramento do **projeto construtivo** da extremidade rosqueada da haste, principalmente relacionado ao raio de concordância do entalhe.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

AGRADECIMENTOS

À Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A – **ELETRONORTE**, pelo apoio financeiro;

Em especial, ao Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – **CEPEL**, pela realização dos ensaios em laboratório e análise da falha.



À Universidade Federal do Pará – **UFPA**, pelo apoio nas análises numéricas;

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 571**: Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry. 2^a. ed. Washington: API Publishing Services, 2011. 257 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A276-06**: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. West Conshohocken: ASTM International, 2006. 7 p.

ARAÚJO, Á. L. D.; LOPES, M. L.; PEREIRA, G. M. **Trinta Anos de Operação das 23 Comportas do Vertedouro da UHE Tucuruí**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30. Foz do Iguaçu: Anais do XXX SNGB. 2015.

CEPEL. **Relatório Técnico 526/2018**: Análise de falha da haste do servomotor da comporta do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Rio de Janeiro: CEPEL, 2018. 63 p.

ELETRONORTE. **Memória Técnica**: Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Brasília: Coordenadoria Técnica do Projeto Memória Eletronorte, 1989. 579 p.

HARE, J. M. Fatigue failure of a circulating water pump shaft. In: ESAKLUL, K. A. **Handbook of Case Histories in Failure Analysis**. Novelty: ASM International, v. 2, 1992. p. 348-353.

HISER, A. L. **Fracture toughness characterization of Type 410 stainless steel: Final report**. Materials Engineering Associates, Inc. Lanham, MD. 1989.

ISHIGURO, T.; MURAKAMI Y.; OHNISHI, K; WATANABE, J. A 2.25Cr-1Mo pressure vessel steel with improved creep rupture strength. In: SANGDAHL, G. S.; SEMCHYSHEN, M. **Applications of 2.25%Cr-1%Mo Steel for Thick-wall Pressure Vessels**. 1^a. ed. Philadelphia: ASTM International, 1982. p. 129–147.

SAGALEVICH, Ye. A.; POTAK Ya. M.; SACHKOV V. V. **The effect of delta ferrite on the properties of low-carbon martensite stainless steels**, Foreign Technology Division Wright-Patterson AFB (Ed.), Dayton, OH, 1970.

INTRODUÇÃO

PROBLEMA

JUSTIFICATIVAS

OBJETIVOS

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

Obrigado!!!



Davi Carvalho Moreira

Msc. Eng^o Segurança de Barragens

E-mail: davimoreira@eln.gov.br

Celular: (94) 98121-0121