



**XX SNPTEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO – II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**PROGRAMA DE CONTROLE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE CALDEIRAS**

**Mauro Duque de Araujo(\*)  
Araujo Engenharia**

**Carlos Silvério  
Araujo Engenharia**

**Arilson Rodrigues da Silva  
Araujo Engenharia**

**RESUMO**

As caldeiras, utilizadas para geração de energia elétrica necessitam de alta confiabilidade e controle das necessidades de manutenção, pois dependendo da extensão dos danos esta atividade pode demandar meses de trabalho e elevados custos. Sendo assim, se torna fundamental o controle do estado físico de seu componentes, tais como tubulões, superaquecedores, evaporadores, economizadores e dessuperaquecedores. Este controle é executado pelo monitoramento de variáveis de processo ao longo do tempo, tais como temperaturas, pressões e variáveis de controle da qualidade da água; e da execução de exames físicos aplicados diretamente aos componentes pressurizados durante as inspeções. Infelizmente esta não é uma atividade muito simples, pois existem diversos componentes que possuem vários mecanismos de deterioração, cuja "caracterização do seu estado físico" é difícil por motivos que incluem desde a extensão das áreas de interesse para inspeção, dificuldades de acesso e limitações das técnicas, de inspeção e ensaios não destrutivos existentes. Adiciona-se a isto a conseqüente dificuldade do gerenciamento das atividades necessárias para o controle do estado físico dos diversos componentes em cada inspeção, devido ao grande número de exames, procedimentos e locais a serem inspecionados. Sem um gerenciamento efetivo, ocorre que atividades fundamentais podem deixar de ser executadas e outras não necessárias o sejam; este problema é sentido quando se evidenciam desgastes ou falhas e faltam os dados necessários para a execução de análises de integridade e estimativa de vida remanescente.

É apresentada uma metodologia de análise e programação de exames destrutivos e não destrutivos para controle da deterioração de caldeiras, que tem por objetivo o "controle da condição física" destes equipamentos e a conseqüente maximização de sua confiabilidade operacional e minimização dos custos de manutenção. O gerenciamento das atividades é executado através de um programa de computador especialmente desenvolvido para este fim, CVR-RBI, o qual utiliza os conceitos de "Inspeção Baseada em Risco", e se baseia na estimativa de vida residual e na determinação das conseqüências das falhas de cada um dos componentes que se deseja controlar o estado físico, para cada um dos mecanismos de deterioração considerados. O "Programa de Inspeção" considera a aplicação de tecnologias especiais de ensaios não destrutivos e procedimentos desenvolvidos especificamente para caldeiras. O sucesso dos "Planos de Inspeção" de cada um dos componentes depende em grande parte da aplicação destas tecnologias, pois é necessário "caracterizar seus estados físicos", o que representa grandes dificuldades práticas quando são utilizadas apenas as técnicas convencionais de ensaios não destrutivos. Destacam-se a aplicação de emissão acústica, técnicas de correntes parasitas, utilização de cabeçotes de ultra-som tipo EMAT em varreduras AB-scan, medição de espessura das camadas de magnetita de tubos de troca térmica por ultra-som, inspeção de tubos por IRIS-CSCAN e ensaios acelerados de fluência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Caldeiras, Ensaios não destrutivos, Avaliação de Integridade, Análise de Falhas, Inspeção de Caldeiras

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O Programa é implementado através da execução das seguintes etapas:

- Levantamento dos dados de projeto e histórico de operação, inspeção e manutenção da caldeira e de seus componentes. Nesta fase são também executados cálculos preliminares que serão utilizados nas próximas etapas e desenhos apropriados para a compreensão do funcionamento dos componentes e para registro dos resultados.

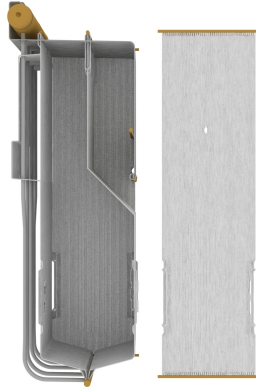


FIGURA 1 – Desenho de uma das paredes de tubos que compõe a fornalha de uma caldeira

- Identificação dos mecanismos de deterioração, danos associados e locais de provável ocorrência para cada uma dos componentes;
- Elaboração do “Plano Inicial de Inspeção” com base na primeira avaliação do estado físico de cada um dos componentes e uma primeira estimativa de vida residual com base nos dados levantados. O Plano Inicial de Inspeção, detalha os ensaios a serem aplicados e a extensão das regiões a serem examinadas para a obtenção dos dados necessários para a avaliação de integridade e estimativa de vida residual precisa para cada mecanismo de deterioração de cada um dos componentes;
- Aplicação dos exames e testes programados. Esta fase se inicia com a inspeção visual da caldeira por engenheiros e técnicos experientes e plenamente envolvidos e cientes do diagnóstico executado, do programa e dos planos de inspeção, pois os resultados obtidos durante a execução dos exames devem ser analisados criticamente em relação aos resultados esperados; indicações “atípicas” podem significar processos de deterioração não previstos inicialmente, assim como falhas na previsão inicial. O exemplo abaixo mostra perda de espessura significativa dos tubos da zona de convecção de uma caldeira decorrente de um processo de corrosão acelerada por fluxo atípico observado durante uma inspeção, o que desencadeou a “análise da causa do dano” e a revisão do plano de inspeção.

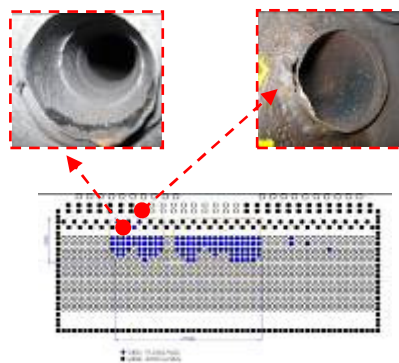


FIGURA 2 – Perda de espessura interna em tubos da zona de convecção

- Avaliação do estado físico e estimativa de vida residual. O valor atual, que caracteriza o estado físico de cada componente em relação a cada um dos mecanismos de deterioração considerados é comparado ao valor nominal e ao mínimo determinado por cálculos, e a vida residual é estimada com base na taxa de evolução esperada, que por sua vez é determinada com base na taxa observada e ponderada com análise crítica da

literatura técnica especializada e com o historico de inspeção, manutenção e operação do equipamento e de similares.

- O Programa de Inspeção contém as datas previstas para execução dos exames, determinada à partir da vida residual estimada e da consequencia da falha, por uma metodologia de Inspeção Baseada em Risco (IBR);

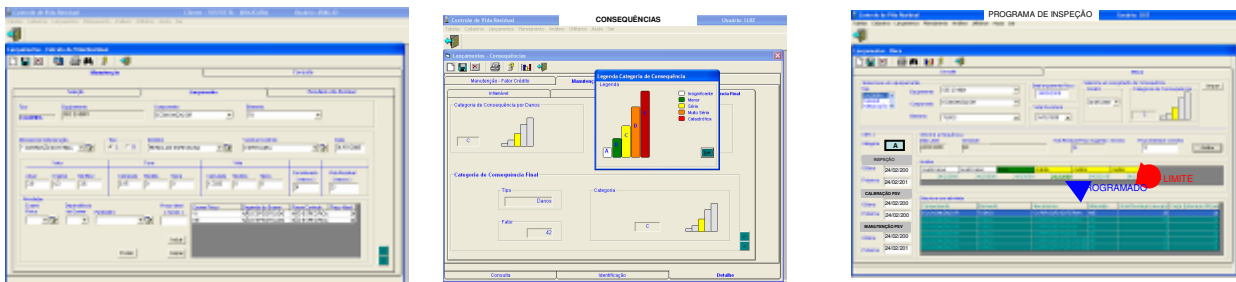


FIGURA 3 – Calculo de vida residual, analise de consequencias e programação RBI

- Os planos de inspeção são concebidos com detalhes de procedimentos técnicos dos exames, indicação dos locais a serem examinados e a extensão destes exames.

## 2.0 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados da aplicação do Programa dependem principalmente do conhecimento da equipe sobre os mecanismos de deterioração de caldeiras, da influencia das variáveis operacionais nas possibilidades de ocorrência e nas taxas de evolução dos danos associados a cada mecanismo de deterioração em cada componente, e na experiencia em inspeção e manutenção de caldeiras. Uma vez feita a analise dos dados e identificados os mecanismos de deterioração corretamente, é necessario determinar as tecnicas e procedimentos de ensaios não destrutivos indicados para a obtenção dos dados predeterminados, necessarios para a caracterização do estado fisico do equipamento.

O atual estagio de desenvolvimento dos ensaios não destrutivos (ENDS) permite a obtenção de resultados precisos sobre o estado fisico e grau de acumulo de danos dos componentes de caldeiras, o que frequentemente não é praticavel utilizando-se tecnicas tradicionais de END. O sucesso do programa também depende em grande medida da aplicação destas tecnicas pois de outra forma não é possivel gerar os dados necessarios para avaliar a integridade dos componentes e estimar a vida residual.

A tecnica de medição de espessuras de tubos por varredura completa atraves de ultra-som A/B-scan utilizando cabeçotes com acoplamento eletromagnetico-acustico (EMAT), dispensa a remoção do oxido externo para medir a espessura. O acoplamento é facil, varredura rapida e a possibilidade de fixação eletromagnetica do cabeçote, permitem a identificação de áreas localizadas corroídas, como o que ocorre na deterioração decorrente de corrosão sob depositos em tubos de fornalha e a identificação das regiões de menor espessura dos tubos de superaquecedores. Este último produz um resultado unico pois observa-se que muitos insucessos na avaliação de integridade e previsão de vida residual de tubos de superaquecedores por fluencia, decorre da utilização de medidas de espessura pouco representativas do estado fisico dos tubos devido a utilização de tecnicas tradicionais de ultra-som com medidas pontuais.

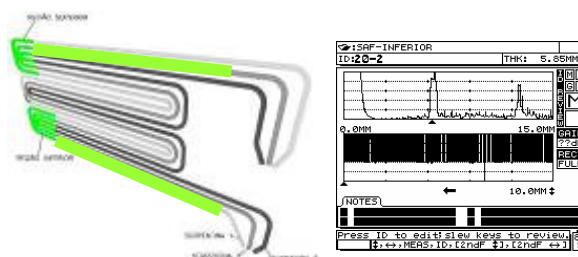


FIGURA 4 – Varredura de espessuras em tubos de superaquecedores por AB-scan EMAT.

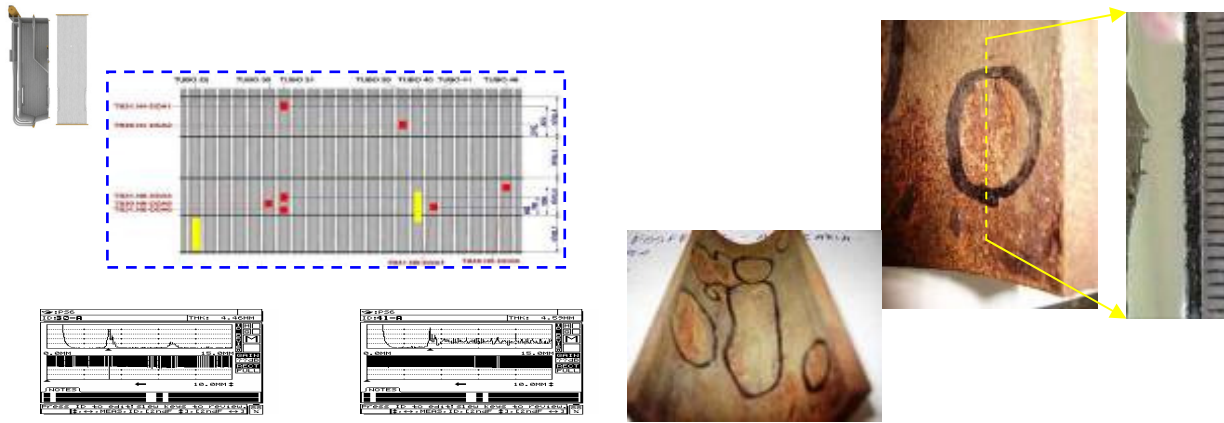


FIGURA 5 – Identificação de corrosão sob depositos em tubos de fornalha por AB-scan EMAT

A medição da espessura da camada interna de magnetita por ultra-som é outra tecnica fundamental para a previsão de vida em fluencia de superaquecedores. É possível estimar a temperatura media de operação local do tubo à partir da espessura da camada de magnetita medida no ponto. Este dado obtido nos pontos indicados pela varredura de espessuras por AB-scan EMAT, permite a identificação do locais de menor vida em fluencia, através de calculos mais precisos, assim como a indicação de locais apropriados para remoção de amostras para execução de ensaios acelerados de fluencia.

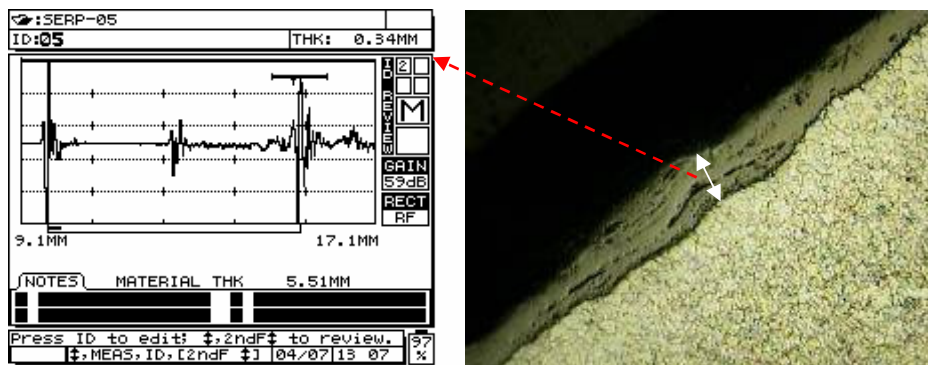


FIGURA 6 – Medição da espessura da camada de magnetita por ultra-som

Tecnicas de correntes parasitas, aplicadas com procedimentos, aparelhos e sondas especificas permitem a pesquisa da presença de trincas superficiais em grandes áreas em coletores de superaquecedores, tubos de fornalhas e superaquecedores e tubulões de caldeiras, sem a necessidade de extensas preparações de superfície e apoio para inspeção.

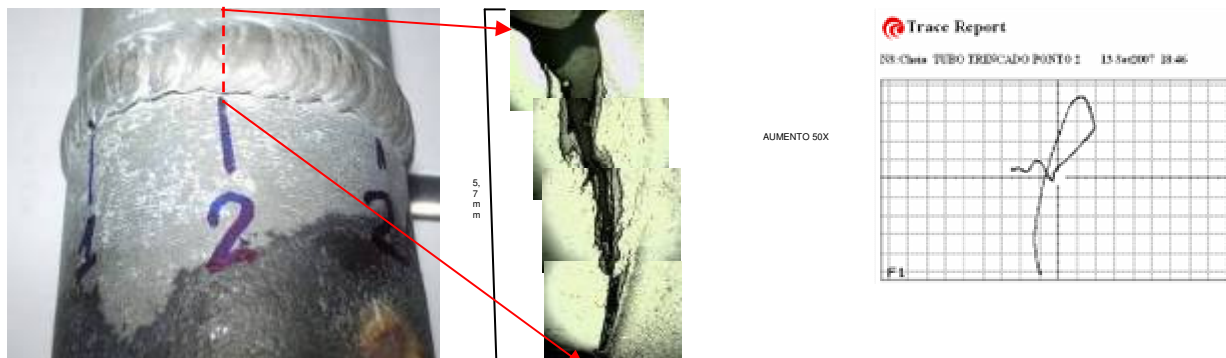


FIGURA 7 – Detecção e estimativa de profundidade de trinca de fadiga termica em tubo de superaquecedor por correntes parasitas

O monitoramento por emissão acustica de tubulões, coletores de superaquecedores e tubulações de vapor superaquecido em determinadas condições operacionais permite a identificação da presença e o acompanhamento

da evolução de trincas de fadiga termica e fadiga-fluencia em áreas extensas e de difícil acesso. A aplicação da técnica exige conhecimentos precisos do comportamento mecânico das estruturas e de descontinuidades potencialmente existentes nos campos de tensões existentes no momento da inspeção.

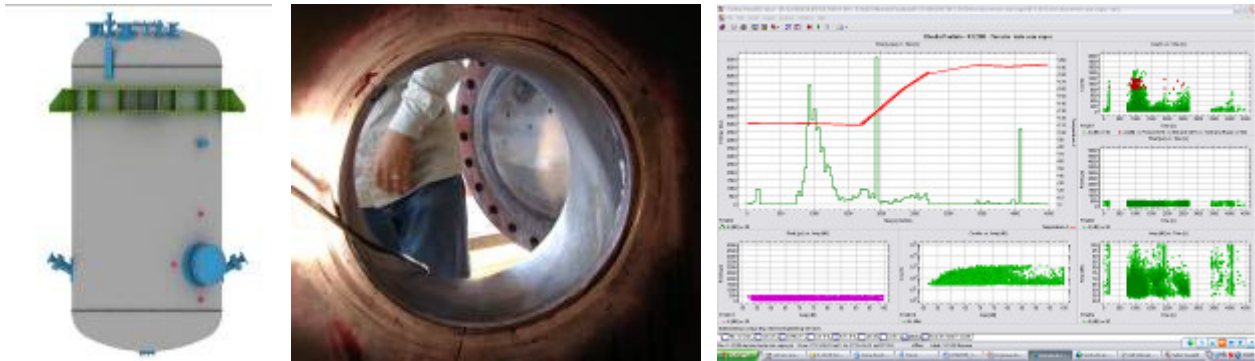


FIGURA 8 – Trincas em um bocal detectadas durante o aquecimento de um vaso de pressão

A pesquisas de perda de espessura em tubos das zonas de convecção por técnicas eletromagnéticas e ultrassônicas tais como Campo Remoto, MFL e IRIS, permitem a identificação e dimensionamento de áreas com perda de espessura. A novidade é a aplicação conjunta das técnicas dependendo da situação de limpeza interna dos tubos, locais de interesse, e disponibilidade de tempo para inspeção. A utilização de tecnologia atualizada permite a obtenção de resultados precisos.

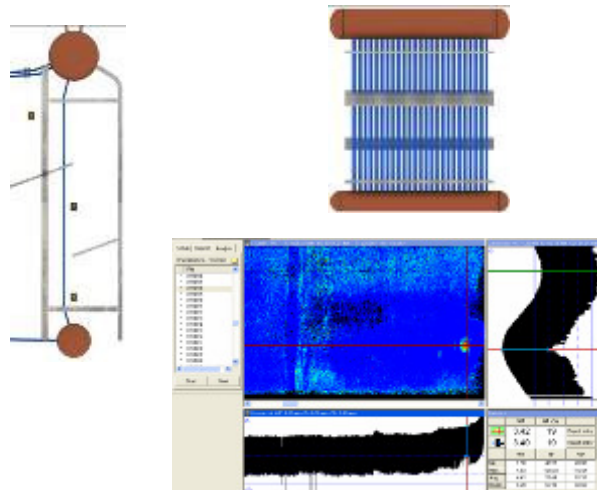


FIGURA 9 – Perda de espessura localizada em tubo da zona de convecção de uma caldeira. Foi identificada e dimensionada por IRIS.

A aplicação de técnicas metalográficas destrutivas e não destrutivas, óticas e eletrônicas, é fundamental na identificação de alguns danos microscópicos e na identificação da causa de danos encontrados durante a inspeção, e também na análise da causa de falhas ocorridas. A interpretação dos resultados por equipe capacitada e suficientemente experiente, de aspectos microscópicos e microestruturais aliados a resultados de análises químicas de materiais, resíduos e produtos de corrosão por técnicas tais como DRX, FRX, EDS, cálculos mecânicos, análises de tensões, cálculos de fratura, dados históricos de inspeção, manutenção e operação, e resultados de ensaios não destrutivos permitem diagnósticos precisos sobre a causa dos danos e falhas, assim como estimativas de sua cinética de evolução. Estas avaliações devem ser executadas permanentemente, principalmente quando são detectados danos insipientes, pois observa-se frequentemente situações “crônicas” de falhas e a execução de reparos extensos e dispendiosos, decorrentes de diagnósticos incorretos.

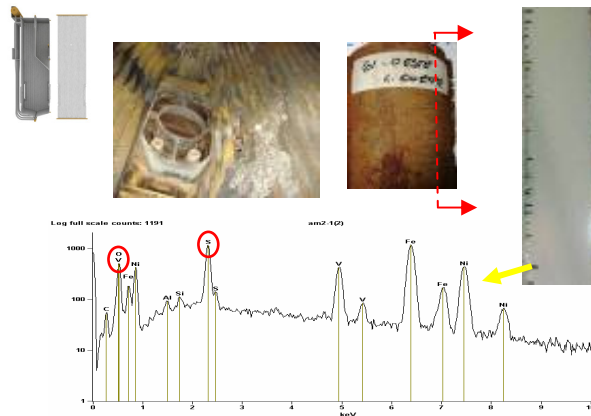


FIGURA 10 – Danos causados por corrosão fadiga em tubo de fornalha. O diagnóstico utilizou técnicas de correntes parasitas e MEV-EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura).

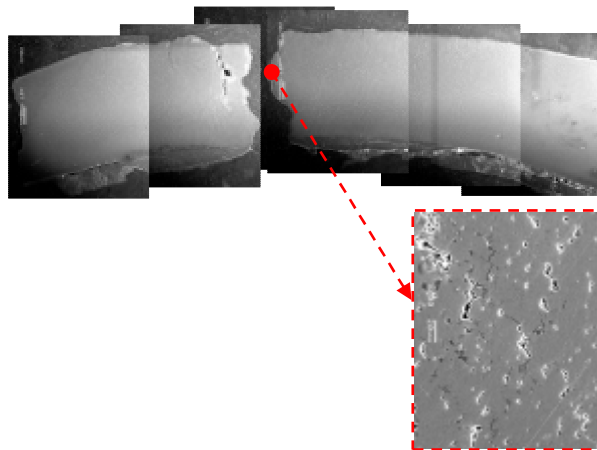


FIGURA 11 – Ruptura por fluência de tubo para superaquecedor. Imagem dos vazios no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

Tendo sido obtidos os dados através da aplicação de técnicas de END corretas, produzidos pela execução do programa e dos planos de inspeção elaborados, são avaliados os resultados e geradas as recomendações de reparos, melhorias e o novo “Programa de Inspeção”, que contém as datas indicadas para execução dos ENDs e das atividades necessárias para controle do estado físico dos componentes do equipamento. Esta tarefa, porém, não é simples devido ao grande volume de dados e análises necessárias, demanda a utilização de programas de computador específicos para este fim, e também para cálculos específicos.

O último aspecto sobre o controle do estado físico de caldeiras que é ressaltado, é o comportamento das pessoas diante do cumprimento do Programa quando “está tudo bem”, ou seja, não são detectados danos importantes, não foram necessários reparos extensos e o equipamento não apresenta um grau de danos acumulados importante. Este cenário leva as pessoas a questionar a importância de aplicar ensaios complexos em áreas extensas, a tendência é se perguntar “será que não é exagero?” Este momento é crítico, quando se abandona o programa preventivo normalmente elimina-se a capacidade de identificar os danos ainda no início e cria-se a situação potencial de “encontrar problemas graves” no futuro.

### 3.0 - CONCLUSÃO

O Programa de Controle da Integridade Física de Caldeiras, agrega confiabilidade e segurança operacional às caldeiras. Para ser implementado depende de equipes técnicas capacitadas e experientes, depende da disponibilidade e aplicação dos ensaios específicos, e principalmente da determinação de manter o cumprimento do Programa e dos planos de inspeção.

#### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) "Babcock & Wilcox". 1992. Steam, its generation and use;
- (2) Bernstein, M. D., Yoder, L. W., 1998. Power Boilers – A guide to section I of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code –Asme press, New York;
- (3) Port, R. D., Herro, H. M., 1991. The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis;
- (4) French, D. N., 1993. Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers. JOHN WILEY & SONS, INC;
- (5) Carroll, D. E., Carroll, D. E. Jr., 1997. "The ASME CODE SIMPLIFIED – POWER BOILERS". Mc Graw Hill;