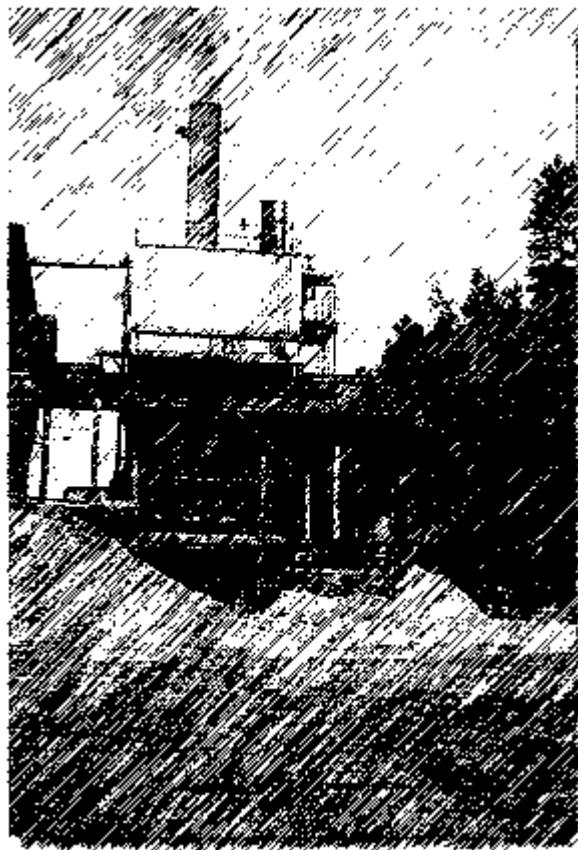


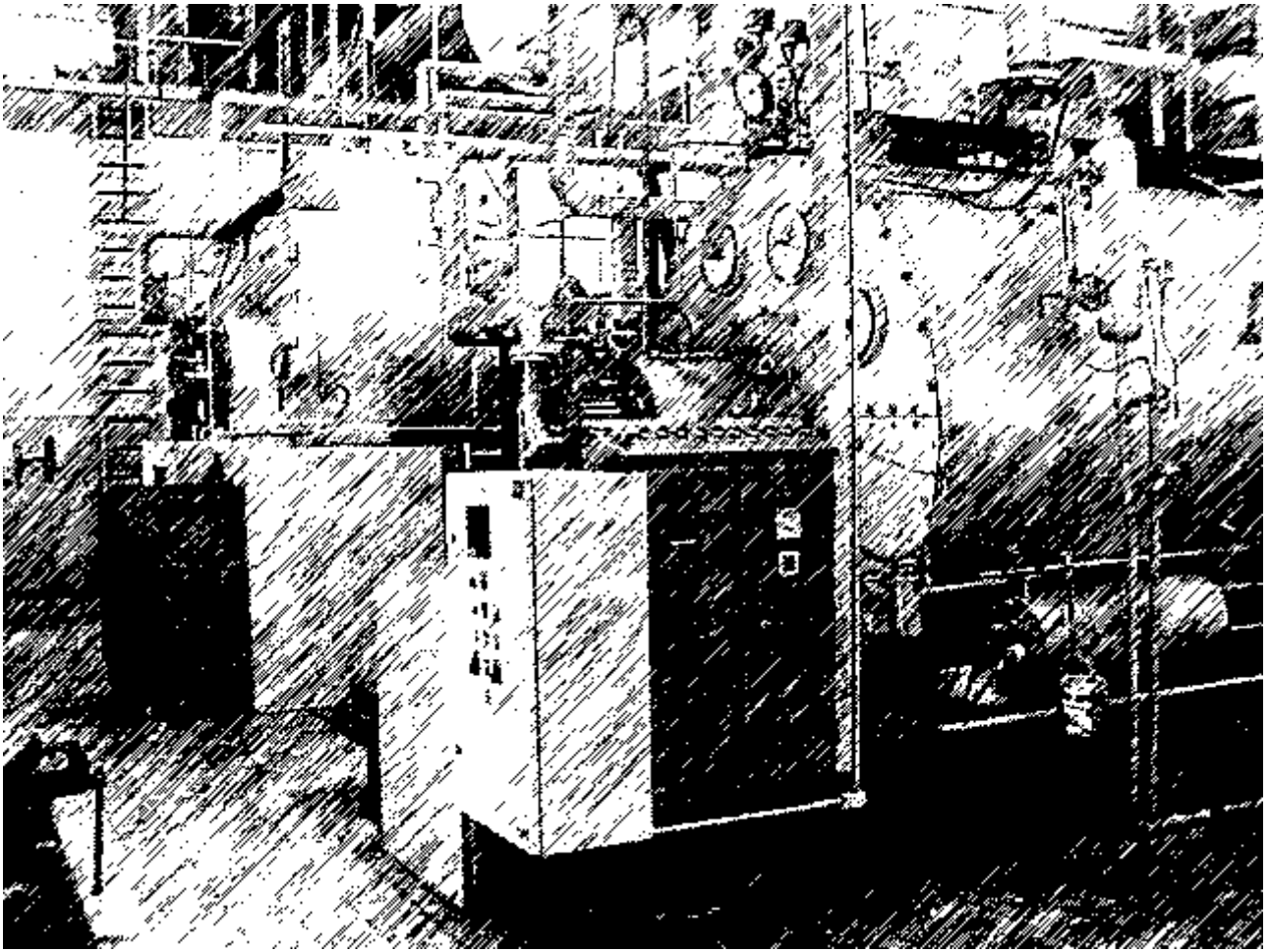
**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DISCIPLINA DE MÁQUINAS TÉRMICAS
APOSTILA SOBRE CALDEIRAS**



Prof. Carlos Roberto Altafini

Semestre letivo 02/2



As caldeiras representam um grande gasto de capital. Sua operação segura e eficaz é freqüentemente crítica para garantir lucratividade. Portanto, é essencial o treinamento e o desenvolvimento do pessoal responsável por esses equipamentos. Falhas nas práticas bem estabelecidas de funcionamento das caldeiras podem ser catastróficas.

ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS ÀS CALDEIRAS

Caldeira é o nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, cuja aplicação tem sido ampla no meio industrial e também na geração de energia elétrica nas chamadas centrais termelétricas. Portanto, as atividades que necessitam de vapor para o seu funcionamento, em particular, vapor de água pela sua abundância, têm como componente essencial para sua geração, a caldeira. Esse equipamento, por operar com pressões acima da pressão atmosférica, sendo na grande parte das aplicações industriais até quase 20 vezes maior e nas aplicações para a produção de energia elétrica de 60 a 100 vezes maior, podendo alcançar valores de até 250 vezes mais, constitui um risco eminente na sua operação. Vários são os aspectos relacionados ao funcionamento das caldeiras, os quais serão tratados nesta apostila: Principais conceitos da Termodinâmica envolvidos na operação de Caldeiras; Tipos e classificação das Caldeiras e seus acessórios principais; Riscos de explosões; Tratamento da água de Caldeiras e Norma Regulamentadora N° 13.

1. PRINCIPAIS CONCEITOS DA TERMODINÂMICA RELACIONADOS À OPERAÇÃO DE CALDEIRAS

- De modo geral, as substâncias podem existir em diferentes fases, que são a fase sólida, fase líquida e a fase gasosa. Assim é definido fase uma porção homogênea de matéria.

Relacionado à fase gasosa da substância, utiliza-se com frequência o nome **vapor** para essa fase quando a substância está próxima de um estado em que parte da mesma pode condensar-se. O comportamento **pressão**, **volume** e **temperatura**, que para os chamados Gases Perfeitos é expresso pela equação $pv = RT$, para o vapor, que é considerado um gás real, essa equação não representa muito bem comportamento mencionado. As equações de estado utilizadas para expressar o comportamento dos gases reais são em geral muito complexas, inviabilizando de forma rápida os seus usos. Para tanto, utiliza-se na maioria das aplicações em engenharia, os diagramas e as tabelas termodinâmicas para as diferentes fases das substâncias. Nesses recursos, especialmente para as fases líquida e gasosa (vapor), são apresentadas os diversos valores das propriedades termodinâmicas: além das três identificadas acima, **título**, **entalpia** e **entropia**.

Nas figuras 1, 2 e 3 são apresentados alguns diagramas para a água, nos quais são identificados os diversos estados que essa substância pode assumir. Esses diagramas,

especialmente aquele de Mollier (figura 3), por ser o mais completo, são muito úteis para apresentar as propriedades termodinâmicas e para auxiliar na visualização dos diversos processos pelos quais uma substância pode passar.

É importante destacar aqui que o **vapor d'água** é utilizado como agente transportador de energia em diversos processos industriais e nas centrais termelétricas. Isso se deve às vantagens a seguir:

- A água é a substância mais abundante sobre a Terra.
- Possui grande conteúdo energético (entálpico).
- Pouco corrosivo.
- Não é tóxico.
- Não é inflamável nem explosivo.

Com base nos diagramas apresentados, algumas considerações são feitas:

- A pressão identificada nos diagramas é a **pressão absoluta**, a qual é medida em relação a um referencial fixo, dito absoluto. Desse modo, uma pressão medida acima da **pressão atmosférica** local, que é variável (altura em relação nível do mar, clima, etc.), possui um valor positivo em relação a essa e é chamada de **pressão manométrica**. Em relação ao referencial absoluto, essa pressão é também positiva e dita de **pressão absoluta** e é igual a soma da **pressão atmosférica** com a **pressão manométrica** ($p_{abs}=p_{atm}+p_{man}$).
- O diagrama $p \times T$ (vide figura 1) relaciona a pressão de saturação (pressão em que se inicia a vaporização a uma dada temperatura) com a temperatura de saturação (temperatura em que se inicia a vaporização a uma dada pressão). Ex.: a p_{sat} (p_{abs})=10 bar ($p_{man}\cong 9\text{bar}$) a temperatura em que a água começa a vaporizar é $\approx 180^\circ\text{C}$ (T_{sat}). As coordenadas (p_{sat} , T_{sat}) definem a **curva de pressão de vapor**, que adquire a forma apresentada nos diagramas $T \times h$ (figura 2) e $h \times s$ (figura 3).
- Nos diagramas são identificados os estados de **líquido comprimido**, de **líquido saturado**, de **saturação líquido-vapor**, de **vapor saturado** e de **vapor superaquecido**. Identifica-se ainda nos diagramas $T \times h$ e $h \times s$, o ponto crítico da água definido por $p=22,09\text{MPa}$ e $T=374,14^\circ\text{C}$, a partir da qual não se identifica mais a presença da fase líquida e vapor existindo em equilíbrio.
- Para o estado de mistura líquido-vapor é comum definir-se o **título** (x) do vapor, que é a fração em massa (ou percentual em massa) do vapor em relação à massa total da mistura. Isso significa dizer, por exemplo, se o vapor que sai de uma

caldeira tem uma qualidade (título) de 97%, significa que 3% é umidade (água líquida).

- Ao iniciar-se a produção de vapor em uma caldeira, primeiramente todo o calor fornecido a água (pela queima do combustível e pelos gases de combustão) serve para aumentar sua temperatura. Ao calor associado à mudança de temperatura da água dá-se o nome de **calor sensível**. Em uma caldeira, como em uma panela de pressão de cozinha, por ser um recipiente rígido, a medida que o calor é fornecido à água, a pressão aumenta junto com a temperatura até que aconteça a abertura da válvula de segurança. Na temperatura de saturação relativa à pressão de abertura da válvula de segurança (pressão de trabalho da caldeira) inicia-se a geração de vapor com alta intensidade e todo calor fornecido à água é para sua mudança de fase, que acontece a pressão e temperatura constantes. Ao calor associado à mudança de fase da água dá-se o nome de **calor latente**. Se o vapor obtido na vaporização apresenta qualidade de 100%, seu título é igual a 1 e a esse vapor dá-se o nome de **vapor saturado seco**. Ainda, se a esse vapor for transferido calor, isso fará aumentar sua temperatura (**calor sensível**) e provocará o seu superaquecimento (**vapor superaquecido**) em um determinado **grau de superaquecimento**. Por exemplo, se ao vapor saturado seco à pressão absoluta de 10 bar ($T=180^{\circ}\text{C}$) for transferido calor de modo a aumentar sua temperatura para 220°C , o grau de superaquecimento resultante é de 40°C .

Para o completo entendimento de operação das caldeiras, aos conceitos introduzidos anteriormente somam-se aqueles relacionados aos dois princípios básicos da Termodinâmica (**1ª e 2ª Leis da Termodinâmica**), acrescidos dos princípios que regem o **processo de combustão**, os **mecanismos de transferência de calor** e **escoamento dos fluidos**.

Em geral, o vapor é empregado para **aquecimento** e para a **produção de trabalho mecânico**. Para aquecimento, o vapor pode ser usado direta ou indiretamente.

No processo de aquecimento direto, o vapor entra em contato direto com o material a ser aquecido. Exemplo disso é o aquecimento de água ou outros líquidos com injeção direta de vapor. Outros exemplos: lavagem de garrafas, curtimento de couro, esterilização, engomagem de tecidos, etc.. No uso indireto, o vapor não entra em contato com o material a ser aquecido e fica, portanto, separado por uma superfície. Esse método é empregado quando for necessário uma grande quantidade de calor e/ou em processos que devem ser livres de contaminação. Exemplos de equipamentos que operam com vapor de uso indireto: calandras,

boylers, radiadores, autoclaves, etc..

Para a produção de potência, o vapor é utilizado em **máquinas alternativas** e em **turbinas**, sendo que nessas o vapor é em geral superaquecido. Exemplos de máquinas alternativas: prensas, martelo para forjaria, locomóveis, locomotivas, etc..

O vapor pode ser empregado também para extração de gases não condensáveis, tais como o ar, dos espaços evacuados, nas chamadas **bombas de jato**. Outra aplicação muito comum do vapor é no bombeio da água de alimentação de caldeiras nos chamados **injetores**.

2. TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DAS CALDEIRAS E SEUS ACESSÓRIOS PRINCIPAIS

A primeira tentativa do homem em produzir vapor na evolução da história da humanidade foi no século II a.C., quando Heron de Alexandria concebeu um aparelho que vaporizava água e movimentava uma esfera em torno de seu eixo. Esse foi o aparelho precursor das caldeiras e das turbinas a vapor.

Entretanto, foi na época da Revolução Industrial que teve impulso o uso do vapor sob pressão para movimentar as máquinas. Muitos, entre cientistas, artífices e operários, ocuparam-se por longos anos na evolução dos geradores de vapor. Os mais notáveis trabalhos neste campo se devem a Denis Papin na França, a James Watt na Escócia e a Wilcox nos Estados Unidos.

Por volta de 1835, haviam aproximadamente 6 mil teares operantes a vapor. Entretanto, foi após a 1ª Guerra Mundial que o emprego do vapor se acentuou. Mesmo com a tecnologia, normas, procedimentos e ensaios que hoje existem, as caldeiras ainda explodem, imagina-se quantos acidentes ocorreram e quantas vítimas houveram desde a época em que o vapor passou a ser o principal agente de movimentação das máquinas.

Atualmente as caldeira de uso industrial produzem até 10 toneladas ou mais de vapor por hora e o fator limitante da capacidade de produção de vapor é as dimensões da unidade e as propriedades metalúrgicas dos materiais utilizados.

Aliado aos avanços da tecnologia na produção de vapor, houve a necessidade de avanços nas técnicas de proteção tanto dos operadores dos equipamentos geradores de vapor, quanto da comunidade ao redor da fábrica. Foi a partir de um dos acidentes mais catastróficos ocorridos durante a evolução industrial, o qual aconteceu em 1905 na cidade de

Massachusetts/EUA, onde morreram 58 pessoas, que a sociedade alertou-se para a necessidade de normas e procedimentos para a construção, manutenção e operação das caldeiras. Assim, foram criados os códigos da *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, o qual se constituem na principal fonte de referência normativa sobre caldeiras e vasos de pressão do mundo.

Nos geradores de vapor, a energia térmica é liberada através das seguintes formas:

- Pela queima de um combustível sólido (carvão, lenha), líquido (óleos derivados do petróleo) ou gasoso (gás natural).
- Por resistências elétricas (eletrotermia).
- Por fontes não convencionais, como a fissão nuclear, energia solar, energia geotérmica, etc..

A energia térmica liberada na queima de qualquer uma das fontes acima, deve ser adequadamente transferida para as **superfícies de absorção** de calor.

Existem diversos tipos de caldeiras, as quais podem ser classificadas segundo diversos critérios. Segundo uma classificação mais genérica, as caldeiras se classificam em **FUMOTUBULARES** e **AQUOTUBULARES**.

As caldeiras **fumotubulares** ou flamatubulares se caracterizam pela circulação interna dos gases de combustão, ou seja, os tubos conduzem os gases por todo o interior da caldeira, como mostra a figura 4. São construídas para operar com pressões limitadas, pois as partes internas submetidas à pressão são relativamente grandes, inviabilizando o emprego de chapas de maiores espessuras. Existem caldeiras fumotubulares verticais (figura 4), porém, atualmente, as caldeiras horizontais são muito mais comuns, podendo ser fabricadas com **fornalhas lisas e corrugadas**, com **1, 2 ou 3** passes, com **traseira seca** ou **molhada**, conforme visto na figura 4. Nas caldeiras fumotubulares que operam com combustíveis líquidos ou gasosos, o queimador é instalado na parte frontal da fornalha. Nessa, predomina a troca de calor por **radiação luminosa** e nas partes posteriores da caldeira (caixas de reversão e tubos) a troca de calor se processa essencialmente por **radiação gasosa** e **convecção**. A fornalha e os tubos ficam circundados de água e são ancorados nos espelhos (discos externos) por solda ou por mandrilagem. Os espelhos são ancorados por solda ao tubulão externo. Esses estão submetidos à pressão interna do vapor e os tubos e fornalha estão submetidos à pressão externa. As caldeiras fumotubulares, em razão de seu aspecto construtivo, são limitadas em produção e pressão, que em geral não ultrapassam valores de 15 ton/h de produção de vapor e

18 bar de pressão de trabalho.

As caldeiras **aquotubulares** se caracterizam pela circulação externa dos gases de combustão e os tubos conduzem massa de água e vapor. A figura 5 ilustra este tipo de caldeira, cuja **produção de vapor é maior** que a das fumotubulares. As caldeiras aquotubulares são de utilização mais ampla, pois possuem vasos pressurizados internamente e de menores dimensões relativas. Isso viabiliza econômica e tecnicamente o emprego de maiores espessuras e, portanto, a **operação em pressões mais elevadas**. Outra característica importante desse tipo de caldeira é a possibilidade de adaptação de acessórios, como o **superaquecedor**, que permite o fornecimento de **vapor superaquecido**, necessário ao funcionamento das turbinas.

Nas caldeiras aquotubulares o volume de água é distribuído por um grande número de tubos submetidos, exteriormente, ao contato dos gases de combustão. Os tubos podem ser retos ou curvados, dispostos de forma a garantir uma eficiente circulação da água em ebulição. A circulação natural da água está condicionada às unidades que operam a baixas pressões de trabalho, pois valores próximos à pressão crítica tornam a circulação natural deficiente ($\gamma_{\text{Liq}} \approx \gamma_{\text{Vap}}$, figura 6). As figuras de 7 a 11 mostram diversos tipos construtivos de caldeiras aquotubulares.

Existem, embora sejam raras, caldeiras que possuem partes fumotubulares e partes aquotubulares, constituindo, dessa forma, o que se pode denominar de caldeiras mistas.

As caldeiras fumotubulares são em geral, compactas, isto é, saem prontas da fábrica, restando apenas sua instalação no local em que serão operadas. As caldeiras aquotubulares, porém, além do tipo compacto, podem ser do tipo **montadas em campo**, quando seu porte justificar sua construção no local de operação. Essas se caracterizam de acordo com a estrutura que a suporta: **caldeira auto-sustentada**, quando os próprios tubos e tubulões constituem sua estrutura; **caldeira suspensa**, quando a necessidade de uma estrutura a parte; e **caldeira mista**, que emprega estas duas formas básicas de sustentação.

Após a queima do combustível na fornalha, os gases quentes percorrem o circuito dos gases, desenvolvendo diversas passagens para melhor aproveitamento do calor, sendo, finalmente, lançados na atmosfera através da chaminé. É evidente que, para essa movimentação, há necessidade de diferenças de pressões para promover a retirada dos gases queimados e possibilitar a entrada de nova quantidade de ar e combustível. Dá-se o nome de **tiragem** ao processo que retira os gases mediante a criação de pressões diferenciais na fornalha. Portanto, as caldeiras podem ser de **tiragem natural**, quando esta se estabelece por

meio da chaminé, e de **tiragem forçada** quando, para produzir a depressão, são utilizados ventiladores.

Finalmente, para os propósitos da NR 13, as caldeiras são classificadas em 3 categorias, conforme segue:

- Caldeiras da **categoria A** são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,6 bar = 19,98 kgf/cm²).
- Caldeiras da **categoria C** são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,88 bar = 5,99 kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 litros.
- Caldeiras da **categoria B** são todas aquelas que não se enquadram nas categorias anteriores.

As unidades geradoras de vapor necessitam de equipamentos para controle e operação, tais como:

- Sistema de controle da água de alimentação.
- Indicador de nível.
- Válvulas de segurança.
- Sopradores de fuligem
- Injetores.
- Outros.

Os **sistemas de controle da água de alimentação** devem regular o abastecimento de água ao tubulão de evaporação para manter o nível entre limites desejáveis. Esses limites devem ser observados no indicador de nível. A quase totalidade das caldeiras são equipadas com sistemas automatizados, que proporcionam maior segurança, maiores rendimentos e menores gastos de manutenção. O sistema automático de controle da água mais usado é o **regulador de nível de eletrodos**, mostrado na figura 12. Este regulador age diretamente na bomba de alimentação da caldeira, que de acordo com o esquema da figura 12, o eletrodo 2 com o terra 0, tem a função de ligá-la. O eletrodo 3 com o terra 0, desliga a bomba e o eletrodo 1 com o terra, funciona como alarme.

Os **indicadores de nível** tem por objetivo indicar o nível de água dentro do tubulão de evaporação. Em geral, são constituídos por um vidro tubular.

As **válvulas de segurança** são necessárias para prevenir eventual ascensão na pressão normal de trabalho da caldeira. Toda caldeira deve possuir pelo menos uma válvula de

segurança, embora o recomendado seja duas. As válvulas de segurança devem ser capazes de descarregar todo o vapor gerado sem causar aumento de pressão superior a 10% da pressão de projeto.

Os **sopradores de fuligem** são muitos usados nas caldeiras aquotubulares e são instalados em pontos estratégicos da mesma. Servem para remover fuligem ou depósitos de cinzas das superfícies de aquecimento e funcionam, em geral, com vapor seco. Esse sai de tuberias a alta velocidade, podendo atingir tubos distantes 2 a 3 metros. A remoção do material particulado da superfície de aquecimento pode melhorar o rendimento da caldeira de 2 a 10%.

O **injetor** é um dispositivo empregado como alimentador auxiliar de caldeiras para situações de falta de energia elétrica. A figura 13 mostra este dispositivo, onde o vapor proveniente da caldeira expande-se num bocal A, saindo deste a alta velocidade e baixa pressão. Na câmara 1, devido à baixa pressão reinante, água de alimentação é succionada, misturando-se com o vapor que vem de A. A mistura passa por um segundo bocal B com alta velocidade e em seguida passa por um difusor C. Nesse, parte da energia cinética do fluxo transforma-se em energia de pressão, o que permite seu ingresso na caldeira.

A maioria das caldeiras utilizam ainda **pressostatos**, que atuam em conjunto com os queimadores ou com alimentadores de combustível. Os pressostatos mantêm a pressão dentro de uma faixa admissível de operação.

É imprescindível também o uso de **manômetros** nas caldeiras, os quais devem ser ligados diretamente ao espaço ocupado pelo vapor. Devem ser graduados nas unidades apropriadas com aproximadamente duas vezes a pressão de trabalho e, em nenhum caso, inferior a 1,5 vezes. Cada caldeira deverá dispor de uma ligação para um manômetro aferidor.

Outros acessórios são ainda importantes: **sensor de chama** (atuam no queimador), **válvula de purga** (instaladas no ponto mais baixo da caldeira), **válvula de bloqueio** (instalados em toda saída de vapor da caldeira), etc..

3. RISCOS DE EXPLOSÕES

O emprego de caldeiras implica na presença de riscos dos mais diversos: explosões, incêndios, choques elétricos, intoxicações, quedas, ferimentos diversos, etc. Os **riscos de explosões** são, entretanto, os mais importantes pela seguintes razões:

- Por se encontrar presente durante todo o tempo de funcionamento, sendo imprescindível seu controle de forma contínua, ou seja, sem interrupções.
- Em razão da violência com que as explosões acontecem. Na maioria dos casos suas conseqüências são catastróficas, em virtude da enorme quantidade de energia liberada instantaneamente.
- Por envolver não só os operadores, como também as pessoas que trabalham nas redondezas.
- Por que sua prevenção deve ser considerada em todas as fases: projeto, fabricação, operação, manutenção, inspeção e outras.

O risco de explosão do lado da água está presente em todas as caldeiras, pois a pressão reinante nesse lado é sempre superior à pressão atmosférica. Todo fluido compressível tem o seu volume bastante reduzido quando comprimido. Essa redução é tantas vezes menor quanto for o aumento de pressão. A massa comprimida de fluido procura então, ocupar um espaço maior através de fendas e rupturas. Isso é conseguido com a explosão, quando, por algum motivo, a resistência do recipiente que o contem é superada. Para evitar a explosão surge a necessidade de empregar-se espessuras adequadas em função da resistência do material e das características de operação.

No caso de caldeiras, outro fator importante a ser considerado quanto às explosões é a grande quantidade de calor transmitida no processo de vaporização, dada a grande quantidade de calor latente e calor sensível absorvida pelo vapor. Neste sentido, os danos provocados pela explosão de uma caldeira serão muito maiores que um reservatório contendo ar, por exemplo, de mesmo volume e de mesma pressão. Isso por que parte da energia será liberada na forma de calor, provocando o aquecimento do ambiente onde a explosão ocorre.

Com a finalidade de analisar o comportamento das curvas de cálculo de espessuras, simplifica-se a expressão aplicável a equipamentos submetidos a pressões internas, onde são eliminados os termos que exercem pequena influência e obtém-se:

$$e \approx p R / \sigma_{adm}$$

sendo e a espessura; p a pressão de projeto; R o raio interno e σ_{adm} a tensão admissível.

Considerando-se um determinado raio R constante, algumas observações podem ser feitas na figura 14 que mostra o comportamento das curvas de e em função de σ_{adm} e p .

Das curvas mostradas na figura 14 observa-se que, para resistir a uma dada pressão p ,

os valores de e e σ_{adm} podem variar sem prejudicar a segurança do equipamento, desde que o par $(\sigma_{adm,i}, e_i)$ estejam dentro da área situada acima da curva referente à pressão com a qual deseja-se trabalhar. Dessa forma, observa-se:

- Os valores $(\sigma_{adm,1}, e_1)$ que caracterizam o ponto 1 não são satisfatórios para que o equipamento opere na pressão p_1 ;
- Os valores $(\sigma_{adm,2}, e_2)$ que caracterizam o ponto 2 são satisfatórios para que o equipamento opere na pressão p_1 , mas são insatisfatório para que o equipamento opere na pressão p_2 . Para que o equipamento possa operar nessa pressão é necessário aumentar a espessura pelo menos para e_3 , ou escolher um material mais resistente, com tensão admissível igual ou superior a $\sigma_{adm,3}$. Pode-se ainda adotar outra combinação de valores $\sigma_{adm,x}, e_y$, de modo que o par $(\sigma_{adm,x}, e_y)$ esteja acima da curva p_2 .

Risco de explosão pode, portanto, ser originado pela combinação de 3 causas:

- Diminuição da resistência, que pode ser decorrente do superaquecimento ou da modificação da estrutura do material (vide figura 15).
- Diminuição de espessura que pode ser originada da corrosão ou da erosão (vide figura 16).
- Aumento de pressão decorrente de falhas diversas, que podem ser operacionais ou não (vide figura 17).

3.1. O superaquecimento como causa de explosões

Quando o aço com que é construída a caldeira é submetido, em alguma parte, à temperaturas maiores àquelas admissíveis, ocorre redução da resistência do aço e aumenta o risco de explosão. Entretanto, antes da ocorrência da explosão podem haver danos: empenamentos, envergamentos e abaulamentos.

Nas caldeiras aquotubulares é muito freqüente a ocorrência de abaulamento com a superfície convexa voltada para o lado dos gases, decorrentes da deformação plástica do aço em temperatura da ordem de 400 a 550°C e sob a ação duradoura de pressão interna de vapor.

Outra conseqüência do superaquecimento é a oxidação das superfícies expostas, se o meio for oxidante, ou é a carbonetação (formação de carbetos de ferro), se o meio for redutor.

As principais causas do superaquecimento são:

- **Seleção inadequada do aço no projeto da caldeira.** Em caldeiras aquotubulares, por exemplo, parte dos tubos da fornalha poderão estar submetidos à radiação mais intensa que aqueles de outras partes, devendo por isso, ser constituídos por aços de características condizentes com a solicitação. Se no projeto de caldeiras não forem consideradas as condições de não homogeneidade de temperatura de trabalho das superfícies de aquecimento, poderá haver risco de fluência e/ou ruptura dessas partes submetidas a pressão, devido ao emprego de aços poucos resistentes às solicitações impostas. As figuras 18 e 19 mostram as faixas de temperatura em que os aços constituintes de chapas e de tubos, respectivamente, resistem às solicitações impostas pela geração de vapor.
- **Uso de aços com defeitos.** O processo de laminação utilizado na obtenção de chapas e de tubos, é aquele que mais pode determinar a inclusão de defeitos. É comum na produção de chapas ocorrer a chamada dupla laminação, consistindo de vazios no interior do aço. Após sucessivas passagens pelos laminadores, esses vazios adquirem um formato longitudinal ao longo da chapa, dando a impressão de se ter chapas sobrepostas. Esses defeitos fazem com que as chapas não resistam às cargas térmicas e/ou mecânicas previstas no projeto.
- **Prolongamentos excessivos dos tubos.** Isso ocorre com muita freqüência nas caldeiras fumotubulares, em que tubos expandidos nos espelhos são deixados com comprimento excessivo para dentro das caixas (câmaras) de reversão. Esses prolongamentos exagerados, identificados na figura 20, prejudicam a reversão de fluxo dos gases quentes, determinando pontos de superaquecimento, cuja conseqüência certa é o aparecimento de fissuras nos tubos e/ou nas regiões entre furos dos espelhos (vide figura 21).
- **Queimadores mal posicionados.** Como visto nas figuras 18 e 19, os aços das chapas e dos tubos de caldeiras admitem aquecimento a até algumas centenas de graus Celcius, sem perderem totalmente suas propriedades mecânicas. As chamas de queimadores podem atingir valores de temperatura de até 1.000°C, de modo que o mal posicionamento do queimador pode determinar a incidência direta da chama sobre alguma superfície, propiciando o superaquecimento e a fluência do material. A conseqüência disso pode ser a deformação lenta e gradual da caldeira ou a explosão eminente da mesma, o que depende da ocorrência de outros fatores. O posicionamento dos queimadores é muito mais complicada quando esses são do

tipo tangenciais (vide figura 22), os quais produzem um turbilhonamento intenso dos gases no centro da câmara de combustão.

- **Incrustações.** Esse é um problema clássico relacionado à segurança de caldeiras. As incrustações são deposições de sólidos sobre as superfícies de aquecimento, no lado da água, devido à presença nessa de impurezas: sulfatos, carbonatos de cálcio e/ou magnésio, silicatos complexos (contendo Fe, Al, Ca e Na) e sólidos em suspensão. Aparecem ainda, devido à presença de precipitados que resultam de tratamentos inadequados da água da caldeira (borras de fosfato de cálcio ou magnésio) e de óxidos de ferro não protetores. A incrustação, se comportando como isolante térmico (a condutividade térmica é cerca de 45 vezes menor que a do aço), não permite que a água mantenha refrigerada as superfícies de aquecimento. Isso reduz a transferência de calor do aço para a água, fazendo com que o aço absorva mais calor sensível e aumentando sua temperatura de forma proporcional à quantidade de calor recebida. Nos casos de incrustações generalizadas há um agravamento da situação para manter-se a água na temperatura de ebulição, pois é necessário o aumento do fornecimento de calor no lado dos gases (vide figura 23). Com esse aumento de temperatura, podem ocorrer as seguintes conseqüências indesejáveis com relação à segurança do equipamento:
 - O aço, previsto para trabalhar em temperaturas da ordem de 300°C, fica exposto a temperaturas da ordem de 500°C, fora dos limites de resistência. Portanto, o risco de explosão acentua-se.
 - A camada incrustante pode romper-se e soltar-se, fazendo a água entrar em contato direto com as paredes do tubo em alta temperatura (vide figura 24), o que pode provocar a expansão repentina da água e, de conseqüência, a explosão.
 - Formação de zonas propícias à corrosão, em virtude da porosidade da camada incrustante e a possibilidade da migração de agentes corrosivos para sua interface com o aço.
- **Operação em marcha forçada.** Isso ocorre quando a caldeira possui potência insuficiente para atender as necessidades de vapor do usuário, que na expectativa de ver sua demanda atendida, intensifica o fornecimento de energia à fornalha. Nessas circunstâncias, dadas as limitações da caldeira, em vez de alcançar a

produção desejada, o que é conseguido é o superaquecimento das várias partes da caldeira, determinando a deformação das mesmas ou até a ruptura. Portanto, isso constitui em risco eminente de explosão do equipamento. No caso das caldeiras fumotubulares, a intensificação de energia à fornalha pode também determinar riscos de fissuras no espelho traseiro, nas regiões entre furos, de forma similar aos prolongamentos excessivos mencionados.

- **Falta de água nas regiões de transmissão de calor.** O contato da água com o aço é fundamental para mantê-lo refrigerado. Por isso, é essencial que o calor recebido pelas superfícies de aquecimento seja transferido para água, sem provocar aumento excessivo da temperatura do aço, pois no lado da água, o processo de vaporização acontece à pressão constante. No caso de haver falta de água em alguma parte da caldeira, o processo a temperatura constante cessará neste local, a partir do que se dará início uma transferência de calor sensível (com aumento da temperatura). Isso provocará o superaquecimento do metal e, de conseqüência, perda de resistência. A maior parte das explosões em caldeiras é devido à falta de água nas regiões de transferência de calor. Os principais motivos para a falta de água são a circulação deficiente de água e a falha operacional que serão discutidos a seguir:

- **Má circulação da água.** Nas caldeiras aquotubulares em que a circulação da água se faz de modo natural, a diferença de densidade entre as partes mais quentes da água e as partes menos quentes, é a força motriz responsável pela movimentação da água no interior do equipamento. Essa força motriz é tanto menor, quanto mais a pressão da água se aproxima do ponto crítico (220,9 bar). Na prática, para pressões de trabalho superiores a 150 bar, é justificável o uso de bombas para forçar a circulação da água. É necessário que cada tubo seja atravessado por uma quantidade de água suficiente para refrigerá-lo, pois é preciso encontrar um bom equilíbrio da vazão de água. A rugosidade, as corrosões e os depósitos internos são fatores que reduzem a vazão de água nos tubos, podendo prejudicar a refrigeração.

Nas caldeiras fumotubulares é estabelecido em regime normal uma circulação de água como ilustra o esquema da figura 25. Se nos pontos A e B, em particular, os quais correspondem os pontos mais baixo e mais alto da fornalha, a velocidade da água for deficiente, pode determinar nesses

pontos um aumento de temperatura. Isso tende a se agravar, se no ponto A formam-se bolhas de vapor, isolando termicamente a parede da fornalha da água da caldeira.

- **Falha operacional.** As caldeiras industriais de última geração operantes com combustível líquido ou gasoso são totalmente automatizadas, cujos parâmetros de funcionamento são controlados por meio de malhas de instrumentação. Isso tem exigido dos operadores poucas intervenções, exigindo, porém, maior qualificação do pessoal e maior precisão nas decisões. O esquema da figura 26 mostra a lógica do automatismo das caldeiras, obtido através de pressostatos e do sistema regulador de nível da água, que comandam, respectivamente, o funcionamento dos queimadores e das bombas de alimentação de água. A atuação desses dispositivos, indispensáveis à segurança das caldeiras, podem interromper subitamente o funcionamento das mesmas, através de válvulas solenóides que bloqueiam o suprimento de combustível, desligando totalmente os queimadores.

Não obstante o automatismo das caldeiras modernas, os períodos de acendimento e de desligamento das mesmas acontecem, em geral, de forma manual. Se o acendimento se realizasse em posição automática, os controles admitiriam o máximo fornecimento de energia, pois são comandados pela pressão de vapor e isso pode ser desastroso para a caldeira. Na posição de manual, o risco de falta de água está relacionado à procedimentos inadequados do operador, que, por exemplo, não aumenta a vazão de água quando o nível tende a baixar. Falhas desse tipo em geral acontecem por falsas indicações de nível ou por imperícia na operação da caldeira.

Riscos de obstruções ou acúmulo de lama na coluna de nível, geralmente acontecem, quando a **limpeza** ou a **manutenção preventiva** ou o **tratamento da água** são realizados de forma **deficiente**. Isso poderá fornecer indicações de nível incorretas para o operador ou para os instrumentos responsáveis pelo suprimento de água. De forma similar, obstruções em tubulações de água de alimentação da caldeira podem conduzir a riscos de acidentes, pois a vazão de ingresso da água será inferior à vazão de saída do vapor.

Em casos de **variações no consumo** ocorrer um **aumento brusco na vazão de vapor**, a instrumentação pode ser responsável por falta de água, pois em virtude da **queda brusca de pressão**, bolhas de vapor que se formam sob a superfície da água se expandem, dando origem a uma **falsa indicação de nível alto**, o que reduz a vazão de entrada de água. Além disso, como o pressostato sente a baixa pressão, o sinal que ele envia para os dispositivos de combustão é no sentido de fazer aumentar o fornecimento de combustível, isso tenderá a agravar a condição de risco de acidente.

3.2. Choques térmicos

Os choques térmicos acontecem em virtude de **freqüentes paradas e recolocação em marcha** de queimadores. As caldeiras suscetíveis a essas condições são aquelas que possuem **queimadores com potência excessiva** ou **queimadores que operam em *on-off***, ou seja, que não modulam a chama. As **incrustações** das superfícies também favorecem os efeitos dos choques térmicos.

Outras situações de ocorrência de choques térmicos são quando a caldeira é alimentada com **água fria** (<80°C) ou com **entrada de água quente nas regiões frias**. Os problemas com choques térmicos acontece com mais freqüência com as caldeiras fumotubulares, especialmente com aquelas com câmara de reversão traseira seca.

Falha operacional pode também contribuir para a ocorrência de choques térmicos. Isso pode acontecer quando após uma **redução excessiva do nível de água**, por um motivo qualquer e com parte da superfície de aquecimento sem refrigeração, o operador **faz injetar água** na tentativa de restabelecer o nível normal. Em situações como esta, deve-se adotar como medida correta a **cessação imediata do abastecimento de combustível aos queimadores**.

3.3. Defeito de mandrilagem

A mandrilagem é a operação de expansão dos tubos junto aos furos dos espelhos da caldeira. A expansão é feita, portanto, nas extremidades dos tubos por meio de um dispositivo

cônico chamado mandril e que gira em torno de seu eixo axial. Através da mandrilagem os tubos ficam ancorados, com a estanqueidade devida, nos espelhos das caldeiras fumotubulares ou nas paredes do tubulão das caldeiras aquotubulares. A estanqueidade pode ficar comprometida, se no momento da mandrilagem houverem corpos estranhos na superfície externa da extremidade dos tubos ou nas paredes dos furos. Problemas podem também ocorrer se o processo de mandrilagem não for bem controlado, promovendo o aparecimento de trincas nos espelhos (entre furos) e/ou nos tubos.

Para melhorar a estanqueidade no processo de mandrilagem é necessário empregar chapas com espessura mínima de 3/4 de polegada e a execução de *grooves*, que são sulcos circulares nos furos. Esses sulcos são inteiramente ocupados pelo tubo após a mandrilagem. Em espessuras superiores a 2 polegadas são geralmente executados 2 *grooves*. Os sulcos devem ser executados de modo que não apresentem arestas cortantes, pois podem cisalhar as paredes do tubo, trazendo riscos adicionais. A figura 27 ilustra o processo de mandrilagem em tubos de caldeiras.

3.4. Falhas em juntas soldadas

O processo de soldagem é muito aplicado na fabricação de caldeiras: solda de tubos, solda de espelhos, solda de tubulões, de reforços, de estais, etc. Portanto, falhas em juntas soldadas aumentam os riscos de acidentes nas caldeiras, pois representam regiões de menor resistência do metal.

De modo geral, o Instituto Internacional de Solda classifica os defeitos em grupos:

- Grupo 1 – **Fissuras** ou **trincas**.
- Grupo 2 – **Cavidades**
- Grupo 3 – **Inclusão de escória**
- Grupo 4 – **Falta de fusão e de penetração**
- Grupo 5 – **Defeitos de forma**

Hoje, a maior parte dos fabricantes de caldeiras empregam processos automatizados de soldagem, sendo o **processo a arco submerso** o que tem apresentado melhores resultados,

especialmente na soldagem de chapas de grande espessura. Nesse processo é eliminada a necessidade de execução de vários passes, como também as descontinuidades de soldagem manual. Proporciona cordões de solda limpos, alta eficiência, menor incidência de falhas e, do ponto de vista de segurança do trabalho, é pouco nocivo ao trabalhador, pois não emite radiações e o arco elétrico fica submerso em um pó, chamado fluxo de soldagem, durante todo o tempo de execução da solda.

Sem dúvidas, qualquer que seja o processo de soldagem, esse deve ser executado por **soldadores qualificados** e segundo processos reconhecidos por normas técnicas específicas. Após as operações de soldagem, as caldeiras deveriam passar por **tratamentos térmicos de alívio de tensões** ou de normalização, para minimizar as tensões resultantes do processo de solda.

Para garantir segurança à caldeira desde sua construção, é fundamental que **suas juntas soldadas** sejam controladas por ensaios não destrutivos, tal como o **exame radiográfico**.

3.5. Alterações na estrutura metalográfica do aço

Devido à alta capacidade de produção de vapor, ocorre nas caldeiras que operam a pressões elevadas, a **decomposição da água**, com o conseqüente **desprendimento de oxigênio e de hidrogênio**. O H_2 , difundindo-se na estrutura do aço, atua sobre a cementita (Fe_3C – confere dureza e resistência ao aço carbono), decompondo-a em ferrita e carbono, o que reduz a resistência do aço. O H_2 pode ainda reagir com o carbono, produzindo CH_4 (gás metano), que provoca o **empolamento** do aço, ou seja, a formação de protuberâncias superficiais.

3.6. Corrosão

Um dos principais responsáveis pela degradação das caldeiras é a corrosão, que age como fator de redução da espessura das superfícies submetidas a pressão. A corrosão não é sentida pelos instrumentos de operação da caldeira, ou seja, os pressostatos e as válvulas de segurança não detectam sua evolução por que não é acompanhada por elevação de pressão de

trabalho. A corrosão avançada das partes da caldeira, pode ser causa de explosões até mesmo em pressões inferiores à **PMTA – Pressão Máxima de Trabalho Admissível**. Portanto, o avanço da corrosão em caldeiras só pode ser detectado por meio de **inspeções minuciosas do equipamento** (obrigatórias por lei).

A corrosão nas caldeiras podem ocorrer tanto nas partes em contato com a água (corrosão interna), como nas partes em contato com os gases (corrosão externa):

- **Corrosão interna.** Esse tipo de corrosão se processa sob várias maneiras, segundo vários mecanismos, entretanto, é sempre consequência direta da presença de água (características, impurezas presentes e comportamento), quando em contato com o ferro, nas diversas faixas de temperaturas.
- **Oxidação generalizada do ferro.** O aço dos tubos e chapas antes da colocação em marcha das caldeiras, apresenta uma fina camada (da ordem de 50 microns) protetora contra a corrosão, chamada **magnetita** (Fe_3O_4), que apresenta uma coloração escura, densa e aderente. No funcionamento da caldeira, essa camada protetora está constantemente sendo quebrada e reconstruída e é muito resistente à alguns agentes químicos (ácido nítrico). Entretanto, quando sofre a ação de agentes físicos, tais como choques térmicos e dilatações e/ou a ação de agentes químicos, tal como a soda cáustica, oxigênio, quelantes de tratamentos de água, etc., a magnetita deixa de existir e inicia-se o oxidação do ferro, resultando na formação de outros óxidos não protetores do aço.
- **Corrosão galvânica.** Ocorre quando dois metais diferentes estão em presença de um eletrólito, gerando uma diferença de potencial e, de consequência, um fluxo de elétrons. Nas caldeiras, o par galvânico pode ser originado quando partes metálicas de cobre ou de níquel ou outro metal, se desprendem pela erosão, cavitação de tubulações ou de rotores de bombas e se alojam em ranhuras ou pequenas folgas entre as partes da caldeira. O aço, atuando como anodo, é o elemento mais prejudicado quanto à corrosão.
- **Corrosão por aeração diferencial.** Isso ocorre em geral, nas caldeiras fumotubulares em que o oxigênio dissolvido na água provoca corrosão dos tubos superiores. Os tubos submersos estão submetidos a menores concentrações de O_2 , comparados à região acima da superfície da água (daí o nome aeração diferencial). Essa diferença de concentração de O_2 , forma uma pilha em que o anodo é formado pela parte menos

aerada. Como na pilha galvânica, o anodo, nesse caso, é também a região que apresenta corrosão mais severa, e, sendo localizada, viabilizará o aparecimento de pites (cavidade na superfície metálica com fundo angular e profundidade maior que o seu diâmetro) ou alvéolos (cavidade na superfície metálica com fundo arredondado e profundidade menor que seu diâmetro). Nas caldeiras aquotubulares a aeração diferencial ocorre no tubulão superior e nos purificadores de vapor.

- **Corrosão salina.** Acontece quando existem concentrações elevadas de **cloretos** que migram para ranhuras ou regiões sem proteção da magnetita. Os cloretos podem também se alojar sob camadas porosas que se formam sobre os tubos. Em particular, o cloreto de magnésio se hidrolisa formando ácido clorídrico, atacando quimicamente o ferro da caldeira. Em geral, os cloretos na presença de O_2 catalizam a reação da magnetita com o O_2 resultando o Fe_2O_3 , que é um óxido não protetor.
- **Fragilidade cáustica.** Esse é um modo de corrosão em que o hidróxido de sódio (soda cáustica), em concentrações acima de 5%, migra para fendas ou outras partes em que não exista a camada protetora de magnetita e reage diretamente com o ferro.
- **Corrosão por gases dissolvidos.** A água da caldeira pode se contaminar com gases, especialmente com o gás sulfídrico (H_2S), decorrentes da poluição atmosférica ou pelo seu tratamento com sulfito de sódio. O H_2S reage com o ferro dando origem a sulfeto de ferro (FeS), que se apresenta sob a forma de manchas pretas. O gás carbônico (CO_2) torna a água ligeiramente acidificada, viabilizando a formação de pites.

Outro fator que também age na redução da espessura é a **erosão**. Esse fenômeno pode acontecer de diversas maneiras nas caldeiras. Nas caldeiras fumotubulares pode ocorrer, por exemplo, na alimentação da água pela bomba em que o jato de entrada, podendo conter partículas pesadas (areia, partes metálicas, etc.), incide sobre a parede externa da fornalha, causando seu desgaste. A erosão pelo vapor pode acontecer em sedes de vedação de válvulas de segurança. Essas válvulas são normalmente fabricadas para resistir à ação abrasiva da passagem do vapor em regime de solicitações normais, ou seja, quando a válvula é aberta apenas em situações de emergência e de testes. Entretanto, quando outros controles de pressão não estão presentes ou não funcionam, a válvula de segurança deixa de ser um acessório de emergência e passa a funcionar com maior frequência, desgastando de modo excessivo e reduzindo muito a vida útil do disco de assentamento. Nas caldeiras aquotubulares a erosão é freqüentemente ocasionada por sopradores de fuligem desalinhados, que direcionam o jato de

vapor sobre os tubos, em vez de entre eles.

A **cavitação** é também uma forma de degeneração dos materiais, podendo ser responsável pela redução de espessuras. Seu mecanismo é caracterizado pela ação dinâmica resultante da contínua formação e colapso de bolhas de gases ou vapores do meio líquido sobre uma superfície. Sua ocorrência é muito comum em bombas centrífugas (com pressão de sucção deficiente), dobras, cotovelos e derivações de tubulações, válvulas, etc.

Logicamente, a ação combinada dos dois últimos fenômenos com a corrosão, é muito mais maléfica para as caldeiras, que o efeito isolado de cada um deles.

- **Corrosão externa.** Esse tipo de corrosão acontece nas superfícies expostas aos gases de combustão e é função do combustível utilizado e das temperaturas. Nas caldeiras aquotubulares, as superfícies de aquecimento mais quente são aquelas do superaquecedor e do reaquecedor, podendo ocorrer corrosão tanto nas caldeiras que queimam óleo como carvão. Outro problema de corrosão ocorre nas caldeiras que operam com cinzas fundidas, que permitem o ataque do O_2 , destruindo a camada protetora de magnetita. A corrosão nas regiões de baixa temperatura é consequência direta da presença de enxofre nos combustíveis, na forma de sulfatos, de compostos orgânicos ou na forma elementar. A decomposição dos sulfatos produz SO_3 , já o enxofre elementar e os compostos orgânicos produzem no processo de combustão o SO_2 e o SO_3 (em menor quantidade). O SO_2 por sua vez pode oxidar-se em SO_3 por ação direta do O_2 ou por oxidação direta catalítica ao contato dos depósitos existentes sobre as superfícies de aquecimento. Para os combustíveis contendo enxofre na ordem de 3%, o teor de SO_3 nos gases de combustão varia entre 20 a 80 ppm (partes por milhão) em massa.

Os gases de combustão contendo vapor d'água, pode haver a condensação de gotas de ácido sulfúrico quando a temperatura reduz muito e atinge o ponto de orvalho. Esse depende das pressões parciais do H_2O e do SO_3 nos gases de combustão, porém pode variar de 90 a 160°C. A condensação das gotas de H_2SO_4 pode, desta forma, acontecer nas partes finais das caldeiras aquotubulares, ou seja, no economizador, no pré-aquecedor de ar e na chaminé.

Outro fator que contribui para a corrosão externa é o ar atmosférico. Caldeiras instaladas em regiões muito úmidas, locais próximos ao mar e em atmosferas fortemente poluídas, apresentam corrosão externa, de modo generalizado, em todas as suas partes (chaparias, colunas, escadas, plataformas, etc.).

3.7. Explosões causadas por aumento da pressão

A pressão do vapor em uma caldeira é função direta da quantidade de energia disponível na fornalha pela queima do combustível e que é transmitida à água. Sendo assim, a pressão interna na caldeira depende fundamentalmente da atuação do queimador. Entretanto, o queimador não é o único responsável pelo aumento de pressão na caldeira, pois a bomba de alimentação injeta água com pressão superior àquela de trabalho. Se a vazão com que a bomba alimenta a caldeira for maior que aquela de saída do vapor, o nível de água sobe e a pressão de trabalho aumenta. Durante a operação normal da caldeira, a pressão é mantida dentro de seus limites pelos seguintes sistemas:

- **Sistema de modulação de chama.** Sistema constituído por um pressostato modulador de chama, um servo-motor e um conjunto de registros (*dampers*). O pressostato possui um diafragma ou fole que se estende com o aumento da pressão e que aciona os contatos que emitem o sinal elétrico para o acionamento do servo-motor. Esse transmite movimento à alavancas, que acionam os *dampers*, alterando a vazão de combustível e a vazão de ar. Com isso, a alimentação do queimador fica modificada e obtêm-se a modulação de chama, ou seja, sua redução nos momentos de pressões elevadas e sua intensificação nos momentos de pressões baixas.
- **Sistema de pressão máxima.** Esse é composto por um pressostato e uma válvula solenóide (figura 28). Quando a pressão se eleva além de um certo limite, o pressostato é acionado e corta a alimentação elétrica da válvula solenóide. Conseqüência direta disso, é o corte completo de combustível ao queimador. Quando a pressão normal de trabalho se restabelece, o pressostato faz abrir totalmente a passagem do combustível ao queimador.
- **Válvula de segurança.** Como já comentado anteriormente, essas válvulas têm a função de deixar sair o vapor quando a pressão ultrapassa a **PMTA**, fazendo diminuir a pressão interna. As figuras 29 e 30, ilustram as válvulas de segurança de contrapeso e as de ação por molas.
- **Sistema manual.** Conforme for a indicação de pressão no manômetro da caldeira, o operador tem condições de acionar os vários dispositivos para intervir, onde for necessário, para manter a pressão interna da caldeira: queimador, bomba de alimentação ou mesmo na válvula de segurança. Por meio dessa última, o vapor pode ser liberado à atmosfera manualmente (acionamento da alavanca da válvula, por exemplo).

Com todas essas possibilidades, conjugadas ou não, é de se esperar que as caldeiras tenham grande chance de ser operadas com segurança, porém, mesmo assim, há inúmeros casos de explosões, causadas por falhas. A possibilidade de **falhas em pressostatos** pode ser de **natureza mecânica**, como o bloqueio de sua comunicação com a caldeira ou a deterioração do diafragma ou de **natureza elétrica**, pelo colagem dos contatos. Falhas nas válvulas solenóides oferecem riscos quando impedem o bloqueio do combustível, ou seja, quando operam na posição aberta. Há possibilidades da ocorrência desse defeito por falha mecânica de fabricação ou pela instalação incorreta, fora da vertical, ou de cabeça para baixo.

As válvulas de segurança, para funcionarem adequadamente, devem ser fabricadas em processo de rigoroso controle de qualidade, com molas testadas, dimensões calibradas, concentricidade dos elementos e vedações perfeitas, do contrário não fecham após o alívio da pressão, ou, o que é mais grave, não abrem no momento em que necessita sua abertura. É importante observar que, normalmente, a válvula de segurança opera após o sistema de pressão máxima não ter funcionado. Ou seja, se a válvula de segurança não funcionar, a segurança do sistema estará bastante comprometida, restando apenas o sistema manual como possível controle da situação.

Falhas no sistema manual são decorrentes de defeitos em instrumentos de indicação de pressão (manômetros) e de nível, ou nos dispositivos de controle, ou, ainda, de procedimentos inadequados por parte do operador.

3.8. Explosões no lado dos gases

As explosões no lado dos gases são originadas por uma reação química, ou seja, pelo processo de combustão. Esse processo além de ocorrer exotermicamente, acontece em um tempo muito pequeno, cuja consequência é o aumento rápido e violento da pressão em um espaço restrito. As explosões dessa natureza acontecem com frequência nas caldeiras que operam com combustíveis líquidos e gasosos. As névoas de líquidos inflamáveis ou de óleos combustíveis aquecidos apresentam comportamento similar às dispersões gasosas inflamáveis. Quando entram em contato com o ar, formam uma mistura que entra em combustão instantânea, se a relação ar/combustível estiver dentro do limite de inflamabilidade do combustível e se houver uma pequena fonte de calor para a ignição. As caldeiras aquotubulares, em face da complexa disposição do circuito dos gases, favorecem a existência de **zonas mortas**, onde pode ocorrer acúmulo de gases não queimados.

As explosões no lado dos gases acontecem com frequência na recolocação manual em marcha da caldeira, quando é promovida a ignição com retardo, ou sem purga prévia, condição em que a fornalha se encontra inundada com a mistura combustível-comburente. Ocorre casos também de explosões durante o funcionamento da caldeira: falta de limpeza dos queimadores ou presença de água no combustível ou, ainda, carbonização do óleo no queimador podem levar à interrupção da alimentação do combustível. Essa falha, associada ou não a falhas no sistema de alimentação de ar, pode causar perda momentânea da chama. Com isso, o interior da fornalha ficará enriquecida com a mistura e a explosão ocorrerá, deflagrada pelo sistema de ignição, ou por partes incandescentes da fornalha, ou ainda, por outro queimador, no caso de a perda da chama ocorrer em um queimador, enquanto outros funcionam.

Algumas caldeiras fumotubulares possuem válvulas de alívio instaladas nos espelhos dianteiros. Essas válvulas são mantidas fechadas por ação de molas durante o funcionamento normal da caldeira e, se abrem para fora, quando a pressão da fornalha supera a pressão exercida pelas molas, ou seja, no momento de uma explosão. Porém, o alívio da pressão nem sempre é obtida, dada a violência com que as explosões acontecem, fazendo voar até os espelhos, nos casos mais extremos. Pode haver também casos de pequenas explosões em que essas válvulas são lançadas fora, e, como se localizam próximas à altura da cabeça do operador, podem criar riscos adicionais.

3.9. Outros riscos de acidentes

Outras condições determinam situações de risco de acidentes no ambiente das caldeiras, em particular, para o operadores. Uma das situações é o **risco de queimaduras** na sala de caldeiras por água quente, vapor, óleo aquecido, tubulações e depósitos desprotegidos, etc. Deve-se considerar ainda, o risco de queimaduras por contato com produtos cáusticos, normalmente empregados para a neutralizar o pH da água da caldeira, como o hidróxido de sódio e outros produtos químicos.

Na casa de caldeira ou nas caldeiras instaladas ao tempo, há riscos consideráveis de **quedas** de mesmo nível, em virtude de óleo impregnado no piso ou de poças de óleo, se o local de trabalho não for convenientemente limpo. As quedas de níveis diferentes representam maiores perigos, pois existem caldeiras de diversos tamanhos, podendo atingir alturas de até dezenas de metros. Nessas caldeiras há necessidade de acesso do operador a diversos níveis, seja para observação de visores de fornalha, de sistemas de alimentação, de válvulas, etc.

Do ponto de vista ergonômico, as caldeiras têm evoluído muito nos últimos anos, existindo hoje, caldeiras que possuem câmaras de vídeo para que o operador possa observar e exercer à distância, e confortavelmente sentado à frente de um painel, o controle das fornalhas, do nível, dos sistemas de alimentação, etc. Entretanto, essas não são em geral, as condições freqüentemente encontradas. Em termos ergonômico, o corpo de um operador de caldeira é solicitado muitas vezes por movimentos desordenados e excessivos, localizados ou generalizados: visores mal posicionados, manômetros instalados em ângulos inadequados, válvulas emperradas e que possuem volantes exageradamente pequenos, regulagem de chamas que exigem operações iterativas, etc.

A presença de **ruído** de baixa freqüência dos queimadores e de alta freqüência proporcionada por vazamentos de vapor (acidentais ou intencionalmente provocados pelas válvulas de segurança) constitui um espectro sonoro peculiar e variável ao longo da jornada de trabalho.

Desconforto térmico nas operações de caldeiras é muito freqüente e de fácil constatação, porém a sobrecarga térmica para ser identificada, exige a análise de cada caso em particular, sendo necessário para tanto, não só avaliações com termômetros de globo e de bulbo úmido, como também exames médicos e acompanhamento individual.

Há também riscos de os operadores terem os **olhos expostos à radiação infravermelha** em operações de regulagem de chama e em observações prolongadas de superfícies incandescentes.

Fumaças, gases e vapores expelidos pela chaminé representam, em certas condições, riscos não somente aos operadores, como também à comunidade, ou seja, pelo risco de intoxicação por monóxido de carbono, por exemplo.

Caldeiras operantes com carvão, lenha, bagaço de cana, biomassa e outras oferecem ainda, riscos inerentes ao manuseio, armazenagem e processamento do combustível.

4. TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRAS

As principais grandezas de qualidade da água são:

- **Dureza Total.** Representa a soma das concentrações de cálcio e magnésio na água. Esses sais possuem a tendência de formar incrustações sobre as superfícies de aquecimento. A água em relação à dureza pode ser classificada como:
 - Até 50 ppm de CaCO_3 mole
 - 50 a 100 ppm de CaCO_3meio dura
 - acima de 100 ppm de CaCO_3dura
- **pH.** É um meio de se medir a concentração de ácido ou soda em uma água. Em outras palavras é a maneira de se medir a acidez ou a alcalinidade de uma amostra. Para a determinação do pH usa-se uma escala que varia de 1 a 14, sendo que de 1 a 6 a água é ácida e de 8 a 14, a água é alcalina. Com pH igual a 7 a água é neutra. Quanto mais ácida é uma água, mais corrosiva ela é.

4.1. Método de tratamento de água

Os métodos de tratamento podem ser divididos em dois grandes grupos:

- **Externos:**
 - **Clarificação**
 - **Abrandamento**
 - **Desmineralização**
 - **Desgaseificação**
 - **Remoção de sílica**
- **Internos:**
 - **A base de fosfato**
 - **A base de quelatos**
 - **Sulfito de sódio**
 - **Hidrazina**
 - **Soda**

4.1.1. Métodos externos

- **Clarificação.** O processo consiste na prévia floculação, decantação e filtração da água com vistas a reduzir a presença de sólidos em suspensão.
- **Abrandamento.** Consiste na remoção total ou parcial dos sais de cálcio e magnésio presentes na água, ou seja, consiste na redução de sua dureza.
- **Desmineralização** ou troca iônica. Nesse processo são utilizadas certas substâncias sólidas e insolúveis, das mais variadas origens e natureza química, que possuem a propriedade de, quando em contato com soluções de íons, trocar esses íons por outros de sua própria estrutura sem que haja alterações de suas características estruturais. Existem dois tipos de **trocadores: de cátions e de ânions.**
- **Desgaseificação.** São empregados equipamento especiais que aquecem a água e desta forma, são eliminados os gases dissolvidos. Pode ser utilizado vapor direto para o aquecimento da água a ser desgaseificada.
- **Remoção de sílica.** Como já foi abordado, a sílica produz uma incrustação muito dura e muito perigosa. Os tratamentos normalmente empregados no interior da caldeira não eliminam a sílica. Os métodos mais usados para a remoção da sílica são a **troca iônica** e o tratamento com **óxidos de magnésio calcinado.**

4.1.2. Métodos internos

Os tratamentos internos se baseiam na eliminação da dureza, ao controle do pH e da sua alcalinidade, na eliminação do oxigênio dissolvido e no controle dos cloretos e do teor total de sólidos.

- **Eliminação da dureza.** Os sais de cálcio e de magnésio precipitam como carbonatos e sulfatos, formando os depósitos duros e isolantes do calor que são as incrustações. Existem dois métodos diferentes de eliminar a dureza:
- **Precipitação com fosfatos.** Esses reagem com os sais de cálcio e de magnésio formando um produto insolúvel que não adere as partes metálicas da caldeira. O precipitado forma um lodo que se acumula no fundo da caldeira, sendo eliminado regularmente por meio de purgas.

- **Tratamento com quelatos.** Nesse tratamento não há precipitação do cálcio, nem do magnésio. Forma, porém, produtos solúveis não em forma de lama. Os quelantes mais utilizados são o EDTA e o NTA.
- **Controle do pH e da alcalinidade.** Os produtos empregados no controle do pH e da alcalinidade são a soda a 50% e a soda (hidróxido de sódio) em lentilhas. Via de regra não é necessário a adição de ácidos para o controle do pH e da alcalinidade por que as águas de alimentação são geralmente bastante ácidas.
- **Eliminação do oxigênio dissolvido.** Isso é de vital importância para o controle da corrosão. A eliminação é feita pela reação entre certos agentes redutores e o O₂. Os dois produtos mais usados são o sulfito de sódio e a hidrazina.
- **Controle do teor de cloretos e sólidos totais.** Quando a concentração de cloretos se torna muito alta, podem aparecer problemas de corrosão. Quando o teor de sólidos é alto, podem aparecer problemas de arraste. A forma de controlar esses teores é através de purgas sempre que se fizer necessário.

Na tabela a seguir é mostrado os valores recomendados para os diversos parâmetros anteriormente mencionados, em função da pressão de trabalho da caldeira.

Parâmetro	Pressão de trabalho da caldeira (kgf/cm ²)					
	Até 13	13,1 a 20	20,1 a 30	30,1 a 40	40,1 a 50	50,1 a 60
pH	11,0	11,0	11,0	10,5	10,5	10,0
Dureza	0	0	0	0	0	0
Alc.M. Orange (C/CaCO₃)	< 800	< 700	< 600	< 500	< 400	< 300
Alc. Hidróxida (C/CaCO₃)	150 – 300	150 – 250	100 – 150	80 – 120	30 – 120	80 – 100
Cloretos (C/Cl)	< 250	< 200	Água desmineralizada			
Fosfatos (C/PO₄)	30 – 80	30 – 60	30 – 60	20 – 50	20 – 40	15 – 30
Sulfito (C/SO₃)	40 – 60	40 – 60	40 – 60	40 – 60	20 – 40	20 – 40
Sólidos totais	3.000	3.000	2.500	2.000	2.000	2,000

Obs.: valores em mg/l

4.2. Manutenção das caldeiras

Todo tratamento para ter bons resultados depende de um controle eficiente e sistemático, quer dos parâmetros químicos e físicos, como de certas operações e procedimentos.

4.2.1. Controle químico

Deve ser estabelecido um programa de coleta e execução de análises que leve em conta principalmente a pressão de trabalho da caldeira, a produção de vapor e as exigências de qualidade do vapor. Em geral, para caldeiras de baixa pressão, é recomendado uma análise química pelo menos semanal e que inclua os seguintes itens:

- pH;
- alcalinidade;
- dureza;
- fosfatos;
- sulfitos ou hidrazina;

- cloretos;
- sólidos totais.

É comum a realização de análises mais regulares para itens como o pH, dureza e cloretos, pela facilidade de execução. Para caldeiras de alta pressão, utiliza-se pelo menos uma análise diária da água da caldeira, sendo analisados todos os itens acima mencionados.

Cuidado especial deve ser tomado com a coleta da amostra para análise. Antes da coleta deve ser feita uma purga para que seja eliminado qualquer depósito nos tubos e no fundo da caldeira. Deve ser previsto também o resfriamento da amostra de água coletada para melhorar sua concentração. Caso a análise não seja feita imediatamente, é necessário evitar o contato com o ar.

De fundamental importância é a correta utilização das purgas. Em caldeiras que são regularmente apagadas deve-se fazer uma purga maior imediatamente antes de se iniciar o fogo ou durante o período de aquecimento da caldeira.

Existem diversas maneiras de adicionar-se os produtos químicos em uma caldeira. Pode-se adicionar todos os produtos de uma só vez ou pode-se adicionar um cada vez. Mas o mais correto é misturar-se todos os produtos e adicionar-se à medida que a bomba de alimentação alimenta a caldeira. Isso pode ser conseguido colocando-se uma bomba dosadora ligada junto com a bomba de alimentação.

4.2.2. Limpeza química de caldeiras

As superfícies internas da caldeira, ainda que a água seja bem tratada, acumulam certa quantidade de depósitos de várias natureza através do tempo. A experiência tem mostrado que uma limpeza química regular (a cada 5 ou 6 anos) apresenta bons resultados. Observa-se assim, o desaparecimento de certos problemas de corrosão que são notados quando não é feita a limpeza regularmente. O rendimento da caldeira também melhora, podendo chegar a uma redução do consumo de até 20%.

Existem vários agentes de limpeza, mas o mais usado é o ácido clorídrico misturado a um inibidor, para evitar a corrosão acentuada das partes internas da caldeira.

4.2.3. Proteção de caldeiras contra corrosão

Esta proteção baseia-se fundamentalmente em evitar a entrada de ar na caldeira. O método mais fácil de conseguir impedir esta entrada é pelo enchimento da caldeira com água (a própria água de alimentação).

Também pode ser feito um selo com nitrogênio, que é um gás inerte. Nesse caso, injeta-se N₂ no espaço vazio da caldeira até uma pressão de 3 a 5 kgf/cm².

Caso a caldeira tenha de ser drenada, a proteção contra corrosão se baseia em evitar que a umidade se deposite sobre os metais. Isso pode ser conseguido aquecendo-se a caldeira com lâmpadas ou resistências elétricas ou usando agentes dessecantes (sílica gel ou alumina ativada).

5. NORMA REGULAMENTADORA Nº 13

No Brasil, desde 1943 a CLT, de forma incipiente, contempla a preocupação com a segurança em caldeiras. Porém, somente a partir de 1978 foi criada a norma sobre Caldeiras e Recipientes de pressão, a **NR-13**, que estabeleceu as medidas de segurança para os usuários destes sistemas. No final de 1994, a Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho publicou, no Diário Oficial da União, o novo texto da **NR-13** (vide site: www.mte.gov.br), elaborado por uma comissão composta por representantes das empresas, Governo e trabalhadores.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na **NBR-12177** – antiga **NB-55** – trata dos **procedimentos de como fazer as inspeções**, e a **NB-227**, dos códigos para **projeto e construção de caldeiras estacionárias**. Outras entidades (INMETRO, IBP e a Abiquim), têm procurado contribuir elaborando estudos, pesquisas e discussões sobre os aspectos de segurança em caldeiras.

Caldeira não é apenas uma máquina que a qualquer problema signifique somente uma parada para manutenção. Em muitas situações esta parada representa, também, a paralisação da produção. Como já tratado, dependendo do estado de conservação do equipamento, devido à má condição de operação ou também falhas na verificação de seus sistemas de segurança, e de procedimento incorreto no funcionamento, a caldeira ou os vasos de pressão podem explodir e destruir parcial ou totalmente uma fábrica. As conseqüências são inúmeras e se for constatada a não observância das normas de segurança, o proprietário ou o seu preposto, no caso o **inspetor de caldeira**, está sujeito a ser responsabilizado civil e criminalmente.

Dentre os vários pontos importantes da **NR-13**, a qual é centrada, portanto, na **inspeção de segurança de caldeiras estacionárias a vapor**, são apresentadas a seguir um resumo das principais regulamentações:

- É considerado “Profissional Habilitado” aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no país.
- As caldeiras serão obrigatoriamente, submetidas à inspeção de segurança, interna e externamente, nas seguintes oportunidades:
 - Antes de entrarem em funcionamento, quando novas, no local de operação.
 - Após reforma, modificação, ou após terem sofrido qualquer acidente.
 - Periodicamente, pelo menos uma vez ao ano, para as caldeiras das categorias A, B e C. Estabelecimentos que possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos” podem estender os períodos entre inspeções de segurança, respeitando alguns prazos (vide norma).
 - Ao ser recolocada em funcionamento após intervalo de inatividade igual ou superior a seis meses consecutivos.
 - Quando houver mudança de local de instalação.
 - Ao completar 25 anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas a rigorosa avaliação de integridade estrutural.
- Toda caldeira deve possuir no estabelecimento, onde estiver instalada, a seguinte documentação:
 - “Prontuário da Caldeira”, contendo diversas informações sobre o projeto e fabricação da caldeira (vide norma).
 - “Registro de Segurança” (livro próprio com páginas devidamente enumeradas), contendo todas as ocorrências importantes (condições de segurança da caldeira e inspeções anteriores).
 - “Projeto de Instalação”.
 - “Projetos de Alteração ou Reparo”.

- “Relatórios de Inspeção”, contendo algumas informações do “Prontuário da Caldeira”, tipo de inspeção executada, descrevendo as inspeções e teste realizados, resultados e providências, nome legível, assinatura e CREA do “Profissional Habilitado”, etc.
- Todos documentos acima referidos devem estar sempre à disposição para consulta dos operadores, do pessoal de manutenção e de inspeção e do pessoal de CIPA, devendo o proprietário da empresa assegurar pleno acesso a esses documentos.
- Inspeccionada a caldeira e uma vez emitido o “Relatório de Inspeção”, uma cópia do mesmo deve ser encaminhado pelo “Profissional Habilitado”, num prazo de 30 dias, a contar do término da inspeção, à representação da categoria profissional predominante no estabelecimento.

A **NR-13** regulamenta também a inspeção de **vasos de pressão**, cujas disposições são similares àquelas previstas para as caldeiras. A **NR-13** prevê ainda, no seu Anexo I-A, o currículo mínimo para os cursos de “Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras” e no Anexo I-B, o currículo mínimo para os cursos de “Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Pressão”. Ainda, no Anexo II, prevê os “Requisitos para Certificação de Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos”.

Existe muitos pontos comuns entre a norma **NBR-12177** e a **NR-13**, entretanto, no que diz respeito às inspeções em si, encontra-se detalhado na primeira. Algumas partes importantes da **NBR-12177** são vistas a seguir. As inspeções incluem:

- Exame do “Prontuário da Caldeira” e dos “Relatórios de Inspeção”
- Exame externo.
- Exame interno.
- Atualização da **PMTA**.
- Ensaio hidrostático.
- Ensaios complementares:
 - De acumulação.
 - Dos dispositivos de alimentação de água.
 - Outros.

O exame do **prontuário** visa verificar se o mesmo está devidamente organizado, completo e mantido em dia, colher dados e elementos necessários para a realização da inspeção. O exame do “**Relatório de Inspeção**” (último) visa verificar se não foi ultrapassada

a data até a qual devia ser realizada a inspeção e verificar se foram devidamente atendidas as recomendações eventualmente consignadas nos relatórios das inspeções anteriores.

O **exame externo** visa sempre verificar se a caldeira funciona normalmente, verificar se a caldeira satisfaz todas as condições de segurança, detectar qualquer anomalia capaz de prejudicar a segurança e colher outros dados ou elementos eventualmente necessários. O exame externo deve ser realizado com a caldeira em funcionamento.

O **exame interno** visa sempre verificar se a caldeira, antes de ser limpa, apresentava alguma anomalia; verificar se a caldeira, depois de limpa, está em ordem e satisfaz todas as condições de segurança; detectar qualquer anomalia capaz de prejudicar a segurança; colher outros dados ou elementos, eventualmente necessários para os cálculos, exames, análises, ensaios, etc., tais como: espessura de paredes, amostras de resíduos, corpos de prova de materiais, etc. O exame interno deve ser realizado com a caldeira não em funcionamento, devendo estar fria e devidamente preparada, permitindo o acesso do inspetor nos espaços a serem examinados.

A **atualização da PMTA** deve ser efetuada quando, na caldeira, ocorrer alteração da resistência de uma ou mais partes vitais, de modo que, em nenhum ponto, a tensão máxima causada pela pressão do vapor ultrapasse a correspondente tensão admissível. A atualização é obrigatória quando os cálculos indicam a necessidade de uma redução de mais de 5% da **PMTA** anterior, em virtude de anomalia insanável. Quando a resistência das partes afetadas é evidentemente inferior a 5%, o inspetor pode dispensar até mesmo os cálculos justificados.

O **ensaio hidrostático** visa detectar a frio e em curto prazo, vazamentos e alguns pontos de resistência fraca. O fato de suportar satisfatoriamente o ensaio hidrostático, não constitui prova suficiente de que a caldeira apresenta segurança adequada, quanto à sua resistência. A pressão de prova a ser aplicada durante o ensaio hidrostático é de 1,5 vezes maior que a **PMTA**, para as caldeiras de todas as categorias. O ensaio deve ser realizado com a caldeira fria, completamente cheia de água, evitando a retenção de bolsas de ar. Todas as aberturas devem estar fechadas, exceto as necessárias ao ensaio e a pressão de ser elevada de maneira progressiva e contínua, preferencialmente com uma bomba manual.

Os **ensaios complementares** são os seguintes:

- **Ensaio de acumulação.** Visa comprovar a suficiência das válvulas de segurança. É obrigatório quando em toda caldeira nova, depois de instalada, nas provas de recebimento ou na inspeção inicial; em qualquer caldeira não nova; antes da

caldeira entrar em uso normal, após a redução da **PMTA**, e/ou após aumento de capacidade de produção de vapor, e/ou após a substituição, modificação, reforma ou concerto de válvulas de segurança.

- **Ensaio dos dispositivos de alimentação de água.** Visa comprovar experimentalmente a suficiência dos dispositivos de alimentação de água das caldeiras. O dispositivo de alimentação deve ser capaz de fornecer à caldeira, estando essa sob pressão de trabalho, uma descarga de água igual ou maior que aproximadamente 1,25 vezes a capacidade de produção de vapor da mesma.
- **Outros ensaios.** Em casos especiais, a verificação das condições de segurança de determinada caldeira, poderá tornar necessária a realização de outros ensaios, além dos citados anteriormente. A realização dos mesmos deverá obedecer, sempre que possível, aos códigos e/ou normas da ABNT, ASME, ISO, DIN e outros.