



UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Guaratinguetá

VITOR NAKAYAMA YAZAKI

ESTUDO DE FALHAS POR FADIGA EM CALDEIRAS

Guaratinguetá
2011

VITOR NAKAYAMA YAZAKI

ESTUDO DE FALHAS POR FADIGA EM CALDEIRAS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2011

| | |
|------|--|
| Y35e | Yazaki, Vitor Nakayama Estudo de falhas por fadiga em caldeiras / Vitor Nakayama Yazaki – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 50 f : il. Bibliografia: f. 48-50 |
| | Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva |
| | 1. Fadiga 2. Caldeiras I. Título |
| | CDU 620.178.3 |



UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Guaratinguetá

ESTUDO DE FALHAS POR FADIGA
EM CALDEIRAS

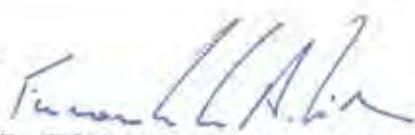
VITOR NAKAYAMA YAZAKI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP-FEG


ENG.º WALTER LUIZ MEDEIROS TUPINAMBÁ
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

à minha família e a todos aqueles que me apoiaram para que este trabalho pudesse ser realizado.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo suporte nesses cinco anos dedicados exclusivamente aos estudos e por acreditarem no meu potencial,

ao professor Dr. Fernando de Azevedo Silva pela compreensão, paciência e, principalmente, pelo incentivo como orientador, que não mediu esforços em indicar quais caminhos seguir para que este trabalho pudesse ser concluído,

ao professor Dr. Marcos Valério Ribeiro pelos conselhos e ajuda na qualificação e apresentação final deste trabalho,

ao Eng.º Walter Luiz Medeiros Tupinambá pela disposição em ajudar na apresentação do trabalho,

à CBC S.A., em particular na pessoa do engenheiro Ronaldo Flávio Faria, pela paciência e determinação em ensinar-me todos os mecanismos relacionados a uma caldeira de recuperação e por ter contribuído intensamente para a realização deste trabalho com dados e materiais didáticos,

à Potencial Engenharia S.A., em particular nas pessoas de Walter de Mattos e Rodrigo Braga, pelo incentivo e apoio para a elaboração deste trabalho,

a todos os amigos e companheiros de turma, pela ajuda e por acreditarem na realização deste trabalho. Pelas quartas-feiras agradáveis em diversos rodízios seja em São Paulo ou em Guaratinguetá,

aos amigos e colegas da república Etflicos, pelo apoio e suporte nos tempos mais difíceis e pelos momentos de descontração nas horas livres,

e a todos que de maneira direta ou indireta, me ajudaram a dar esse passo importante na minha vida.

“As horas mais tristes da vida são aquelas em que duvidamos de nós próprios.”

Henry Ford

YAZAKI, V.N. **Estudo de falhas por fadiga em caldeiras**. Trabalho de Graduação de Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Nos últimos anos, o aumento de demanda por energia ocasionou estudos para aumentar a quantidade de energia elétrica produzida. Devido a este fato, cada vez mais as caldeiras estão se tornando importantes fontes de geração de energia elétrica. Para elevar a eficiência da energia gerada nas caldeiras, é necessário elevar a pressão e temperatura do vapor a valores anteriormente inimagináveis. O uso de materiais mais resistentes e práticas de manutenção e operação mais apropriadas tornaram isso possível. O objetivo desse trabalho é verificar os principais tipos de falha em uma caldeira de recuperação química, em particular devido à fadiga no superaquecedor, por tratar-se de um componente submetido a altas temperaturas e por isso sujeito às mais diferentes falhas. Desta maneira este estudo visa diminuir a incidência de paradas de manutenção não programadas, devido a falhas no superaquecedor, aumentando o tempo de operação em condições adequadas. No modelamento efetuado neste estudo, a falha não ocorreu, pois foram considerados apenas os esforços mecânicos. Em condições normais, esforços mecânicos em conjunto com esforços térmicos podem provocar trincas nos tubos devido a tensões cíclicas, falhando por fadiga.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Caldeiras. Falhas. Caldeira de recuperação. Superaquecedor.

YAZAKI, V.N. **Study of fatigue failure in boilers.** Undergraduate Work Mechanical Engineering - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

In recent years, increasing demand for energy has led to studies to increase the amount of electricity produced. Due to this fact, more and more boilers are becoming important sources of electricity generation. To raise the efficiency of energy generated in the boilers is necessary to raise the steam pressure and temperature to values previously unimaginable. The use of more resistant materials and maintenance practices and most appropriate operation made it possible. The objective of this study is to test the main types of failure in a chemical recovery boiler, in particular due to fatigue in the superheater, because it is a component subjected to high temperatures and thus more subject to different failures. In this manner this study aims to reduce the incidence of unscheduled maintenance shutdowns, increasing the operation time under appropriate conditions. Modeling performed in this study, the failure did not occur, because we considered only the mechanical stress. Under normal conditions, mechanical stress in combination with thermal stresses can cause cracks in the tubes due to cyclical stresses, leading to fatigue failure.

KEYWORDS: Fatigue. Boilers. Failures. Recovery boiler. Superheater.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Caldeira flamotubular | 21 |
| Figura 2 – Caldeira aquotubular | 22 |
| Figura 3 - Caldeira de recuperação química completa | 24 |
| Figura 4 – Caldeiras pela idade | 25 |
| Figura 5 – Corrosão localizada no topo de um tubo de nariz | 32 |
| Figura 6 – Superaquecimento de longo prazo devido à fluência | 33 |
| Figura 7 – Superaquecimento de curto prazo | 34 |
| Figura 8 – Ruptura violenta, causada pelo superaquecimento de curto prazo | 35 |
| Figura 9 – Detalhe do espaçador deslizante | 36 |
| Figura 10 – Falhas em espaçadores | 37 |
| Figura 11 – Correção de solda para minimizar a concentração de tensão | 37 |
| Figura 12 – Tubos do superaquecedor | 39 |
| Figura 13 –Partes fixas | 40 |
| Figura 14 – Detalhe da malha gerada | 40 |
| Figura 15 – Pressão aplicada nos tubos | 41 |
| Figura 16 – Tensão equivalente de von Mises | 42 |
| Figura 17 – Fator de segurança | 42 |
| Figura 18 – Falha por fadiga | 44 |
| Figura 19 – Tubo seccionado para análise | 44 |
| Figura 20 – Análise da micrografia do material | 45 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Falhas mais comuns nos componentes da caldeira | 30 |
|---|----|

LISTAS DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Peso dos materiais..... | 20 |
| Tabela 2 – Quantidade de materiais | 20 |
| Tabela 3 – Relação de caldeiras de recuperação (CR) existentes no Brasil | 26 |
| Tabela 4 – Principais materiais utilizados no SH | 31 |
| Tabela 5 – Características da CR | 38 |
| Tabela 6 – Tensão de ruptura e de escoamento do aço ASTM A210 | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABENDI | - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção |
| ABTCP | - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel |
| ASME | - American Society of Mechanical Engineers |
| ASTM | - American Society for Testing and Materials |
| CBC S.A. | - Companhia Brasileira de Caldeiras |
| CR | - Caldeira de Recuperação |
| CSCRB | - Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil |
| END | - Ensaios Não Destrutivos |
| LAPEC | - Laboratório de Pesquisa em Corrosão |
| NR-13 | - Norma Regulamentadora nº 13 sobre Caldeiras e Vasos de Pressão |
| PMTA | - Pressão Máxima de Trabalho Admissível |
| REFAP | - Refinaria Alberto Pasqualini |
| SH | - Superaquecedor (Superheater) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|--|
| in | - polegadas |
| kgf/cm ² g | - quilograma força por centímetro quadrado |
| m | - metros |
| m ² | - metros quadrados |
| m ³ | - metros cúbicos |
| mm | - milímetros |
| Pa | - Pascal |
| t | - tonelada |
| t/h | - tonelada por hora |
| tssd | - toneladas de sólidos secos por dia |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Proposição | 14 |
| 1.2 | Considerações Gerais | 14 |
| 1.3 | Objetivos Específicos | 15 |
| 1.4 | Delineamento do trabalho | 15 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 17 |
| 2.1 | Fadiga | 17 |
| 2.1.1 | Fadiga Mecânica | 18 |
| 2.1.2 | Fadiga Térmica | 18 |
| 2.1.3 | Fadiga sob corrosão | 18 |
| 2.2 | Caldeiras | 18 |
| 2.2.1 | Caldeiras flamotubulares | 20 |
| 2.2.2 | Caldeiras aquotubulares | 21 |
| 2.2.2.1 | Principais componentes | 22 |
| 2.3 | Caldeira de recuperação química | 23 |
| 2.3.1 | Funcionamento da caldeira de recuperação química | 27 |
| 3 | PROPOSIÇÃO | 29 |
| 3.1 | Análise de falhas | 29 |
| 3.2 | Corrosão no superaquecedor | 31 |
| 3.3 | Superaquecimento de longo prazo | 33 |
| 3.4 | Superaquecimento de curto prazo | 34 |
| 3.5 | Fadiga no superaquecedor | 35 |
| 4 | METODOLOGIA | 38 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 6 | CONCLUSÃO | 47 |
| 6.1 | Recomendações para trabalhos futuros | 47 |
| | REFERÊNCIAS | 48 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Proposição

O trabalho realizado sobre falhas por fadiga em caldeiras deve-se ao fato da importância deste componente para unidades industriais, seja para geração de energia elétrica, ou para a geração de vapor para processos industriais, etc. Paradas de manutenção programadas são realizadas todos os anos para evitar falhas de todos os tipos em caldeiras, porém as paradas não programadas são muito prejudiciais às empresas, pois a produção é interrompida e consequentemente há uma perda substancial de origem financeira. Devido ao fato de falhas por fadiga em caldeiras na maioria das vezes virem acompanhadas por outros tipos de falhas, como corrosão, fluência, etc., uma análise de falhas será realizada, com enfoque no superaquecedor (SH).

“Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.” (NR-13, 1994, p.1).

A complexidade de uma caldeira, devido a seu porte, faz com que um estudo do seu todo seja muito difícil. É muito mais prático e recomendado analisar as falhas nos seus componentes um a um para, assim, realizar uma melhor investigação do tipo de falha e das possíveis soluções para o problema.

Neste trabalho foi realizado um estudo em caldeiras de recuperação química de fábricas de papel e celulose e foi analisada a fadiga em elementos dos superaquecedores, devido a esforços mecânicos. Uma análise no software *Ansys Workbench* foi realizada para demonstrar a variação da tensão nos tubos analisados.

1.2 Considerações Gerais

A importância deste estudo reflete-se na quantidade de dissertações relacionadas com este tema.

Winck Junior (2009), em sua dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia, avaliou os danos por fluência no superaquecedor da Refinaria Alberto Pasqualini

(REFAP). Dentre os resultados obtidos, foi possível estimar a vida remanescente do superaquecedor.

Rubem Manoel (2009), em sua tese para obtenção do título de doutor em engenharia, avaliou camadas de óxidos nos tubos de superaquecedores de caldeiras aquotubulares por ultra-som. A medição da espessura de camadas de óxidos é importante para avaliar a integridade dos tubos de caldeiras. Porém esta técnica está sujeita a erros de medição da espessura.

Carreiro (2009), em sua dissertação de mestrado, estudou sobre o licor negro e sua importância nas fábricas de papel e celulose para geração de energia elétrica e recuperação de compostos químicos.

1.3 Objetivos Específicos

Este trabalho tem por objetivo investigar os tipos mais comuns e frequentes de falhas por fadiga em componentes mecânicos de uma caldeira de recuperação química, além de elaborar possíveis soluções para minimizar a frequência dessas falhas. A investigação de falhas é uma ferramenta indispensável para evolução de projetos e processos de fabricação. Identificar as falhas é o passo fundamental para evitar novas ocorrências e possíveis prejuízos em paradas de manutenção não programadas.

1.4 Delineamento do trabalho

O Capítulo 1 apresenta o tema e os estudos a serem efetuados neste trabalho, além dos objetivos e considerações de outros autores a respeito deste assunto.

O Capítulo 2 refere-se à revisão da literatura. Neste capítulo, são abordados temas como fadiga e caldeiras. Por ser um tema bem abordado durante o curso de engenharia, a fadiga foi explicada brevemente, e o foco do capítulo foi sobre caldeiras de recuperação química utilizadas em fábricas de papel e celulose. Seus principais componentes e funcionamento foram explicados. Uma breve explicação sobre a produção do papel e da celulose também se encontra neste capítulo, pois é deste processo que o licor negro (combustível para a caldeira de recuperação química) é obtido.

O Capítulo 3 é destinado a análises de falhas nas caldeiras. A fadiga e a corrosão apresentam-se como os principais causadores de falhas neste equipamento. Uma análise nos superaquecedores mostra as principais partes suscetíveis a romper devido aos esforços encontrados neste componente.

O Capítulo 4 é sobre o uso do software *Ansys Workbench*. Ele foi utilizado para o modelamento de uma parte da tubulação do superaquecedor, que em outro caso falhou por fadiga.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos dados obtidos no *Ansys* e procedimentos para inspeção das caldeiras de recuperação.

No Capítulo 6 são feitas as conclusões deste trabalho, e recomendações para próximos estudos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fadiga

De acordo com pesquisas, estudos e conhecimento de diversos autores (EDISON DA ROSA, 2002), a falha mais comum em componentes mecânicos é a falha por fadiga. Se o componente mecânico é submetido a uma carga que varia ciclicamente com o tempo, ele poderá sofrer uma falha por fadiga. A fadiga ocorre quando o material é submetido a uma carga e descarga repetitiva. Se essas cargas forem acima de um certo limiar, algumas fissuras (trincas) microscópicas começam a se formar na superfície, causadas por tensões e deformações em regiões críticas (NORTON, 2004). A geometria do material afeta significativamente a vida de fadiga, por exemplo, cantos afiados ou furos quadrados levam a elevada tensão local que é onde as trincas por fadiga podem se iniciar. Peças de maiores dimensões têm uma maior superfície e, portanto, estão mais propensas a desenvolverem defeitos superficiais que servirão como pontos de possível nucleação de fissuras de fadiga.

Segundo Edison da Rosa (2002), atualmente é possível prever a vida de um componente sujeito à fadiga, dentro de uma faixa pequena, mesmo para solicitações aleatórias. Em uma solicitação dinâmica a falha inicia-se na forma de pequenas trincas de fadiga e quando o material é submetido à sobrecarga, ocorre a ruptura total do componente de forma repentina, inesperada. Essas pequenas trincas sofrem a influência do tamanho dos grãos, composição química, segregações no material, carregamentos cíclicos, inclusões e processos térmicos.

Para Castro e Meggiolaro (2004) o estudo da fadiga é multidisciplinar, pois a microestrutura do material trincado é estudada na Ciência dos Materiais, e todo o projeto estrutural tem que ser avaliado através de uma análise de tensões e resistências.

A falha por fadiga é dita frágil, mesmo em materiais dúcteis, pois acontece de forma rápida e inesperada. Além disso, essas falhas costumam acontecer em valores de tensão muito abaixo do limite de resistência a fratura e até do limite de escoamento. As falhas acontecem em estágios, de acordo com Milfont (2011):

- I. Primeiro estágio: Início da trinca. Ocorrem devido a imperfeições, pontos de concentração de tensões, inclusões, etc. Sua duração normalmente é pequena, comparando-se com os outros estágios.
- II. Segundo estágio: Propagação da trinca. Após o surgimento da primeira trinca microscópica, ela se propaga de acordo com os mecanismos da mecânica da fratura.

Envolve o maior período de vida da peça, e caso haja corrosão, sua velocidade aumenta (a trinca, sob corrosão, aumenta mesmo com um carregamento estático).

- III. Terceiro estágio: Ruptura da peça. Com o crescimento da trinca, a peça fica suscetível a ruptura sem aviso prévio.

2.1.1 Fadiga Mecânica

Segundo Dall’Orto (2008), a fadiga mecânica desenvolve-se em componentes solicitados dinamicamente por tensões ou deformações. Um número elevado de solicitações leva o material a falhar. Ocorre normalmente em conexões soldadas.

2.1.2 Fadiga Térmica

Segundo Dall’Orto (2008), a fadiga térmica ocorre quando há solicitações térmicas cíclicas (variações na temperatura), como por exemplo, resfriamentos ou aquecimentos repentinos e repetitivos ao longo da operação do equipamento. Este tipo de fadiga é comum em pontos de dessuperaquecimento, a jusante dos tubulões, etc.

2.1.3 Fadiga sob corrosão

O Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC, 2010) define a fadiga sob corrosão como sendo “a ruptura com aplicação de tensão cíclica em presença de um meio corrosivo. Pressupõe uma interação sinérgica entre corrosão e tensão cíclica”. A fadiga por corrosão ocorre normalmente em cabos de aço submarinos, tubos de evaporadores, caldeiras, etc.

2.2 Caldeiras

Caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos destinados a produção de vapor através da troca térmica entre o combustível e a água. Essa troca é possível devido ao calor liberado pela queima do combustível (sólido, líquido ou gasoso) que faz com que as partes

metálicas da caldeira se aqueçam e transfiram calor à água, produzindo vapor, seja ele saturado ou superaquecido (LEITE; MILITÃO, 2008).

Se uma substância existe sob a forma de vapor na temperatura de saturação, ela é chamada de vapor saturado, contendo pequenas gotículas de água. Quando a temperatura é aumentada, acima da temperatura de saturação, o vapor passa a se chamar superaquecido, resultando em um vapor seco (CHIARANTANO; SANTANA, 2008). É no superaquecedor que o vapor passa de saturado a superaquecido.

As caldeiras e outras instalações que operam a altas pressões e temperaturas são projetadas para uma vida finita (SINGER¹, 1991 apud PAOLIELLO, 2004, tradução nossa). Essa limitação decorre do fato de que esses equipamentos tendem a sofrer degradações conforme estão em operação. A duração de uma caldeira ainda é um assunto bem discutido entre especialistas, alguns consideram de 25-30 anos uma estimativa bem razoável (FRENCH², s.d. apud PAOLIELLO, 2004, tradução nossa), mas experiências práticas mostram que esse número pode ser bem maior na verdade. Isso é possível graças a um grande avanço em desenvolvimento de novos e mais resistentes materiais e de uma melhor prática de operação e manutenção nas caldeiras.

O parâmetro mais importante para o dimensionamento da caldeira é o combustível a ser utilizado. O uso do combustível depende de diversos fatores, entre eles, da disponibilidade e facilidade na obtenção do mesmo, do seu poder calorífico, etc. Dependendo do tipo de caldeira, há a necessidade de montagem no local. A logística do transporte é muito importante, pois para caldeiras de maior porte, são necessários muitos caminhões para transportar todos os componentes. Para caldeiras menores (compactas), elas são transportadas pelo fornecedor totalmente montado. Apenas como fonte de informação e curiosidade, na Tabela 1 é apresentada o peso dos materiais e na Tabela 2 é apresentada as quantidades de materiais utilizados na instalação e montagem de uma caldeira de 3000 t/ssd, com capacidade de 450 t/h. Neste caso foram necessárias a utilização de 724 carretas para transportar todos os componentes e materiais³.

¹ SINGER, J.G. **Combustion, fossil power**. Windsor, Connecticut, [s.n.], 1991 apud PAOLIELLO, F. A. **Guidelines for integrity evaluation and remaining life assessment of recovery boilers**, 2004

² FRENCH, D.N. **Microstructural Degradation**, s.d., [S.l.: s.n.] apud PAOLIELLO, F. A. **Guidelines for integrity evaluation and remaining life assessment of recovery boilers**, 2004

³ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria no 44º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel, em São Paulo, em outubro de 2011.

Tabela 1 – Peso dos materiais.

| Componente | Peso (t) |
|----------------------------|-----------------|
| Partes pressurizadas | 2.050 |
| Partes não pressurizadas | 2.130 |
| Precipitador eletrostático | 1.380 |
| Estrutura de aço | 2.460 |
| Subtotal | 8.020 |

Tabela 2 – Quantidade de materiais.

| Material | Quantidade |
|-----------------|----------------------|
| Concreto | 2.150 m ³ |
| Formas | 7.660 m ² |
| Armação | 280 t |
| Estacas | 2.400 m |

De acordo com o fluido que passa dentro dos tubos, as caldeiras podem ser classificadas em flamotubulares e aquotubulares.

2.2.1 Caldeiras flamotubulares

Segundo Lagemann (2006), neste tipo de caldeira os gases quentes passam por dentro dos tubos, enquanto que a água a ser aquecida passa pelo lado externo. Caldeiras deste tipo são utilizadas onde o volume, pressão e temperatura do vapor são mais baixas, pois as partes internas expostas a pressões são grandes, o que impossibilita a utilização de chapas de maiores espessuras (ALTAFINI, 2002).

De acordo com Dall'Orto (2008), possuem a vantagem de serem de custo mais baixo e construção fácil, exigem pouca alvenaria, não exigem um tratamento de água muito cuidadoso e atendem bem a aumentos instantâneos de demanda por vapor. As desvantagens são: baixo rendimento térmico, partida lenta, limitação de pressão de operação, capacidade de produção limitada, circulação de água deficiente e dificuldades para a instalação de superaquecedores, economizadores e pré-aquecedores. Na Figura 1 é mostrado um esquema básico de uma caldeira deste tipo, apenas para visualizar a esquematização dos tubos. Uma caldeira real possui muito mais componentes, além destes mostrados na figura.

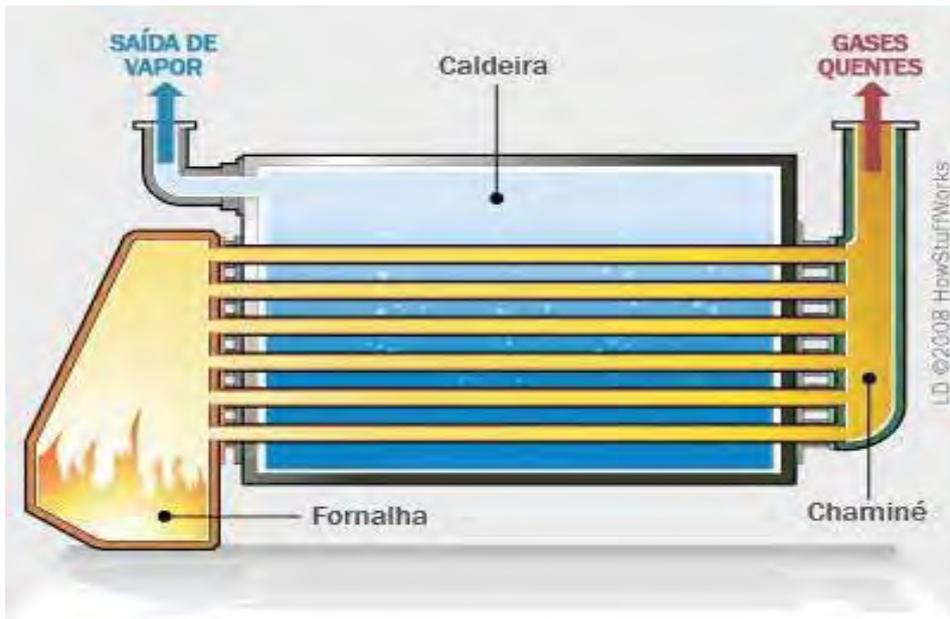


Figura 1 – Caldeira flamotubular. Fonte: Howstuffworks, 2008.

2.2.2 Caldeiras aquotubulares

Segundo Lima et al. (2011), a caldeira aquotubular é utilizada para instalações de maior porte, apesar de serem mais caras, operam com pressão e temperaturas de vapor maiores. Neste tipo, a água circula dentro dos tubos e os gases quentes, provenientes da queima do combustível, circulam por fora dos tubos. São mais utilizadas e, portanto, objeto de estudo deste trabalho.

Conforme Lagemann (2006), as caldeiras aquotubulares possuem como vantagens: maior taxa de produção de vapor, utilização de temperaturas e pressões maiores, facilidade de substituição dos tubos, facilidade de inspeção e limpeza e uma vida útil maior, comparada com a caldeira flamotubular. As desvantagens são: custo mais elevado, construção mais complexa e exigem um tratamento de água mais cuidadoso. Na Figura 2 é representado um esquema também básico, comparando-o com a Figura 1.

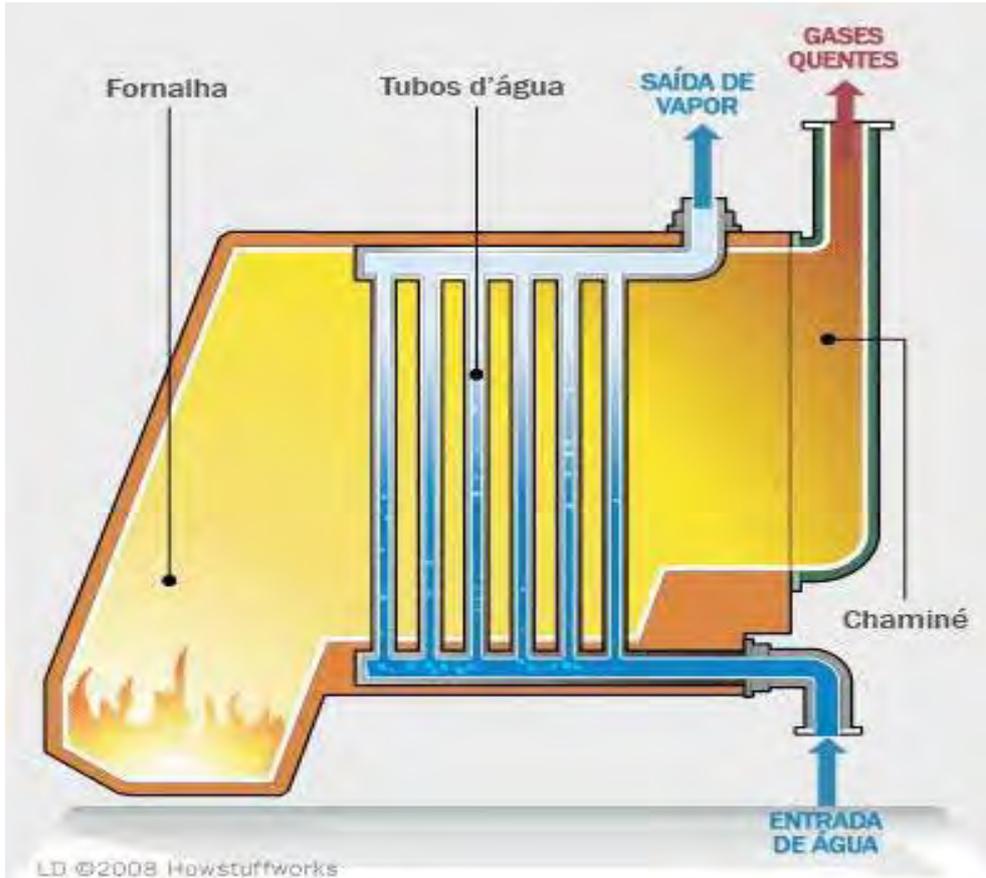


Figura 2 – Caldeira aquotubular. Fonte: Howstuffworks, 2008.

2.2.2.1 Principais componentes

Os principais componentes de uma caldeira aquotubular são descritos abaixo (PAULINO, 2004):

- Tubulão superior: é o elemento da caldeira onde é injetada a água de alimentação e de onde o vapor é retirado para o superaquecedor.
- Coletores: conectadas com o conjunto de tubos, cuja finalidade é coletar água ou vapor.
- Câmara de combustão ou fornalha: local onde ocorre a queima do combustível, gerando os gases quentes.
 - Queimadores: peças destinadas a promover a queima dos combustíveis em suspensão.
 - Tubos: servem para a circulação de vapor e água dentro da caldeira.
 - Superaquecedor (SH): aproveita os gases de combustão para aquecer o vapor saturado, transformando-o em vapor superaquecido. Deve ser capaz de manter uma operação estável e confiável e resistir à corrosão e aderência de cinzas sob condições severas.

- Sopradores de fuligem: como o nome já diz, tem a finalidade de remover a fuligem da superfície externa dos tubos, que dificultaria a transferência de calor.
- Economizador: responsável por pré aquecer a água de alimentação antes desta retornar ao tubulão. Aproveita o calor dos gases de combustão, representando uma economia de energia, pois aumenta o rendimento do sistema.
- Evaporador: absorve calor do gás a altas temperaturas que deixam o superaquecedor. É um elemento importante da caldeira, pois aumenta a eficiência da mesma.
- Pré-aquecedor de ar: tem por finalidade aquecer o ar de combustão, normalmente aproveita os gases quentes da combustão para realizar esse aquecimento. Como resultado, consegue-se uma melhor queima e um maior rendimento da caldeira.
- Refratários: resistentes a altas temperaturas, isolam a câmara de combustão dos elementos estruturais.
- Chaminé: liberam os gases para a atmosfera, normalmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos. Caldeiras de grande porte geralmente possuem tratamento dos gases com equipamento antipolvente, como o Precipitador Eletrostático, que controla as emissões de material particulado para a atmosfera e também protege equipamentos auxiliares, como ventiladores de tiragem induzida.

2.3 Caldeira de recuperação química

As caldeiras de recuperação químicas são utilizadas para a mesma finalidade das caldeiras convencionais, porém elas aproveitam os produtos químicos que seriam descartados e os utilizam para gerar vapor. Nas modernas fábricas de papel e celulose, as caldeiras de recuperação são vitais, pois reutilizam os produtos químicos (licor negro) do processo de produção da celulose, auxiliando na geração de energia elétrica para o consumo na própria fábrica. São responsáveis também por diminuir o nível de emissão de poluentes.

Na Figura 3 são ilustrados os componentes descritos anteriormente e outros componentes também.

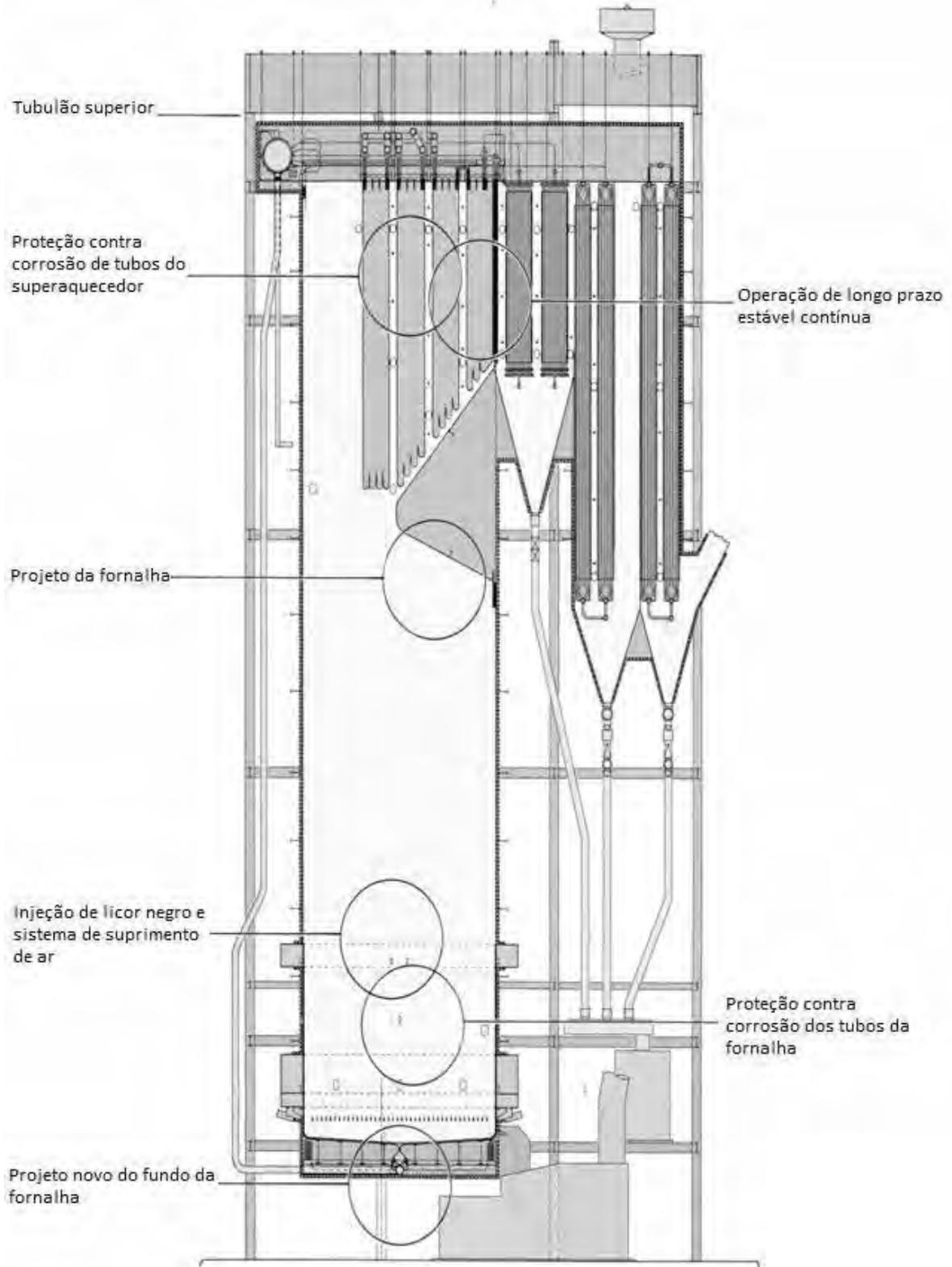


Figura 3 - Caldeira de recuperação química completa. Fonte: Mitsubishi Heavy Industries - adaptado.

Na Figura 4 é apresentado um gráfico em que podemos visualizar a vida das caldeiras de recuperação existentes no Brasil e na Tabela 3 é apresentada uma relação de caldeiras de recuperação existentes no Brasil (atualizado em Agosto/2011):



Figura 4 – Caldeiras pela idade. Fonte: JONAS, 2011.

Tabela 3 – Relação de caldeiras de recuperação (CR) existentes no Brasil. Fonte: JONAS, 2011.

| # | Empresa | Fornecedor | Status | Start up (ano) | Reforma (ano) | Idade (anos) | Capacidade Original (tss virgem/dia) | Capacidade Real (tss virgem/dia) | Pressão (barg) | Temp. (C) | Vapor p/ processo (t/h) | Área (m ²) | Ratio (tss/m ² dia) |
|----|-----------------------|-------------|-------------|----------------|---------------|--------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------|-----------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | BSC | CBC | Em operação | 2008 | | 3 | 3000 | 3300 | 85 | 490 | 494 | 149,2 | 22,1 |
| 2 | CENBRA | CBC | Em operação | 1977 | 2003 | 34 | 1440 | 1800 | 65 | 450 | 250 | 93,86 | 19,2 |
| 3 | CENBRA | CBC | Em operação | 1992 | 2004 | 19 | 2050 | 2700 | 65 | 450 | 422 | 138,13 | 19,5 |
| 4 | CENBRA | CBC | Em operação | 2006 | | 5 | 3500 | 3500 | 66/86 | 450 | 524/515 | 189 | 18,5 |
| 5 | CMPC | B&W | Em operação | 2002 | | 9 | 1950 | 1950 | 64 | 465 | 300 | 125 | 15,6 |
| 6 | COCELPA | Metso | Em operação | 1988 | | 23 | 160 | 220 | 45 | 425 | 30 | 12 | 18,3 |
| 7 | Eldorado | Metso | Em projeto | 2012 | | 0 | 6800 | 6800 | 85 | 485 | 1116 | 293 | 23,2 |
| 8 | Fibria Aracruz CR-A | Metso | Em operação | 2001 | | 10 | 3440 | 3440 | 64 | 450 | 524 | 156,7 | 22,0 |
| 9 | Fibria Aracruz CR-B | Metso | Em operação | 1991 | 2002 | 20 | 2200 | 3600 | 64 | 450 | 524 | 165,7 | 21,7 |
| 10 | Fibria Aracruz CR-C | Andritz | Em operação | 1997 | 2000 | 14 | 2200 | 3300 | 64 | 455 | 433 | 130,8 | 25,2 |
| 11 | Fibria Jacarei | CBC | Em operação | 1994 | | 17 | 1430 | 1990 | 90 | 470 | 240 | 101 | 19,7 |
| 12 | Fibria Jacarei | CBC | Em operação | 2002 | | 9 | 2500 | 2990 | 93 | 480 | 360 | 149 | 20,1 |
| 13 | Fibria Três Lagoas | Metso | Em operação | 2009 | | 2 | 5300 | 5500 | 86 | 487 | 822 | 242 | 22,7 |
| 14 | Iguacu | São Caetano | Em operação | 1972 | | 39 | 104 | 104 | 16 | 204 | 24 | 17,2 | 6,0 |
| 15 | IP - Luiz Antonio | CBC | Em operação | 1991 | 2005 | 20 | 890 | 1550 | 64 | 450 | 245 | 66 | 23,5 |
| 16 | IP- Mogi Guaçu | B&W | Em operação | 1976 | | 35 | 187 | 320 | 29 | 350 | 28 | 14,04 | 22,8 |
| 17 | IP - Mogi Guaçu | Andritz | Em operação | 1985 | 2006 | 26 | 950 | 1144 | 27,6 | 340 | 120 | 51,85 | 22,1 |
| 18 | Jari Nova Campina | CBC | Em operação | 2006 | | 5 | 400 | 400 | 42 | 400 | 74 | 26 | 15,4 |
| 19 | Jari Monte Dourado | HBI | Em operação | 1979 | 1988 | 32 | 1360 | 1750 | 59 | 450 | 276,12 | 89 | 19,7 |
| 20 | Klabin-Correa Pinto | CBC | Em operação | 1987 | 1992 | 24 | 580 | 750 | 85 | 480 | 110 | 49 | 15,3 |
| 21 | Klabin Telemaco | Metso | Em operação | 1977 | 2000 | 34 | 1100 | 1850 | 46 | 430 | 250 | 92,5 | 20,0 |
| 22 | Klabin Telemaco | CBC | Em operação | 2007 | | 4 | 1700 | 1700 | 106 | 503 | 243 | 79,6 | 21,4 |
| 23 | Klabin-Otacílio Costa | Metso | Em operação | 1987 | | 24 | 330 | 230 | 42 | 400 | 47,4 | 24,11 | 9,5 |
| 24 | Klabin-Otacílio Costa | CBC | Em operação | 1998 | | 13 | 1100 | 1050 | 89 | 483 | 170,2 | 69,1 | 15,2 |
| 25 | Lwaoel | CBC | Em operação | 2002 | 2008 | 9 | 700 | 826 | 85 | 480 | 120 | 44 | 18,8 |
| 26 | Nobre cel | CBC | Em operação | 1999 | 2006 | 12 | 270 | 270 | 45 | 450 | 37 | 16 | 16,9 |
| 27 | Riçesa | B&W | Em operação | 1987 | | 24 | 250 | 250 | 43 | 370 | 95,4 | 18,3 | 13,7 |
| 28 | Riçesa | Andritz | Em operação | 1999 | | 12 | 850 | 600 | 64 | 460 | 126 | 47,4 | 12,7 |
| 29 | Suzano Limeira | Metso | Em operação | 1972 | | 39 | 270 | 510 | 42 | 380 | 65 | 24,11 | 21,2 |
| 30 | Suzano Limeira | Metso | Em operação | 1981 | 2000 | 30 | 270 | 510 | 42 | 380 | 65 | 24,11 | 21,2 |
| 31 | Suzano Limeira | CBC | Em operação | 2002 | 2007 | 9 | 1100 | 1700 | 46 | 400 | 180 | 69 | 24,6 |
| 32 | Suzano Maranhao | Metso | Em projeto | 2013 | | 0 | 7000 | 7000 | 95 | 492 | 1207 | 323,2 | 21,7 |
| 33 | Suzano Mucuri | Metso | Em operação | 1992 | 2007 | 19 | 1750 | 3000 | 85 | 480 | 420 | 144 | 20,8 |
| 34 | Suzano Mucuri | Metso | Em operação | 2007 | | 4 | 4700 | 4700 | 85 | 480 | 738 | 251 | 18,7 |
| 35 | Suzano Suzano | Metso | Em operação | 1973 | 2004 | 38 | 670 | 811 | 50 | 380 | 110 | 49 | 16,6 |
| 36 | Suzano Suzano | CBC | Em operação | 1987 | 2002 | 24 | 800 | 1400 | 50 | 420 | 218 | 64,1 | 21,8 |
| 37 | Trombini | Orcepa | Em operação | 1989 | 2000 | 22 | 140 | 180 | 21 | 420 | 30 | 10 | 18,0 |
| 38 | Veracel Celulose | Metso | Em operação | 2005 | | 6 | 4000 | 4000 | 93,6 | 490 | 630 | 210 | 19,0 |

Para melhor entendimento da importância da caldeira de recuperação em uma fábrica de papel e celulose, é necessária uma breve explicação sobre a fabricação do papel nessas instalações. Segundo Souza (2008), o processo de produção do papel compreende três fases: I. Formação da floresta e seu corte; II. Produção da celulose; III. Produção do papel.

Na fase I, somente de florestas cultivadas pelas próprias empresas (pinus, eucaliptos), a madeira é descascada, cortada em pedaços menores e são transportadas até a fábrica. Nas fábricas mais modernas, o corte e descascamento do eucalipto são feitos por uma máquina denominada *Harvester*, no próprio campo de plantação.

Na fase II, as toras de madeira são picadas e reduzidas a cavacos. Para produzir a celulose, é necessário “desprender” a lignina das fibras de celulose presentes nos cavacos. O método mais utilizado é o processo Kraft. Esse processo consiste em submeter os cavacos a uma máquina chamada digestor. Lá o licor branco (solução contendo hidróxido de sódio e sulfeto de sódio) reage com a madeira, numa condição de cozimento. Dessa reação forma-se o licor negro e a celulose.

Na fase III, a celulose é separada do licor negro, ela passa por um processo de branqueamento e posteriormente vai para as secadoras, onde é secada, moldada em folhas, cortadas em tamanhos menores, e em seguida embaladas para distribuição.

Todo o processo de obtenção da celulose é muito mais complexo que o explicado acima, porém como o enfoque do trabalho é sobre falhas em caldeiras, uma explicação mais aprofundada não foi apresentada neste trabalho.

O combustível queimado na fornalha das CR é o licor negro. O licor negro é um subproduto do processo de extração da celulose pela polpação (processo Kraft), conforme explicado brevemente acima. Da forma como ele é descartado dos digestores (aproximadamente 17% de sólidos), não possui valor como combustível. Desta maneira, o licor negro é concentrado em uma série de trocadores de calor chamados de Planta de Evaporação, aumentando a sua concentração de sólidos para algo em torno de 70-80%. Assim, a parte orgânica da mistura tem poder calorífico suficiente para gerar vapor para o processo, para geração de energia elétrica e para fornecer calor para as reações químicas dos inorgânicos no fundo da fornalha⁴, onde o licor branco será produzido em processos posteriores e utilizado para o processo Kraft, fechando o ciclo.

2.3.1 Funcionamento da caldeira de recuperação química

Na Figura 3 estão identificados todos os componentes da CR. Uma caldeira deste tipo funciona da seguinte maneira: a água de alimentação entra no economizador a uma temperatura de 120°C. Lá ela é aquecida pela troca de calor entre os tubos e os gases quentes da combustão do licor negro, atingindo a temperatura de 220°C e dirige-se para o tubulão superior. No tubulão, há a separação da água e do vapor saturado. A água é então distribuída para os tubos da parede aquotubular onde é transformado em vapor saturado e por meio de

⁴ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, no escritório da Companhia Brasileira de Caldeiras (CBC S.A.), em São Paulo, em outubro 2011.

outros tubos retorna ao tubulão superior. Esse processo ocorre por circulação natural, ou seja, a força motriz é a diferença de densidade entre a água e a mistura água-vapor. O vapor saturado sai do tubulão e vai para o SH, onde é aquecido até tornar-se vapor superaquecido saindo em torno de 550°C (o aquecimento ocorre sem elevação da pressão do vapor e de maneira similar ao aquecimento da água de alimentação no economizador). O superaquecedor é formado por dois tubos coletores (entrada e saída) e por feixes tubulares. O vapor saturado entra pelo coletor de entrada, é aquecido nos feixes tubulares e sai pelo coletor de saída. No topo do SH, as curvas superiores, que ultrapassam o teto do tubo da fornalha, são totalmente vedadas pela placa de vedação. Esta estrutura rígida impede qualquer oscilação dos painéis do SH, causadas pela ação dos sopradores de fuligem. É nesta estrutura que falhas por fadiga podem ocorrer, devido a tensões sofridas por esta estrutura para impedir a movimentação dos painéis. As temperaturas descritas acima são aproximadas e dependem de diversos fatores, entre eles, porte da caldeira, capacidade de gerar o vapor, finalidade do vapor, etc⁵. Esses valores referem-se à CR cujas características serão indicadas no capítulo posterior.

⁵ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, no escritório da CBC S.A., em São Paulo, em outubro 2011.

3 PROPOSIÇÃO

3.1 Análise de falhas

A ocorrência de falhas mecânicas pode ser atribuída a:

- Deficiências no projeto ou deficiências na escolha dos materiais;
- Processamentos inadequados;
- Deterioração em serviço;
- Uso ou operação inadequada.

A análise das falhas tem por objetivo restringir a ocorrência de novas falhas. A necessidade de um estudo aprofundado e metucioso sobre a falha deve ser realizada somente em circunstâncias especiais, visto que uma análise completa do evento exige muito tempo e dinheiro. Em casos de falhas em caldeiras, uma análise aprofundada é necessária, pois a concepção (projeto, desenvolvimento, montagem e instalação) e operação das caldeiras demandam um enorme gasto que não podem ser desperdiçados em apenas alguns anos de uso. Como visto anteriormente, a vida útil de uma caldeira deve variar entre 25-30 anos, no mínimo. Por lei, uma vez por ano, a operação da caldeira deve ser interrompida para uma inspeção geral. Uma das principais ações tomadas é medir as espessuras dos tubos, a fim de verificar-se a existência de possíveis defeitos.

Segundo Paoliello (2005, tradução nossa), sob condições normais de operação, as avaliações de integridade física e vida restante em caldeiras de recuperação devem ocorrer em duas situações: quando a caldeira estiver perto de completar 80% da sua vida de projeto e após a conclusão de 25 anos em operação (período legal no Brasil, que sob nenhuma circunstância deve ser ultrapassado). Em casos especiais, as avaliações podem ocorrer mais cedo, como por exemplo, se a caldeira estiver operando acima da sua capacidade nominal, históricos de partidas e paradas mais rápidas que os estipulados no projeto, evidências de acúmulos de danos, entre outros. Essas avaliações são fundamentais, pois apenas as inspeções de rotina não são suficientes para garantir uma ótima manutenção e um prolongamento da vida de operação da caldeira.

O design da fornalha da CR (como visto na Figura 3) mostra uma estrutura parecida com um nariz. Essa estrutura uniformiza o fluxo de gás quente provenientes da combustão e protege o SH da radiação direta da fornalha. A vida útil do SH é estimada em 10.000 horas em operação, o que representa de 10-15 anos.

De acordo com estudos, análises e conversas com um especialista em caldeiras, verificou-se a existência de diversas falhas ocorridas em caldeira. No Quadro 1 estão apresentados as falhas mais comuns nos componentes da caldeira.

Quadro 1 – Falhas mais comuns nos componentes da caldeira. Fonte: PAOLIELLO, 2005 - adaptado.

| Mecanismos de danos | Corrosão | Fadiga | Erosão | Oxidação a altas temperaturas | Fluência | Degradação microestrutural |
|--|----------|--------|--------|-------------------------------|----------|----------------------------|
| Fornalha | ✓ | ✓ | ✓ | — | — | — |
| Tubulão | ✓ | ✓ | — | — | — | — |
| Economizador | ✓ | ✓ | ✓ | — | — | — |
| Superaquecedor | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Partes não refrigeradas expostas ao fluxo de gás | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | — | ✓ |
| Linha principal de vapor | — | ✓ | — | — | ✓ | ✓ |
| Estruturas | ✓ | ✓ | — | — | — | — |
| Tanque de dissolução | ✓ | ✓ | ✓ | — | — | — |

Pelo Quadro 1, notamos que a corrosão, a fadiga e a erosão são os maiores causadores de falhas nas caldeiras e é no superaquecedor que acontecem os mais diversos problemas, pois é o elemento que está sujeito às maiores temperaturas do vapor.

Segundo Aspgrén et al. (2003), falhas nos tubos do SH em CR tem ocasionado perdas substanciais de produção em muitas fábricas de papel e celulose. As falhas podem ocorrer por perdas de espessura das paredes dos tubos devido à corrosão, trincas em espaçadores do SH ou suportes e penetrações do teto, aquecimento demasiado do material do SH, fadiga térmica ou contaminação do lado do vapor. Todas estas falhas acarretam em indisponibilidade da caldeira de tempos em tempos e custos de manutenção maiores durante as paradas de manutenção. Caldeiras mais antigas e que por necessidade são submetidas a aumento de produção são os principais alvos destas falhas. Na tabela 3, verificamos que a maioria das CR mais antigas já passaram por reforma para adequar-se à nova demanda e assim reduzir a probabilidade de novas falhas.

O trabalho será abordado em falhas por fadiga nos superaquecedores. Como é muito raro ter uma falha catastrófica em componentes de caldeira cuja causa raiz possa ser isolada em um único modo de falha, outros mecanismos de falha serão abordados neste capítulo, atuando sozinhos ou em conjunto com outros tipos, cada qual com a sua contribuição no processo de ruptura. Porém, no modelamento, será considerada apenas a fadiga.

3.2 Corrosão no superaquecedor

A corrosão é uma situação complicada, pois na concepção da caldeira de recuperação é necessária uma análise de quais materiais utilizar para controlá-la, visto que não é possível evitá-la por completo. A localização do SH é um fator importante na sua suscetibilidade à corrosão. Antigamente, a temperatura do vapor era mantida em temperaturas mais baixas (na faixa de 350 °C) e por isso a corrosão não era uma grande preocupação (BRUNO, 1997). Com a demanda por energia aumentando, a temperatura e pressão do vapor foram aumentando também (assim obtém-se uma melhor eficiência em energia), e por isso a corrosão passou a ser um importante parâmetro para a escolha do material dos tubos do superaquecedor. Sua escolha é difícil e baseia-se, principalmente, nos anos de experiência de engenheiros e pesquisadores. Muitas vezes caldeiras que adotam o mesmo material podem sofrer diferentes tipos de corrosão, pois suas operações podem ser diferentes entre si. Isto explica um pouco da complexidade em controlar a corrosão nos tubos do superaquecedor.

A escolha dos materiais do SH é realizada de acordo com as condições mais críticas de temperatura e pressão. Os aspectos econômicos também são levados em conta⁶. Neste sentido, os principais materiais escolhidos para os tubos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais materiais utilizados no SH. Fonte: ASPGREN et al., 2003.

| Material | Especificação ASME | Temperatura (°C) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| Aço Carbono | SA-210 | 450 |
| Carbono + ½ Mo | SA-209-T1 | 480 |
| 1 ¼ Cr - ½ Mo | SA-213-T11 | 550 |
| 2 ¼ Cr – 1 Mo | SA-213-T22 | 580 |
| 18 Cr – 10 Ni | SA-213-321H | 810 |

Em ambientes sulfurosos redutores ou oxidantes, as temperaturas da Tabela 4 são fortemente rebaixadas (ASPGREN et al., 2003). Materiais especiais de aço inoxidável são utilizados para maior durabilidade da curvatura inferior dos painéis do SH.

Desequilíbrios de temperatura no lado do vapor e dos gases podem ajudar na identificação de áreas que estão mais sujeitas à corrosão. Devido às altas taxas de transmissão

⁶ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, no escritório da CBC S.A., em São Paulo, em outubro 2011.

de calor no lado do vapor, a temperatura do metal está mais ligada à temperatura do vapor. Portanto um controle da temperatura nos tubos do SH deve ser feita para diminuir a ocorrência da corrosão.

Segundo Vakkilainen (2007), a corrosão é dividida por áreas, baseada na sua localização: a) corrosão do lado da água; b) corrosão em altas temperaturas e c) corrosão a baixas temperaturas.

A corrosão é dividida também por tipos, que dependem basicamente do causador da falha. Por exemplo, a corrosão galvânica é causada geralmente devido à presença de metais dissimilares e a corrosão pode ocorrer também devido a temperatura excessiva, geralmente nos tubos dos superaquecedores (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel - ABTCP, 2003).

Na Figura 5 é mostrada a corrosão causada pelo baixo ponto de fusão dos depósitos. Houve perda de espessura do tubo devido à corrosão.



Figura 5 – Corrosão localizada no topo de um tubo de nariz. A figura abaixo mostra a perda de espessura de aproximadamente 1 mm. Fonte: ASPGREN et al., 2003.

3.3 Superaquecimento de longo prazo

O superaquecimento de longo prazo ocorre, especialmente, em superaquecedores, reaquecedores e tubos de parede. Neste tipo de falha, o metal excede sua temperatura de projeto por dias, semanas, meses ou anos (PORT; HERRO, 1991).

De acordo com Aspgren et al. (2003), este superaquecimento excessivo pode ser causado por:

- Formação gradual de incrustações ou contaminação.
- Altas velocidades dos gases causados por obstrução parcial.
- Fluxo de vapor com velocidade reduzida, o que acarreta em temperaturas elevadas localizadas nos tubos.
- Fluxos de vapor não uniforme causados por erros de projeto do SH.
- Fluxos de gás distribuídos de maneira desigual, que podem causar cargas térmicas maiores em alguns elementos do SH.

Na Figura 6 é ilustrada uma falha que ocorreu devido à ação de tensões estáticas em um ambiente a altas temperaturas por um período de tempo prolongado (falha por fluência).



Figura 6 – Superaquecimento de longo prazo devido à fluência. Fonte: PORT; HERRO, 1991.

3.4 Superaquecimento de curto prazo

Segundo Port e Herro (1991), ocorrem devido à operação em altas temperaturas, por isso, superaquecedores e reaquecedores são os locais de falhas mais comuns. Quando o nível baixo de água é a causa, as falhas ocorrem perto do tubulão de vapor.

Este tipo de falha ocorre de maneira semelhante ao superaquecimento de longo prazo, porém como o próprio nome diz, a diferença está na duração do superaquecimento. Agora o aquecimento excessivo ocorre por períodos pequenos e a falha ocorre geralmente por uma perturbação na operação da caldeira, normalmente durante a partida da caldeira. Um exemplo típico deste tipo de falha ocorre quando os tubos do SH não estão totalmente livres de condensação, o que acarreta a obstrução do fluxo de vapor. As temperaturas do metal do tubo podem atingir níveis elevados, fazendo com que o tubo se rompa.

O principal meio de detectar esta falha é por análise metalográfica do material, outras técnicas de identificação podem ser utilizadas, porém são menos efetivas. Nas Figuras 7 e 8 são ilustradas estas falhas.



Figura 7 – Superaquecimento de curto prazo. Fonte: PORT; HERRO, 1991.



Figura 8 – Ruptura violenta, causada pelo superaquecimento de curto prazo. Fonte: PORT; HERRO, 1991.

3.5 Fadiga no superaquecedor

Como já explicado no capítulo anterior, os SH são responsáveis por elevar a temperatura do vapor sem aumento da pressão. O SH em estudo é formado por seções. A primeira seção (seção primária) é do tipo contra fluxo e localiza-se na zona de temperatura do gás mais baixa. A segunda seção (seção secundária) está localizada na zona de mais alta temperatura dos gases com o fluxo de vapor paralelo ao do vapor. A seção final está localizada na zona de temperatura média do gás a fim de diminuir a temperatura do tubo metálico. O dessuperaquecedor está localizado na saída da seção do SH primário, para minimizar o desbalanceamento da temperatura do vapor e temperatura do metal.

O superaquecedor é composto por painéis, o espaçamento médio entre os painéis é de 300 mm, com tubos de 54 mm de diâmetro externo e espessura de 4,4 mm. A tubulação é escolhida de acordo com condições críticas de pressão e temperatura, por isso tubos de materiais diferentes são utilizados no SH⁷.

A falha por fadiga pode acontecer nos grampos ou espaçadores, soldados aos tubos do SH, que são utilizados para limitar os movimentos dos tubos e painéis (ASPGREN et al., 2003). Para garantia de ótimo funcionamento, esses espaçadores devem ser resistentes a altas temperaturas. Os espaçadores podem ser fixos (restrição nos três eixos) ou deslizantes (restrição em dois eixos, não impede a dilatação térmica axial).

A pressão de impacto durante o funcionamento dos sopradores de fuligem causa tensões adicionais nos espaçadores conforme os painéis do SH se movimentam. Este esforço

⁷ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, no escritório da CBC S.A., em São Paulo, em outubro 2011.

(mecânico) repetido e alternado ocorre em ciclos, cuja duração varia de dois a cinco minutos a cada três a quatro horas.

Os esforços térmicos causados pela dilatação térmica diferencial nos tubos do SH também são responsáveis por falhas nos espaçadores. A temperatura dos elementos varia continuamente aumentando do nível mais baixo na entrada até o ponto mais alto na saída do SH. Desta forma os elementos sofrem dilatação térmica diferencial em seus espaçadores instalados em diferentes elevações do painel⁸.

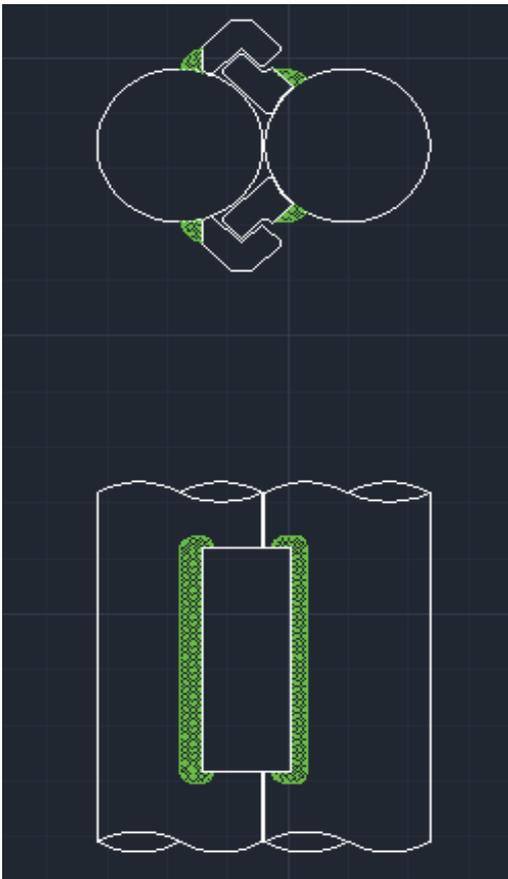


Figura 9 – Detalhe do espaçador deslizante.

Na Figura 9, as partes em verde são as soldas realizadas dos espaçadores nos tubos. Como estes pontos são submetidos a altas tensões durante a operação, tanto térmicas quanto mecânicas, é essencial que as melhores técnicas de soldagem sejam aplicadas neste processo, com acabamentos suaves e cantos arredondados. Quando as soldas são mal efetuadas, trincas podem ocorrer. Na Figura 10, está bem visível a falha nos espaçadores. Na Figura 11, é demonstrada uma correção de solda para minimizar a concentração de tensão.

⁸ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, via e-mail, em outubro 2011.



Figura 10 – Falhas em espaçadores. Fonte: ASPGREN et al., 2003.

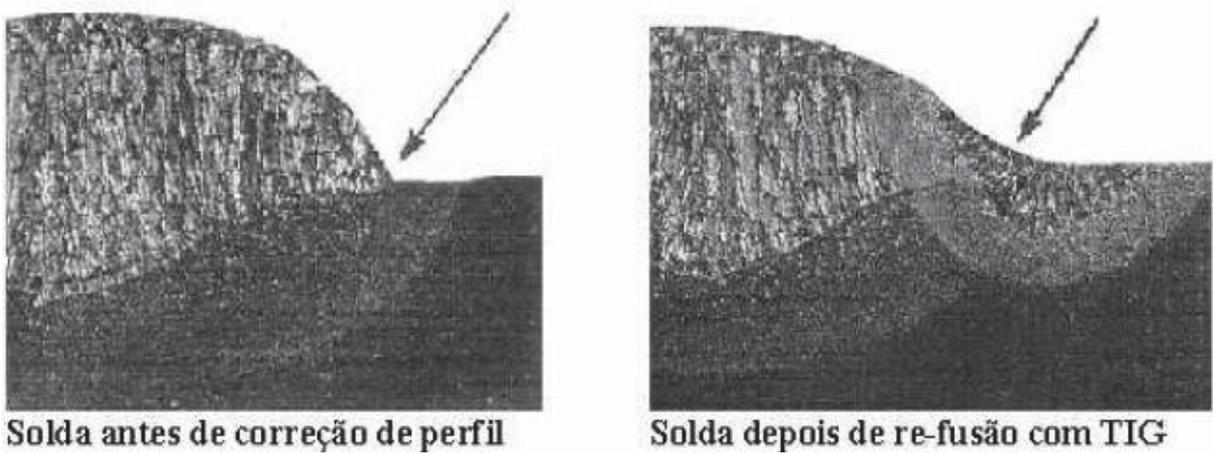


Figura 11 – Correção de solda para minimizar a concentração de tensão. Fonte: ASPGREN et al., 2003.

4 METODOLOGIA

O software de elementos finitos *Ansys Workbench* foi utilizado para verificação das tensões durante a operação da caldeira de recuperação.

O *Ansys* é um software que utiliza o método dos elementos finitos para analisar projetos como: estruturas estáticas, fluidos, transferência de calor, magnetismo, entre outros. O programa utiliza o método numérico para realizar os cálculos. Os resultados são mostrados graficamente, ajudando na interpretação do que está ocorrendo com a peça e facilitando a leitura e obtenção dos resultados. Segundo o Eng.º Azevedo [entre 2003 e 2011] a geometria da peça é subdividida pelo programa, em pequenos elementos (em quantidade finita), mantendo estes elementos ligados por nós, formando a malha. Este processo é chamado de discretização. É dessas divisões que surgiu o termo “análise por elementos finitos”.

A análise divide-se em três partes: pré-processamento, solução e pós-processamento.

No pré-processamento, definem-se as propriedades do material, a malha, geometria da peça e as condições de contorno.

Na solução define-se o tipo de solução desejada.

No pós-processamento, é possível visualizar resultados como: tensão, deformação, apresentação dos pontos críticos, listagem dos deslocamentos nodais, de tensões ou qualquer outro tipo de variável para análise.

Para o modelamento, foram considerados apenas os esforços mecânicos devido à ação dos sopradores de fuligem.

Na Tabela 5 estão demonstradas as características da CR estudada.

Tabela 5 – Características da CR.

| | |
|---|--------------------------|
| Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) | 62 kgf/cm ² g |
| Ano de fabricação | 2001 |
| Capacidade de produção de vapor | 180 t/h |
| Pressão de operação na saída do SH | 46 kgf/cm ² g |
| Temperatura de operação na saída do SH | 403 °C |

Os sopradores de fuligem, responsáveis pelas tensões adicionais nos tubos do SH, operam com fluxo de vapor de 10 t/h, diâmetro de 3,5 in e *nozzle* (bico) de 1,5 in convergente⁹.

Na Figura 12 é ilustrada uma parte do painel do SH no qual falhas podem ocorrer. Os tubos maiores possuem 54 mm de diâmetro e espessura de 4,4 mm. Os tubos menores soldados no suporte e nos tubos maiores possuem 62 mm de diâmetro e 4,4 mm de espessura. A parte superior dos tubos do painel e o suporte são pontos fixos, conforme mostrada na Figura 13. O comprimento da tubulação chega a aproximadamente 15 m, mas pode ser desconsiderada para a análise da falha.

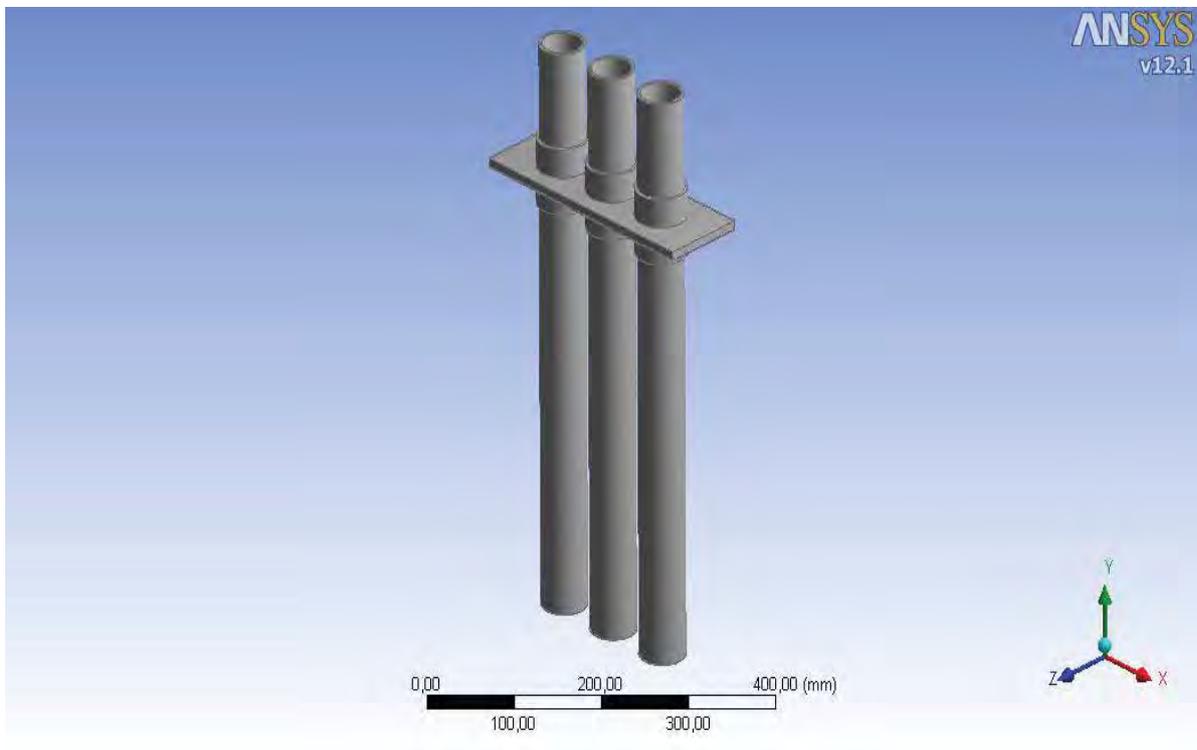


Figura 12 – Tubos do superaquecedor.

⁹ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, via e-mail, em novembro 2011.

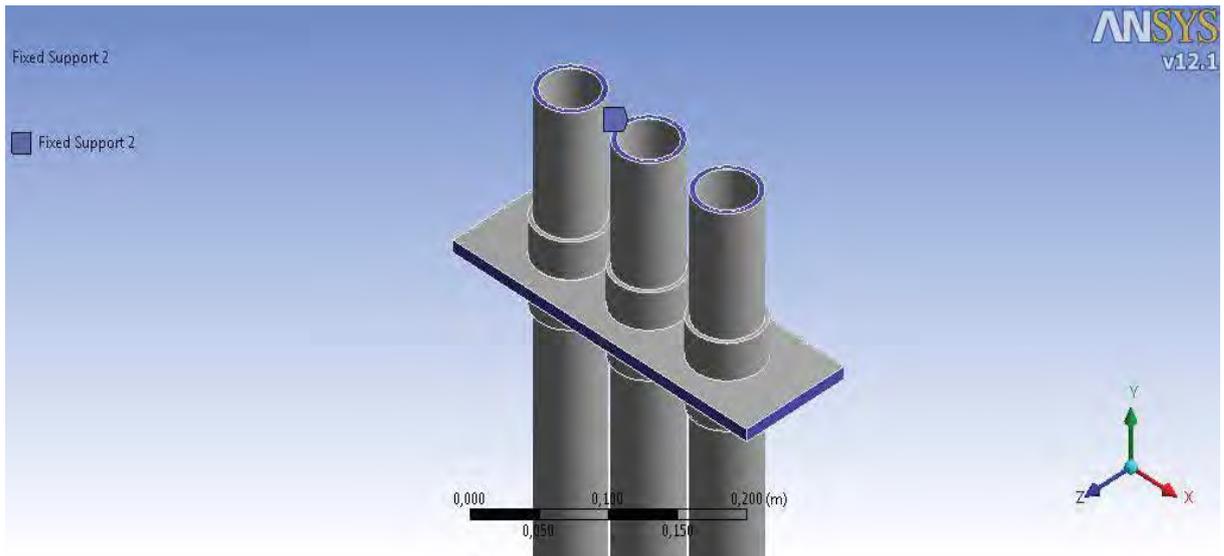


Figura 13 – Partes fixas.

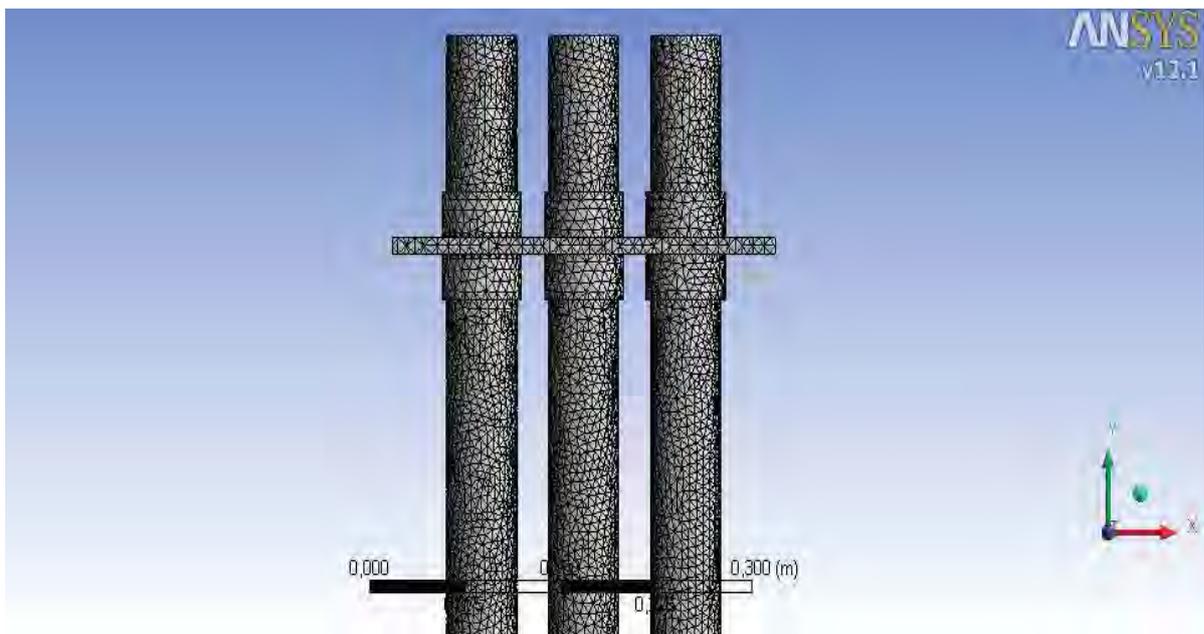


Figura 14 – Detalhe da malha gerada.

A malha foi gerada pelo software e possui 125.155 elementos e 247.919 nós. Alguns ajustes foram necessários, como o refinamento da malha. A pressão devido à ação dos sopradores de fuligem pode variar entre 250 kPa (bocal convencional) e 400 kPa (alta eficiência), com raio de ação de mais ou menos 750 mm¹⁰.

¹⁰ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, via e-mail, em dezembro 2011.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A pressão utilizada foi para sopradores de alta eficiência. Ela foi aplicada na parte inferior dos três tubos, conforme mostrada na Figura 15.

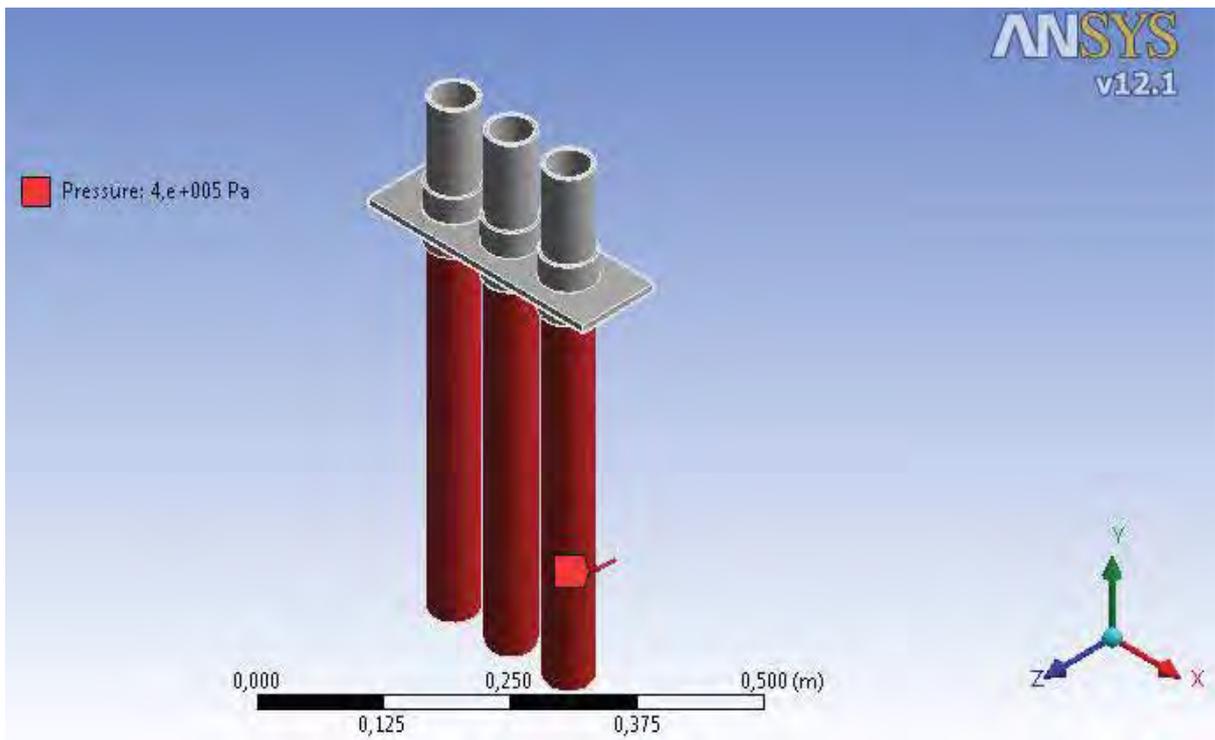


Figura 15 – Pressão aplicada nos tubos.

Os resultados obtidos no *Ansys Workbench* para a pressão de 400 kPa estão ilustradas na Figura 16.

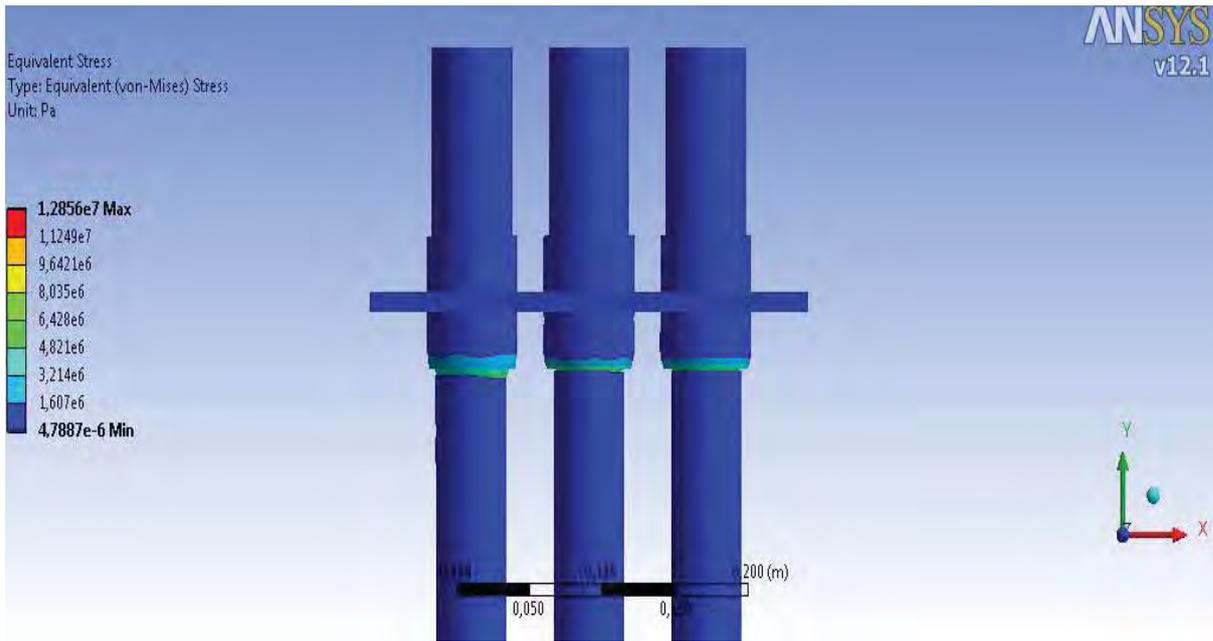


Figura 16 – Tensão equivalente de von Mises.

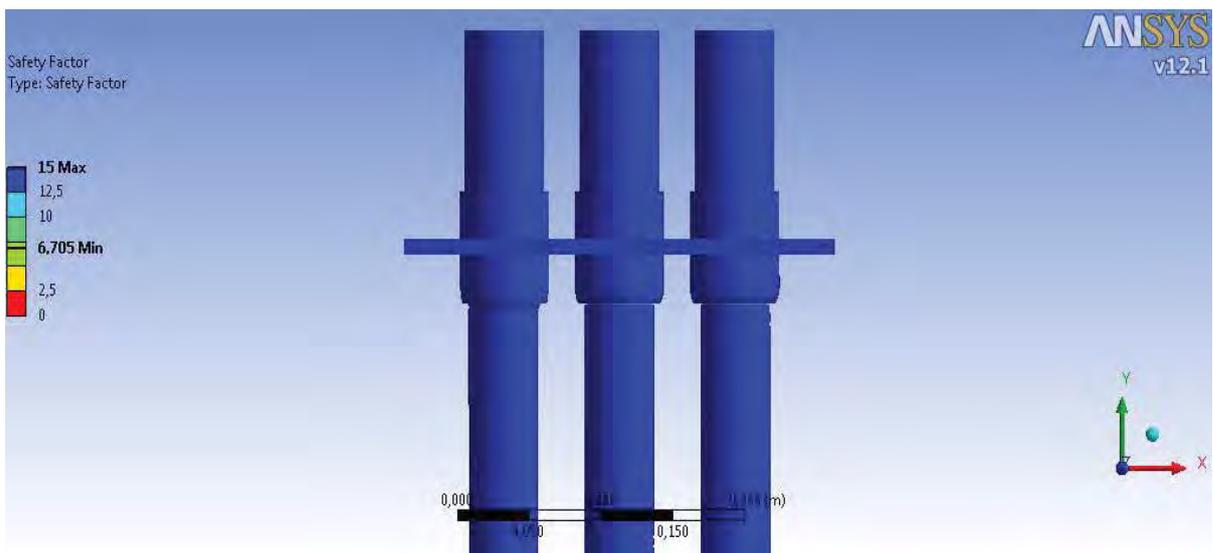


Figura 17 – Fator de segurança.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de tensão de ruptura e tensão de escoamento do tubo de aço carbono ASTM A210, o grau A-1 é o utilizado nos painéis do superaquecedor em questão.

Tabela 6 – Tensão de ruptura e de escoamento do aço ASTM A210.

| | Limite de ruptura (MPa) | Limite de escoamento (MPa) |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Grau A-1 | 415 | 255 |
| Grau C | 485 | 275 |

Nota-se que a tensão máxima obtida foi bem menor que a tensão de escoamento do material, ou seja, a peça não irá romper. O menor fator de segurança encontrado foi de 6,7. Lembrando que neste caso foram considerados apenas os esforços mecânicos devido à ação dos sopradores de fuligem. Para condições normais de operação não foram obtidos dados suficientes para análise completa de uma possível falha. Em um caso real, esforços térmicos também influenciam para a falha por fadiga, pois o vapor entra no coletor de entrada a 260-280 °C e sai pelo coletor de saída a 370-390 °C. Em condições normais, os painéis do SH sofrerão ciclos completos de aquecimento e resfriamento de três a quatro vezes por ano¹¹. No modelamento as temperaturas dos tubos também foram desprezadas.

Em uma situação real de operação, falhas ocorreram em soldas dos tubos do SH, como demonstradas nas Figuras 18, 19 e 20. A falha ocorreu em uma solda de filete para efeito de vedação apenas. O fato de o combustível estar fora da especificação influenciou nesta falha. Na Figura 20, estão destacadas as marcas de praia, que indicam que a falha ocorreu por fadiga. Neste caso, não foram fornecidas mais informações da falha, como relatórios e observações, e por isso este caso em específico não foi modelado. Porém pelo modelamento notamos uma concentração de tensão na solda, que em conjunto com outros mecanismos de tensões podem ter acarretado a trinca deste material.

¹¹ Informação fornecida pelo Eng.º Ronaldo F. Faria, via e-mail, em novembro 2011.



Figura 18 – Falha por fadiga.



Figura 19 – Tubo seccionado para análise.

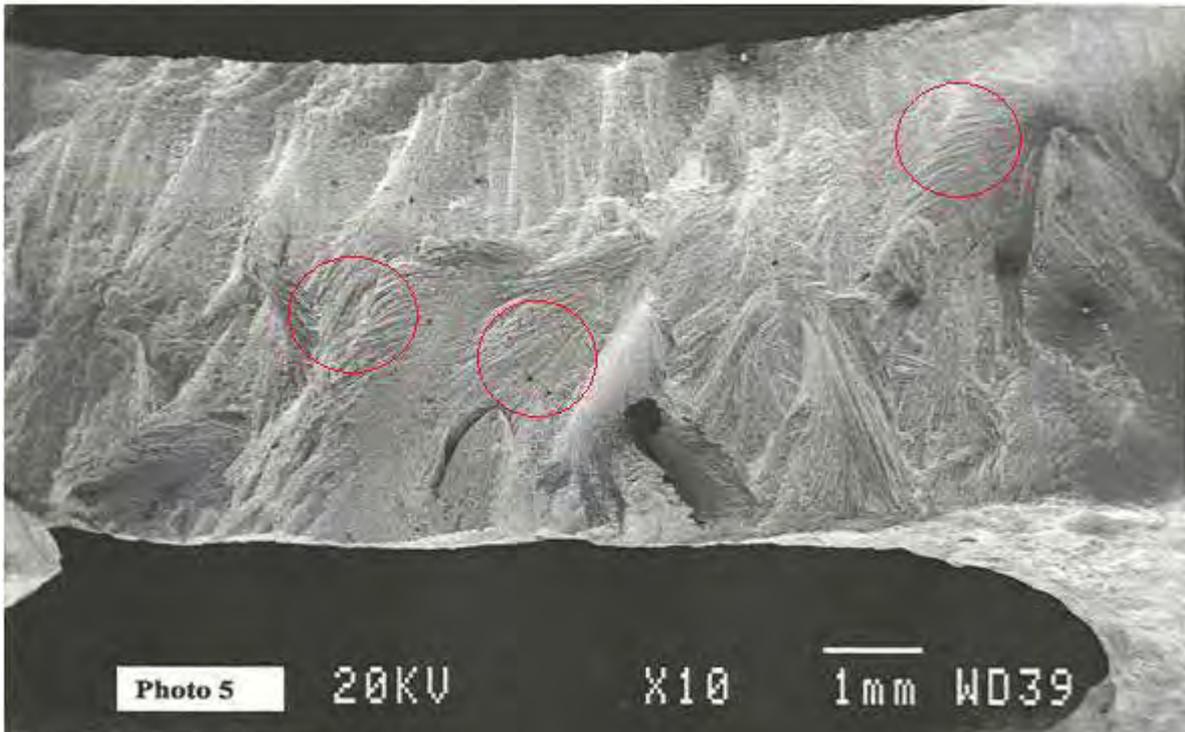


Figura 20 – Análise da micrografia do material.

Para prevenir as falhas nas caldeiras de recuperação, normas técnicas e legais presentes no Brasil decretam que caldeiras de qualquer tipo sejam inspecionadas regularmente. O guia para inspeção periódica de caldeiras de recuperação elaborado pelo Comitê de Segurança em Caldeiras de Recuperação do Brasil (CSCRB, 2004) é um excelente documento para entendimento do assunto.

As inspeções são importantes, pois definem os procedimentos a serem executados durante as manutenções preventivas nas paradas programadas.

É importante sempre manter o histórico de cada inspeção para possíveis conferências no futuro. As inspeções devem ser realizadas por profissional devidamente habilitado e são constituídas de exames internos, externos além de testes complementares. Os exames dependem basicamente da experiência e conhecimento do profissional indicado. Em certos casos é necessário um aprofundamento em exames internos enquanto em outros casos, os exames externos podem oferecer informações de grande valia ao inspetor. Relatórios decorrentes destas inspeções são exigidos com resultados convincentes sobre os exames efetuados com recomendações de como proceder em cada caso.

No exame interno, a inspeção visual é o início para verificarem-se possíveis pontos de corrosão, trincas, erosão, rupturas, deformações, etc. Alguns elementos como aletas, chapas

de vedação, espaçadores, suportes e outros elementos soldados devem ser minuciosamente examinados quanto a possíveis trincas.

Métodos eficazes de prevenção em caldeiras de recuperação são os Ensaio Não Destrutivos (END). Segundo a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI), os END são métodos utilizados para inspecionar materiais ou equipamentos sem danificá-los. Contribuem para garantir a qualidade, reduzir os custos e elevar a confiabilidade das inspeções. Os ensaios mais usuais são: líquido penetrante, ensaio visual, ultra-som, estanqueidade, correntes parasitas, partículas magnéticas e radiografia.

De acordo com o CSCRB (2004), as medições periódicas por ultra-som das espessuras dos tubos são fundamentais para identificar desgastes anormais e para confirmação da PMTA da unidade. Para os tubos do SH, são recomendados medições prioritariamente em partes curvas (regiões inferiores e superiores do painel) e nos trechos retos, nas linhas de centro dos sopradores de fuligem. O ensaio por ultra-som é utilizado, principalmente, para inspeção em soldas, avaliação dos efeitos de corrosão e para medir espessuras.

O ensaio visual é simples e de baixo custo. Requer boa visão, boas condições de iluminação e conhecimento em detectar defeitos. Caso necessário, alguns equipamentos podem ser utilizados, como micro câmeras, lupas de pequeno aumento, etc.

O ensaio de líquido penetrante é usado para detecção de descontinuidades superficiais, como trincas e pequenas fissuras. É realizado pela aplicação de um líquido penetrante (corante) na superfície, que penetra nas descontinuidades. Após certo período, retira-se o excesso, aplica-se o revelador e verificam-se as descontinuidades apontadas pelo líquido. Pode ser utilizado para detecção de defeitos nos espaçadores do SH.

Para casos em que a falha já ocorreu, seja ela a ruptura total ou apenas trinca, é necessária a remoção dos tubos. O procedimento conhecido como *dutchman* é a retirada de parte da tubulação com defeito e substituição por uma seção de tubo sem defeito, que são soldados e em seguida verifica-se se o procedimento (retirada e substituição) foi realizado dentro das normas para, então, liberar a operação da caldeira.

6 CONCLUSÃO

Por serem de vital importância em fábricas de papel e celulose, falhas nas caldeiras de recuperação são muito prejudiciais. Estudos para prevenção de falhas são de extrema valia para evitarem-se paradas não programadas. Em alguns casos, não é necessário uma parada e reparos de emergência são realizados provisoriamente para manter a unidade em operação e somente nas paradas programadas, a solução definitiva é realizada.

Em condições normais de operação, a CR está sujeita a falhas por fadiga em soldas, tubos e suportes. Uma vez por ano há uma parada programada para manutenção nas CR. Nestas paradas, inspeções de todos os tipos são realizadas visando a detecção de defeitos nestes equipamentos. Caso sejam encontradas imperfeições, métodos como substituição do material com defeito ou soldas refeitas são utilizadas como solução do problema.

No estudo realizado não ocorreu a falha nos tubos do SH, pois somente foram consideradas os esforços mecânicos. Em casos reais, os tubos estão submetidos a esforços térmicos também, que combinados com os esforços mecânicos podem resultar em falhas nos pontos de solda modelados.

As experiências mostram que uma avaliação abrangente é a maneira mais eficiente para se determinar a causa raiz da falha. Falhas em tubos são, normalmente, sintomas de outros problemas. Uma investigação completa dos aspectos da operação da caldeira que levaram à falha deve ser realizada para compreender plenamente a sua causa. Neste sentido, estudos de campo podem ser de extrema importância para isolar e identificar a causa raiz da falha.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Devido à indisponibilidade de dados, recomenda-se para trabalhos futuros, um estudo de caso completo de uma falha por fadiga no superaquecedor. Verificar os esforços térmicos e mecânicos responsáveis pela falha e modelar no *Ansys Workbench*.

Se possível, analisar dois casos reais para compará-los quanto à tensão de ruptura.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, Prof. Carlos Roberto. **Apostila sobre caldeiras**. Universidade de Caxias do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica: [s.n.] 2002.

ASPGREN, Peter; THORSLUND, F. E. G.; EDGREN, Carl-Walter. **Experiências em falhas nos superaquecedores de caldeiras de recuperação**. In: ABTCP RECOVERY & UTILITY SEMINAR, 12., 2003, São Paulo: [s.n.], 2003. p. 1-29.

AZEVEDO, Eng.º Domingos F. O. **Apostila de Treinamento em Elementos Finitos com ANSYS**. [S.l.: s.n.], [entre 2003 e 2011].

BRAIN, Marshall. **HowStuffWorks – Caldeiras**. Disponível em:<<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor2.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

BRUNO, F. **Superheater corrosion in kraft recovery boilers**. Stiftelsen for Värmeteknisk Forskning, Stocholm. 129p., 1997.

CARREIRO, Milton Roberto de Mattos. **Análise Exergética e Ambiental do Processamento do Licor Negro Gerado em Fábricas de Celulose e Papel**, 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Itajubá, Itajubá, 2009.

DA ROSA, Edison. **Análise de resistência mecânica**. Santa Catarina: Grante, 2002. 399 p.

DALL'ORTO, Gibson. **Geradores de vapor**. CEFETES – Unidade de São Mateus. [S.l.: s.n.], 2008.

DE ALMEIDA, Gustavo Matheus. **Deteção de situações anormais em caldeiras de recuperação química**, 2006. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DE ALMEIDA, Jerfson Pereira. **Análise de Falha e Risco Associados aos Dutos de Gás Natural à Alta Pressão**, 2008. 107 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

DE BRAGA, Rubem Manoel. **Medição da camada de óxidos em tubos de superaquecedores de caldeiras aquatubulares por ultrassom**, 2009. 98 f. Tese (Doutorado

em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HAMAGUCHI, M.; VAKKILAINEN, E. Corrosão em tubos de superaquecedor de caldeiras de recuperação: um desafio. **O Papel**. [S.l.], v. 71, n. 6, p. 57-71, jun. 2010.

LABORATÓRIO DE PESQUISA EM CORROSÃO. **Corrosão sob fadiga**. [S.l.: s.n.], 2010.

LAGEMANN, V., e SALLES, M. **Inspeção em Caldeiras**. São Paulo, São Paulo, Brasil: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. 2006.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. de A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2008.

LIMA, A. C. et al. **Trabalho de Processos Unitários da Indústria Química I**; UFRRJ; Novembro, 1996.

LIMA, Ério et al. **NR-13 (Caldeiras e vasos de pressão)**. Curso e Colégio Unificado – Curso Técnico em Saúde e Medicina do Trabalho, 2011.

MILFONT, Prof. Gilfran. **Elementos de máquinas**. Notas de aula. [S.l.: s.n.], 2011.

MINISTÉRIO DO TRABALHO - Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho, **Norma Regulamentadora nº 13**. Caldeiras e Vasos de Pressão, D.O.U, Brasília, 1995.

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES LTD. **Mitsubishi chemical recovery boiler**. Japan: [s.n.], [20--]. 18 p.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 2ª edição. São Paulo: Bookman, 2004.

PAOLIELLO, Flávio A. Guidelines for integrity evaluation and remaining life assessment of recovery boilers – CENIBRA's experience. **O Papel**. [S.l.: s.n.], 2004.

PAULINO, J. C. **Caldeiras - Vasos sob pressão**. Engenharia de Segurança do Trabalho, p. 1-6, 2004.

PEDRO, Jonas. **Caldeiras de Recuperação do Brasil Uma visão geral: Acidentes e Incidentes.** In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO, 18., 2011, [S.l., s.n.], 2011.

PORT, R. D.; HERRO, H. M. **The Nalco guide to boiler failure analysis.** [S.l.]: McGraw-Hill, Inc. 1991. 316 p.

SALMENOJA, Dr. Keijo. **Superheater Corrosion In Modern Recovery Boilers.** Finland: [s.n.], 2004.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKLE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica.** São Paulo: Bookman, 2005.

SOUZA, André H. C. Botto e. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose.** São Paulo: CETESB, 2008. 49 p.

VAKKILAINEN, Esa. **Pulp Mill Energy and Recovery Processes.** Helsinki: [s.n.], 2007.

WINCK JUNIOR, João Carlos. **Avaliação dos danos por fluência no superaquecedor da caldeira de CO da REFAP S/A segundo API STD 530,** 2009. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.