

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**PLANO OTIMIZADO DE INSPEÇÃO DE MEDIÇÃO DE  
ESPESSURA COM BASE NA MATRIZ DE RISCO DAS  
REGIÕES INTERNAS DE UMA CALDEIRA DE  
RECUPERAÇÃO - PROPOSTA**

**ELDER COSTA SOEIRO  
FÁBIO ALVES ANTONIOLLI**

**VITÓRIA – ES  
12/2005**

**ELDER COSTA SOEIRO  
FÁBIO ALVES ANTONIOLLI**

**PLANO OTIMIZADO DE INSPEÇÃO DE MEDIÇÃO DE  
ESPESSURA COM BASE NA MATRIZ DE RISCO DAS  
REGIÕES INTERNAS DE UMA CALDEIRA DE  
RECUPERAÇÃO - PROPOSTA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Elder Costa Soeiro e Fábio Alves Antoniolli, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
12/2005**

**ELDER COSTA SOEIRO  
FÁBIO ALVES ANTONIOLLI**

**PLANO OTIMIZADO DE INSPEÇÃO DE MEDIÇÃO DE  
ESPESSURA COM BASE NA MATRIZ DE RISCO DAS  
REGIÕES INTERNAS DE UMA CALDEIRA DE  
RECUPERAÇÃO - PROPOSTA**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. MsC Oswaldo Paiva Almeida Filho  
Orientador**

---

**Prof. MsC Rogério Silveira de Queiroz  
Examinador**

---

**Prof. DsC João Luiz Marcon Donatelli  
Examinador**

**Vitória - ES, 22/ 12/ 2005**

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos este trabalho aos nossos pais e familiares, amigos, namoradas, professores e alunos do Curso de Engenharia Mecânica pelo apoio e compreensão que nos foi dispensado durante estes anos de graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Técnico de Inspeção Sérgio Sthal por ter contribuído com sua experiência profissional e motivação que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Aos inspetores especializados em caldeiras de recuperação, aos membros do Comitê de Caldeiras de Recuperação do Brasil e aos coordenadores da Fábrica de Celulose em estudo.

E a Deus por ter nos proporcionado a oportunidade de ter realizado e concluído este Estudo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Caldeira Cornovaglia .....	20
Figura 2-2 Caldeira Locomotivas e Locomóveis.....	22
Figura 2-3 Caldeira Escocesa .....	23
Figura 2-4 Exemplo de caldeira aquatubular de tubos retos.....	24
Figura 2-5 Caldeira aquatubular de tubos retos .....	24
Figura 2-6 Caldeira de circulação forçada com recirculação .....	27
Figura 2-7 Caldeira de La Mont e W. Workauf de circulação natural, porém com tubulão ligado à tubos de grande diâmetro que por sua vez se ligam ao feixe de troca de calor de tubos com diâmetros menores. ....	28
Figura 3-1 Caldeira de Recuperação com indicação das principais regiões.....	30
Figura 3-2 Funcionamento esquemático de um aparelho de ultra-som.....	49
Figura 3-3 Realização do teste de ultra-som.....	50
Figura 3-4 Aparelho medidor de espessura por ultra-som.....	52
Figura 3-5 Características Técnicas das Caldeiras de Recuperação .....	53
Figura 3-6 Dados técnicos das Caldeiras de Recuperação .....	54
Figura 4-1 Curva de tendência do Painel 35 - Elevação 55.420 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	64
Figura 4-2 Curva de tendência do Painel 2 - Elevação 61.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	64
Figura 4-3 Curva de tendência do Painel 11 - Elevação 58.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	65
Figura 4-4 Curva de tendência do Painel 4 - Elevação 64.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	65
Figura 4-5 Curva de tendência do Painel 23 - Elevação 67.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	66
Figura 4-6 Curva de tendência do Painel 5 - Elevação 55.420 B – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	66
Figura 4-7 Curva de tendência do Painel 11 - Elevação 58.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	67
Figura 4-8 Curva de tendência do Painel 33 - Elevação 61.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	67

Figura 4-9 Curva de tendência do Painel 16 - Elevação 64.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	68
Figura 4-10 Curva de tendência do Painel 35 - Elevação 67.745 – para o Superaquecedor Terciário - SF.....	68
Figura 4-11 Curva de tendência do Painel 32 – Ponto A – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	71
Figura 4-12 Curva de tendência do Painel 32 – Ponto B – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	71
Figura 4-13 Curva de tendência do Painel 31 – Ponto C – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	77
Figura 4-14 Curva de tendência do Painel 16 – Ponto D – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	77
Figura 4-15 Curva de tendência do Painel 31 – Ponto E – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	78
Figura 4-16 Curva de tendência do Painel 6 – Ponto F – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	78
Figura 4-17 Curva de tendência do Painel 25 – Ponto G – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	79
Figura 4-18 Curva de tendência do Painel 5 – Ponto H – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	79
Figura 4-19 Curva de tendência do Painel 25 – Ponto I – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	80
Figura 4-20 Curva de tendência do Painel 14 – Ponto J – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	80
Figura 4-21 Curva de tendência do Painel 20 – Ponto K – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	81
Figura 4-22 Curva de tendência do Painel 21 – Ponto L – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	81
Figura 4-23 Curva de tendência do Painel 29 – Ponto M – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	82
Figura 4-24 Curva de tendência do Painel 29 – Ponto N – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	82

Figura 4-25 Curva de tendência do Pannel 21 – Ponto O – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	83
Figura 4-26 Curva de tendência do Pannel 30 – Ponto P – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	83
Figura 4-27 Curva de tendência do Pannel 33 – Ponto Q – para o Superaquecedor Terciário - Curvas.....	84
Figura 4-28 Curva de tendência do Pannel 9 – Ponto R – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	84
Figura 4-29 Curva de tendência do Pannel 28 – Ponto S – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	85
Figura 4-30 Curva de tendência do Pannel 6 – Ponto T – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	85
Figura 4-31 Curva de tendência do Pannel 35 – Ponto T – para o Superaquecedor Terciário - Curvas .....	86
Figura 4-32 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 12 – para o Nariz .....	92
Figura 4-33 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 30 – para o Nariz .....	92
Figura 4-34 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 110 – para o Nariz .....	93
Figura 4-35 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 140 – para o Nariz .....	93
Figura 4-36 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 15 – para o Nariz .....	94
Figura 4-37 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 54 – para o Nariz .....	94
Figura 4-38 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 86 – para o Nariz .....	95
Figura 4-39 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 112 – para o Nariz .....	95
Figura 4-40 Curva de tendência do Ponto A3 – Tubo 51 – para o Nariz .....	96
Figura 4-41 Curva de tendência do Ponto A3 – Tubo 138 – para o Nariz .....	96
Figura 4-42 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 27 – para o Nariz .....	97
Figura 4-43 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 47 – para o Nariz .....	97
Figura 4-44 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 133 – para o Nariz .....	98
Figura 4-45 Curva de tendência do Ponto B2 – Tubo 128 – para o Nariz .....	98
Figura 4-46 Curva de tendência do Ponto B2 – Tubo 142 – para o Nariz .....	99
Figura 4-47 Curva de tendência do Ponto B3 – Tubo 19 – para o Nariz .....	99
Figura 4-48 Curva de tendência do Ponto B3 – Tubo 37 – para o Nariz .....	100
Figura 4-49 Curva de tendência do PT – Tubo 65 – 1000 mm acima do Teto de Segurança	104
Figura 4-50 Curva de tendência do PT – Tubo 120 – 1000 mm acima do Teto de Segurança	104

Figura 4-51 Curva de tendência do PF – Tubo 1 – 1000 mm acima do Teto de Segurança	105
Figura 4-52 Curva de tendência do PLE – Tubo 20 – 1000 mm acima do Teto de Segurança	105
Figura 4-53 Curva de tendência do PLE – Tubo 170 – 1000 mm acima do Teto de Segurança.....	106
Figura 4-54 Curva de tendência do PLD – Tubo 25 – 1000 mm acima do Teto de Segurança	106
Figura 4-55 Curva de tendência do PLD – Tubo 155 – 1000 mm acima do Teto de Segurança.....	107

## LISTA DE TABELA

Tabela 3-1 Etapas do teste hidrostático .....	47
Tabela 4-1 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 55.420.....	60
Tabela 4-2 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 61.800.....	60
Tabela 4-3 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 58.890.....	60
Tabela 4-4 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 64.890.....	61
Tabela 4-5 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 67.890.....	61
Tabela 4-6 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 55.420 B .....	61
Tabela 4-7 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 58.700.....	62
Tabela 4-8 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 61.700.....	62
Tabela 4-9 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 64.700.....	62
Tabela 4-10 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 67.745.....	63
Tabela 4-11 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - SF.....	63
Tabela 4-12 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto A.....	70
Tabela 4-13 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto B .....	70
Tabela 4-14 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - Curvas.....	70
Tabela 4-15 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto C .....	72
Tabela 4-16Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto D.....	72

Tabela 4-17 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto E .....	72
Tabela 4-18 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto F.....	72
Tabela 4-19 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto G .....	73
Tabela 4-20 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto H.....	73
Tabela 4-21 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto I.....	73
Tabela 4-22 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto J .....	73
Tabela 4-23 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto K .....	74
Tabela 4-24 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto K .....	74
Tabela 4-25 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto M .....	74
Tabela 4-26 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto N.....	74
Tabela 4-27 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto O .....	75
Tabela 4-28 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto P.....	75
Tabela 4-29 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto Q .....	75
Tabela 4-30 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto R .....	75
Tabela 4-31 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto S.....	76
Tabela 4-32 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto T .....	76
Tabela 4-33 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - Curvas.....	76

Tabela 4-34 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A1.....	88
Tabela 4-35 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A2.....	89
Tabela 4-36 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A3.....	89
Tabela 4-37 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B1 .....	90
Tabela 4-38 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B2.....	90
Tabela 4-39 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B3.....	91
Tabela 4-40 Material e dimensões do Nariz .....	91
Tabela 4-41 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PT.....	102
Tabela 4-42 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PF.....	102
Tabela 4-43 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PLE.....	102
Tabela 4-44 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PLD .....	103
Tabela 4-45 Material e dimensões dos pontos localizados a 1000 mm acima do Teto de Segurança.....	103
Tabela 4-46 Rotinas da Inspeção de Espessura na Caldeira de Recuperação em Estudo ....	109
Tabela 4-47 Plano Proposto para Rotinas de Inspeção de Medição de Espessura (MEUS)	111

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELA .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIII</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1      PRODUÇÃO DE CELULOSE.....</b>	<b>15</b>
1.1 PÁTIO DE MADEIRA .....	15
1.1.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS .....	15
1.2 LINHA DE PASTA.....	16
1.2.1 COZIMENTO E LAVAGEM .....	16
1.2.1.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS .....	16
1.2.2 DEPURAÇÃO.....	16
1.2.3 DESLIGNIFICAÇÃO COM O <sub>2</sub> .....	17
1.2.3.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS .....	17
1.2.4 BRANQUEAMENTO.....	18
1.2.5 PLANTA QUÍMICA.....	18
1.3 SECAGEM E ENFARDAMENTO .....	18
1.3.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS .....	19
<b>2      CALDEIRAS – GERAL .....</b>	<b>19</b>
2.1 Caldeiras Flamotubulares .....	19
2.1.1 Classificação.....	19
2.1.1.1 Caldeira Vertical.....	20
2.1.1.2 Caldeira Horizontal .....	20
2.2 Caldeiras Aquatubulares.....	23
2.2.1 Classificação.....	23
2.2.1.1 Caldeiras de Tubos Retos .....	24
2.2.1.2 Caldeiras de Tubos Curvos.....	25
2.2.1.3 Caldeiras com Circulação Forçada.....	26
2.2.2 Aplicação e Utilização das Caldeiras Aquotubulares.....	28

<b>3</b>	<b>CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO.....</b>	<b>29</b>
3.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA .....	29
3.2	INSPEÇÃO PERIÓDICA EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO .....	32
3.2.1	Generalidades .....	32
3.2.1.1	Objetivo e Campo de Aplicação desta Recomendação .....	32
3.2.1.2	Princípios e orientações gerais para a inspeção de caldeiras de recuperação de álcalis [4] .....	32
3.2.2	Preparativos .....	34
3.2.3	Exame Interno .....	36
3.2.3.1	Lado de gases .....	36
3.2.3.2	Lado de água e vapor.....	41
3.2.4	Exame Externo .....	42
3.2.4.1	Parte exterior da caldeira .....	43
3.2.4.2	Acessórios e órgãos periféricos à caldeira.....	43
3.2.5	Testes Complementares.....	46
3.2.5.1	Teste Hidrostático.....	46
3.2.5.2	Teste das válvulas de segurança .....	47
3.3	MÉTODO DE ENSAIO POR ULTRA-SOM.....	49
3.3.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MÉTODO .....	49
3.3.1.1	Introdução:.....	49
3.3.1.2	Finalidade do Ensaio .....	50
3.3.1.3	Campo de Aplicação .....	50
3.3.2	Limitações em Comparação com outros Ensaios.....	51
3.3.3	APARELHAGEM.....	52
3.4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO DA EMPRESA DE CELULOSE EM ESTUDO E APLICAÇÃO DESTE TRABALHO.....	53
3.4.1	Breve histórico da Caldeira de Recuperação em Estudo.....	54
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>57</b>
4.1	HISTÓRIO DE INSPEÇÃO DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA E CURVAS DE TENDÊNCIAS .....	57
4.1.1	SOBRE AS CURVAS (LINHAS) DE TENDÊNCIA .....	57
4.1.2	O que são linhas de tendência?.....	57
4.1.3	Segurança das linhas de tendência .....	57

4.1.4	Tipos de Linhas de Tendência.....	58
4.1.4.1	Linear.....	58
4.1.4.2	Logarítmica .....	58
4.1.4.3	Polinomial .....	58
4.1.4.4	Potência .....	58
4.1.4.5	Exponencial .....	59
4.1.5	HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS DO SUPERAQUECEDOR TERCIÁRIO NA LINHA DO SOPRADOR DE FULIGEM .....	60
4.1.5.1	Exemplos de curvas de tendência da região do superaquecedor terciário na linha do soprador de fuligem utilizadas para a determinação da Matriz de Risco .....	64
4.1.6	HISTÓRICO E CURVAS DE TENDÊNCIAS DOS PONTOS ANALISADOS DO SUPERAQUECEDOR TERCIÁRIO – CURVAS .....	69
4.1.6.1	Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco .....	71
4.1.6.2	Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco .....	77
4.1.7	HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS DO NARIZ.....	87
4.1.7.1	Exemplos de curvas de tendência da região do Nariz utilizadas para a determinação da Matriz de Risco .....	92
4.1.8	HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS ACIMA DO TETO DE SEGURANÇA (1000 mm).....	101
4.1.8.1	Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco .....	104
4.2	Rotinas da Inspeção de Medição de Espessura (MEUS) X Tempo de Parada.....	108
4.3	Análise Crítica .....	109
4.4	Proposta do novo plano de inspeção .....	110
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>112</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>

## **RESUMO**

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um novo plano de inspeção de medição de espessura (MEUS) baseado em risco e adequação ao uso para gerenciar a integridade estrutural das Caldeiras de Recuperação de uma indústria de papel e celulose.

É feita uma análise quantitativa do risco para as diversas regiões localizadas no interior da caldeira de recuperação, através de análises estatísticas de curvas de tendências e de recomendações do Comitê de Caldeira de Recuperação do Brasil, avaliando a probabilidade de falha.

São propostos planos de inspeções, sempre respeitando os prazos máximos estabelecidos pela NR-13, de modo a manter o risco abaixo de um nível tolerável, possibilitando assim um melhor aproveitamento dos recursos de inspeção.

## INTRODUÇÃO

As atividades de inspeção em equipamentos e componentes durante a vida útil de uma planta industrial demonstraram, ao longo dos anos, que as intervenções de manutenção são distribuídas sob a orientação de diversas premissas, como atendimento a requisitos legais, disponibilidade dos equipamentos e minimização dos riscos de falhas em operação. No caso brasileiro, o atendimento legal vigente refere-se à Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho – NR13 – “Regulamentação de Segurança para Caldeiras e Vasos de Pressão”.

Portanto, o planejamento focado em inspeção baseada em risco deve respeitar primordialmente os prazos máximos de campanhas definidos por esta norma.

Diferente da NR-13 – que estabelece os prazos máximos entre inspeções de caldeiras e vasos de pressão – na Inspeção Baseada em Risco a periodicidade de inspeções passa a ser uma variável entre as consequências de um acidente e a probabilidade deste acidente ocorrer.

A tendência estatística de concentração do alto risco em uma Caldeira de Recuperação de uma planta industrial é fato observado na prática. Com base nesta premissa, para se reduzir o risco global, é necessário aplicar planos de inspeção diferenciados para cada região da caldeira. Verifica-se também que a efetividade destes planos pode aumentar com um levantamento mais preciso dos riscos individuais das regiões, criando inclusive padronizações para esta atividade. Com isto procura-se intensificar os gastos com manutenção onde o risco é alto e diminuí-los onde o risco é baixo.

Neste trabalho foi elaborado um plano otimizado de inspeção de medição de espessura com base na matriz de risco das regiões internas de uma caldeira de recuperação (ex.: fornalha, superaquecedores, etc.), levando-se em consideração as recomendações de inspeções observadas pelo Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação e a análise de tendência baseada em históricos de inspeção para aplicação da inspeção baseada em risco (IBR). Os resultados servirão para organizar e padronizar as definições de serviços de Inspeção da unidade.

# **1 PRODUÇÃO DE CELULOSE**

O processo de produção de celulose envolve todas as áreas diretamente ligadas ao processamento da madeira para obtenção da fibra. Essas áreas são Pátio de Madeira, Linha de Pasta e Secagem.

## **1.1 PÁTIO DE MADEIRA**

O Pátio de Madeira é a área que recebe a madeira e começa a prepará-la para a obtenção da celulose. O abastecimento de madeira nas mesas receptoras é responsabilidade do Transporte e Movimentação de Madeira (PSM). A partir daí, o manuseio de madeira até a sua transformação em cavacos é responsabilidade do Pátio de Madeira.

Dentre as responsabilidades da equipe do Pátio de madeira, destacam-se:

- Manutenção das pontes rolantes que descarregam as toras nas mesas receptoras (a operação das pontes cabe à equipe de Transporte e Movimentação de Madeira – PSM).
- Operação e manutenção das mesas receptoras de madeira, descascadores, picadores e peneiras, transformando as toras em cavacos de dimensões apropriadas para a operação do Digestor.
- Estocagem dos cavacos em pilhas para a alimentação do Digestor.
- Processamento da casca proveniente do descascamento de toras em dimensões apropriadas para queimar na Caldeira Auxiliar.
- Processamento da madeira destinada à geração de energia e controle das pilhas para alimentação das caldeiras auxiliares.

### **1.1.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS**

Os principais equipamentos do Pátio de Madeira são:

- Descascador
- Picador

## **1.2 LINHA DE PASTA**

A linha de pasta engloba as etapas de Cozimento, Lavagem, Depuração da Pasta Marrom, Deslignificação, Branqueamento e a Planta Química.

### **1.2.1 COZIMENTO E LAVAGEM**

O cozimento tem a função de transformar os cavacos de madeira em polpa, através da dissolução da lignina que compõe a lamela média. Essa é uma das etapas mais importantes do processo, pois é nela que serão definidas algumas das principais características do produto final.

O cozimento é feito por dois digestores contínuos.

A etapa de lavagem se resume na passagem da polpa cozida pelos difusores atmosféricos, visando substituir o licor negro que foi transportado junto com a polpa por um mais limpo.

#### **1.2.1.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS**

Os principais equipamentos do processo de cozimento e lavagem são:

- Alimentador de alta pressão
- Digestor
- Difusor radial

### **1.2.2 DEPURAÇÃO**

A depuração consiste basicamente na separação das impurezas da madeira e dos pedaços de cavaco que não foram devidamente cozidos no digestor, tais como nós e outros materiais (areia, pedras, etc). Os rejeitos da depuração, dependendo de sua natureza, são removidos do processo ou retornam para serem reprocessados. Depois de depurada, a polpa é uma massa homogênea e marrom, pronta para ser branqueada. É papel da depuração também remover o restante do licor preto da massa (que não saiu nos difusores), deixando a massa sem os produtos químicos do cozimento e já sem a

lignina dissolvida, ou seja, deixa na massa apenas os produtos que só o branqueamento consegue remover.

### **1.2.3 DESLIGNIFICAÇÃO COM O<sub>2</sub>**

A deslignificação com oxigênio dá continuidade ao processo de deslignificação iniciado no cozimento, mantendo a resistência da pasta (viscosidade). As principais vantagens resultantes do processo de deslignificação são:

- Redução de consumo de produtos químicos no branqueamento.
- Redução de carga de efluentes no branqueamento.
- Possibilidade de uso de seqüências de branqueamento ECF e TCF.

O processo de deslignificação com oxigênio depende de vários fatores como espécie de madeira utilizada, tipo de cozimento, número Kappa na entrada, requisitos do produto final e custos operacionais. A seletividade da deslignificação com oxigênio depende da temperatura, da carga de álcali, da quantidade de substâncias dissolvidas transferidas ao estágio de deslignificação, da consistência de pasta e da pressão do oxigênio. O grau de deslignificação obtido é avaliado através de análises do número Kappa em amostras de pasta coletadas antes e após o reator.

#### **1.2.3.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS**

Os principais equipamentos do processo de deslignificação com O<sub>2</sub> são:

- Bombas mc
- Misturador
- Reatores para oxidação
- Prensa lavadora

#### **1.2.4 BRANQUEAMENTO**

A principal função do branqueamento é remover as impurezas que dão cor à celulose.

Grande parte das características do produto final depende fortemente da sequência utilizada no branqueamento da pasta. Sendo assim, o branqueamento é a etapa mais importante no que diz respeito à diferenciação dos produtos. Essa diferenciação é feita alterando-se os químicos utilizados e algumas condições de processo.

#### **1.2.5 PLANTA QUÍMICA**

A Planta Química produz o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) que serão utilizados na etapa de branqueamento da celulose. A Planta possui 3 linhas de produção de dióxido de cloro e uma de dióxido de enxofre.

As linhas 1 e 3 de  $\text{ClO}_2$  utilizam o processo R10 (solução de clorato de sódio) para a produção, enquanto a linha 2 utiliza o R3 (solução de clorato e cloreto de sódio). As soluções de clorato são fornecidas via tubulação pela Nexen.

A linha de produção de  $\text{SO}_2$  pode operar queimando o enxofre sólido e depois solubilizando o gás gerado, ou solubilizando o  $\text{SO}_2$  gasoso comprado. Hoje preferencialmente o  $\text{SO}_2$  é comprado.

#### **1.3 SECAGEM E ENFARDAMENTO**

A secagem compreende os processos de Depuração da Pasta Branqueada, Formação da Folha, Secagem e Enfardamento da celulose.

A função da Depuração é remover as impurezas que possam ter sido transportadas juntamente com a pasta branqueada. Depois de depurada a pasta seguirá para a máquina, onde ocorrerá a formação e posterior secagem da folha.

Depois de secas as folhas de celulose são então cortadas e agrupadas em fardos de 250 kg que serão embalados e agrupados em uma unidade contendo 8 fardos (2 toneladas ao todo).

### **1.3.1 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS**

Os principais equipamentos do processo de secagem e enfardamento são:

- Depuradores pressurizados
- Peneira vibratória
- Planta de canisters (ciclone)
- Caixa de entrada
- Mesa plana
- Primeira prensa - rolo pick-up
- Segunda prensa
- Terceira prensa superior e inferior
- Secador
- Torre de quebras

## **2 CALDEIRAS – GERAL**

### **2.1 Caldeiras Flamotubulares**

Também conhecidas como Piro-tubulares, Fogotubulares ou, ainda, como Tubos de Fumaça, são aquelas nas quais os gases da combustão (fumos) atravessam a caldeira no interior de tubos que se encontram circundados por água, cedendo calor à mesma.

#### **2.1.1 Classificação**

Existem vários métodos de classificação das caldeiras flamotubulares (segundo o uso, a capacidade, a pressão, a posição da fornalha, a posição dos tubos, os tamanhos, etc.). Adotaremos aqui dividi-las em:

### 2.1.1.1 Caldeira Vertical

É do tipo monobloco, constituída por um corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas planas chamadas espelhos. São várias as suas aplicações por ser facilmente transportada e pelo pequeno espaço que ocupa, exigindo pequenas fundações. Apresenta, porém, baixa capacidade e baixo rendimento térmico.

São construídas de 2 até 30 m<sup>2</sup>, com pressão máxima de 10 kg/m<sup>2</sup>, sendo sua capacidade específica de 15 a 16 kg de vapor por m<sup>2</sup> de superfície de aquecimento.

Apresenta a vantagem de possuir seu interior bastante acessível para a limpeza, fornecendo um maior rendimento no tipo de fornalha interna. São mais utilizadas para combustíveis de baixo poder calorífico.

### 2.1.1.2 Caldeira Horizontal

Podem possuir fornalha interna ou externa. Faz-se aqui uma descrição dos diversos tipos de Caldeiras Horizontais.

## CALDEIRA CORNOVAGLIA

Tem funcionamento simples, é constituída por uma tubulação por onde circulam os gases produtos da combustão, transmitindo calor para a água, que o circunda, por contato de sua superfície externa. É, em geral, de grandes dimensões (maior do que 100 m<sup>2</sup>), tem baixo rendimento térmico e, devido ao seu tamanho, tem sua pressão máxima limitada a 10 kg/m<sup>2</sup>. Sua capacidade específica varia de 12 a 14 kg de vapor por m<sup>2</sup> de superfície.

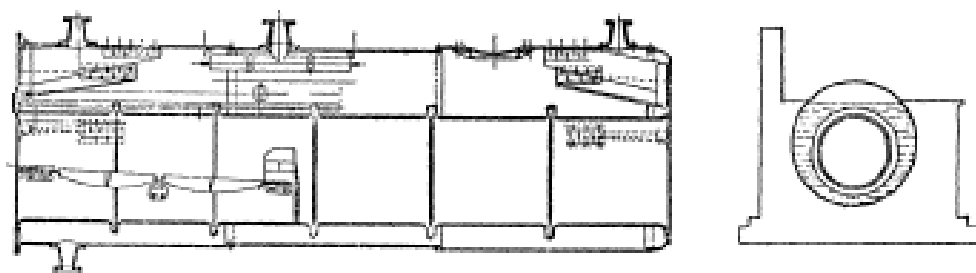


Figura 2-1 Caldeira Cornovaglia

## **CALDEIRA LANCASHIRE**

Também conhecida como Caldeira Lancaster, é a evolução da caldeira anterior, possuindo 2 (às vezes 3 ou 4) tubulões internos, alcançando superfície de aquecimento de 120 a 140 m<sup>2</sup>. Alguns tipos atingem de 15 a 18 kg de vapor por m<sup>2</sup> de superfície de aquecimento.

Tanto a Caldeira Cornovaglia, como a Lancashire, está caminhando para o desuso devido às unidades modernas mais compactas.

## **CALDEIRAS MULTITUBULARES**

A substituição dos tubulões das caldeiras anteriores por vários tubos de pequeno diâmetro deu origem à caldeira flamotubular multitubular. São encontradas com duas ou três voltas de chama, isto é, os gases de combustão fazem duas ou três voltas no interior da caldeira.

Os diâmetros dos tubos variam entre 2 ½” a 4”, de acordo com a aplicação. Não permitem o uso de fornalha interna, sendo completamente revestida de alvenaria. Sua grande vantagem é permitir a utilização de qualquer combustível, mas devido ao alto custo do refratário, despesas de manutenção e alto custo de instalação. Este tipo de caldeira vem tendo sua aplicação industrial diminuída. Sua capacidade máxima é de 600kg de vapor por hora com pressão máxima de 16 kg/m<sup>2</sup>.

## **CALDEIRAS LOCOMOTIVAS & LOCOMOVEIS**

As caldeiras locomoveis são uma adaptação e modificação das caldeiras locomotivas. Ainda que ideais por fácil mudança de local por serem portáteis, elas têm limitações no serviço estacionário.

São multitubulares com a fornalha revestida completamente por dupla parede metálica formando uma câmara onde circula água, tendo um razoável custo de construção. Possui vantagens de ser portátil, serviço contínuo e excelente, com custo mínimo em condições severas de trabalho, assim como uma grande capacidade de produção de vapor em comparação com seu tamanho.

Tem como desvantagens a pequena velocidade de circulação de água e grandes superfícies metálicas. Suportam pressões de 18 kg/m<sup>2</sup> e chegam até 8000 kgVapor/h.

Tem aplicação em campos de petróleo, associados a máquinas de vapor na geração de energia, em serrarias, etc.

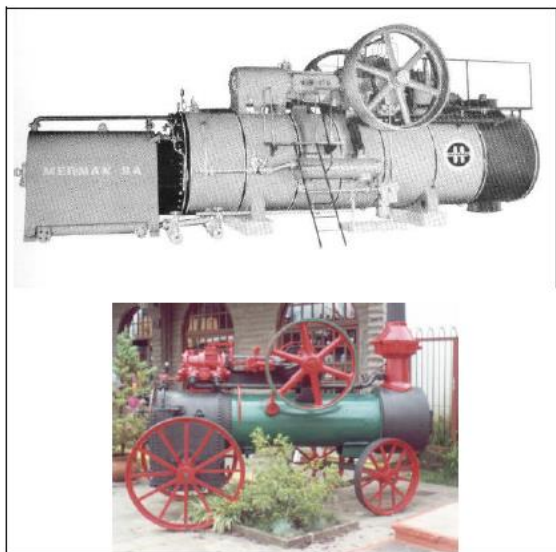


Figura 2-2 Caldeira Locomotivas e Locomóveis

### **CALDEIRAS ESCOCESAS**

É o tipo mais moderno e evoluído de caldeiras flamotubulares,

Não exige gastos com instalações especiais ou custosas colunas de aço ou alvenaria, bastando uma fundação simples e nivelada, as ligações com a fonte de água, eletricidade e esgoto para entrar imediatamente em serviço. Têm controle eletrônico de segurança e funcionamento automático arrancando tão logo sejam ligados os interruptores.

A caldeira consta de um corpo cilíndrico que contém um tubulão sobre o qual existe um conjunto de tubos de pequeno diâmetro. Tem geralmente uma câmara de combustão de tijolos refratários na parte posterior, a que recebe os gases produtos da combustão, e os conduz para o espelho traseiro.

Essas unidades operam com óleo ou gás (banha derretida), sendo a circulação garantida por ventiladores (tiragem mecânica). As unidades compactas alcançam elevado rendimento térmico, garantindo 83%. São construídas até a máxima produção de 10 tonV/h a uma pressão máxima de 18 kg/m<sup>2</sup>. Sua vaporização específica atinge valores da ordem de 30 a 34 kgV/m<sup>2</sup>, dependendo da perda de carga oferecida pelo circuito.

Os gases circulam com grande velocidade, de 20 a 25 m/s, permitindo a obtenção de elevado índice de transmissão de calor. A perda por radiação é muito baixa, não ultrapassando 1%.

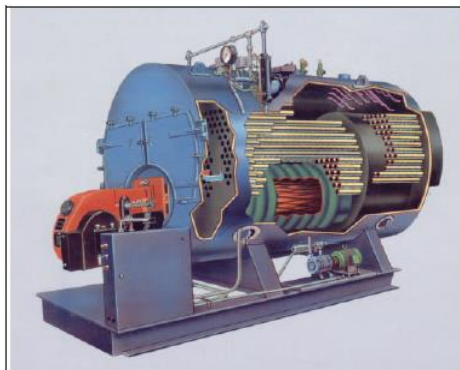


Figura 2-3 Caldeira Escocesa

## 2.2 Caldeiras Aquatubulares

Também conhecidas como Caldeiras Tubos de Água ou Aquatubulares se caracterizam pelo fato dos tubos situarem-se fora dos tubulões da caldeira (tambor) constituindo com estes um feixe tubular.

Diferenciam-se das Pirotubulares no fato da água circular no interior dos tubos e os gases quentes se acham em contato com sua superfície externa.

São empregadas quando interessa obter pressões e rendimentos elevados, pois os esforços desenvolvidos nos tubos pelas altas pressões são de tração ao invés de compressão, como ocorre nas pirotubulares, e também pelo fato dos tubos estarem fora do corpo da caldeira obtemos superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas.

Os objetivos a que se propõe uma caldeira aquotubular abrangem uma grande faixa e em vista disto temos como resultado muitos tipos e modificações, tais como tubos retos, tubos curvos de um ou vários corpos cilíndricos, enfim a flexibilidade permitida possibilita vários arranjos.

### 2.2.1 Classificação

Como vimos as caldeiras aquotubulares poderiam ser classificadas de diversas maneiras, mas iremos dividi-las em:

### 2.2.1.1 Caldeiras de Tubos Retos

Podendo possuir tambor transversal ou longitudinal, estas caldeiras são ainda bastante utilizadas devido a possuírem fácil acesso aos tubos para fins de limpeza ou troca, causarem pequena perda de carga, exigir chaminés pequenas, e porque também todos os tubos principais são iguais necessitando de poucas formas especiais.

As Figuras 2-4 e 2-5 mostram dois exemplos de caldeiras aquatubulares com tubos retos de tambor longitudinal e transversal respectivamente.

Os tubos de água, normalmente de 4, são inclinados de aproximadamente  $22^\circ$ , sendo ligados nas extremidades aos coletores também chamados câmaras onduladas, formando com o tubulão um circuito fechado por onde circula a água que entra pela parte inferior do tambor, desce pelo interior do coletor posterior e sobe pelos tubos inclinados onde se forma o vapor. A mistura de vapor e água ascende rapidamente pelo coletor frontal retornando ao tambor onde tem lugar a separação entre o vapor e a água.

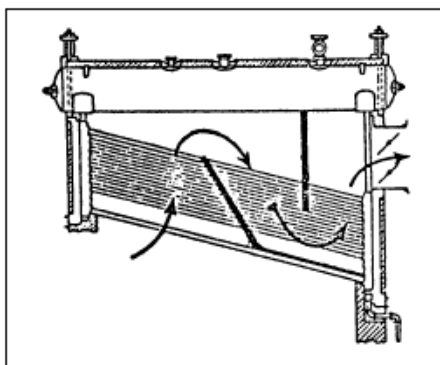


Figura 2-4 Exemplo de caldeira aquatubular de tubos retos

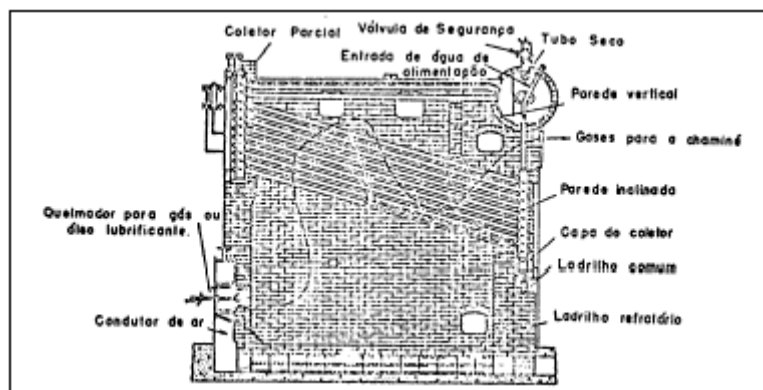


Figura 2-5 Caldeira aquatubular de tubos retos

Estas caldeiras podem ser adaptadas à produção de energia e possui um apreciável volume de água, fator importante para várias aplicações. Sua superfície de aquecimento varia de 67 a 1.350 m<sup>2</sup>, com pressões de até 45 kg/m<sup>2</sup> para capacidades variando de 3 a 30 tVapor/h.

Seu inconveniente se restringe no fato de que os tubos terminam em coletores cujas paredes devem estar em esquadro com a linha central dos tubos para que as juntas de vapor possa se encaixar aos extremos dos tubos contra as paredes dos coletores, e por possuírem baixa vaporização específica, da ordem de 20 a 25 kg.Vapor/m<sup>2</sup>.

### **2.2.1.2 Caldeiras de Tubos Curvos**

A utilização de vapor em centrais térmicas exigia geradores de grande capacidade de produção e com isto as caldeiras de tubos curvos, devido à sua ilimitada capacidade de produzir vapor, tomaram uma posição de grande importância para casos desta natureza.

São compostas por tubos curvos ligados à tambores e suas concepções iniciais possuíam quatro e até cinco tambores, sendo revestidos completamente por alvenaria.

Atualmente, por motivos de segurança, economia e para eliminar o uso de peças de grande diâmetro, o número de tambores foi reduzido a dois (2) e com um único tambor, sendo este último aplicado a unidade de altas pressões e capacidades. As paredes de refratário representavam um custo enorme das instalações por isto desenvolveram-se estudos quanto a um melhor aproveitamento do calor irradiado, e a aplicação de paredes de água veio eliminar o uso destes custosos refratários.

Com o maior proveito do calor gerado, além de reduzir o tamanho da caldeira, promove-se uma vaporização mais rápida e aumenta-se a vida do revestimento das câmaras de combustão.

Este tipo de caldeira encontra uma barreira para sua aceitação comercial no que se refere ao fato de exigirem um controle especial da água de alimentação (tratamento da água), embora apresente inúmeras vantagens, tais como, manutenção fácil para limpeza ou reparos, rápida vaporização, sendo o tipo que atinge maior vaporização específica com valores de 28 a 30 kg.V/m<sup>2</sup> nas instalações normais, podendo atingir até 50kg.V/m<sup>2</sup> nas caldeiras de tiragem forçada.

### 2.2.1.3 Caldeiras com Circulação Forçada

A diferença de pesos específicos da água de alimentação fria, com a água aquecida e misturada com bolhas de vapor promove uma circulação natural da água no interior dos tubos. Fatores como incrustações, variações de carga, etc., acabam por tornar-se obstáculos a esta circulação, portanto, apesar de vários cuidados tomados, não se consegue uma circulação orientada, ou como é chamada, uma circulação positiva.

Baseado nisto substituiu-se a circulação por gravidade pela circulação forçada por uma bomba de alimentação e com isto reduz-se o diâmetro dos tubos, aumenta-se o circuito de tubos e estes podem dispor-se em forma de uma serpentina contínua formando o revestimento da fornalha, melhorando-se a transmissão de calor e reduzindo-se o tamanho dos tambores, coletores e tornando mínimo o espaço requerido.

Foi Mark Benson da Siemens alemã o autor deste tipo de caldeira, que se caracterizava pelo fato de não utilizarem bomba de recirculação ou tambor, trabalhando com pressões supercríticas, exigindo assim um controle rigoroso.

Aproveitando calor do superaquecedor (~4%) para a água de alimentação, a Sulzer apresentou seu modelo trabalhando com uma pressão a 140 kgf/cm<sup>2</sup> e com sensíveis aparelhos para controlar o superaquecimento desejado através do controle da combustão e da circulação de água.

Baseados no modelo da Sulzer, a La Mont e a Velox desenvolveram seus modelos chamados de “circulação favorecida” por possuírem uma bomba de recirculação que trabalha no primeiro caso com pressões superiores à da caldeira de 40lb/pol<sup>2</sup> em média, tendo aplicação satisfatória em caldeiras de recuperação consumindo menos de 1% da energia produzida.

Na caldeira Velox, que alcança rendimento térmico de até 90% e por isto vem adquirindo grande aceitação na Europa, os gases da câmara de combustão são comprimidos de 1 a 2 kgf/cm<sup>2</sup> por meio de um ventilador acionado por uma turbina a gás que utiliza os gases de escape da caldeira. Devido a compressão, ha um aumento da densidade dos gases e de sua velocidade até valores próximos a 200 m/s, melhorando-se assim a transmissão de calor em alguns casos com coeficientes 15 vezes maiores que nos casos comuns.

Por este motivo a caldeira requer aproximadamente 1/4 do espaço e pesa um sétimo (1/7) do valor de geradores convencionais de mesma capacidade de produção de vapor. Outras vantagens atribuídas a este tipo são uma resposta rápida aos controles e

rápida entrada em funcionamento (5 a 7 minutos), alcançando uma vaporização específica de até 500 kg.v/m<sup>2</sup>.h.

A Figura 2-6 abaixo representa uma caldeira de circulação forçada com recirculação. O vapor produzido e a água sem vaporizar entram em um cilindro vertical no qual canais centrífugos dirigem a água para o fundo e o vapor saturado sobe pelo centro. A água volta a entrar na bomba de circulação de onde é injetada no gerador de novo.

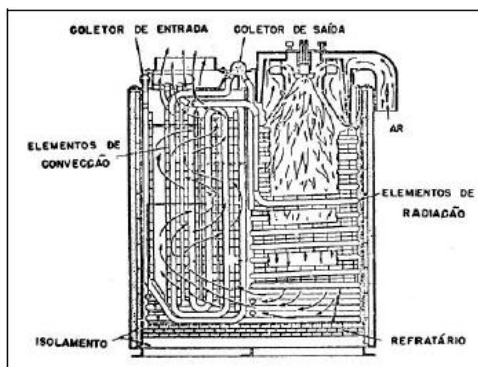


Figura 2-6 Caldeira de circulação forçada com recirculação

Um gerador deste tipo produz aproximadamente 2.750 kg.v/h ocupando um espaço de 2,1 x 2,1m.

As caldeiras de circulação forçada devido, entre outras coisas, a serem mais leves, formarem vapor praticamente seco ou superaquecido e instantaneamente, ocuparem menor espaço e possuírem grandes coeficientes de transmissão de calor, pareciam tomar conta completamente do mercado, porém o seu uso apresentou certos inconvenientes como super sensibilidade, paradas constantes por mínimos problemas, etc., o que levou La Mont a elaborar juntamente com W. Vorkauf um outro tipo sem bomba de alimentação (circulação natural), porém com tubulão ligado à tubos de grande diâmetro que por sua vez se ligam ao feixe de troca de calor de tubos com diâmetros menores (Figura 2-7). Este tipo teve grande aceitação dos usuários, pois aproveitou as vantagens das caldeiras de circulação forçada e eliminou os defeitos das mesmas.

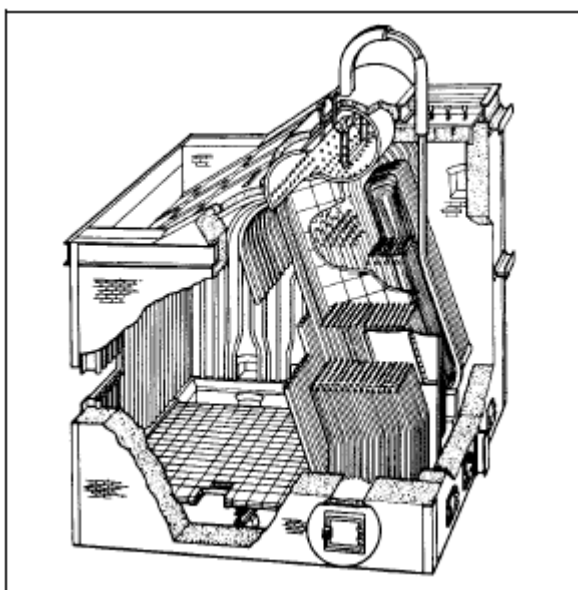


Figura 2-7 Caldeira de La Mont e W. Workauf de circulação natural, porém com tubulão ligado à tubos de grande diâmetro que por sua vez se ligam ao feixe de troca de calor de tubos com diâmetros menores.

### 2.2.2 Aplicação e Utilização das Caldeiras Aquotubulares

As caldeiras tubos de água perseguem os mesmos objetivos de uma caldeira qualquer, isto é, custo reduzido, compacta cidade, ser acessível, tubos com forma simples, boa circulação, coeficiente de transmissão de calor elevado e alta capacidade de produção de vapor. Poderia se dizer que este tipo atinge todos ou quase todos dos objetivos pretendidos, como por exemplo, a sua limpeza é facilmente realizada pois as incrustações são retira das sem dificuldade utilizando um dispositivo limpa-tubo movido com água ou ar.

Possuem as mais variadas aplicações industriais sendo também usadas para caldeiras de recuperação e aplicações marítimas, tipo este estudado com maiores detalhes por Engenheiros Navais. Porém, destacamos sua utilização em centrais térmicas onde trabalham com elevadas pressões de ate  $200 \text{ kg/m}^2$  e capacidades atingindo valores de aproximadamente  $800 \text{ t.V/h}$ .

Com respeito às grandes centrais térmicas, não e raro um alto consumo de combustível e por isto qualquer aumento de rendimento, por menor que seja, torna-se econômico mesmo se os investimentos aplicados forem grandes.

Em caldeiras de pressões elevadas, devido aos grandes esforços aplicados, os tambores resultam um custo muito elevado por isto conclui-se que seu número e tamanho deva ser o menor possível, e isto é função dos seguintes fatores:

- Rendimento
- Tipo de combustível
- Natureza da carga
- Pressão de trabalho
- Ampliações futuras
- Espaço disponível e
- Condições do clima

Em resumo, as caldeiras aquatubulares são empregadas quase exclusivamente quando interessa obter elevadas pressões grandes capacidades e altos rendimentos.

### **3 CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA**

As caldeiras de recuperação têm por função a geração de vapor a partir do licor de negro e recuperar os químicos utilizados no processo de cozimento.

As caldeiras de recuperação são caldeiras aquatubulares de fabricação especial, desenvolvidas para a recuperação de produtos químicos, queimando para isso o licor rico em matéria orgânica proveniente do processo de cozimento da madeira em um ambiente redutor (pobre em oxigênio). A fornalha destas caldeiras é desenvolvida de forma a facilitar a remoção e o resfriamento do smelt que é composto de aproximadamente 2/3 de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e 1/3 de  $\text{Na}_2\text{S}$ , contendo também pequenas quantidades de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e carbono.

O licor contendo cerca de 25% de água é pulverizado no interior da fornalha por bicos que o transformam em gotículas. Essas gotículas devem ser grandes o suficiente para prevenir seu arraste para as regiões superiores da caldeira, e pequenas o suficiente para que estejam secas antes de atingirem a camada de fundido evitando assim o contato da água com o smelt.

O licor negro queima em estágios sobrepostos, de maneira similar a outros combustíveis sólidos e líquidos. Os quatro principais estágios são a secagem, a devolatilização (pirólise), a queima do carbono, e a coalescência e reações do smelt.

A parte orgânica do licor consiste de produtos degradados de lignina, polissacarídeos e alguns extrativos. Quando a temperatura das gotículas se aproxima de

200° C esses produtos começam a sofrer degradação térmica, liberando CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, NO, NH<sub>3</sub>, hidrocarbonetos leves, mercaptanas e outros compostos organossulfurados. Esse processo é chamado devolatilização. O sólido restante contém material orgânico não volátil, principalmente carbono, juntamente com a maioria do material inorgânico.

Ao final da etapa de devolatilização cerca de 50% do carbono presente inicialmente no licor se transforma em compostos voláteis. O sólido orgânico restante na partícula passa então a terceira etapa, juntamente com o material inorgânico, onde irá reagir com oxigênio, CO<sub>2</sub> e vapor d'água e se transformará principalmente em CO (monóxido de carbono). No processo o sulfato reage com o carbono, o CO e hidrogênio e é reduzido a sulfeto. A seguir são listadas as principais reações que ocorrem na camada de fundido e no smelt.

As Caldeiras de Recuperação têm duas funções principais, que são: recuperação dos materiais inorgânicos presentes no licor negro e a combustão dos constituintes orgânicos, de modo a gerar vapor para energia e para o processo.

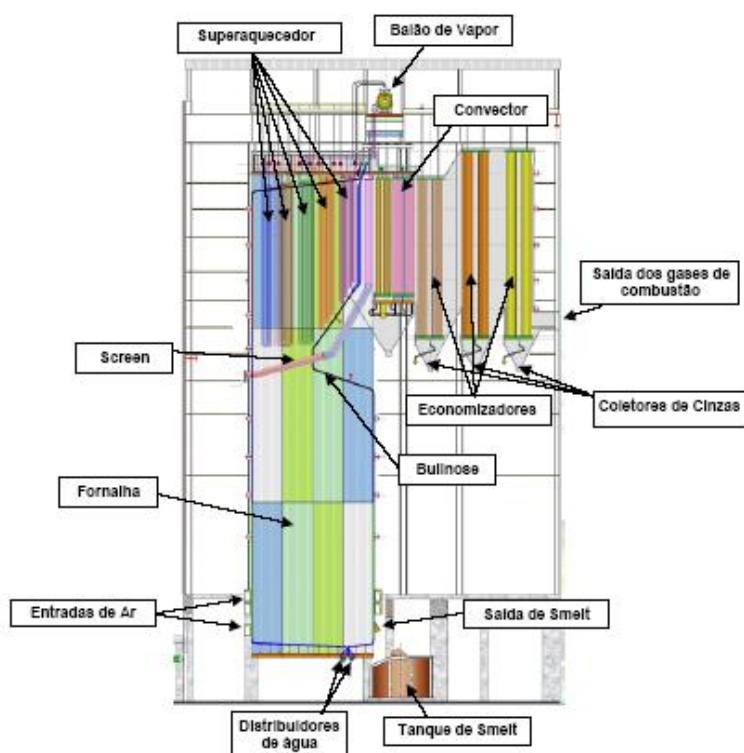


Figura 3-1 Caldeira de Recuperação com indicação das principais regiões

Caldeiras de Recuperação possuem duas diferentes seções principais: a seção da fornalha e a seção de transferência de calor. Toda mistura e combustão do combustível e do ar é realizada na seção da fornalha, onde por volta de 40% da transferência de calor dos gases de combustão podem ser realizadas. A transferência de calor para a água da caldeira para gerar vapor de alta pressão é então finalizada na seção transferência de calor convectiva.

Seção da fornalha: é a seção da caldeira onde são admitidos os sistemas de ar primário, secundário e terciário, em diferentes níveis, bem como o licor negro a ser queimado. Suas paredes são construídas com tubulações alinhadas verticalmente e interligadas em suas extremidades, sendo que na extremidade superior ligam-se aos coletores de vapor (que por sua vez se ligam ao balão de vapor) e na extremidade inferior ao coletor de água (que se ligam aos downcomers). As paredes da fornalha possuem aberturas (através dos desvios de tubulações) para portas de visita, sistemas de alimentação de ar (primário, secundário e terciário), para os bicos de aspersão de licor e para os queimadores de carga e partida.

O limite entre a seção da fornalha e a seção de transferência de calor não existe fisicamente, mas pode-se considerar na altura do “nariz” da fornalha (bullnose), cujos objetivos principais são desviar os gases de saída, induzindo-os a passar pelo sistema de superaquecedores e também proteger os superaquecedores da radiação intensa proveniente da fornalha.

Seção de transferência de calor: nessa seção, situada acima da fornalha, estão os sistemas de superaquecedores, convectores (boiler bank) e de economizadores.

Os superaquecedores consistem em sistemas de tubulações pela qual passa vapor saturado proveniente do balão de vapor e, devido ao contato desta tubulação com os gases quentes de saída, terão sua temperatura e pressão elevado. Localizam-se a frente dos convectores e acima do nariz da fornalha, possuindo quantidade de feixes de tubulações e arranjo distintos, dependendo do fabricante e da tecnologia adotada.

Os convectores encontram-se após os superaquecedores e antes dos economizadores. São compostos por feixes de tubulações interligadas aos balões da caldeira (dependendo da tecnologia utilizada têm-se 1 ou 2 balões) que recebem a água aquecida nos economizadores e trocam calor com os gases de combustão vindos dos superaquecedores, através de um processo de circulação natural (convecção).

Os economizadores também são feixes de tubulações que têm como objetivo aquecer a água de alimentação da caldeira em contracorrente com os gases quentes que

passaram pelos convectores, aproveitando ainda mais sua energia. Existem em número de dois ou três feixes, dependendo do fabricante e da tecnologia adotada.

## **3.2 INSPEÇÃO PERIÓDICA EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO**

### **3.2.1 Generalidades**

#### **3.2.1.1 Objetivo e Campo de Aplicação desta Recomendação**

Por razões de segurança, normas técnicas e legais vigentes no Brasil preceituam que caldeiras de qualquer tipo sejam inspecionadas com regularidade. Estas normas estabelecem procedimentos, prazos, responsabilidades e demais requisitos para estas inspeções. Há, contudo um reconhecimento geral, na indústria de celulose, de que a segurança das caldeiras de recuperação de álcalis requer cuidados de inspeção que transcendem as exigências oficiais genéricas para geradores de vapor, contidas nas normas acima citadas. Com isto, configura-se a necessidade de que o escopo técnico aplicável à inspeção de caldeiras de recuperação esteja definido. O presente documento, respeitando inteiramente os regulamentos oficiais vigentes, tem o objetivo de delinear e complementar este escopo recomendável de exames, de forma coerente com a criticidade e o risco associado às caldeiras de recuperação de álcalis da indústria de celulose.

#### **3.2.1.2 Princípios e orientações gerais para a inspeção de caldeiras de recuperação de álcalis [4]**

- Deve ser elaborado e mantido pelo proprietário da caldeira um programa de inspeção documentado, detalhado e individual para cada caldeira, levando-se em conta diferenças de concepção, idade, condições de operação e outras particularidades. Este programa deve ser continuamente revisado e atualizado, levando em consideração novas observações e experiências. Prioritariamente o programa deve observar a conformidade aos requisitos legais, conforme enfatizado em 3.2.1.1.

- Registros históricos de cada inspeção devem ser mantidos documentados para futura referência.
- As inspeções devem ser executadas por agente qualificado, podendo ser pessoal próprio ou contratado.
- Por ocasião das inspeções, quaisquer anomalias já conhecidas pelo proprietário da caldeira devem ser reportadas ao inspetor comissionado para os trabalhos.
- Todas as especificações, critérios e padrões gerais de aceitação que possam vir a ser necessários (ex: descrição dos materiais, espessura mínima de tubos, valores de ajuste de válvulas de segurança, parâmetros do teste hidrostático, etc.), devem estar prontamente disponíveis nestas ocasiões, evitando dúvidas e equívocos.
- As inspeções devem ser constituídas de exame interno, exame externo e testes complementares. Cada uma destas etapas é descrita neste documento de forma sucinta, como orientação apenas. Cabe ao inspetor utilizar sua experiência e conhecimento para determinar a extensão, abrangência e detalhamento das verificações e ensaios a serem aplicados. É necessário que sejam gerados relatórios escritos conclusivos sobre os exames realizados e recomendações deles resultantes.
- O inspetor deverá certificar-se de que todos os reparos e modificações advindas das inspeções sejam executados em conformidade com as normas e códigos de projeto e construção da caldeira, conforme estabelecido pela legislação vigente.

### 3.2.2 Preparativos

- Procedimentos de segurança ocupacional prévios à inspeção, especialmente bloqueio e sinalização dos itens cujo acionamento acidental possa ser perigoso, devem ser rigorosamente providenciados, com suficiente antecedência.
- Recomenda-se que se proceda uma verificação interna preliminar à limpeza da caldeira, de forma a observar as possíveis incrustações, obstruções e depósitos excessivos, sua natureza e localização, arranjo do fundido remanescente, etc. Entretanto esta verificação deve ser cercada das precauções de segurança exigíveis, especialmente quanto à possível queda de blocos de sulfato.
- As cinzas remanescentes devem ser removidas por lavagem a alta pressão com água quente. A lavagem deve ser estendida, inundando-se a fornalha com água através dos sopradores de fuligem e queimadores de licor (bocais spray têm que ser removidos). A qualidade da limpeza resultante deve ser cuidadosamente avaliada antes do encerramento definitivo da lavagem, e antes que se iniciem quaisquer atividades de manutenção na caldeira. Especial atenção deve ser dada à remoção de formações de sulfato que eventualmente ficam presas ao teto, paredes e painéis após a lavagem, evitando acidentes com sua queda durante os trabalhos internos.
- Todas as portas de visitas e outras aberturas da caldeira precisam ser abertas. Após a abertura das portas dos balões, ar frio deve ser insuflado em seu interior para promover um resfriamento mais rápido.
- Iluminação geral interna de baixa voltagem deve ser providenciada, bem como luminárias manuais para todas as partes a serem localmente examinadas.

- O teto de segurança precisa obrigatoriamente ser montado antes que qualquer trabalho seja iniciado na fornalha baixa. Deve ser observada a perfeita vedação entre as partes do teto de segurança e as paredes da caldeira, garantindo que não haja aberturas que possam permitir a queda de materiais na fornalha. É essencial proceder-se a uma cuidadosa inspeção das vigas e demais elementos que compõem o teto de segurança, antes de cada montagem e utilização do mesmo.
- Um andaime rígido e seguro deve ser erguido para possibilitar a inspeção em toda a altura da fornalha, bem como em todas as linhas de sopragem nos superaquecedores, até o teto. É importante que o andaime proporcione, quando possível, fácil acesso entre os diferentes níveis dos superaquecedores, e nunca obstrua bocas de visita. Plataformas devem ser montadas nos funis de cinzas sob a bancada e economizador. O acesso a outros sítios de interesse além dos citados, se solicitado pelo inspetor comissionado, deve ser providenciado sem restrições.
- A limpeza mecânica e preparação das superfícies para inspeção e ensaios devem ser feitas pelos meios adequados e com máximo cuidado, a fim de se evitar a abrasão excessiva dos tubos e conseqüentes perdas de espessura. Precauções especiais se aplicam ao uso de jato de areia, pelas razões expostas.
- É recomendável, especialmente se houver qualquer suspeita do vazamento na caldeira, a execução de um teste de estanqueidade na mesma (com não mais que a pressão de operação) no início da parada, antecedendo as inspeções propriamente ditas. Esta providência permite evidenciar os possíveis vazamentos em tempo hábil para sua correção, evitando a sua constatação apenas no teste hidrostático final.

### **3.2.3 Exame Interno**

O exame visual interno em uma caldeira de recuperação de álcalis deve ser extensivo e detalhado, sendo recomendável que seja executado anualmente. Abaixo são descritos os procedimentos gerais para este exame.

#### **3.2.3.1 Lado de gases**

##### **EXAME VISUAL**

- Os tubos da caldeira devem ser examinados visualmente com foco em corrosão, erosão, desalinhamento, deformações, amassamento, empolamento, inchamento, porosidade, trincas, rupturas, descoloração, alterações da textura do material, etc. Deve verificar os tubos também quanto a danos mecânicos decorrentes de possível interferência física indevida entre componentes da própria caldeira, limpeza da caldeira com instrumentos pontiagudos, colisões com sopradores de fuligem, queda de objetos pesados, etc. Tubos de cortina e do fundo da fornalha são particularmente sujeitos a danos por queda de grandes formações de sulfato, que se desprendem das partes altas da caldeira.
- Aletas, membranas, chapas de vedação tipo crotch-plate, grampos, espaçadores, suportes e outros elementos soldados devem ser atentamente examinados quanto a possíveis trincas, que podem se propagar para os tubos. Este problema assume maior criticidade quando ocorrido em locais passíveis de contato água-fundido. As aberturas das bicas de fundido e bocais de ar primário são, portanto, locais em que se recomenda máxima atenção.
- Caldeiras de um balão que possuam convector do tipo long-flow, assim como certos tipos de economizadores longitudinais, apresentam às vezes suscetibilidade a vibrações, e deve-se verificar a existência de trincas nos coletores, soldas e suportes.

- Tubos compostos são sujeitos à ocorrência de trincas e erosão, devendo ser examinados com este foco.
- A pinagem protetora, quando existente, deve ser inspecionada, controlando-se o comprimento remanescente dos pinos, uma vez que estes se desgastam por ação de corrosão e erosão. Outros elementos da caldeira sujeitos a mecanismos similares de desgaste são bocais de ar de combustão e queimadores.
- Recomenda-se uma verificação amostral das condições dos tubos do fundo da caldeira a cada cinco anos em caldeiras de fundo plano. Para tanto podem ser abertas uma ou mais janelas pequenas (1 x 1 m, por exemplo) no refratário do piso, de forma a permitir uma verificação visual dos tubos que compõem o fundo, e a sua medição de espessura conforme descrito no item 3.1.2. Para unidades com fundo inclinado a inspeção nesta região deve ser anual. Dada a diversidade de materiais, tipos de tubos e formas construtivas de fundos de caldeiras de recuperação, esta recomendação, aqui dada de forma genérica, devem ser cuidadosamente adaptada às condições particulares da caldeira em questão. Atenção especial deve ser dada aos tubos do fundo, dos cantos em caldeiras que tenham sofrido redimensionamentos importantes de capacidade devido a possíveis alterações de circulação (estas, verificáveis por tubos Pitot). Nota: extremo cuidado deve ser exercido na remoção do refratário, para evitar danos mecânicos aos tubos.
- Suportes, tirantes, chicanas e grampos anti-vibração devem ser examinados quanto à sua fixação, partes faltantes ou soltas, atritos e interferências indevidas.
- Refratários de um modo geral devem ser avaliados quanto ao seu possível desgaste, fragmentação, deterioração, situação da ancoragem e até mesmo se ainda permanecem nos locais originais.

- Recomenda-se fortemente que as bicas de fundido sejam substituídas a cada campanha anual. Se isto não ocorrer por alguma razão, é imperioso submetê-las a inspeção criteriosa incluindo ensaios não-destrutivos para determinar sua espessura remanescente, e eventual degradação (corrosão, erosão e trincas), especialmente micro-trincas no material do leito. Nota: bicas substituídas devem ser inutilizadas imediatamente para evitar sua reutilização, inclusive por terceiros, de forma inadvertida ou mal-intencionada. As bicas usadas devem, contudo, ser objeto de avaliação com vistas a informações de interesse para o histórico da caldeira (por exemplo, verificar se está havendo trincas ou não).
- O penthouse e o lower plenum devem ser examinados visualmente, com foco no estado de elementos estruturais ali alojados, corrosão em geral, invólucros, isolamentos, possíveis infiltrações e acúmulos de sulfato, estado de refratários e selos, estado de termopares e conexões de tubos Pitot. Especialmente deve ser verificada a condição de coletores, distribuidores e tubos, e as conexões entre eles. Em alguns tipos de caldeiras, é necessário inspecionar o sistema de suportação dos superaquecedores, quanto a trincas. Possíveis vazamentos de fundido devem ser pesquisados no plenum.
- Inspeção similar à descrita no item anterior, no que for aplicável, deve ser executada no vestíbulo posterior ao nariz.

## **ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS**

### **Medições de espessura**

Medições ultra-s nicas de espessura periódicas são essenciais para controlar a vida útil dos tubos, detectarem desgastes anormais e confirmar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) da unidade. Abaixo são recomendadas linhas gerais para um plano de prospecção ultra-s nica para medição de espessura:

Ressalta-se aqui, uma vez mais, que o plano deve ser individualizado para cada caldeira, levando-se em conta sua concepção, idade, histórico de corrosão, etc. As medições de espessura devem ser sempre complementadas com uma cuidadosa inspeção visual quanto a perdas de material dos tubos, por exemplo, com o uso de uma lanterna em ângulo. As medições são feitas em um arranjo lógico de localizações (exemplo: a cada 6 metros, de 5 em 5 tubos), resultando em uma densidade de medições adequada a cada caso, e para cada parte da caldeira. Vários milhares de pontos podem ser necessários em uma inspeção, para proporcionar uma adequada avaliação da unidade. O arranjo de medições também deve ser tal que permita boa repetibilidade dos ensaios em inspeções subseqüentes. Tipicamente as medições de espessura são feitas a cada ano. Este período, bem como a densidade de pontos, pode ser ajustado dependendo dos resultados. Abaixo são recomendadas práticas para prospecção de cada parte da caldeira.

- Os tubos de fornalha são medidos entre 3 e 6 níveis ou elevações, dependendo do tipo de proteção contra corrosão existente. Prioritariamente são medidos os níveis de ar de combustão e queimadores, e os tubos curvados ao redor das diversas aberturas da fornalha. Em áreas críticas é recomendado que a medição seja feita em três pontos da semicircunferência do tubo exposta aos gases, ao invés de uma única medição central. Partes como o nariz, que sabidamente experimentam maior desgaste, também devem receber atenção especial nas medições. As regiões altas da fornalha e teto, em contrapartida, geralmente apresentam baixas taxas de corrosão e podem ser examinadas com menor frequência.
- Os tubos de superaquecedores são medidos prioritariamente em partes curvas. Contudo medem-se também partes retas, preferencialmente nas linhas de centro de sopragem.
- Os tubos de economizadores devem ser medidos com prioridade para as partes inferiores, mais frias, e nas linhas de sopragem. Cuidado especial deve ser tomado para verificar a chamada corrosão do lado frio, próxima ao invólucro, estendendo-se as medições ultra-sônicas a estes

locais se necessário. Isto se aplica de forma especial quando o invólucro estiver corroído nas regiões próximas às entradas de sopradores de fuligem.

- Os tubos de cortina são medidos em 2 a 5 níveis (este número pode ser maior dependendo das características da cortina). As partes próximas às penetrações das paredes, tubos curvados e trechos retos nas regiões de sopragem são os focos de interesse principal.
- Os tubos de bancada devem ser medidos próximo aos balões, se for o caso, em partes curvadas e nas linhas de sopragem
- Tubos com sinais visuais evidentes de desgaste ou corrosão anormais devem ser medidos independentemente da sua localização.

É essencial verificar freqüentemente a calibração do aparelho, durante os trabalhos de medição de espessura.

### **Outros ensaios não-destrutivos**

- Ensaios não-destrutivos clássicos são usados para evidenciar descontinuidades em partes pressurizadas e estruturais. Abaixo são dadas algumas recomendações específicas do emprego destes ensaios, típicas nas inspeções periódicas da caldeira de recuperação:
- Líquidos penetrantes ao redor nas aberturas das bicas de smelt. Nas fornalhas de tubos compostos, onde a experiência tenha mostrado uma incidência apreciável de trincas, o ensaio também deve ser estendido às portas de ar de combustão e demais aberturas da fornalha baixa.
- Líquidos penetrantes em espaçadores ou soldas de painéis de screen, quando o painel em questão tiver sido deformado por queda de blocos de sulfato.

- Radiografia para controle da qualidade de eventuais soldas de manutenção em partes pressurizadas. É necessário radiografar 100% das soldas executadas em tubos de água na região da fornalha, assim como em quaisquer outras localizações que teoricamente possam originar vazamentos para a fornalha.
- Ensaio IRIS nos tubos do banco de convecção, quando houver suspeita de redução da espessura.
- Outros ensaios não-destrutivos, ou os ensaios acima em localizações diferentes das citadas, devem ser aplicados segundo necessidades específicas e/ou suspeitas levantadas nos exames visuais. Métodos especializados de ultra-som como B-Scan e o próprio IRIS, por exemplo, são indicados para exame de grandes áreas ou locais com limitação de acesso.

### **3.2.3.2 Lado de água e vapor**

- Por ocasião da inspeção periódica, a qualidade da água de alimentação (incluindo água de alimentação principal, de reposição e dos condensados que retornam à caldeira) é avaliada. Uma inspeção interna nos balões e coletores torna isto possível. No caso dos coletores, devem ser removidos caps para possibilitar esta visualização, e também ser feita a retirada de amostras dos depósitos internos e possíveis detritos, que serão analisadas por agente competente. Falhas ou deficiências da camada de óxido protetor, depósitos excessivos, corrosão, pitting, erosão, e outras irregularidades associáveis à qualidade da água são, portanto evidenciadas neste exame dos balões e coletores. Também podem ser cortados trechos de tubos para permitir análise dos depósitos internos.

- Os internos do balão de vapor, nomeadamente defletores, telas separadoras de umidade, tubulações de alimentação de água e de dosagem de produtos químicos, devem ser verificados quanto à sua adequada instalação e fixação, e ao seu estado geral. Observar nesta ocasião a linha d'água no balão, o que fornecerá indícios acerca do controle de nível no mesmo.
- A inspeção nos balões, além dos fatores acima, deve incluir o exame quanto a trincas e rupturas. Atenção especial deve ser dada às extremidades expandidas de tubos mandrilados e respectivas soldas de selagem, recorrendo-se a ensaios não-destrutivos se necessário. Isto se aplica especialmente após eventual lavagem química.
- Investigação com foco em corrosão e erosão nas partes em contato com a água, é feita, por exemplo, por meio de radiografia se houver indícios apontando para isto.
- Recomenda-se, quando da inspeção do balão de água, a instalação de tampas nas aberturas dos downcomers, presas com correntes no lado externo do balão, evitando-se que objetos caiam acidentalmente nestes locais.

### **3.2.4 Exame Externo**

O exame visual externo em uma caldeira de recuperação de álcalis também deve ser extensivo e detalhado. Embora tenha menor abrangência e profundidade que o exame interno, pode ainda assim proporcionar informações de grande relevância ao inspetor. Abaixo são dadas linhas gerais para o exame externo, subdividindo-o em: parte exterior da caldeira, e acessórios e órgãos periféricos.

### **3.2.4.1 Parte exterior da caldeira**

Deve ser feita uma inspeção cuidadosa na estrutura, buckstays, tirantes, isolamento térmico, invólucros, portas, visores, instrumentos, windboxes, funis de cinzas, escadas e corrimãos, plataformas, pisos, vias de evacuação em emergência, sinalização, etc. Recomenda-se periodicidade semestral para esta inspeção, que pode ser conduzida com a unidade em operação.

### **3.2.4.2 Acessórios e órgãos periféricos à caldeira**

Muitos destes itens requerem a parada da unidade para serem inspecionados. A periodicidade recomendada é, portanto anual, juntamente com o exame interno. Os principais estão destacados abaixo:

- Tanque de dissolução: antes da limpeza, verificar quanto a acúmulos irregulares de fundido, que indicam deficiência da agitação. O estado do costado deve ser avaliado externa e internamente. Se for construído em aço carbono revestido em aço inoxidável, eventuais falhas deste revestimento, expondo o substrato de aço carbono ao produto corrosivo, devem ser pesquisadas, uma vez que darão origem a pontos de severa corrosão localizada. Devem ser examinados os agitadores com foco em seus suportes de fixação (que podem ter trincas), estado das telas de proteção e desgaste dos rotores. Inspeccionar o estado e possíveis obstruções das linhas de licor verde, fragmentadores de licor verde a vapor, chuveiros de recirculação e outros internos do tanque.
- Sopradores de fuligem: inspecionar quanto ao alinhamento e possível existência de trincas, corrosão e erosão nas lanças, estas últimas ocasionadas geralmente por inadequada purga de condensado. Deve-se adotar como procedimento a inspeção por gamagrafia (radiografia utilizando raios gamas) nas soldas de lanças novas e reparos executados, conferindo-lhes maior segurança contra defeitos que poderiam causar o rompimento do tubo e sua projeção para o interior da caldeira. Deve ser examinada por END com especial atenção a solda de

união entre as ponteiros e as lanças. Observar o estado das caixas de selagem dos sopradores, montadas junto às penetrações nas paredes da caldeira. Proceder também a uma verificação da estanqueidade das válvulas do sistema. Confiabilidade adicional quanto à segurança dos sopradores de fuligem pode ser alcançada executando-se testes funcionais e dinâmicos com os mesmos. O teste, conduzido “a seco” durante a parada da unidade, é feito inserindo-se completamente a lança de cada soprador, enquanto um inspetor observa os seguintes aspectos: (a) curso da lança, certificando-se que a mesma não se aproxima demasiadamente, ou mesmo colide, com a parede oposta; (b) as condições e funcionamento das chaves-limite e batentes mecânicos de fim-de-curso, devendo a fixação (deste último) ser verificada por líquidos penetrantes; (c) o empeno ou descentralização da lança ao longo do percurso, com possíveis atritos laterais com painéis de tubos adjacentes; (d) condições de desgaste e desalinhamento, bem como ruídos anormais, dos roletes de apoio da lança; (e) funcionamento adequado do sistema de indexação, se existente.

- Tanque de água de alimentação e desaerador: devem ser examinados com foco na qualidade da água conforme descrito em 3.2 (1), atentando-se para depósitos e a presença de materiais estranhos em seu interior. Verifica-se também o estado dos internos do desaerador, especialmente fixação das bandejas e bicos spray. De forma geral estes vasos devem receber o mesmo tratamento de inspeção e END aplicável a vasos de pressão em geral, inclusive com atendimento aos requisitos legais.
- Linha de água de alimentação: está sujeita à perda de espessura causada por corrosão acelerada por fluxo, podendo resultar em rupturas de conseqüências catastróficas. Toda a tubulação deve portanto ser inspecionada com este foco, dando-se atenção especial às curvas, partes adjacentes ou à jusante de válvulas, derivações, pontos de dosagem de químicos ou onde quer que a geometria da linha favoreça o aumento de turbulência e o impingimento do fluido contra as paredes dos tubos. A

medição ultra-sônica de espessura é o recurso indicado. Como a corrosão pode ocorrer de forma localizada, é importante que se meça, a intervalos criteriosamente definidos, ao redor de toda a circunferência do tubo, e que seja feito um grid adequado de pontos de medição nas áreas suspeitas. Se necessário, inspecionar internamente com um endoscópio: a aparência rugosa típica da superfície interna das regiões corroídas será facilmente identificada com este instrumento.

- Linha de vapor principal: está sujeita principalmente à acumulação de danos de longo prazo, mas ainda assim deve receber certa atenção também nas inspeções anuais. Nestas ocasiões, devem ser verificadas principalmente as condições gerais de suportaço (estado visual e funcionamento dos suportes elásticos, exame por END nos olhais e outros dispositivos de suspensão soldados à tubulaço). De modo particular em caldeiras onde parte da linha de vapor esteja sujeita as intempéries, atenção deve ser dada à possibilidade de corrosão externa sob o isolamento térmico da tubulaço - uma forma clássica de corrosão.

Outros órgãos externos e periféricos da caldeira a serem inspecionados encontram-se apenas relacionados de forma genérica abaixo, como referência adicional ao inspetor:

- Válvulas de segurança;
- Bombas de alimentação de água e de circulação;
- Lavadores de gases;
- Pré-aquecedores de ar;
- Tanque de mistura;
- Sistemas de limpeza das portas de ar primário;
- Tanques e descarga contínua e de fundo;
- Tanque de água de resfriamento das bicas;
- Ventiladores e exaustores de tiragem;
- Precipitadores eletrostáticos;

- Transportadores de cinzas;
- Válvulas rotativas;
- Dutos de ar e gases;
- Manômetros e indicadores de nível;
- Instrumentação e alarmes em geral. Dispositivos de segurança como sistema de drenagem rápida, medição on-line de sólidos, instrumentos com ação de trip na caldeira;
- Etc.

### 3.2.5 Testes Complementares

Além dos exames visuais e ensaios, a aplicação dos testes complementares citados abaixo, de natureza mais funcional, contribuirá para aferir a segurança da unidade. Estes testes devem ser testemunhados pelo profissional comissionado para executar a inspeção da caldeira.

#### 3.2.5.1 Teste Hidrostático

A aplicação de prova de pressão hidrostática (com valor normalizado de sobrepressão, e seguindo procedimentos de teste também padronizados no código de projeto da caldeira) permite verificar a existência de vazamentos e/ou insuficiência de resistência da unidade. Embora somente exigível, pelas normas genéricas para caldeiras, na inspeção inicial e após execução de reparos e/ou vazamentos em partes pressurizadas, o teste hidrostático é imprescindível por ocasião das inspeções periódicas, no caso de caldeiras de recuperação.

Abaixo é mostrado o diagrama de pressão de um teste hidrostático típico, bem como as operações associadas a cada um de seus segmentos, de A até F:

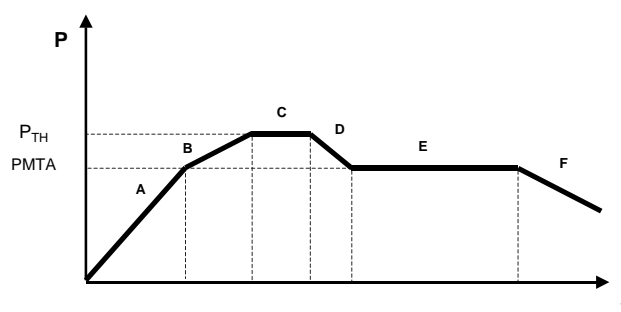


Diagrama de pressão de um teste hidrostático típico

Segmento	Operação/atividade	Razão de pressurização / depressurização
A	Pressurização até a PMTA	2 a 3 kgf/cm <sup>2</sup> por minuto. Pode ser conduzida em patamares intermediários
B	Elevação até a pressão de teste, P <sub>TH</sub>	1 kgf/cm <sup>2</sup> por minuto
C	Estabilização na pressão de teste por 30 minutos	Zero
D	Redução da pressão até a PMTA	2 a 3 kgf/cm <sup>2</sup> por minuto
E	Ingresso dos interessados na caldeira e execução das inspeções	Zero
F	Despressurização	2 a 3 kgf/cm <sup>2</sup> por minuto

Tabela 3-1 Etapas do teste hidrostático

Recomendações gerais para teste hidrostático:

- Travar as válvulas de segurança;
- Pressurizar por meio das bombas de alimentação (BFPs);
- Utilizar água desmineralizada, fria (15 a 40°C);
- Utilizar manômetro-padrão aferido, instalado no balão de vapor;
- Inspeccionar todas as partes pressurizadas acessíveis da caldeira;
- Surgimento de gotículas em tubos mandrilados não deve motivar reprovação.

### 3.2.5.2 Teste das válvulas de segurança

Válvulas de segurança são dispositivos de proteção sujeitos a falhas latentes, isto é, falhas que só serão percebidas quando a atuação da válvula se fizer necessária. Assim, mesmo assumindo-se que tenham recebido adequada manutenção, e sejam suficientes em termos de vazão, as válvulas de segurança devem ainda ser testadas anualmente, com foco na calibração e funcionamento adequado. A pressão de abertura e o diferencial de alívio devem estar em estrita conformidade com as especificações do

fabricante, com o código de projeto da caldeira e com a legislação vigente. A abertura das válvulas deve ser em disparo único, em “pop”, sem apresentar batimento ou trepidação. As PSVs devem também estar isentas de vazamentos perceptíveis quando da operação normal da caldeira.

Nota: o teste das válvulas de segurança, bem como sua desmontagem e revisão anuais são mandatários pela legislação vigente.

Recomendações gerais para teste convencional de válvulas de segurança:

- Iniciar o teste pela PSV de ajuste mais alto;
- A cada válvula testada, as demais deverão estar travadas;
- Caso sejam requeridos ajustes, disparar a válvula em questão no máximo 5 vezes seguidas. Ocorrendo esta situação, somente após 6 horas poderá ser feita nova tentativa;
- Quando uma PSV abrir, o operador deverá apagar um queimador e liberar vapor pela válvula de alívio blowoff.;
- Utilizar manômetro-padrão aferido, instalado no balão de vapor;
- Uma tolerância de  $\pm 1 \text{ kgf/cm}^2$  no valor de abertura da PSV, é usualmente aceita;
- Testes de acumulação não devem ser executados em caldeiras providas de superaquecedores.

Opcionalmente ao teste convencional de válvulas de segurança, é aceita a utilização de dispositivos atuadores hidráulicos, geralmente associados a uma instrumentação especial, constituindo o chamado teste on-line, sem a necessidade do disparo em “pop” e abertura total das válvulas de segurança.

### 3.3 MÉTODO DE ENSAIO POR ULTRA-SOM

#### 3.3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MÉTODO

##### 3.3.1.1 Introdução:

Sons extremamente graves ou agudos podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, não por deficiência deste, mas por caracterizarem vibrações com frequências muito baixas, até 20Hz (infra-som) ou com frequências muito altas acima de 20 kHz (ultra-som), ambas inaudíveis.

Como sabemos, os sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes.

Fenômenos como este apesar de simples e serem freqüentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultra-sônico de materiais.

No passado, testes de eixos ferroviários, ou mesmos sinos, eram executados através de testes com martelo, em que o som produzido pela peça, denunciava a presença de rachaduras ou trincas grosseiras pelo som característico.

Assim como uma onda sonora, reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.

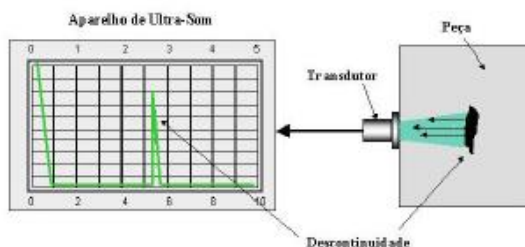


Figura 3-2 Funcionamento esquemático de um aparelho de ultra-som

### 3.3.1.2 Finalidade do Ensaio

O ensaio por ultra-som caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos e medições de espessura em tubulações.

Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada, como por exemplo, bolha de gás fundido, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escoria em uniões soldadas e muitos outros.

Portanto, o exame ultra-sônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.



Figura 3-3 Realização do teste de ultra-som

### 3.3.1.3 Campo de Aplicação

Em 1929 o cientista Sokolov fazia as primeiras aplicações da energia sônica para atravessar materiais metálicos, enquanto que 1942 Firestone utilizou o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais. Somente em 1945 o ensaio ultra-sônico iniciou sua caminhada em escala industrial, impulsionado pelas necessidades e responsabilidades cada vez maiores. Hoje, na moderna indústria, principalmente nas áreas de caldeiraria e estruturas marítimas, o exame ultra-sônico, constitui uma ferramenta indispensável para garantia da qualidade de peças de grandes espessuras, geometria complexa de juntas soldadas, chapas.

Na maioria dos casos, os ensaios são aplicados em aços-carbonos e em menor porcentagem em aços inoxidáveis. Materiais não ferrosos são difíceis de serem examinados e requerem procedimentos especiais.

### **3.3.2 Limitações em Comparação com outros Ensaios**

#### **Vantagens em relação a outros ensaios:**

O método ultra-sônico possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo:

- Trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia).
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção.
- No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados.
- Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultra-sônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação.
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-sônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder a um reparo.

#### **Limitações em relação a outros ensaios:**

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor.

- O registro permanente do teste não é facilmente obtido.
- Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método.
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, que demanda tempo de fábrica.

### 3.3.3 APARELHAGEM

Descrição dos Aparelhos Medidores de Espessura por ultra-som.

Os medidores de espessura por ultra-som podem se apresentar com circuitos digitais ou analógicos, e são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material, através da espessura, registrando no display o espaço percorrido, ou seja, a própria espessura. Operam com transdutores duplocristal, e possuem exatidão de décimos ou até centésimos dependendo do modelo.



Figura 3-4 Aparelho medidor de espessura por ultra-som

São aparelhos bastante úteis para medição de espessuras de chapas, tubos, taxas de corrosão em equipamentos industriais, porém para a obtenção de bons resultados, é necessária sua calibração antes do uso, usando blocos com espessuras calibradas e de mesmo material a ser medido, com o ajuste correto da velocidade de propagação do som do aparelho.

Os aparelhos medidores modernos de espessura digital são dotados de circuitos de memória que podem armazenar centenas de dados referentes a espessuras medidas e

após, conectando na impressora, pode-se obter um relatório completo das medidas efetuadas e as condições usadas.

### 3.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO DA EMPRESA DE CELULOSE EM ESTUDO E APLICAÇÃO DESTE TRABALHO

O estudo de otimização de inspeção de medição de espessura está sendo embasado na Caldeira de Recuperação de Álcalis A de uma Planta Industrial de Papel e Celulose.

Os parâmetros de processo e dados técnicos da caldeira de recuperação supracitada encontram-se nas Figuras 3-5 e 3-6.

<b>Parâmetro – CR A</b>	<b>LIE</b>	<b>Média</b>	<b>LSE</b>	<b>Objetivo</b>
Pressão de SHS (MPa)	5,9	6,3	6,5	6,3
Temperatura do SHS (°C)	425	430	435	430
Álcali total LGR (g/l)	155	160	165	160
Dregs no LGR (ml/l)	-	50	100	50
TRS na Chaminé (ppm)	-	0,5	2,0	0,5
SO <sub>2</sub> na Chaminé (ppm)	-	61	100	61
Opacidade na Chaminé (%)	-	11	30	11
Grau de redução (%)	90	95	-	95

<b>Parâmetro – CR B</b>	<b>LIE</b>	<b>Média</b>	<b>LSE</b>	<b>Objetivo</b>
Pressão de SHS (MPa)	5,8	6,2	6,5	6,2
Temperatura do SHS (°C)	425	430	435	430
Álcali total LGR (g/l)	155	160	165	160
Dregs no LGR (ml/l)	-	50	100	50
TRS na Chaminé (ppm)	-	0,5	2,0	0,5
SO <sub>2</sub> na Chaminé (ppm)	-	61	100	61
Opacidade na Chaminé (%)	-	11	30	11
Grau de redução (%)	90	95	-	95

<b>Parâmetro – CR C</b>	<b>LIE</b>	<b>Média</b>	<b>LSE</b>	<b>Objetivo</b>
Pressão de SHS (MPa)	5,9	6,3	6,5	6,3
Temperatura do SHS (°C)	430	445	460	445
Álcali total LGR (g/l)	155	160	165	160
Dregs no LGR (ml/l)	-	50	100	50
TRS na Chaminé (ppm)	-	0,5	2,0	0,5
SO <sub>2</sub> na Chaminé (ppm)	-	61	100	61
Opacidade na Chaminé (%)	-	11	30	11
Grau de redução (%)	90	95	-	95

Figura 3-5 Características Técnicas das Caldeiras de Recuperação

Dados Técnicos	A *	B	C
Fornecedor	Kvaerner	Kvaerner (Götaverken)	Ahlstron
Ano de fabricação/retrofit	2001	1988/2002	1996/2001
SDCD	Foxboro	Fisher	Foxboro
Capacidade de Queima (t ss/dia)	3440	3440	3100
Área da fornalha (m <sup>2</sup> )	156,7	165,7	130,8
Aspesores de Licor	12	8	11
Queimadores de Óleo	8+4	8	8+3
Bicas de Smelt	5	5	5
Economizadores	3	2	2
Balão de Vapor	1	1	1
Sopradores de Fuligem	98	88	98
Precipitadores Eletrostáticos	3 (ABB)	3 (FLAKT)	2 (ABB)
Geração de Vapor (t/h)	523,6	440	450
Pressão de Saída (kgf/cm <sup>2</sup> )	64	64	64
Temp. do Vapor (°C)	450	450	450
Temp. água de alimentação (°C)	135	135	135

Figura 3-6 Dados técnicos das Caldeiras de Recuperação

### 3.4.1 Breve histórico da Caldeira de Recuperação em Estudo

A caldeira de recuperação de álcalis da fábrica A foi fornecida em 1978 pela GOTAVERKEN da Suécia, no ano de 2001 passou por uma grande reforma (Retrofit), visando o aumento de sua capacidade de produção. Naquela reforma toda a fornalha e sistemas de superaquecedores e economizadores foram trocados (Kvaerner) e foi instalado um novo precipitador eletrostático. O investimento total da reforma foi da ordem de US\$ 80 milhões.

Encontram-se nas páginas seguintes, Figura 3-7 e 3-8, as configurações da CRA antes e após o Retrofit.

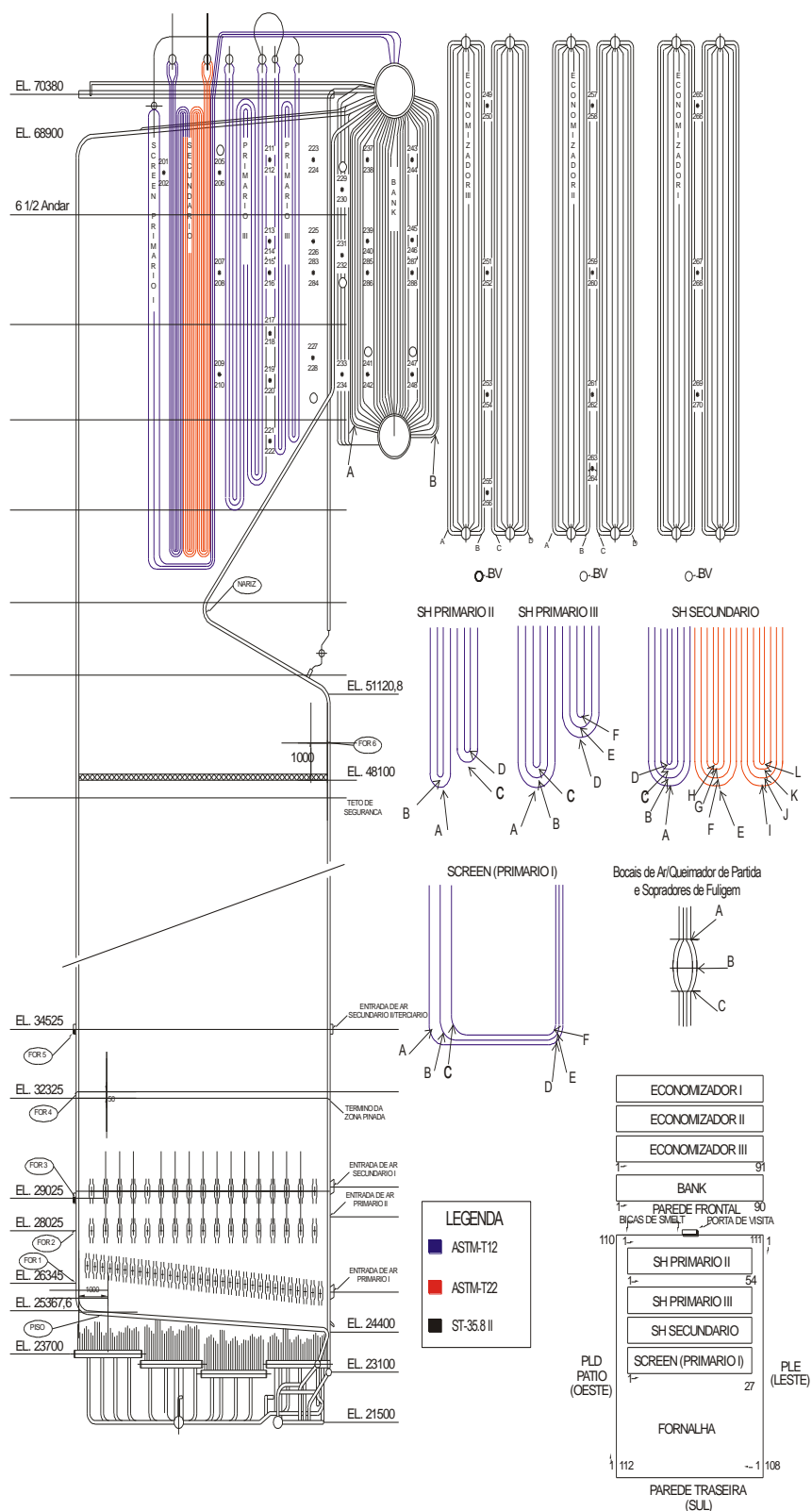


Figura 3-7 Configuração da Caldeira de Recuperação A antes do Retrofit



## **4 ESTUDO DE CASO**

### **4.1 HISTÓRIO DE INSPEÇÃO DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA E CURVAS DE TENDÊNCIAS**

Para a confecção do Novo Plano de Rotinas de Medição de Espessura foram analisados e plotadas Curvas de Tendência para todos os pontos localizados em cada região onde são realizadas as Inspeções de Medição de Espessura.

Com base nas recomendações do Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil e na experiência dos Especialistas em inspeção de Caldeiras de Recuperação, foram pré-selecionados os pontos mais críticos pertencentes a cada região da caldeira – Tabela 4- 79.

Traçadas as curvas de tendência, com base nas recomendações do Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil e na Metodologia de Inspeção Baseada em Risco, foi elaborado o Novo Plano de Inspeção de Medição de Espessura em Caldeiras de Recuperação.

Foi realizada uma amostragem das curvas de tendência de algumas regiões da caldeira para serem incluídas neste trabalho objetivando exemplificar a metodologia empregada na elaboração do Novo Plano de Inspeção.

#### **4.1.1 SOBRE AS CURVAS (LINHAS) DE TENDÊNCIA**

##### **4.1.2 O que são linhas de tendência?**

As linhas de tendência são usadas para exibir graficamente tendências nos dados e analisar problemas de previsão. Esta análise também é chamada de análise de regressão. Usando a análise de regressão, você pode estender uma linha de tendência em um gráfico além dos dados reais para prever valores futuros.

##### **4.1.3 Segurança das linhas de tendência**

Os tipos de dados existentes determinam o tipo de linha de tendência que deve ser usado.

Uma linha de tendência é mais segura quando seu valor de R-quadrado (valor de R-quadrado: um indicador de 0 a 1 que revela o grau de correspondência entre os valores estimados para a linha de tendência e os dados reais. A linha de tendência é mais confiável quando o valor de R-quadrado é 1 ou próximo de 1. Conhecido também como coeficiente de determinação.) é ou aproxima-se de 1.

#### **4.1.4 Tipos de Linhas de Tendência**

##### **4.1.4.1 Linear**

Uma linha de tendência linear é uma linha reta de melhor ajuste usada com conjuntos de dados lineares simples. Seus dados serão lineares se o padrão nos pontos de dados se parece com uma linha. Uma linha de tendência linear geralmente mostra que algo está aumentando ou diminuindo com uma taxa fixa.

##### **4.1.4.2 Logarítmica**

Uma linha de tendência logarítmica é uma linha curva de melhor ajuste usada quando a taxa de alteração nos dados aumenta ou diminui rapidamente e depois se nivela. Uma linha de tendência logarítmica pode usar valores negativos e/ou positivos.

##### **4.1.4.3 Polinomial**

Uma linha de tendência polinomial é uma linha curva usada quando os dados flutuam. É útil, por exemplo, para analisar ganhos e perdas em um conjunto de dados amplo. A ordem da polinomial pode ser determinada pelo número de flutuações nos dados ou por quantas dobras (picos e vales) aparecem na curva. Uma linha de tendência polinomial de ordem 2 geralmente só possui um pico ou vale. A ordem 3 geralmente possui um ou dois picos ou vales. A ordem 4 geralmente possui até três.

##### **4.1.4.4 Potência**

Uma linha de tendência de potência é uma linha curva usada com conjuntos de dados que comparam medidas que aumentam as taxas específicas — por exemplo, a

aceleração de um carro de corrida em intervalos de 1 segundo. Não poderá ser criar uma linha de tendência de potência se seus dados contiverem valores zero ou negativos.

#### **4.1.4.5 Exponencial**

Uma linha de tendência exponencial é uma linha curva usada quando os valores de dados estiverem crescendo ou caindo com taxas cada vez mais altas. Não poderá ser criar uma linha de tendência exponencial se seus dados contiverem valores zero ou negativos.

#### 4.1.5 HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS DO SUPERAQUECEDOR TERCIÁRIO NA LINHA DO SOPRADOR DE FULIGEM

- ELEVAÇÃO 55.420**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1	6,2	6,2	6,2	6,0
9	6,4	6,2	6,1	5,9
15	6,3	6,2	6,0	5,9
25	6,3	6,3	6,1	5,9
35	6,2	6,2	6,0	5,7

Tabela 4-1 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 55.420

- ELEVAÇÃO 61.890**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
2	6,1	6,1	5,9	5,8
6	6,2	6,0	5,9	5,8
15	6,3	6,2	6,0	5,9
19	6,4	6,2	6,0	5,9
33	6,4	6,3	6,1	6,0

Tabela 4-2 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 61.800

- ELEVAÇÃO 58.890**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1	6,3	6,2	5,9	5,9
6	6,2	6,2	6,1	6,0
11	6,6	6,4	6,3	5,9
17	6,3	6,2	6,0	5,9
35	6,2	6,2	6,0	5,9

Tabela 4-3 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 58.890

• **ELEVAÇÃO 64.890**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
2	6,1	6,0	5,9	5,9
4	6,3	6,2	5,2	5,2
18	6,1	6,0	5,9	5,8
29	6,4	6,2	6,1	6,0
33	6,5	6,3	6,2	6,1

Tabela 4-4 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 64.890

• **ELEVAÇÃO 67.890**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1	6,3	6,1	6,0	5,8
20	6,3	6,2	6,1	6,0
23	6,3	6,1	5,9	5,8
33	6,4	6,1	6,0	5,9
35	6,2	6,2	6,2	6,2

Tabela 4-5 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 67.890

• **ELEVAÇÃO 55.420 B**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1	6,2	6,1	6,1	5,9
5	6,2	6,2	6,0	5,8
13	6,2	6,2	6,1	5,9
20	6,2	6,2	6,2	6,0
30	6,3	6,2	5,9	5,9

Tabela 4-6 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 55.420 B

• **ELEVAÇÃO 58.700**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
3	6,3	6,3	6,1	6,0
11	6,5	6,4	6,3	6,1
21	6,4	6,2	6,2	6,2
26	6,4	6,2	6,2	6,1
35	6,2	6,2	6,2	6,2

Tabela 4-7 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 58.700

• **ELEVAÇÃO 61.700**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
2	6,3	6,1	5,9	5,8
14	6,6	6,3	6,3	6,0
15	6,5	6,4	6,3	6,1
18	6,3	6,2	6,1	5,9
33	6,2	6,2	6,2	6,0

Tabela 4-8 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 61.700

• **ELEVAÇÃO 64.700**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
6	6,0	6,0	6,0	6,0
13	6,4	6,3	6,2	6,0
16	6,3	6,2	6,1	5,9
21	6,2	6,0	5,9	5,8
31	6,3	6,2	6,0	5,9

Tabela 4-9 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 64.700

• **ELEVAÇÃO 67.745**

Painel	2001	2002	2003	2004
7	6,2	6,2	6,2	6,2
11	6,5	6,2	6,0	6,0
20	6,0	6,0	5,7	5,7
27	6,4	6,2	6,1	6,0
35	6,1	6,1	6,0	5,9

Tabela 4-10 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – SF – Elevação 67.745

**Mat.: A - 213 T 12**

Diâmetro. (mm) 63,50

Espessura .  
Nominal(mm) 5,60

Esp. Rec. (mm) 4,30

Esp. Mín. (mm) 4,00

Tabela 4-11 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - SF

#### 4.1.5.1 Exemplos de curvas de tendência da região do superaquecedor terciário na linha do soprador de fuligem utilizadas para a determinação da Matriz de Risco

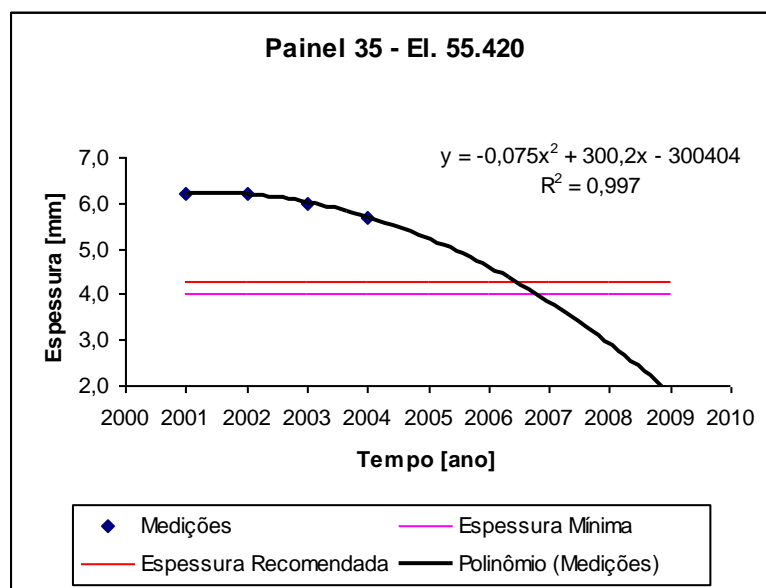


Figura 4-1 Curva de tendência do Painel 35 - Elevação 55.420 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

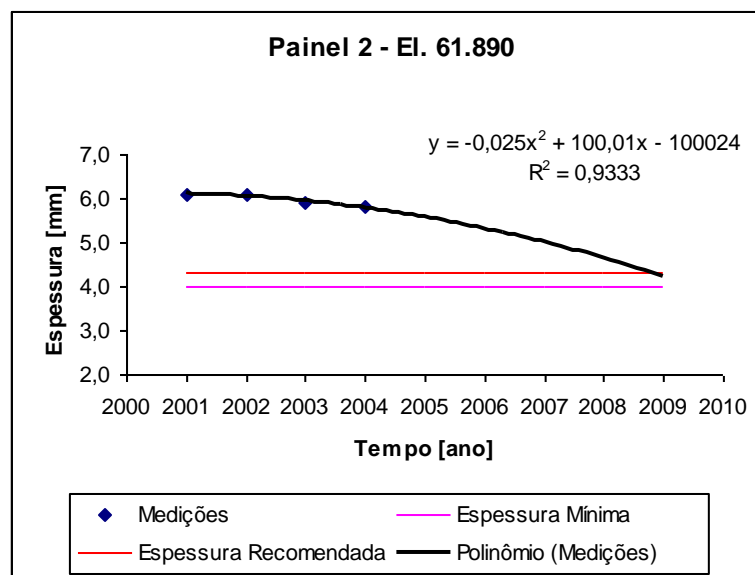


Figura 4-2 Curva de tendência do Painel 2 - Elevação 61.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2009
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2008

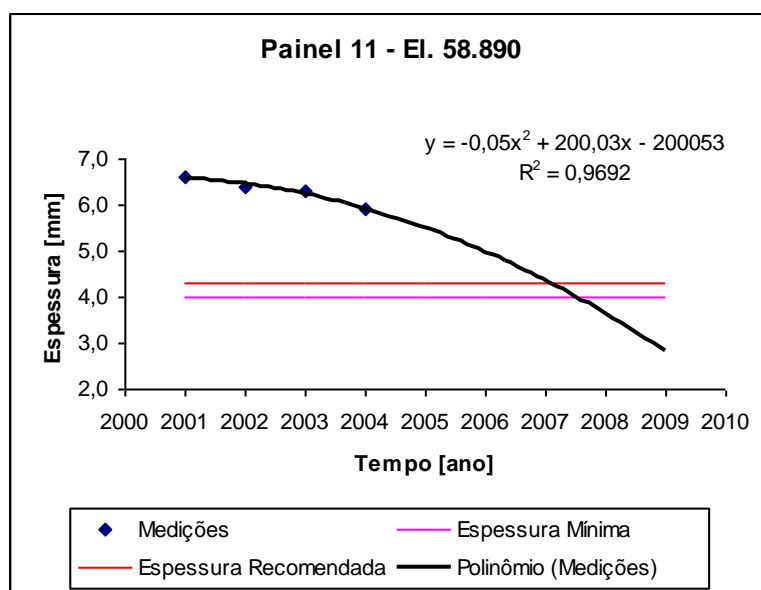


Figura 4-3 Curva de tendência do Painel 11 - Elevação 58.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

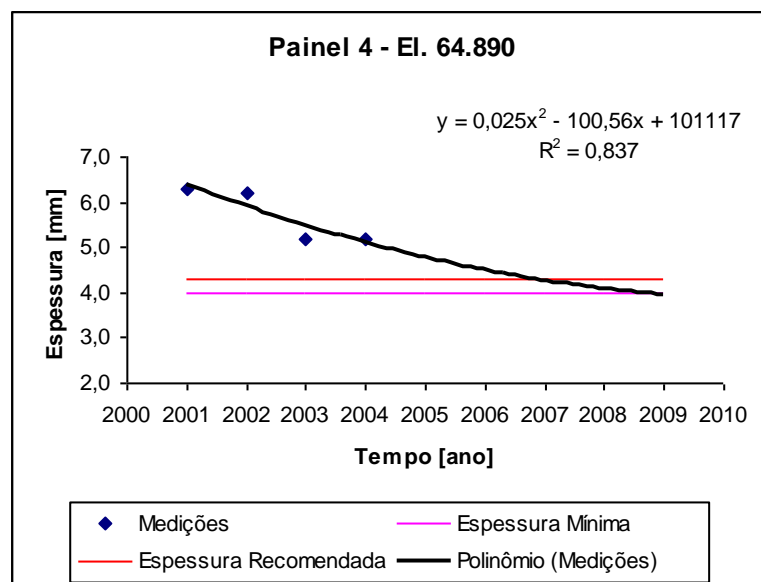


Figura 4-4 Curva de tendência do Painel 4 - Elevação 64.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2008

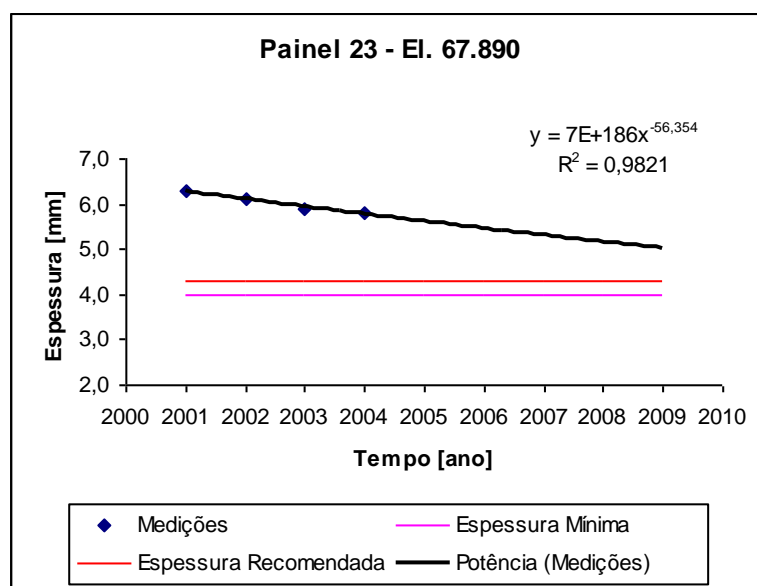


Figura 4-5 Curva de tendência do Painel 23 - Elevação 67.890 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2014
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2012

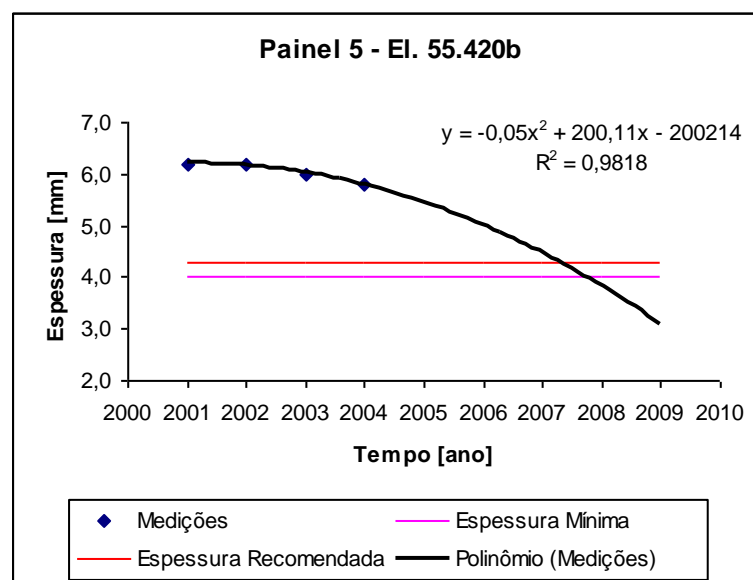


Figura 4-6 Curva de tendência do Painel 5 - Elevação 55.420 B – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

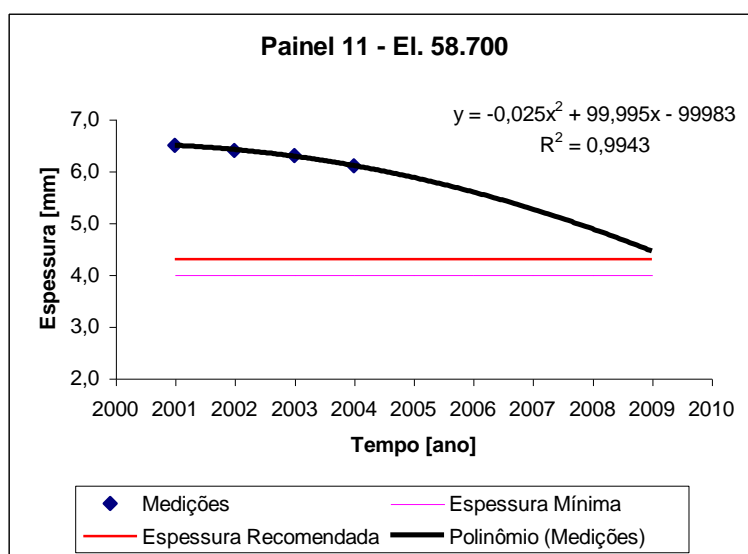


Figura 4-7 Curva de tendência do Painel 11 - Elevação 58.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2010
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2009

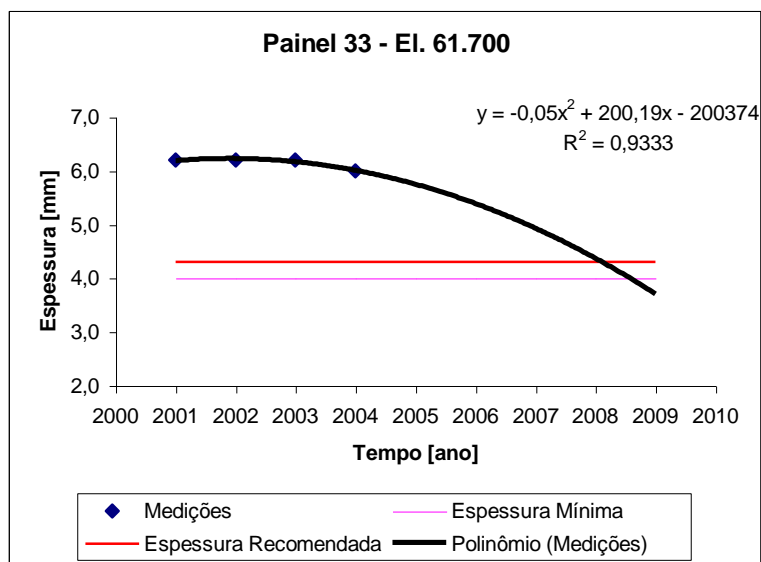


Figura 4-8 Curva de tendência do Painel 33 - Elevação 61.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2008

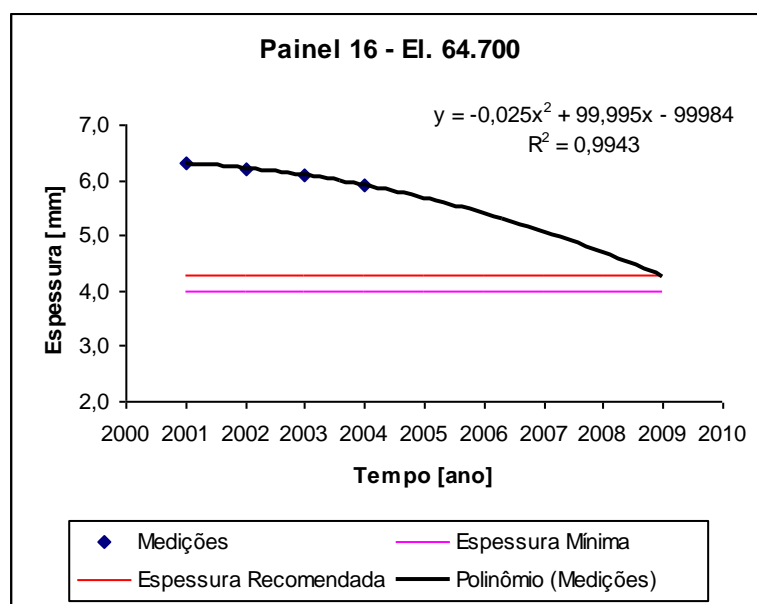


Figura 4-9 Curva de tendência do Painel 16 - Elevação 64.700 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2009
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2008

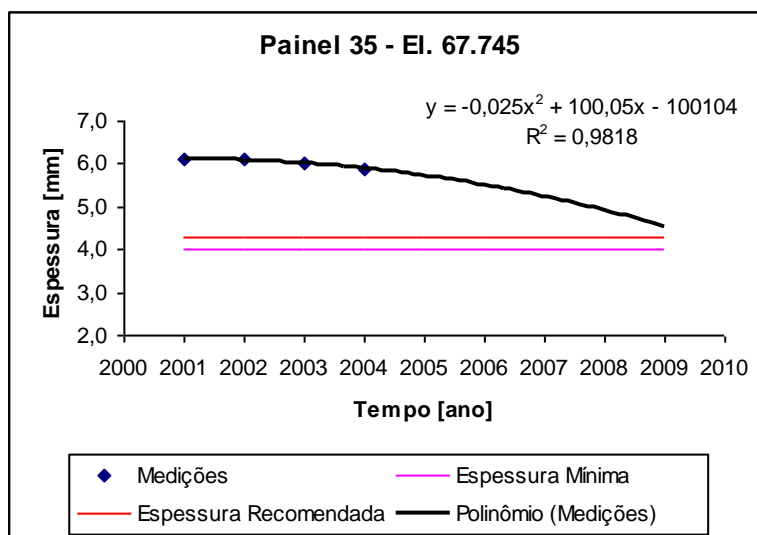
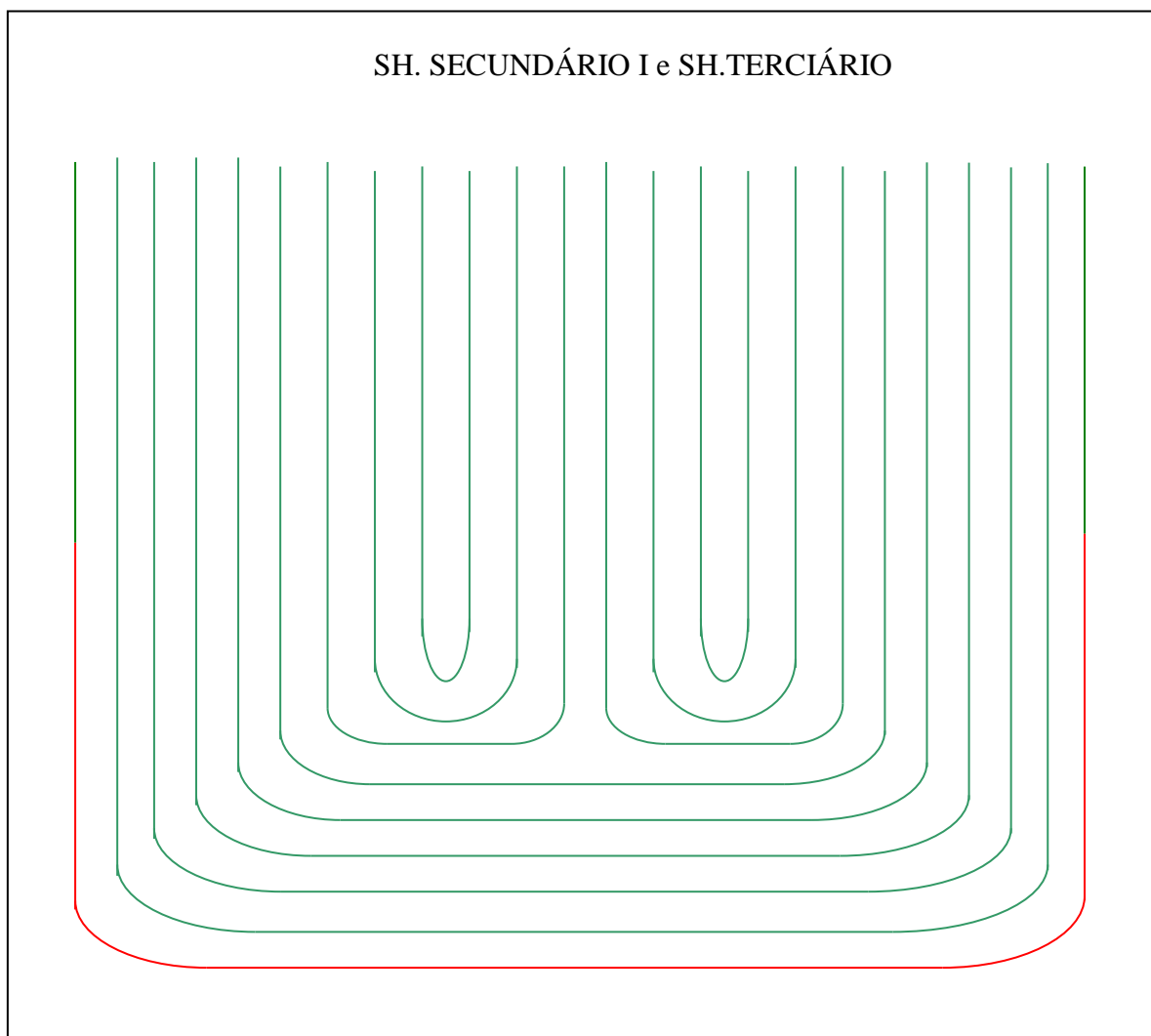


Figura 4-10 Curva de tendência do Painel 35 - Elevação 67.745 – para o Superaquecedor Terciário - SF

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2010
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2009

#### 4.1.6 HISTÓRICO E CURVAS DE TENDÊNCIAS DOS PONTOS ANALISADOS DO SUPERAQUECEDOR TERCIÁRIO – CURVAS



• **PONTO A**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
5	6,0	6,0	6,0	6,0
19	6,0	5,8	5,7	5,7
32	6,2	6,2	6,2	5,9

Tabela 4-12 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto A

• **PONTO B**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
13	6,0	6,0	6,0	6,0
23	6,1	5,8	5,8	5,8
32	6,3	6,1	6,0	6,0

Tabela 4-13 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto B

**Curvas A e B**

**Mat.: A - 213 T 12 + inox**

Diâm. (mm) 63,50

Esp. Nom. (mm) 5,60

Esp. Rec. (mm) 4,30

Esp. Mín. (mm) 4,00

Tabela 4-14 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - Curvas

#### 4.1.6.1 Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco

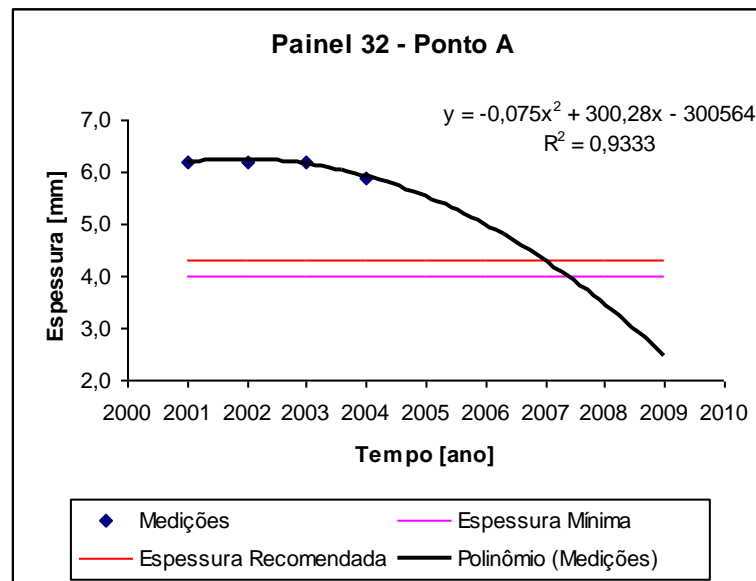


Figura 4-11 Curva de tendência do Painel 32 – Ponto A – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

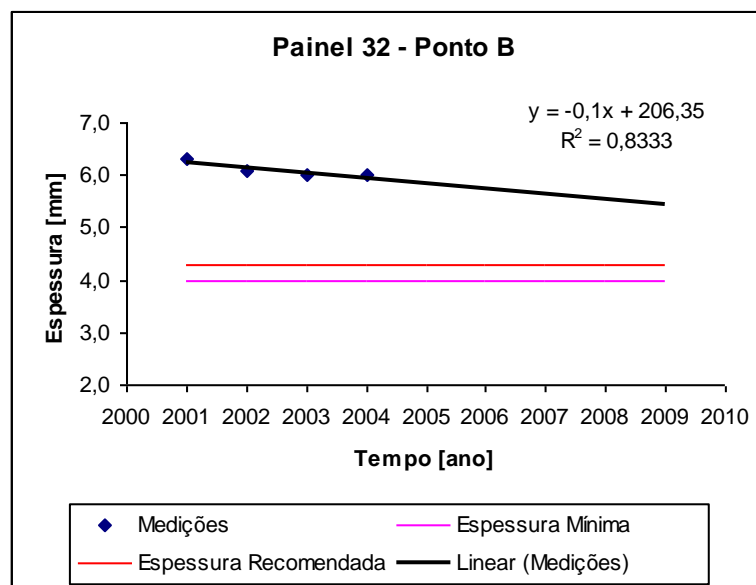


Figura 4-12 Curva de tendência do Painel 32 – Ponto B – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2023
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2020

• **PONTO C**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
17	5,6	5,1	4,7	4,7
18	5,5	5,3	4,7	4,7
31	5,3	4,8	4,7	4,4

Tabela 4-15 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto C

• **PONTO D**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
16	5,6	5,3	4,7	4,7
24	5,5	5,2	4,6	4,6
32	5,7	5,0	4,7	4,7

Tabela 4-16 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto D

• **PONTO E**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
15	5,6	5,2	4,7	4,7
18	5,6	5,4	4,5	4,5
31	5,6	5,2	5,1	4,9

Tabela 4-17 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto E

• **PONTO F**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
5	5,7	5,2	4,7	4,7
6	5,8	5,4	4,8	4,8
24	5,5	4,9	4,5	4,5

Tabela 4-18 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto F

• **PONTO G**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
25	5,7	5,0	4,9	4,7
29	5,5	5,2	5,0	4,5
34	5,4	4,7	4,5	4,5

Tabela 4-19 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto G

• **PONTO H**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
5	5,8	5,3	5,2	4,9
28	5,6	5,0	4,6	4,6
32	5,6	5,0	4,6	4,6

Tabela 4-20 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto H

• **PONTO I**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
18	5,5	5,0	4,4	4,2
20	5,5	4,4	4,4	4,2
25	5,6	4,8	5,1	4,5

Tabela 4-21 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto I

• **PONTO J**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
14	5,6	5,3	5,1	4,7
19	5,7	5,0	4,9	4,8
21	5,6	5,5	5,0	4,6

Tabela 4-22 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto J

• **PONTO K**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
20	5,6	5,6	4,6	4,3
21	5,4	4,6	4,4	4,0
25	5,5	4,6	5,0	4,1

Tabela 4-23 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto K

• **PONTO L**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
18	5,6	5,2	4,6	4,6
21	5,5	5,1	5,1	4,6
26	5,7	5,2	4,0	4,0

Tabela 4-24 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto K

• **PONTO M**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
11	5,5	5,4	4,4	4,4
29	5,4	5,2	5,2	4,4
30	5,4	4,7	4,7	4,5

Tabela 4-25 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto M

• **PONTO N**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
11	5,6	5,0	4,6	4,6
29	5,6	5,2	5,1	4,7
35	5,6	5,1	5,3	4,7

Tabela 4-26 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto N

• **PONTO O**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
11	5,9	5,6	4,4	4,4
21	5,7	5,0	4,7	4,5
32	5,6	5,1	4,6	4,3

Tabela 4-27 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto O

• **PONTO P**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
30	6,0	5,6	5,6	5,1
34	6,1	5,7	4,7	4,7
35	6,5	5,9	5,3	5,3

Tabela 4-28 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto P

• **PONTO Q**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
9	5,7	4,5	4,4	4,3
13	5,7	5,7	4,6	4,5
33	5,5	5,0	5,0	4,4

Tabela 4-29 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto Q

• **PONTO R**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
9	5,6	4,8	4,4	4,3
13	5,7	5,5	4,2	4,2
29	5,6	4,4	4,4	4,4

Tabela 4-30 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto R

• **PONTO S**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
5	5,7	4,5	4,5	4,5
10	5,5	5,0	4,4	4,1
28	5,6	5,4	5,0	4,3

Tabela 4-31 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto S

• **PONTO T**

Painel	Nov01	Out02	Nov03	Out04
6	6,2	5,3	4,7	4,7
21	6,3	5,4	5,4	5,3
35	6,0	6,0	5,0	5,0

Tabela 4-32 Histórico de medição de espessura do Superaquecedor Terciário – Curvas – Ponto T

**Curvas C e T**

**Mat.: A - 213 T 12**

Diâm. (mm) 63,50

Esp. Nom. (mm) 5,60

Esp. Rec. (mm) 4,30

Esp. Mín. (mm) 4,00

Tabela 4-33 Material e dimensões do Superaquecedor Terciário - Curvas

#### 4.1.6.2 Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco

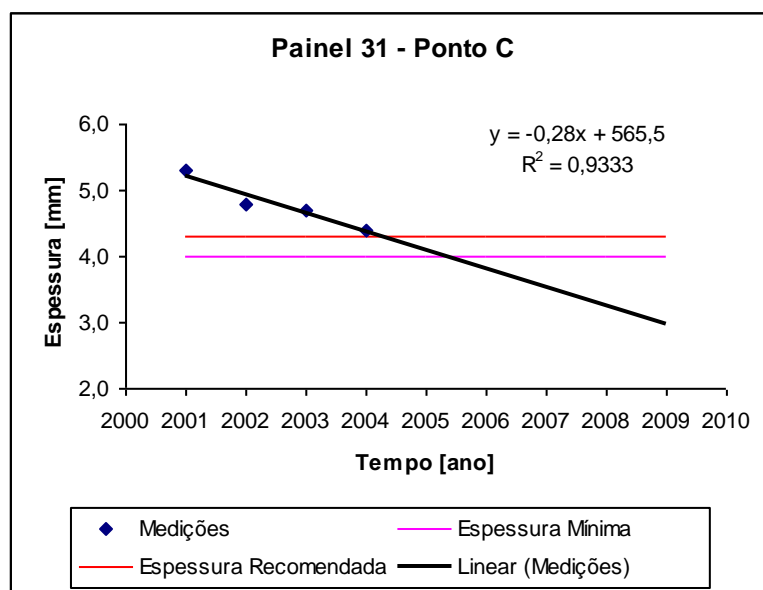


Figura 4-13 Curva de tendência do Painel 31 – Ponto C – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

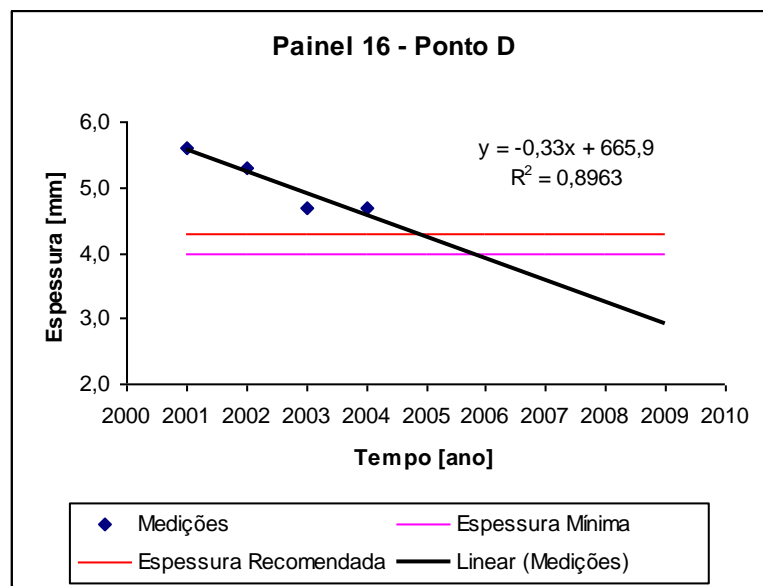


Figura 4-14 Curva de tendência do Painel 16 – Ponto D – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

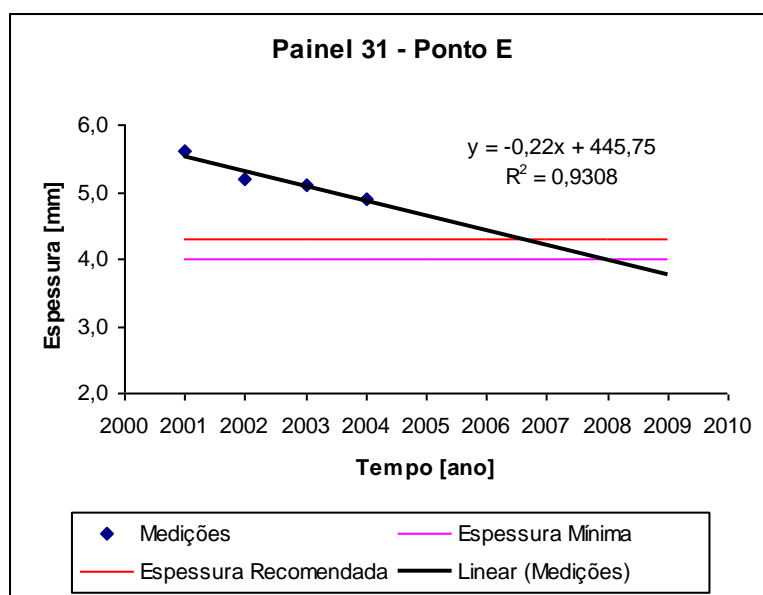


Figura 4-15 Curva de tendência do Painel 31 – Ponto E – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

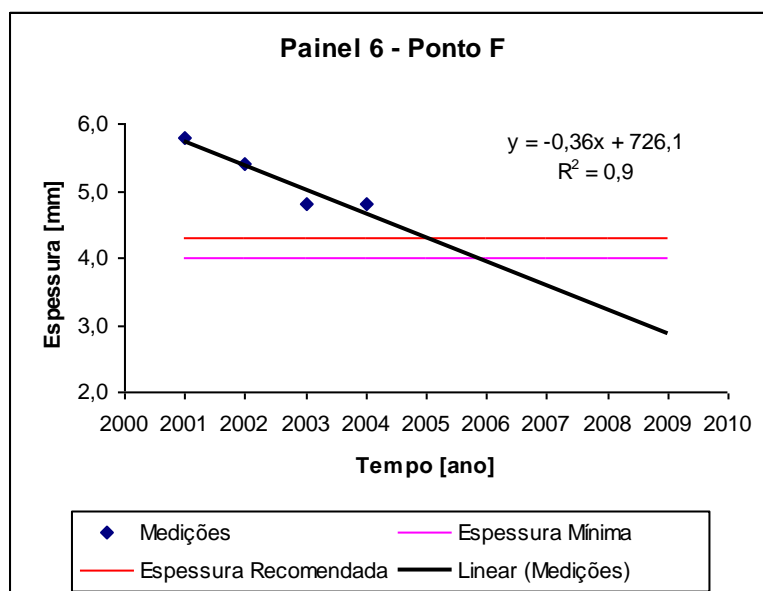


Figura 4-16 Curva de tendência do Painel 6 – Ponto F – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

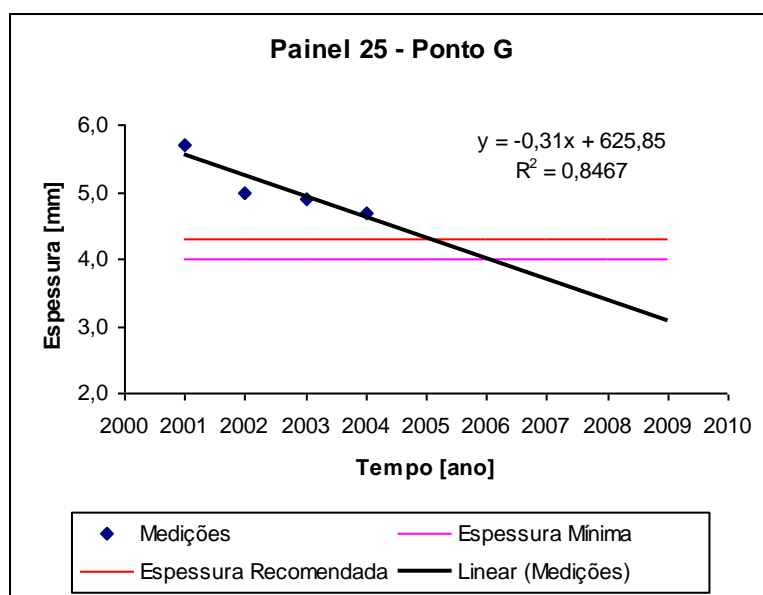


Figura 4-17 Curva de tendência do Painel 25 – Ponto G – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

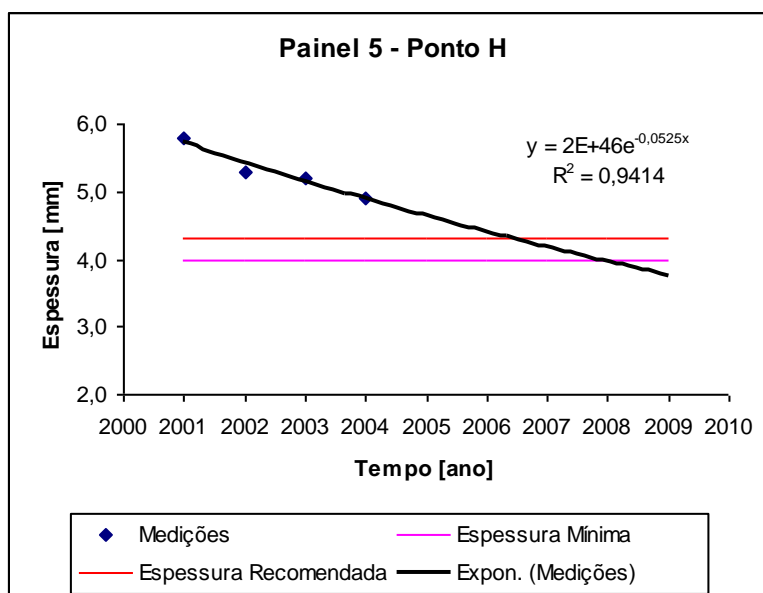


Figura 4-18 Curva de tendência do Painel 5 – Ponto H – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

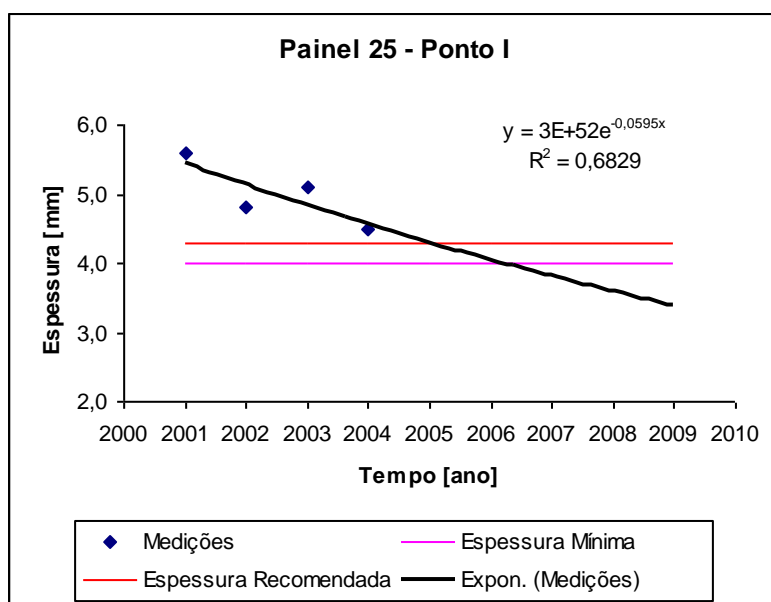


Figura 4-19 Curva de tendência do Painel 25 – Ponto I – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

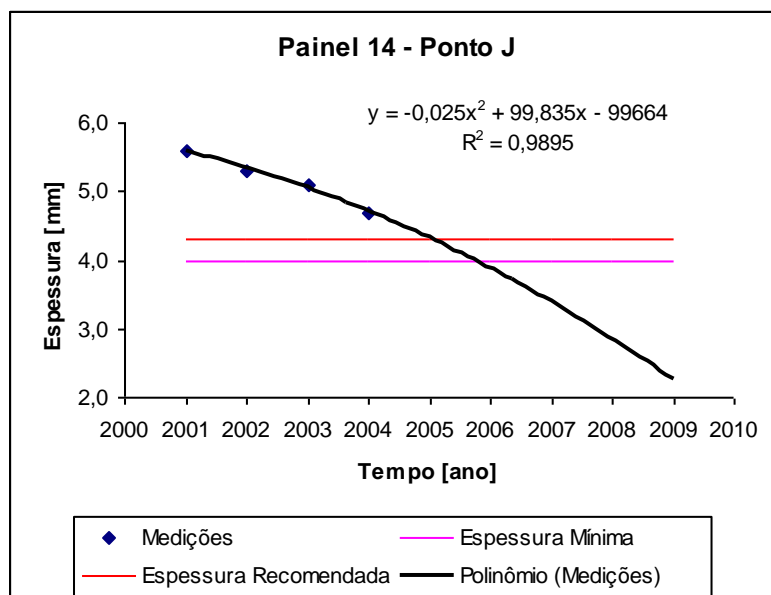


Figura 4-20 Curva de tendência do Painel 14 – Ponto J – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

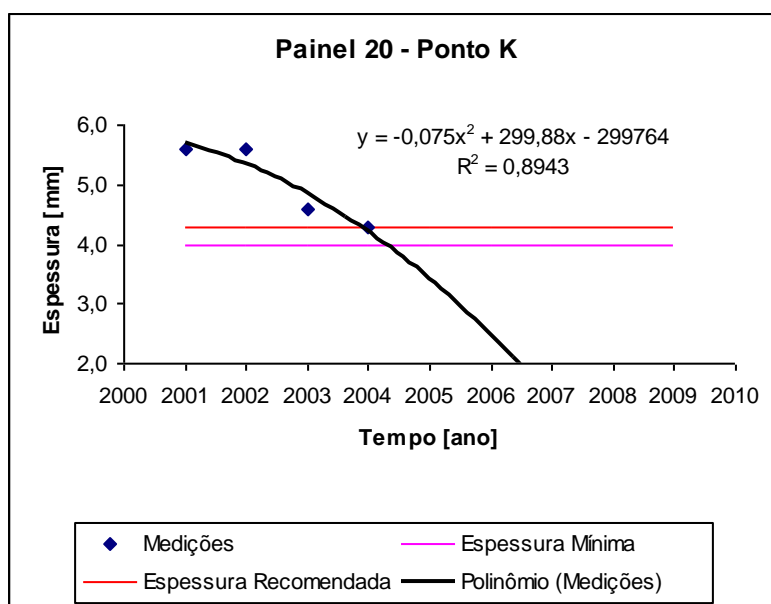


Figura 4-21 Curva de tendência do Painel 20 – Ponto K – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2004
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

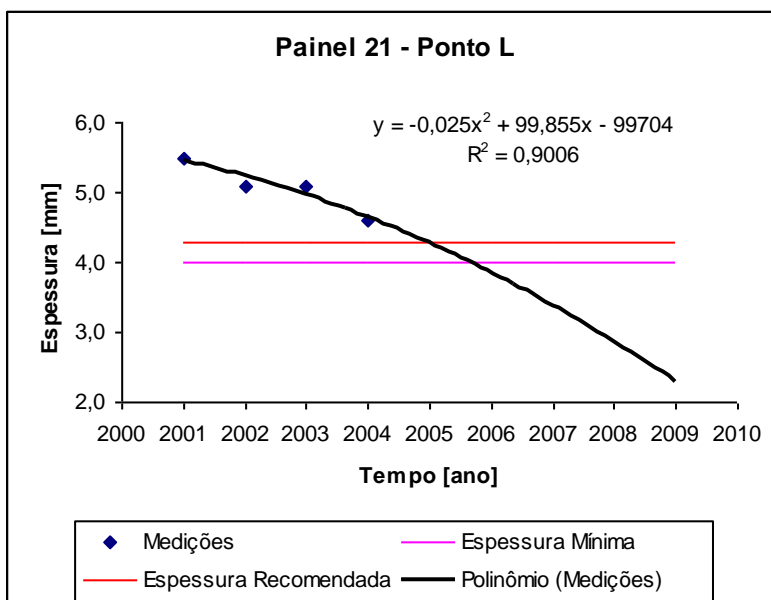


Figura 4-22 Curva de tendência do Painel 21 – Ponto L – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

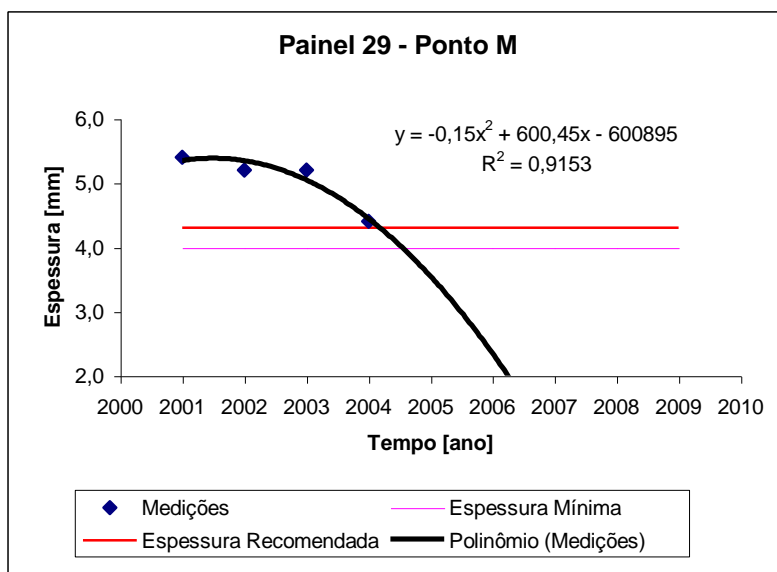


Figura 4-23 Curva de tendência do Painel 29 – Ponto M – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2004
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

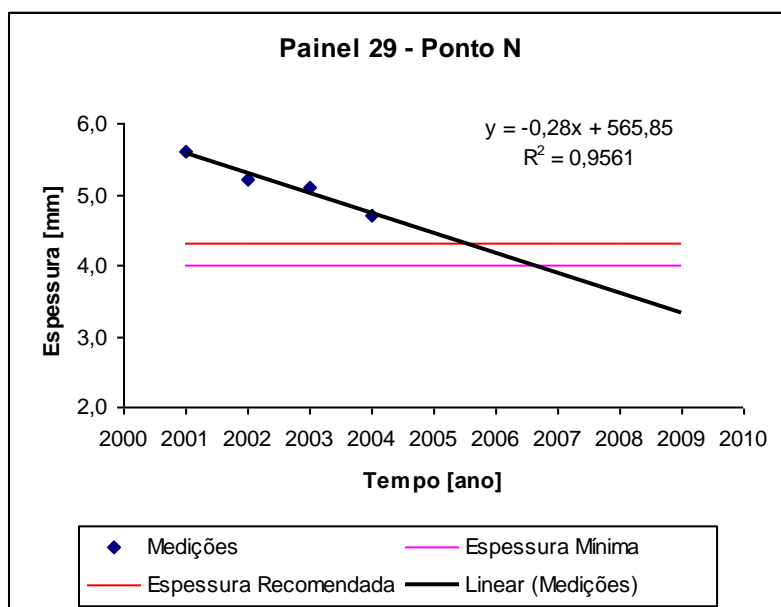


Figura 4-24 Curva de tendência do Painel 29 – Ponto N – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

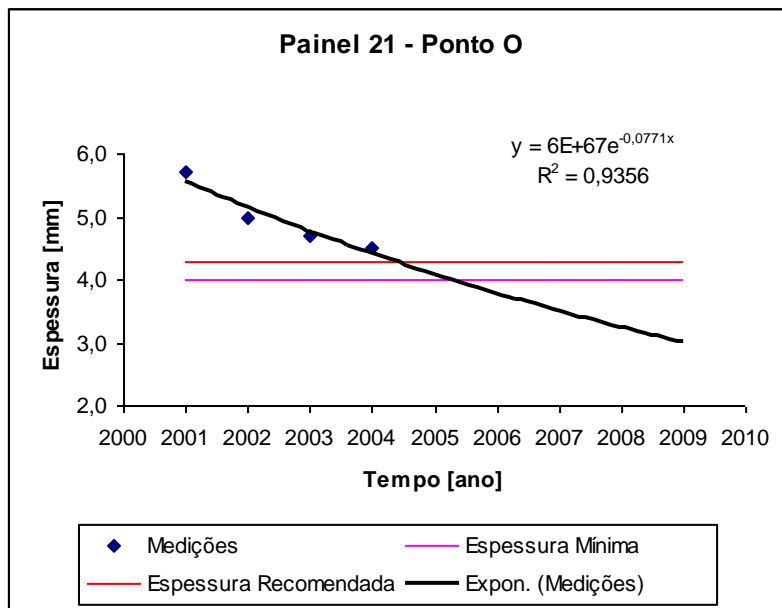


Figura 4-25 Curva de tendência do Painel 21 – Ponto O – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

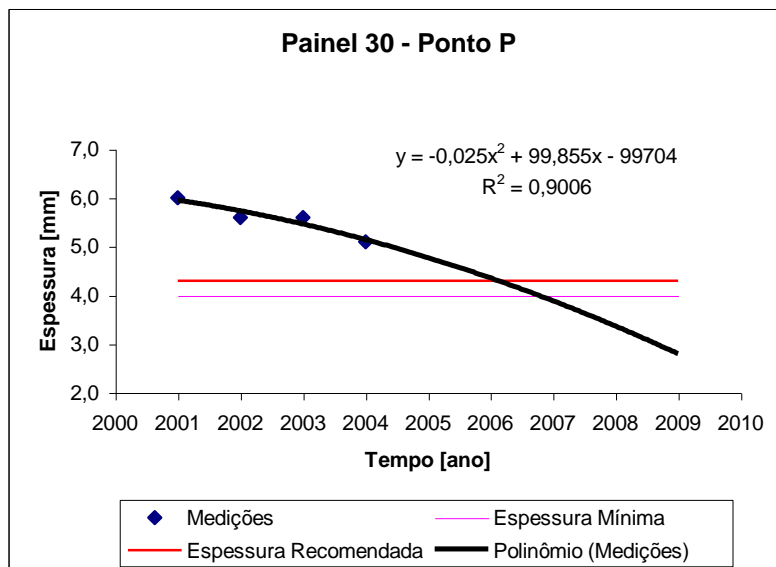


Figura 4-26 Curva de tendência do Painel 30 – Ponto P – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

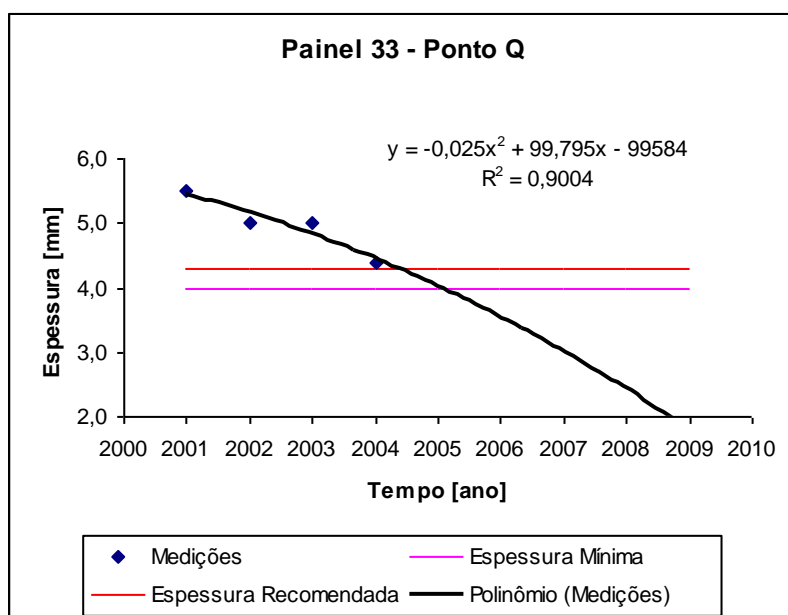


Figura 4-27 Curva de tendência do Painel 33 – Ponto Q – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

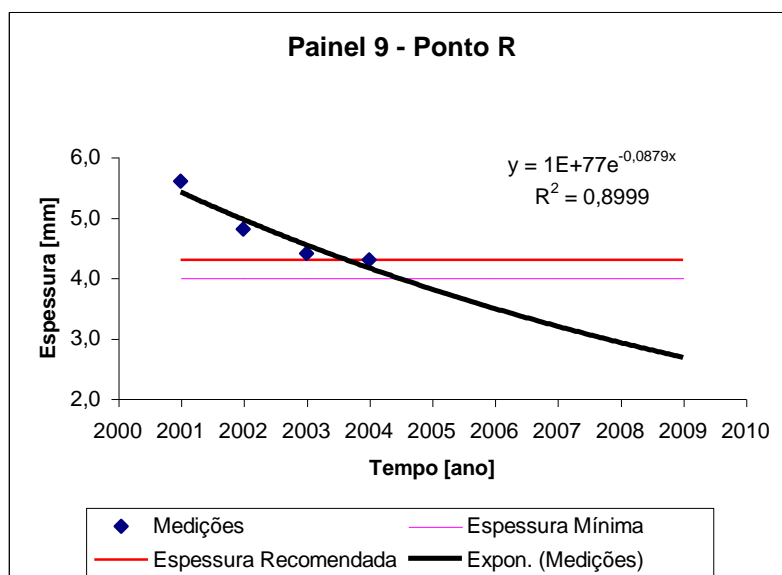


Figura 4-28 Curva de tendência do Painel 9 – Ponto R – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2004
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2003

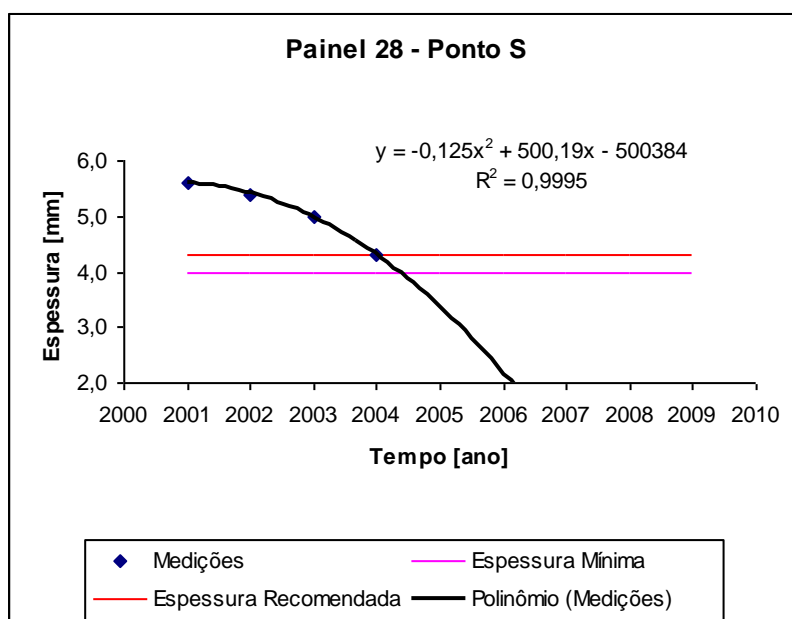


Figura 4-29 Curva de tendência do Painel 28 – Ponto S – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2004
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

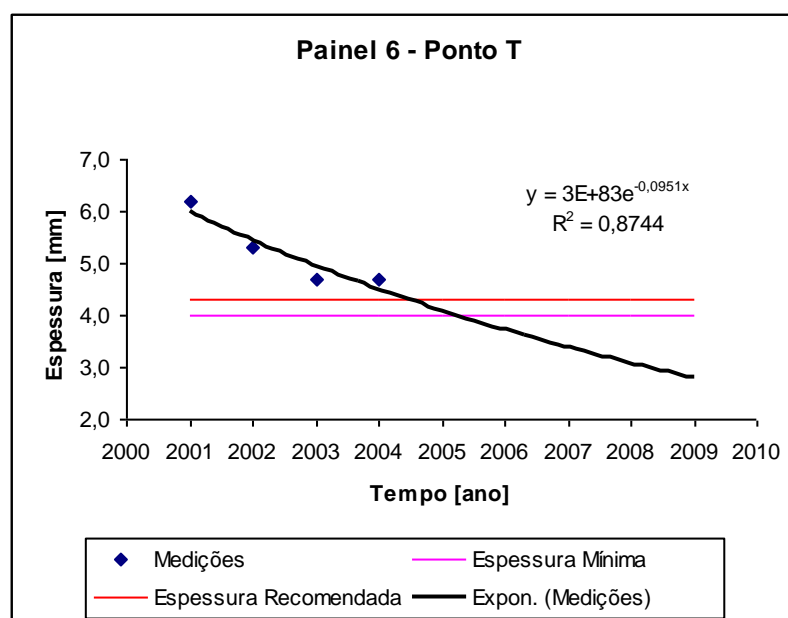


Figura 4-30 Curva de tendência do Painel 6 – Ponto T – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2004

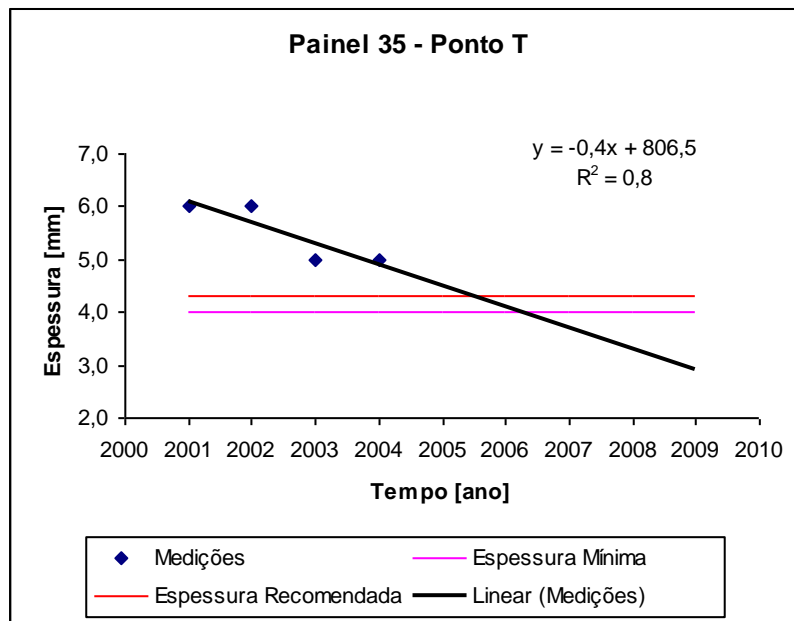
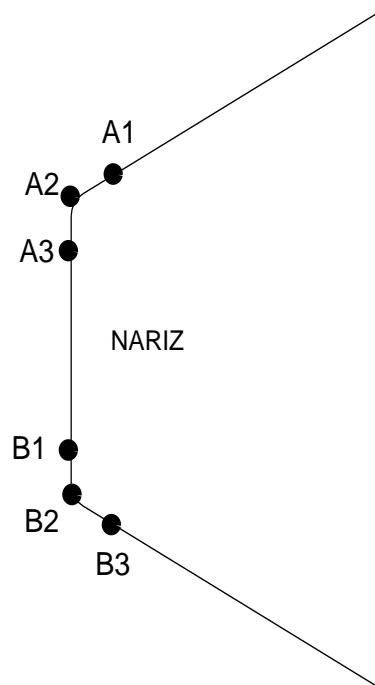


Figura 4-31 Curva de tendência do Painel 35 – Ponto T – para o Superaquecedor Terciário - Curvas

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

#### 4.1.7 HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS DO NARIZ

Desenho esquemático do Nariz identificando os pontos analisados.



• **PONTO A1**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
3	5,2	5,1	5,1	5,1
12	5,2	4,9	4,9	4,9
20	5,1	5,1	5,0	5,0
30	5,2	5,1	5,0	4,8
40	5,0	5,0	5,0	5,0
50	5,0	5,0	5,0	5,0
60	5,1	5,1	5,0	5,0
71	5,0	5,0	4,9	4,9
80	5,1	5,1	5,0	5,0
90	4,8	4,8	4,8	4,8
100	5,0	5,0	4,9	4,9
110	4,9	4,9	4,8	4,8
120	4,9	4,9	4,8	4,8
130	5,1	5,1	5,0	5,0
140	5,4	5,4	5,2	5,0
146	4,9	4,9	4,9	4,9

Tabela 4-34 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A1

• **PONTO A2**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
4	5,1	5,1	4,9	4,9
15	5,1	5,1	5,0	4,8
25	4,7	4,7	4,7	4,7
36	5,2	4,8	4,8	4,7
48	5,3	5,2	5,2	4,8
54	5,1	5,1	5,0	4,4
66	5,0	5,0	5,0	4,2

80	5,0	5,0	4,9	4,5
83	4,9	4,9	4,8	4,1
86	4,9	4,9	4,8	4,3
103	4,9	4,9	4,8	4,7
112	5,3	5,2	5,0	4,7
122	5,0	5,0	4,9	4,2
128	5,3	5,2	5,1	5,0
138	5,1	5,1	5,0	4,3
146	4,8	4,8	4,7	4,7

Tabela 4-35 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A2

• **PONTO A3**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
7	5,0	5,0	5,0	5,0
17	5,1	5,1	5,1	5,1
27	5,1	4,9	4,9	4,7
48	5,3	5,3	5,2	5,2
51	5,0	5,0	4,9	4,7
72	5,0	5,0	4,9	4,9
84	4,9	4,9	4,9	4,9
102	4,9	4,9	4,9	4,8
117	4,9	4,9	4,9	4,9
138	5,1	5,1	5,0	4,7

Tabela 4-36 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto A3

• **PONTO B1**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1	4,8	4,8	4,6	4,6
10	4,9	4,9	4,9	4,9

27	4,9	4,9	4,9	4,7
47	5,1	5,1	5,1	4,8
58	5,1	5,0	5,0	4,7
84	4,8	4,8	4,8	4,8
106	4,7	4,7	4,7	4,7
116	5,1	5,0	5,0	4,9
133	5,0	5,0	5,0	4,7
146	5,0	5,0	5,0	4,8

Tabela 4-37 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B1

• **PONTO B2**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
27	4,9	4,9	4,8	4,7
35	5,2	5,1	5,1	4,9
49	5,2	5,1	5,1	5,0
71	4,8	4,8	4,8	4,8
91	5,0	5,0	4,8	4,7
104	5,0	5,0	5,0	5,0
109	4,7	4,7	4,7	4,7
116	5,1	5,1	5,0	4,9
128	5,2	5,2	5,1	4,9
142	5,0	5,0	4,7	4,4

Tabela 4-38 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B2

• **PONTO B3**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1		4,8	4,8	4,5
5		5,3	5,2	5,0
18		5,4	5,3	5,1

19		5,4	5,3	4,7
37		5,3	5,2	4,7
45		5,4	5,3	5,2
66		5,2	5,1	4,9
94		5,2	5,1	5,1
120		4,9	4,9	4,9
130		5,2	5,2	5,2

Tabela 4-39 Histórico de medição de espessura do Nariz – Ponto B3

---

**Mat.: ASTM - A210 - A1**

---

Diâm. (mm) 63,50

---

Esp. Nom. (mm) 5,00

---

Esp. Rec. (mm) 3,30

---

Esp. Mín. (mm) 3,00

---

Tabela 4-40 Material e dimensões do Nariz

#### 4.1.7.1 Exemplos de curvas de tendência da região do Nariz utilizadas para a determinação da Matriz de Risco

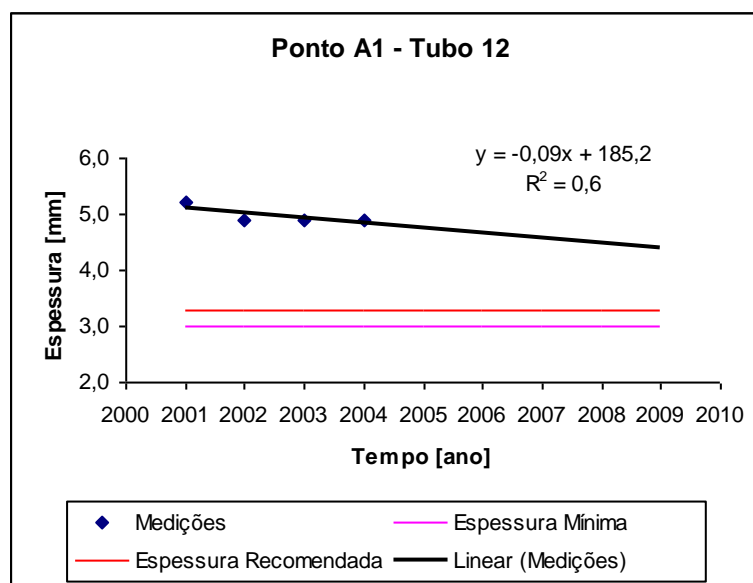


Figura 4-32 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 12 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2024
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2024

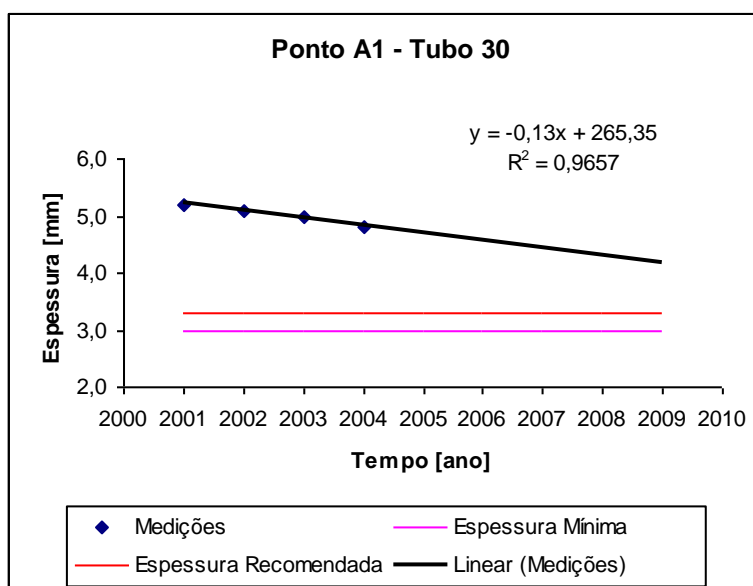


Figura 4-33 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 30 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2018
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2015

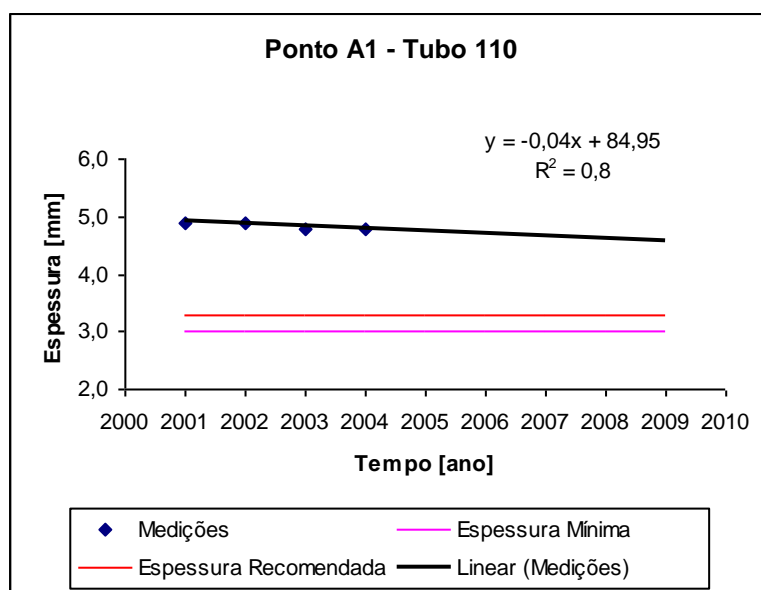


Figura 4-34 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 110 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2048
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2041

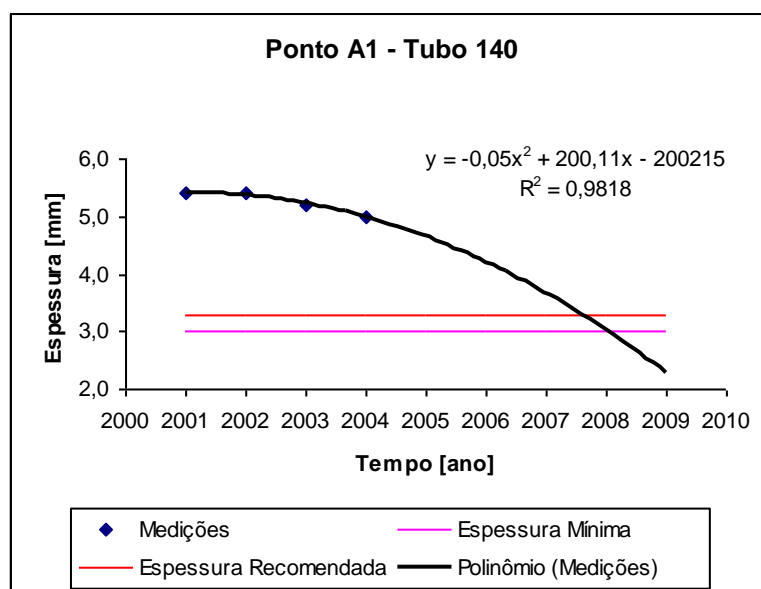


Figura 4-35 Curva de tendência do Ponto A1 – Tubo 140 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

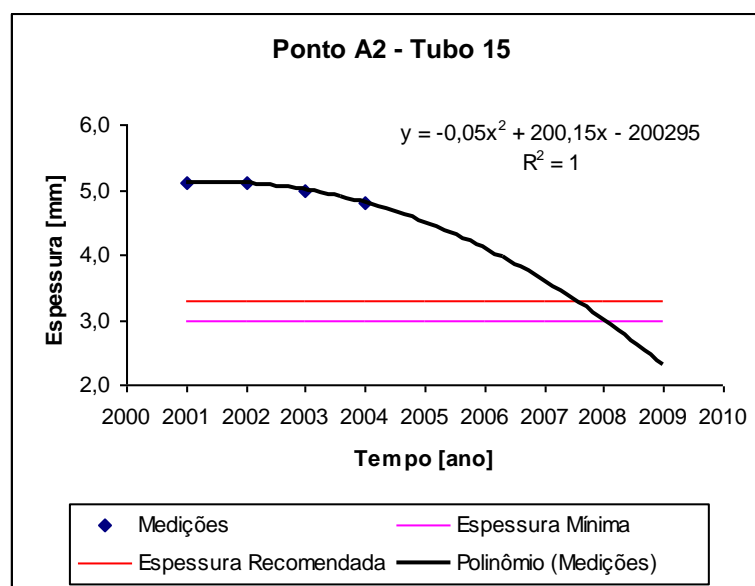


Figura 4-36 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 15 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

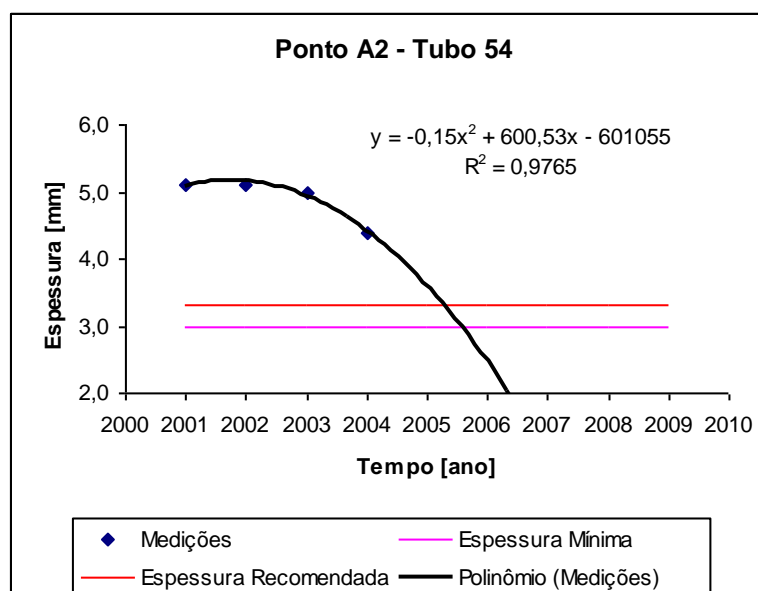


Figura 4-37 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 54 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

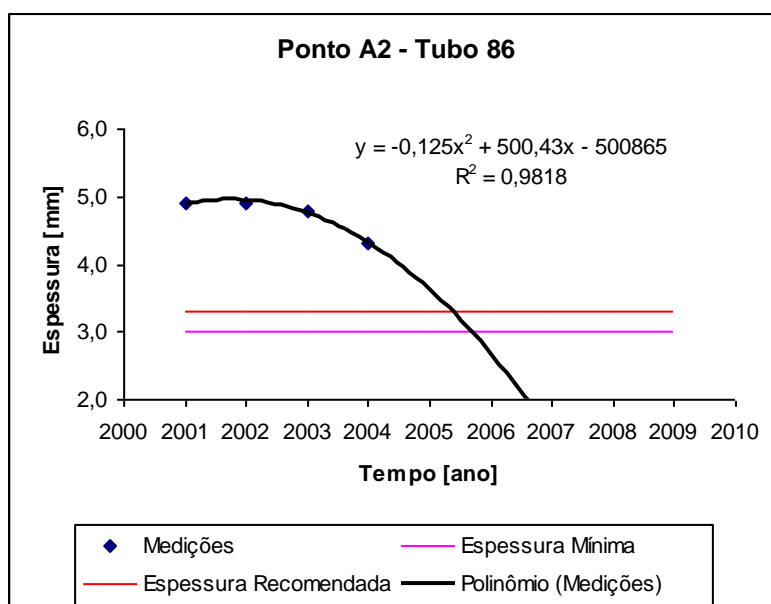


Figura 4-38 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 86 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

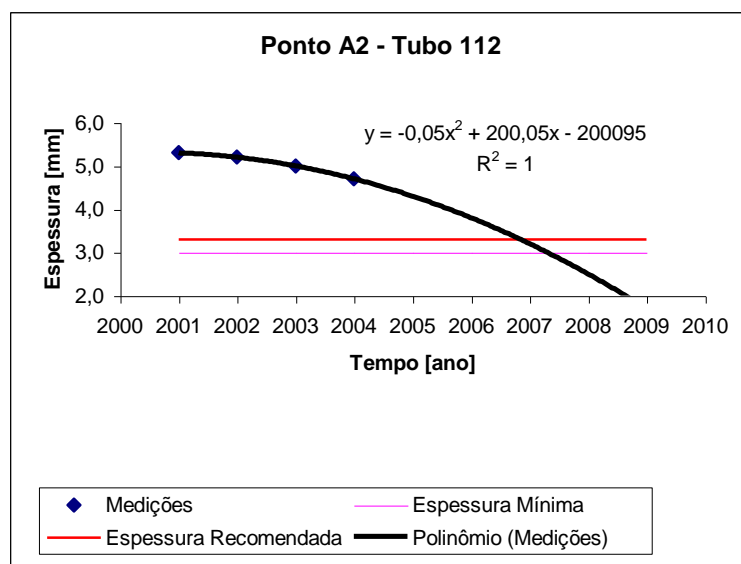


Figura 4-39 Curva de tendência do Ponto A2 – Tubo 112 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

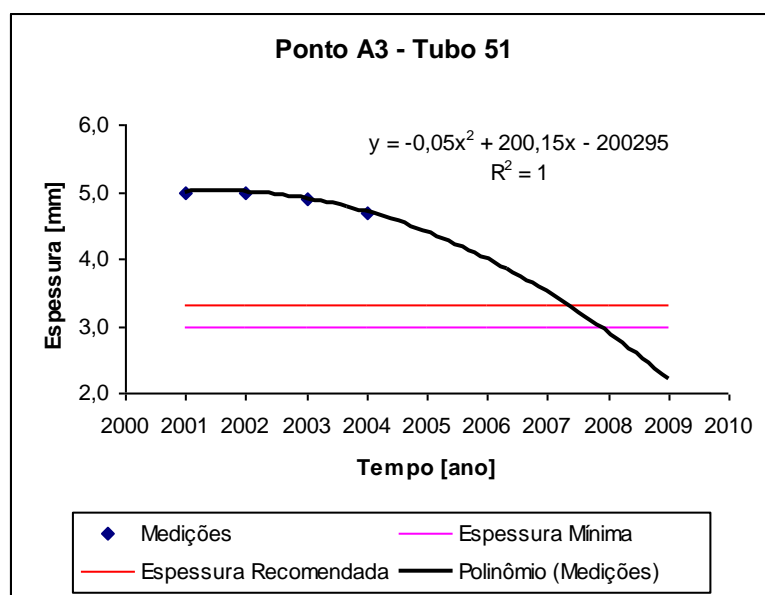


Figura 4-40 Curva de tendência do Ponto A3 – Tubo 51 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

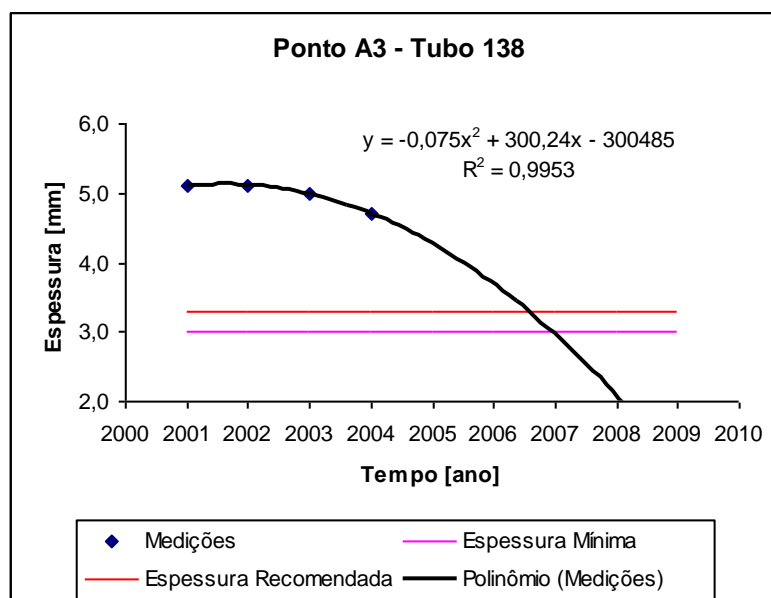


Figura 4-41 Curva de tendência do Ponto A3 – Tubo 138 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

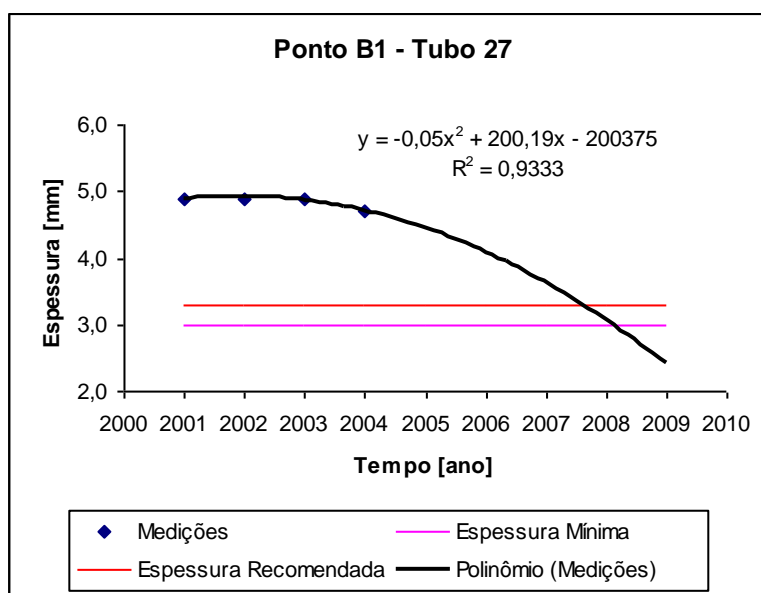


Figura 4-42 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 27 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

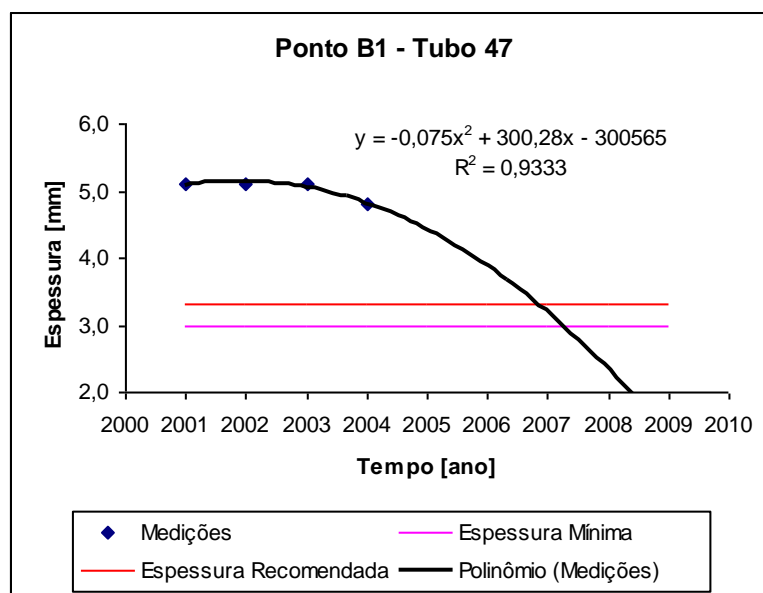


Figura 4-43 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 47 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

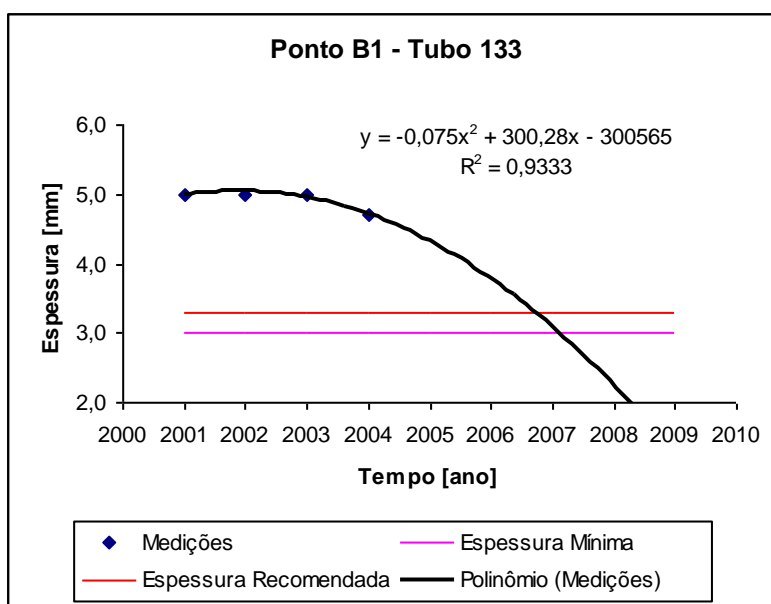


Figura 4-44 Curva de tendência do Ponto B1 – Tubo 133 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2007
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2006

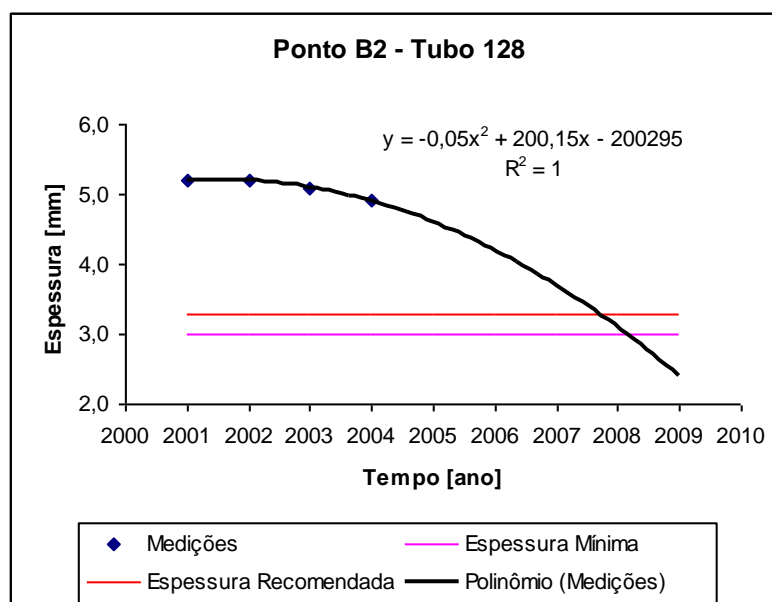


Figura 4-45 Curva de tendência do Ponto B2 – Tubo 128 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2008
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2007

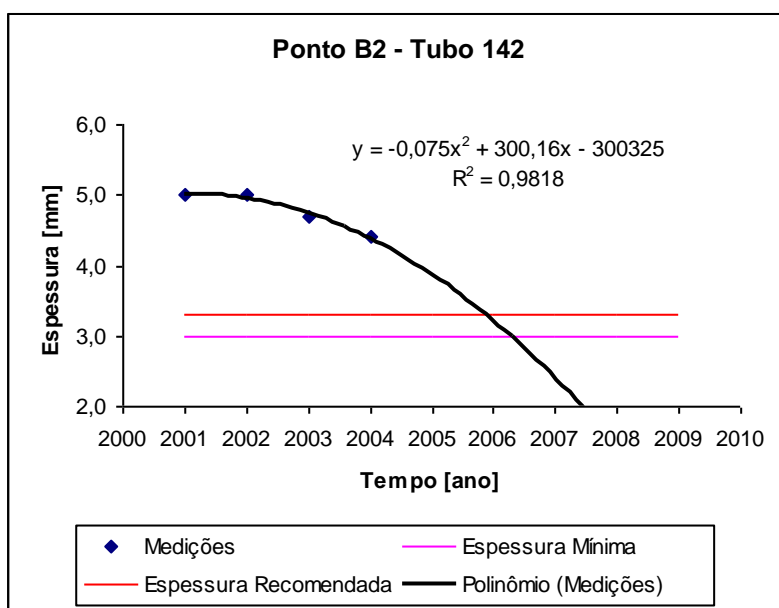


Figura 4-46 Curva de tendência do Ponto B2 – Tubo 142 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2006
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

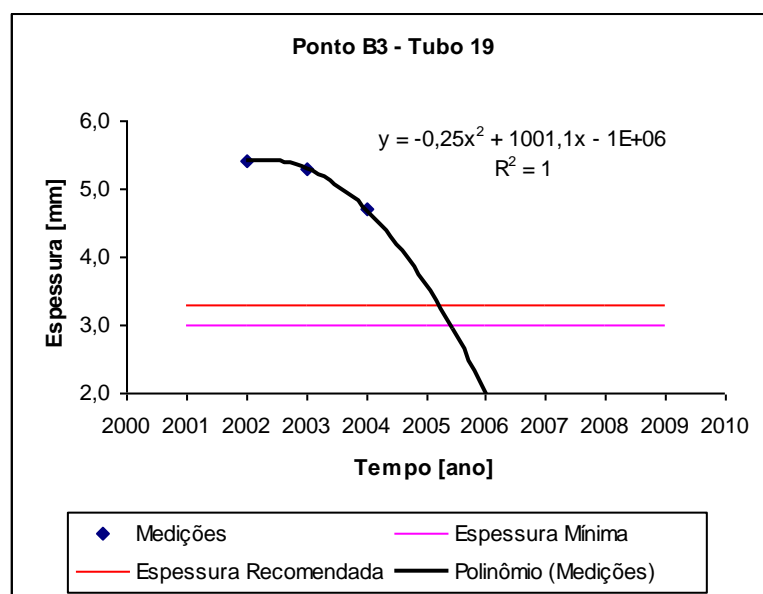


Figura 4-47 Curva de tendência do Ponto B3 – Tubo 19 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

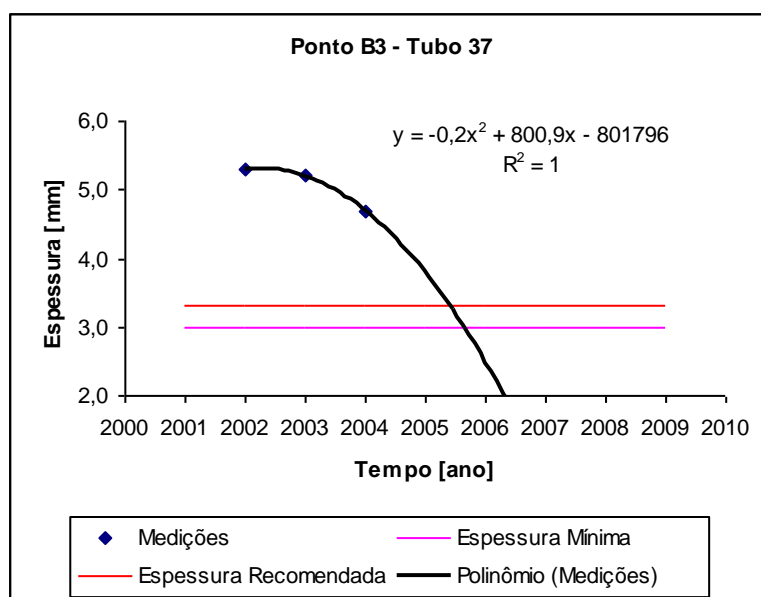
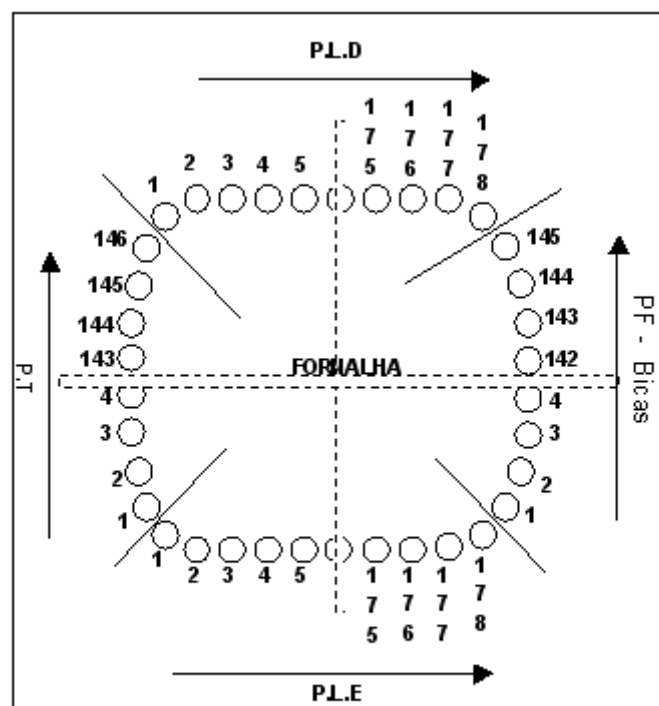


Figura 4-48 Curva de tendência do Ponto B3 – Tubo 37 – para o Nariz

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2005
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2005

#### 4.1.8 HISTÓRICO DOS PONTOS ANALISADOS ACIMA DO TETO DE SEGURANÇA (1000 mm)

Desenho esquemático e localização dos pontos analisados – 1000 mm acima do Teto de Segurança



**ATENÇÃO:** O (1º), primeiro tubo da P.F. é o 2º tubo do piso e o tubo 145 da P.F. é o penúltimo tubo do piso

• **PT**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1		5,6	5,6	5,4
65		5,4	5,4	5,4
85		5,4	5,4	5,3
110		5,6	5,6	5,1
120		5,6	5,5	5,4
135		5,4	5,3	5,1

Tabela 4-41 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PT

• **PF**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
1		5,6	5,6	5,6
90		5,4	5,4	5,4
140		5,4	5,4	5,4

Tabela 4-42 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PF

• **PLE**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
20		5,7	5,4	5,3
40		5,4	5,4	5,4
75		5,5	5,4	5,4
115		5,5	5,4	5,1
170		5,5	5,4	5,3

Tabela 4-43 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PLE

• **PLD**

Tubo	Nov01	Out02	Nov03	Out04
10		5,6	5,5	5,3
25		5,4	5,3	5,2
70		5,6	5,6	5,4
105		5,4	5,4	5,0
155		5,5	5,5	5,5
160		5,6	5,6	5,3
170		5,6	5,5	5,3

Tabela 4-44 Histórico de medição de espessura dos pontos 1000 mm acima do Teto de Segurança – PLD

**Carbono Mat.: A210 A1**

Diâm. (mm) 63,50

Esp. Nom. (mm) 5,00

Esp. Rec. (mm) 3,30

Esp. Mín. (mm) 3,00

Tabela 4-45 Material e dimensões dos pontos localizados a 1000 mm acima do Teto de Segurança

#### 4.1.8.1 Exemplos de curvas de tendência da região das curvas do superaquecedor utilizadas para a determinação da Matriz de Risco

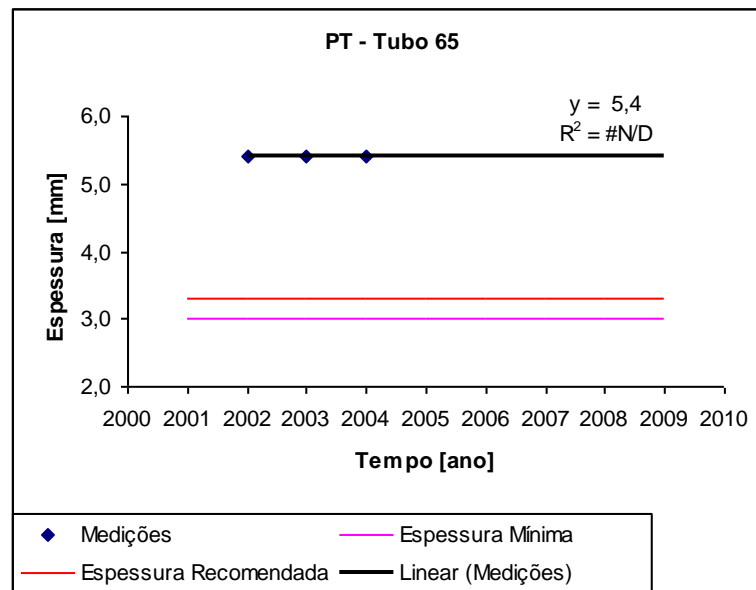


Figura 4-49 Curva de tendência do PT – Tubo 65 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	N/D
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	N/D

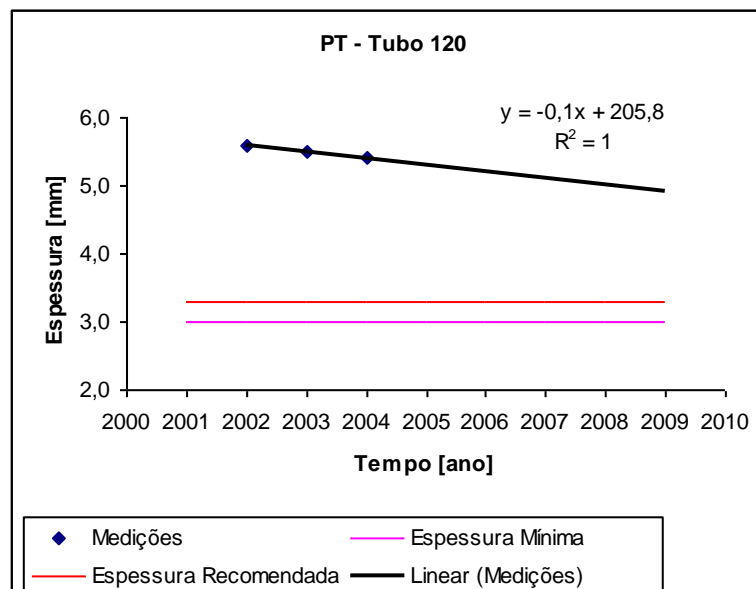


Figura 4-50 Curva de tendência do PT – Tubo 120 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2028
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2025

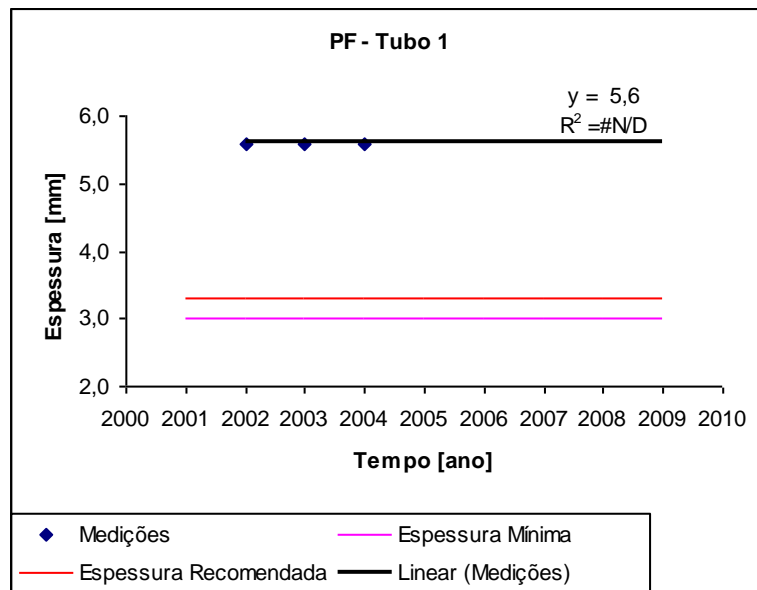


Figura 4-51 Curva de tendência do PF – Tubo 1 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	N/D
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	N/D

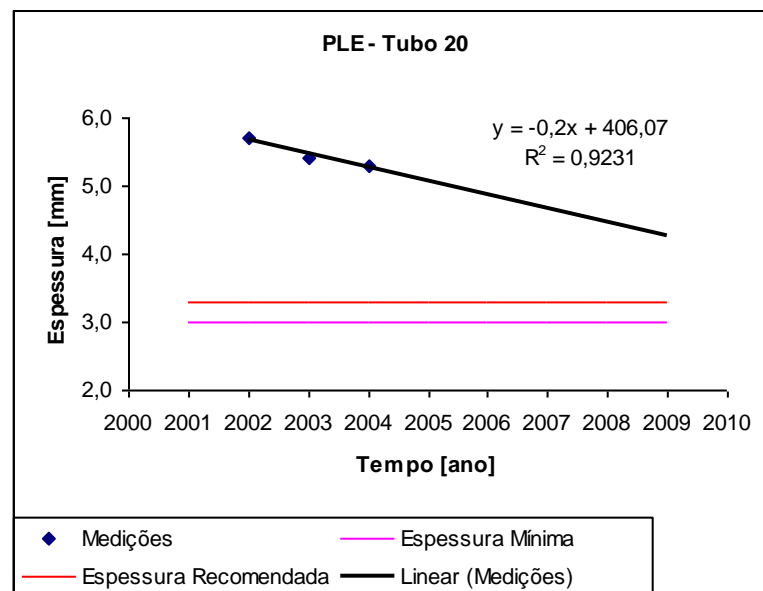


Figura 4-52 Curva de tendência do PLE – Tubo 20 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2015
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2013

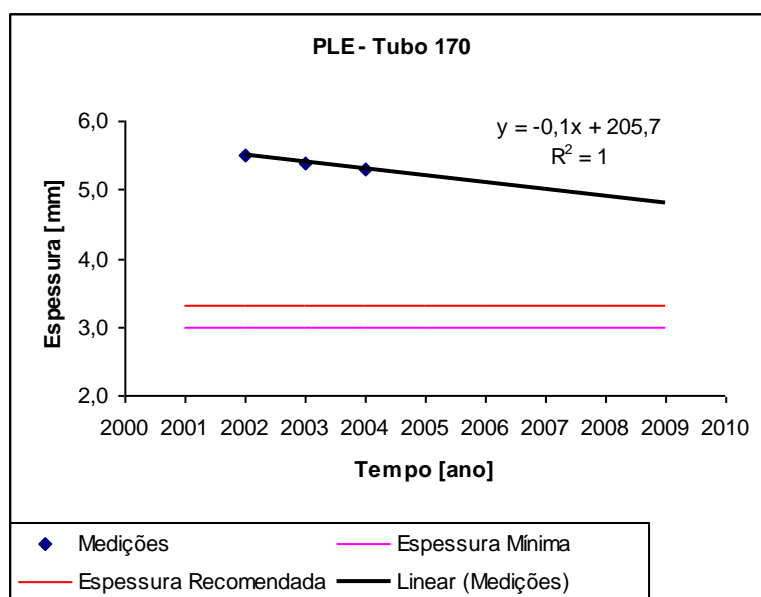


Figura 4-53 Curva de tendência do PLE – Tubo 170 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2027
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2024

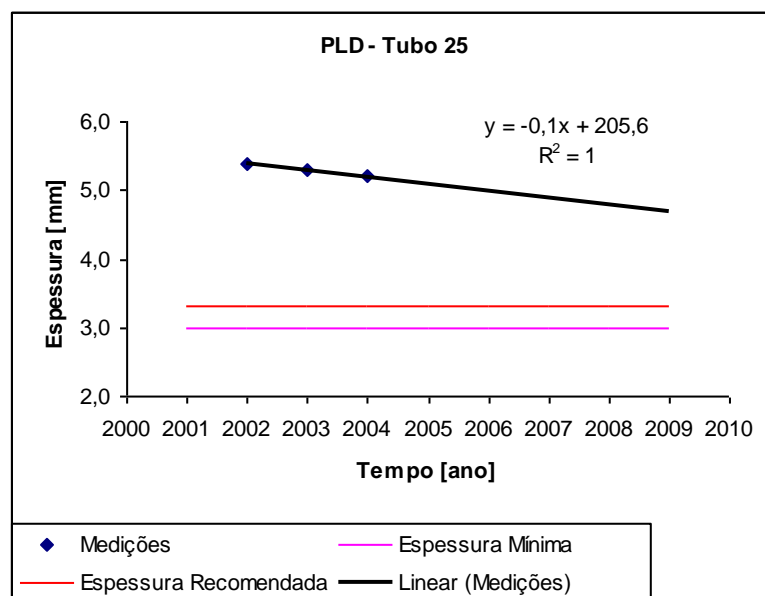


Figura 4-54 Curva de tendência do PLD – Tubo 25 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	2026
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	2023

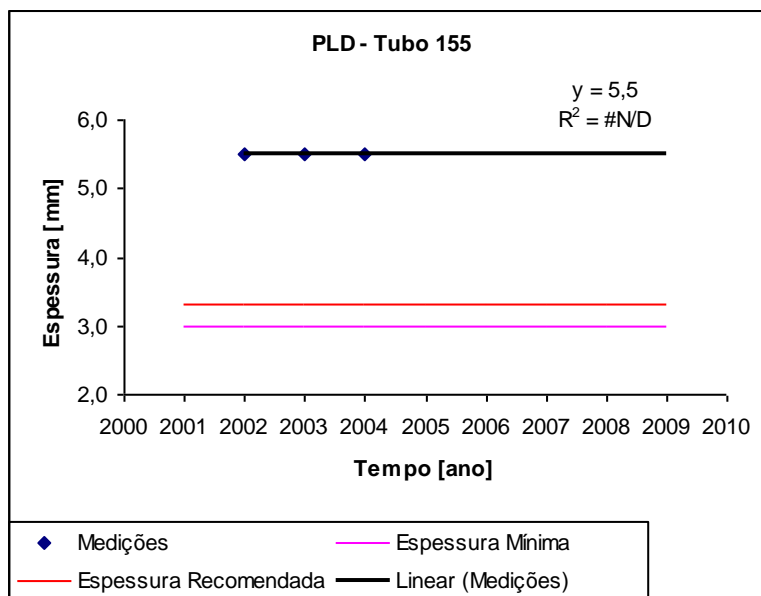


Figura 4-55 Curva de tendência do PLD – Tubo 155 – 1000 mm acima do Teto de Segurança

Instante em que será atingida a Espessura Mínima	N/D
Instante em que será atingida a Espessura Recomendada	N/D

## 4.2 Rotinas da Inspeção de Medição de Espessura (MEUS) X Tempo de Parada

Segue abaixo as regiões da caldeira de recuperação em estudo com suas referidas frequências de realização das inspeções de medição de espessura aplicadas atualmente:

<b>Rotinas da Inspeção de Medição de Espessura (MEUS) na Caldeira de Recuperação Em Estudo</b>	
Local da Inspeção	Frequências dos MEUS
Bicas de Smelt	Anual - todos os pontos
Piso - Solda de Transição	Anual - todos os pontos
Nível do Ar Primário	Anual - A cada 5 tubos
Nível do Ar Secundário	Anual - A cada 5 tubos
Nível dos Queimadores de Licor	Anual - A cada 10 tubos
Nível do Ar Terciário	Anual - A cada 10 tubos
Fornalha - região de transição composto / carbono (30mm acima e abaixo)	Anual - todos os pontos
1.000mm Acima do teto de segurança	Anual - A cada 5 tubos
Região Nariz	Anual - todos os pontos
Superaquecedor Secundário I	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Superaquecedor Primário II	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Superaquecedor Terciário	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Superaquecedor Secundário II	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Superaquecedor Primário I	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem

Front Wall Screen	Anual - Linha do Soprador de Fuligem
Generating Bank	Anual - Linha do Soprador de Fuligem
Economizador III	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Economizador II	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem
Economizador I	Anual - Todas as Curvas e linha do Soprador de Fuligem

Tabela 4-46 Rotinas da Inspeção de Espessura na Caldeira de Recuperação em Estudo

Através das informações fornecidas por especialistas de inspeção em Caldeiras de Recuperação, o tempo para realização das medições de espessuras durante as paradas gerais é de 72 h.

### 4.3 Análise Crítica

Com base nos históricos de inspeção de medição de espessura analisados e nas recomendações do Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação, observa-se que existem regiões da Caldeira de Recuperação em estudo que não são críticas, tais como regiões altas da fornalha e que a rotina de inspeção nessas regiões está sendo realizada com frequência elevada, fazendo com que ocorra um aumento no tempo de parada do equipamento, maiores custos de manutenção, etc.

O prolongamento do tempo de parada do equipamento devido a irracionalização dos recursos é um item de primordial importância, pois sendo a caldeira de recuperação em estudo um equipamento ligado diretamente ao processo, o aumento do seu tempo de parada implica diretamente em custos de produção, custos que fazem desse estudo uma peça de fundamental importância para a otimização das inspeções de medição de espessura e conseqüente aumento de disponibilidade do equipamento.

#### **4.4 Proposta do novo plano de inspeção**

O novo plano de inspeção proposto passa a ser baseado na metodologia de Inspeção Baseada em Risco.

Este plano está embasado na criticidade de cada região – otimizando a distribuição dos recursos. Isso significa não só uma maior atenção às regiões mais críticas, como também a redução no número de inspeções desnecessárias.

A criticidade de cada região localizada na caldeira de recuperação, como já citado, é obtida através dos históricos de inspeções de medição de espessura, fazendo-se uso de curvas de tendência, seguindo sempre a recomendação do Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil.

A Inspeção Baseada em Riscos não só otimiza a atividade de inspeção e manutenção, como também aumenta a confiabilidade, devido à sistematização que essa metodologia traz.

**Plano Proposto para Rotinas da Inspeção de Medição de Espessura (MEUS)  
na Caldeira de Recuperação em Estudo**

Local da Inspeção	Frequências das MEUS		
	1º Ano	2º Ano	3º Ano
Bicas de Smelt	Todos os Pontos		
Piso - Solda de Transição	A cada 5 tubos		A cada 5 tubos
Nível do Ar Primário		A cada 5 tubos	
Nível do Ar Secundário		A cada 5 tubos	
Nível dos Queimadores de Licor		A cada 5 tubos	
Nível do Ar Terciário		A cada 5 tubos	
Fornalha - região de transição composto / carbono	A cada 5 tubos	Todos os Pontos	A cada 5 tubos
1.000mm Acima do teto de segurança	A cada 5 tubos		
Região Nariz	Todos os Pontos		
Superaquecedor Secundário I	Curvas e linha do SF		
Superaquecedor Primário II	Curvas e linha do SF		
Superaquecedor Terciário	Curvas e linha do SF		
Superaquecedor Secundário II	Curvas e linha do SF		
Superaquecedor Primário I	Curvas e linha do SF		
Front Wall Screen			Linha do SF
Generating Bank		Linha do SF	
Economizador III	Curvas e linha do SF		
Economizador II		Curvas e linha do SF	
Economizador I			Curvas e linha do SF

Tabela 4-47 Plano Proposto para Rotinas de Inspeção de Medição de Espessura (MEUS)

Com base na grande experiência Profissional de especialistas que trabalham diretamente ligas ao processo de inspeção em caldeiras de recuperação, estima-se que o

novo plano de inspeção de medição de espessura (MEUS) será realizado em um tempo de 52 h para cada ano.

## **5 CONCLUSÃO**

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permitiu algumas conclusões importantes conforme descrito a seguir:

O Plano otimizado de inspeção de medição de espessura através da Metodologia Baseada em Risco proporciona uma redução acentuada do tempo de realização das inspeções. Observa-se que há uma redução de 20h no período gasto para a realização das inspeções.

Sabe-se que a taxa de produção de celulose da fábrica em estudo é de 80ton/h e levando-se em consideração que o custo por tonelada de celulose é de US\$ 480,00, conclui-se que com a redução do tempo de inspeção e portanto o de parada da fábrica, haverá um ganho de produção de US\$ 768.000,00.

Redução do risco de acidentes devido a um menor número de pessoas necessárias para realização de preparativos que antecedem as inspeções (montagem de andaime, limpeza de superfícies, etc.) e menor número de pessoas necessárias para a realização das inspeções. Conseqüentemente serão reduzidos os custos de manutenção para realização das inspeções de medição de espessura.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O estudo realizado para otimização das inspeções de medição de espessura através da Metodologia Baseada em Risco pode ser estendido para outros métodos de ensaios não destrutivos, observando sempre as recomendações do Comitê de Caldeiras de Recuperação do Brasil e os históricos de inspeção em estudo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos: guia para alunos, professores e pesquisadores da UFES.** 2. ed. Vitória, 1997.
- [2] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Guia para normalização de referências bibliográficas: NBR 6023.** 2. ed. Vitória, 1997.
- [3] SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. **Normas Regulamentadoras. Lei 6514 de 22 de dezembro de 1977.** 38. ed. Atlas, São Paulo, 1997.
- [4] MINUTA DE RECOMENDAÇÃO DO COMITÊ DE SEGURANÇA EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO DO BRASIL. **Guia para inspeção periódica de caldeiras de recuperação.** Revisão 2003/2004.
- [5] MARTINELLI Jr., Luiz Carlos. Máquinas Térmicas I – **Noções sobre geradores de vapor.** Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, n.º 8, Editora Unijuí, Ijuí, RS, 1998.
- [6] RELATÓRIO DE ATIVIDADES. **Programa de Indução.** Incel, 2001.
- [7] LEITE, Paulo G.P. **Curso de Ensaio Não Destrutivos.** Associação Brasileira de Metais-ABM , 8. ed. 1966 .