

## Análise de falha relativa à explosão de reservatório de água aquecida - termodinâmica e sucessão de fatores determinantes

R. M. Tocantins <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Instituto Geral de Perícias de Santa Catarina (IGP/SC), Santa Catarina (SC), Brasil

\* Endereço de e-mail para correspondência: [rogerio.tocantins@yahoo.com](mailto:rogerio.tocantins@yahoo.com). Tel.: +55-47-33401920

Recebido em 08/04/2014; Revisado em 17/07/2014; Aceito em 23/07/2014

---

### Resumo

O presente trabalho aborda um evento de explosão de um reservatório de água aquecida empregado nas atividades de um estabelecimento hoteleiro, classificado pela norma regulamentadora brasileira (NR-13) como vaso de pressão. Reservatórios do gênero são amplamente empregados em instalações de clubes, hotéis, hospitais e edificações prediais diversas. Tais reservatórios tornam-se equipamentos de altíssimo risco, caso não sejam observadas determinadas normas de projeto, fabricação, instalação e, principalmente, de operação e manutenção, devido ao elevado potencial de danos materiais, lesões corporais e vítimas fatais em casos de explosão. Assim sendo este trabalho tem como objetivo precípuo determinar as causas determinantes da explosão. Baseando-se na estimativa dos esforços envolvidos, em exames metalográficos, na análise termodinâmica e na análise dos vestígios oriundos da explosão, verificou-se uma confluência de fatores que, combinados, foram determinantes para a ocorrência do sinistro. O trabalho também ressalta a necessidade de maior rigor na fiscalização por parte órgãos competentes a fim de garantir o cumprimento da norma regulamentadora deste tipo de equipamento e prevenir sinistros futuros.

*Palavras-Chave:* Explosão; Vaso de Pressão; Termodinâmica; NR-13.

---

### Abstract

The scope of this essay analyzes an event of explosion of a hot water tank used in the activities of a hotel facility, classified as pressure vessels by the Brazilian regulatory norm (NR-13). These kind of tanks are widely used in clubs, hotels, hospitals and many others building constructions. Such tanks become extremely high-risk equipment, if certain standards of design, manufacture, installation and especially operation and maintenance are not observed, due to the high potential for property damage, personal injury and fatalities in cases of explosion. Thus, this essay has as main objective to determine the determinants of the explosion. Based on the estimate of forces and stresses involved, in metallographic exams, in the thermodynamic involved and on the analysis of traces from the explosion, was verified a confluence of factors that, combined, were determinant for the accident. This essay also highlights the need for greater consistency in supervisions by relevant bodies in order to ensure compliance of the regulation of this type of equipment and prevent future disasters.

*Keywords:* Explosion; Pressure Vessels; Thermodynamic; NR-13.

---

### 1. INTRODUÇÃO

As indústrias de processos transformam matérias-primas de baixo valor agregado em produtos com valor agregado mais elevado como bens de consumo e produtos intermediários.

O vapor d'água surgiu como elemento indispensável nos processos de transformação primária, tornando imprescindível a utilização de caldeiras (unidades geradoras de vapor) e de vasos de pressão (unidades de

processo), pela necessidade de captação da energia liberada pela queima do combustível numa unidade central, e posterior distribuição aos demais pontos de consumo do processo industrial das empresas.

Diversos fluidos de trabalho podem ser empregados com tal finalidade, porém, a preferência pelo vapor d'água como fluido de trabalho é justificada pelo seu elevado calor específico, aliado à ampla disponibilidade de água no meio industrial [1].

O vapor d'água constitui-se, portanto, no principal

elemento de transporte de energia que atende, de forma abrangente, a necessidades existentes, por exemplo, nos processos de nutrição, lavanderia, esterilização de materiais, reservatórios de água quente, entre outros. Destarte, caldeiras e vasos de pressão tornaram-se equipamentos amplamente empregados não apenas do setor industrial, mas também de outros setores, entre os quais se incluem os setores: hoteleiro, hospitalar, de nutrição, e de clubes desportivos.

## 2. RISCOS DAS ATIVIDADES ENVOLVENDO CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO

Em 1905, uma explosão da caldeira de uma fábrica de sapatos na cidade de Brockton (Massachusetts - EUA), resultou em 58 vítimas fatais e 117 feridos. O incidente causou enorme impacto na sociedade motivou diversos estudos. A partir daí, foram criados os códigos da American Society of Mechanical Engineers (ASME), que se constituem na principal fonte de referência normativa sobre caldeiras e vasos de pressão do mundo. Além destes códigos, existem as British Standards (BS), as normas da Association Française de Normalization (AFNOR), o Code d'Appareils à Pression (Codap), as normas soviéticas, alemãs, japonesas e outras [2].

Caldeiras e vasos de pressão são equipamentos construídos para suportar e/ou armazenar substâncias a pressões e temperaturas muito diferentes das condições normais. Estes equipamentos encerram uma quantidade de energia, que, se liberadas sob controle, atenderão as suas finalidades, sem qualquer risco. Entretanto, caso não sejam observadas determinadas normas de projeto, fabricação, instalação e, principalmente, de operação e manutenção, sinistros poderão ocorrer. Tais sinistros, por vezes, constituem-se em catástrofes de grandes proporções, pois a energia acumulada é subitamente liberada, resultando, entre outras consequências, em danos materiais, lesões e/ou vítimas fatais [3, 4].

No Brasil, com o surgimento das NR (Normas Regulamentadoras) em 1978, através da portaria nº. 3.214, se consolidou uma legislação clara e definitiva [3].

### 3. NR-13

A Norma Regulamentadora 13 (NR-13) fornece orientações fundamentais e específicas para a segurança de processos que adotam caldeiras e vasos de pressão. Neste sentido, as empresas que possuem esses equipamentos e atividades em seu escopo, devem adotar os procedimentos obrigatórios da Norma Regulamentadora 13 que fornece orientações fundamentais e específicas para a segurança do processo. A NR-13 possui caráter preventivo de danos ao ser humano e às instalações; requer inspeções,

dispositivos de segurança, identificações, registros e documentos, projeto de instalação, manutenções e profissionais habilitados entre outros [5, 7].

## 4. CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO

### 4.1. Caldeiras

As primeiras máquinas destinadas a gerar vapor surgiram no início do século XVIII. O desenvolvimento das unidades geradoras de vapor foi estimulado pela necessidade de se encontrar uma fonte de calor que substituísse os inconvenientes apresentados pela queima direta do carvão fóssil [1].

Os geradores de vapor atuais e popularmente denominados caldeiras são definidos também como trocadores de calor. Na definição de Braga [6], segundo Campos [5]:

"Em um trocador de calor os fluidos com temperaturas diferentes permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede, pela qual se realiza a transferência de calor, no contato direto ou indireto."

Estes equipamentos possuem estruturas bastante diversificadas, sendo construídos de forma a melhor aproveitar a energia liberada pela queima do combustível. São capazes de operar, em grande parte das aplicações industriais, com pressões vinte vezes maiores que à atmosférica, podendo constituir durante sua operação, um risco grave e iminente para a integridade física dos trabalhadores. Caldeiras são construídas com chapas e tubos, o calor liberado pelo queima do combustível faz com as partes metálicas da mesma se aqueça transferindo calor à água e produzindo o vapor [5].

### 4.2. Vasos de Pressão

Para Campos [5]:

"Vasos de pressão são todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidades, não sujeitos à chama, fundamentais nos processos industriais, que contenham fluidos e sejam projetados para resistir com segurança a pressões internas diferentes da pressão atmosférica, ou submetidos à pressão externa".

A NR-13, no que se refere a vasos de pressão, é aplicada a quaisquer vasos cujo produto PV seja superior a 8 (oito), onde "P" é a máxima pressão de operação em kPa (quilopascal), e "V" o seu volume geométrico interno em m<sup>3</sup> (metro cúbico). Incluem-se nesta os permutadores de calor, evaporadores e

similares; vasos de pressão ou partes sujeitas a chama direta que não estejam dentro do escopo de outras NR, nem seja classificado como caldeira pela NR-13; vasos de pressão encamisados, incluindo refervedores e reatores; autoclaves e caldeiras de fluido térmico que não o vaporizem; e vasos que contenham fluido da classe “A”, independente da relação PV. Ainda de acordo com a NR-13, “Os vasos de pressão estão classificados em categorias segundo o tipo de fluido e potencial de risco” [7].

## 5. METODOLOGIA

Este estudo de caso refere-se a um incidente explosivo ocorrido em um estabelecimento hoteleiro que se utilizava de caldeiras e vasos de pressão para suas atividades operacionais.

A coleta de dados foi realizada em três etapas, aqui denominadas: etapa de campo, etapa de laboratório e etapa documental.

Durante a etapa de campo localizou-se o epicentro da explosão, analisou-se os aspectos morfológicos da edificação e dos equipamentos originalmente acondicionados em seu interior e, realizou-se a constatação de vestígios materiais que pudessem ter relação com o incidente. Baseando-se nos aspectos morfológicos do equipamento que explodiu, realizou-se a coleta de amostras em regiões específicas para a realização de exames periciais complementares em laboratório.

Na etapa de laboratório foram realizados exames metalográficos diversos: análises macroscópicas, análises microestruturais, análises de microdureza e análises químicas.

Na etapa de pesquisa documental, efetuou-se a categorização de risco tendo como base a Norma Regulamentadora 13 (NR-13).

No presente trabalho, além da Norma Regulamentadora 13 (NR-13), também foram consultados artigos científicos publicados, bem como monografias de especialização e dissertações de Mestrado depositadas em bibliotecas digitais de universidades brasileiras, e livros técnicos relacionados ao tema.

Através da eliminação de hipóteses e com base nos dados coletados nas etapas de campo, de laboratório e de pesquisa documental, foi possível remontar a dinâmica do evento.

## 6. Resultados

### 6.1. Etapa de campo

#### 6.1.1. Edificação motivo pericial

O incidente explosivo ocorreu na “Casa de Máquinas” de um estabelecimento hoteleiro, onde se abrigava o maquinário do sistema de aquecimento de água – caldeiras, reservatórios de água aquecida e torres de arrefecimento – destinado ao abastecimento, armazenamento e distribuição de água aquecida em suas atividades comerciais, tais como lavanderia, cozinha e banho.



Figura 1. Edificação sinistrada.

#### 6.1.2. Sistema de aquecimento e armazenamento de água

Havia 02 (dois) reservatórios que armazenavam água para o consumo geral do hotel (lavanderia, chuveiros, esterilização de alimentos, etc.). Ambos operavam na posição horizontal, possuíam uma capacidade interna de 3.000L (três mil litros), e permaneciam completamente preenchidos com água proveniente da caixa d'água. A caixa d'água do estabelecimento hoteleiro possuía 84.000L (oitenta e quatro mil litros) de capacidade e encontrava-se localizada à aproximadamente 42m (quarenta e dois) metros de altura dos reservatórios. A canalização de água possuía tubulação de respiro (“tubo ladrão”), que se encontrava desobstruída. O referido sistema encontra-se ilustrado no croqui da Fig. 2.

A temperatura da água em seu interior mantida entre 40°C e 60°C através de sistemas de aquecimento que operavam de duas maneiras distintas durante o decorrer do dia.

No período compreendido entre 06h00min e 22h00min, período em que a lavanderia do hotel encontrava-se em funcionamento, o aquecimento da água destes reservatórios era realizado pela energia térmica proveniente do vapor d'água gerado nas caldeiras, que atingiam o interior do reservatório dentro de tubos trocadores de calor. Um queimador promovia a queima de gás natural e a energia térmica desses gases aquecidos vaporizava a água no interior da caldeira. O vapor d'água aquecido passava pelo trocador de calor

(uma serpentina) que acoplado ao interior do reservatório de água, aquecendo-a. Válvulas de controle bloqueavam a entrada do vapor no trocador de calor se a temperatura da água ultrapassasse os 60°C.

Às 22h00min, era realizado o desligamento das caldeiras. Entre 22h00min do dia e 06h00min do dia subsequente, as caldeiras permaneciam desligadas e o aquecimento de água era mantido entre 40°C e 60°C através de um conjunto de resistências elétricas e de termostatos acoplados à estrutura do reservatório.

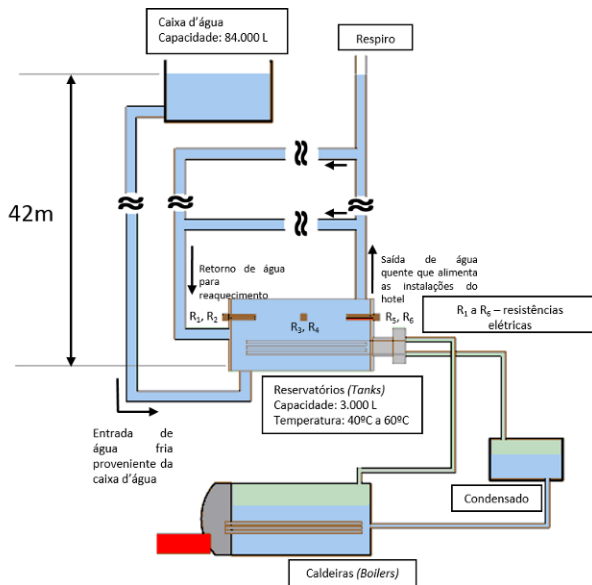


Figura 2. Croqui do sistema de aquecimento e armazenamento de água.

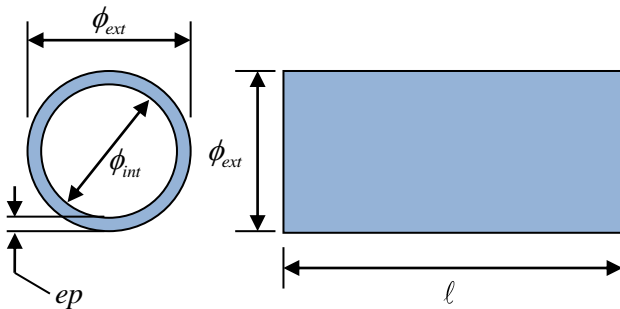


Figura 3. Croqui das dimensões do reservatório.

Tabela 1. Dimensões e pressão interna do reservatório.

<b>Diâmetro Externo</b>	$\phi_{ext} = 122,10cm$
<b>Raio Externo</b>	$r_{ext} = 61,05cm$
<b>Diâmetro Interno</b>	$\phi_{int} = 120,50cm$
<b>Raio Interno</b>	$r_{int} = 60,25cm$
<b>Espessura de Parede</b>	$ep = 0,80cm$
<b>Comprimento</b>	$l = 242,00cm$
<b>Pressão Interna</b>	$p_{int} = 4,2atm = 4,340 kgf/cm^2$

### 6.1.3. Epicentro da explosão

Apesar de explosões deste tipo ocorrerem com maior frequência em caldeiras, as mesmas não figuraram como causa deste sinistro. As avarias constatadas nas caldeiras foram produzidas em decorrência da onda de choque e/ou projeção de destroços. A análise do sistema de controle das caldeiras evidenciou que as mesmas encontravam-se desligadas no momento da explosão. E, o horário da explosão (05h57min), confirmado através das câmeras de monitoramento do estabelecimento comercial vizinho ao estabelecimento hoteleiro, coincidia com o período rotineiro do estabelecimento em que as caldeiras permaneciam desligadas. Tais certificações foram importantes para se descartar a hipótese de que algum funcionário tivesse esquecido de desligar a caldeira na noite do dia anterior ao incidente.

A análise estrutural da edificação e dos equipamentos presentes no interior desta, permitiu identificar como epicentro da explosão um dos reservatórios de armazenamento de água aquecida.

A explosão resultou na projeção da tampa da porção anterior do reservatório contra a parede do hotel (Fig. 4) e, em razão da conservação da quantidade de movimento, também resultou na projeção do restante da estrutura do reservatório em sentido contrário (Fig. 5), impactando contra a parede da edificação vizinha. Os impactos quase simultâneos da tampa e da estrutura do reservatório produziram um intenso esforço de tração nas vigas da estrutura da edificação (Fig. 6). Diversas outras avarias presentes foram produzidas pela “onda de choque” proveniente da explosão.



Figura 4. Região de impacto da tampa do reservatório contra a parede do hotel.

### 6.1.4. Reservatório que explodiu

A estrutura metálica do reservatório sinistrado possuía, originalmente, 03 (três) termostatos. Dois deles não estavam acoplados à estrutura do reservatório em questão, pois foram suprimidos em razão da “onda de

choque” e/ou impactos provenientes da explosão. Tais termostatos também não foram localizados nas proximidades do sítio de explosão, uma vez que foram realizados serviços de limpeza nas ruas localizadas na região mediata à edificação hoteleira antes da chegada da equipe de perícias. O único termostato que se encontrava acoplado à estrutura metálica deste reservatório foi removido, sem autorização prévia, por pessoa alheia à perícia criminal, sendo esta alteração constada em Laudo Pericial.



**Figura 5.** Região de impacto da estrutura do reservatório contra a parede da edificação vizinha.



**Figura 6.** Efeito dos esforços de tração na viga.

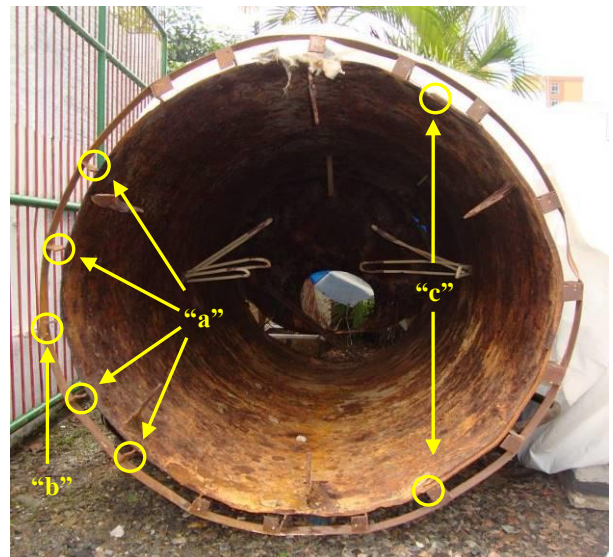


**Figura 7.** Ausência dos termostatos.

De acordo com as informações repassadas por funcionários, os termostatos não possuíam sistema de segurança interligado, ou seja, estes operavam de maneira independente controlando, cada um deles, duas resistências elétricas. Caso a temperatura atingisse 60°C, cada termostato interrompia o fornecimento de energia elétrica das 02 (duas) resistências elétricas as quais controlava, não havendo influência deste na interrupção de fornecimento de energia elétrica para as demais resistências. Portanto, a falha de 01 (um) termostato seria suficiente para a continuidade de fornecimento de energia elétrica para 02 (duas) resistências elétricas que por ele eram controladas, possibilitando a elevação da temperatura da água acima de 60°C.

A porção interna da estrutura metálica do reservatório apresentava-se em avançado estado de corrosão (Fig. 8). O processo de corrosão formou depressões em toda a superfície interna reduzindo em diversos pontos a espessura de parede do reservatório.

A análise morfológica das deformações constantes na estrutura do reservatório sinistrado e em sua tampa, a disposição de ambos no local da explosão, e uma solução de continuidade constatada na porção anterior direita do reservatório, evidenciaram que o início da ruptura deste ocorreu em sua porção anterior direita. E que, em razão da expansão brusca de gases, a tampa foi projetada, em relação ao reservatório, no sentido posterior para anterior e levemente da direita para a esquerda, enquanto que o restante da estrutura sofreu recuo com sentido contrário.



**Figura 8.** Porção anterior do reservatório com visualização da corrosão interna e análise morfológica de deformações: a) ausência de suportes metálicos de fixação; b) suporte metálico de fixação empenado radialmente para fora do reservatório; c) rasgaduras no cordão de solda que fixava a estrutura metálica do reservatório a sua tampa.

## 6.2. Etapa de laboratório

A análise morfológica das avarias indicava ser, na porção direita deste, a região de provável eclosão de ruptura do recipiente, caracterizada pela presença de uma solução de continuidade na estrutura do recipiente (Fig. 9). Na porção anterior do reservatório, em uma única região de seu perímetro de circunferência destinada à tampa, havia um fragmento metálico pertencente à estrutura do reservatório que estava soldado na correspondente posição na tampa (Fig. 10).



Figura 9. Solução de continuidade na estrutura do reservatório.



Figura 10. Fragmento metálico pertencente à estrutura do reservatório soldado em sua tampa.

Amostras da estrutura e da tampa do reservatório desta região de interesse foram recortadas e submetidas a exames metalográficos laboratoriais (Fig. 11).

### 6.2.1. Análise macroscópica

A análise macroscópica das amostras evidenciou a presença de corrosão, com profundidade aproximada de metade da espessura da amostra da estrutura do reservatório (Fig. 12), e com profundidade aproximada de um quarto da espessura da amostra da tampa (Fig. 13).



Figura 11. Amostras. “Tampa” (esquerda) e “Estrutura” (direita).

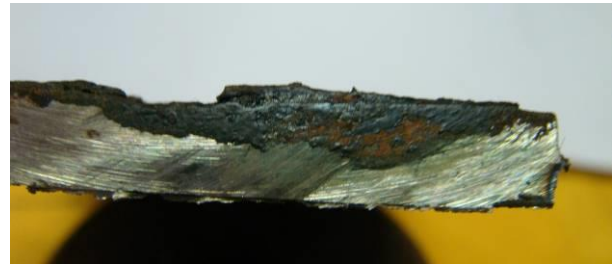


Figura 12. Corrosão – Amostra “Estrutura”.



Figura 13. Corrosão – Amostra “Tampa”.

### 6.2.2. Análise microestrutural

A análise microestrutural das amostras evidenciou que ambas correspondiam a aço carbono ferrítico perlítico [8, 9], usual para o tipo de aplicação a que se destinava (Fig. 14 e 15).

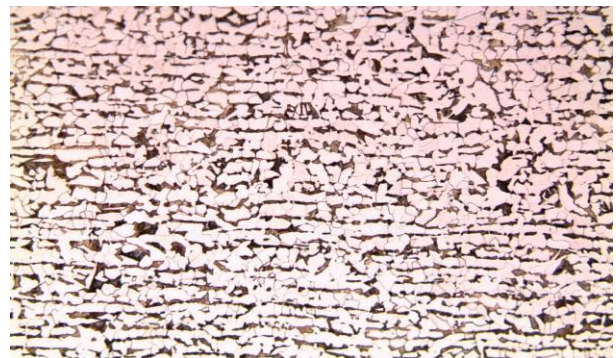
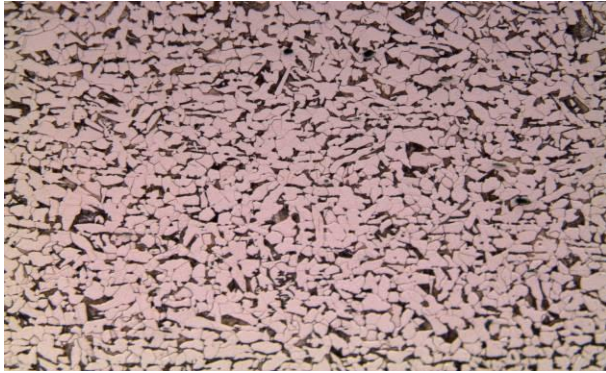


Figura 14. Microestrutura da amostra “Estrutura” – Ampliação 200x.



**Figura 15.** Microestrutura da amostra "Tampa" – Ampliação 200x.

A análise microestrutural na região de solda das amostras também não apresentou quaisquer anomalias na região da zona afetada pelo calor (posições 5 a 8 da Fig. 16).

### 6.2.3. Análise de microdureza

A análise de microdureza das amostras apresentou valores típicos para o material e para esta aplicação a que se destinava.

**Tabela 2.** Microdureza das amostras "Estrutura" e "Tampa".

"Estrutura"	"Tampa"
159 HV	179 HV
163 HV	172 HV
164 HV	160 HV

A análise de microdureza na região de solda das amostras também não apresentou quaisquer anomalias na região da zona afetada pelo calor (posições 5 a 8 da Fig. 16), indicando que o procedimento de soldagem

utilizado na construção do reservatório foi adequado ao uso pretendido.



**Figura 16.** Microestrutura e perfil de impressões de microdureza Vickers na junta soldada – Ampliação 50x.

**Tabela 3.** Medidas de microdurezas da junta soldada entre "Estrutura" e a "Tampa" (HV 2kgf).

Posição	Microdureza (HV2)
1	205
2	208
3	215
4	198
5	197
6	196
7	191
8	182
9	182
10	176
11	169
12	168
13	171

### 6.2.4. Análise de química

A análise química das amostras evidenciou que ambas eram constituídas de aço carbono típicos para a aplicação a que se destinavam, estando os demais elementos dentro das faixas residuais típicas.

**Tabela 4.** Análise química – amostra "Estrutura".

	"Estrutura"							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1	0,263	0,0798	0,729	0,0327	0,0283	0,0206	< 0,0010	0,0099
2	0,256	0,0861	0,731	0,0332	0,0220	0,0191	< 0,0010	0,0094
3	0,256	0,0795	0,714	0,0321	0,0218	0,0188	< 0,0010	0,0084

**Tabela 5.** Análise química – amostra "Tampa".

	"Tampa"							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1	0,260	0,0712	0,730	0,0357	0,0323	0,0371	< 0,0010	0,0167
2	0,254	0,0683	0,720	0,0325	0,0245	0,0243	< 0,0010	0,0095
3	0,258	0,0838	0,721	0,0329	0,0268	0,0225	< 0,0010	0,0102

### 6.3. Etapa de pesquisa documental

Alicerçando-se na NR-13 [7], determinou-se que o reservatório sinistrado se encontrava efetivamente enquadrado na referida norma, como um vaso de

pressão de categoria V, devendo obedecer os prazos máximos de inspeção de segurança: exame externo – 5 anos, exame interno – 10 anos, e teste hidrostático – 20 anos.

Tabela 6. Categorização de Risco de acordo com a NR-13.

	NR-13	Descrição
<b>Enquadramento na norma como vaso de pressão</b>	Anexo III, item 1-a	“... qualquer vaso cujo produto "P.V" seja superior a 8 (oito), onde "P" é a máxima pressão de operação em kPa e "V" o seu volume geométrico interno em m <sup>3</sup> ...” $p = 4,2atm = 411,87kPa$ e $V = 3.000L = 3m^3 \Rightarrow p.V = 1235,6kPa.m^3$
<b>Classificação</b>	Anexo IV, item 1.1	<u>CLASSE “D”</u> - Água ou outros fluidos não enquadrados nas classes "A", "B" ou "C", com temperatura superior a 50°C.
<b>Grupo</b>	Anexo IV, item 1.2	“... Os vasos de pressão são classificados em grupos de potencial de risco em função do produto "PV", onde "P" é a pressão máxima de operação em Mpa e "V" o seu volume geométrico interno em m <sup>3</sup> ...” <u>GRUPO 4</u> - $P.V < 2.5$ e $P.V \geq 1$ $p = 4,2atm = 0,41187MPa$ e $V = 3.000L = 3m^3 \Rightarrow p.V = 1,235MPa.m^3$
<b>Categorização</b>	Anexo IV, item 1.3	<u>CATEGORIA “V”</u> : CLASSE “D” e GRUPO 4
<b>Prazos máximos de inspeção de segurança</b>	Item 13.10.3.a	Exame Externo – 5 anos; Exame Interno – 10 anos; Teste Hidrostático – 20 anos;

## 7. DISCUSSÃO

### 7.1. Fatores determinantes

Da interpretação dos vestígios materiais, considerou-se a possível influência de quatro fatores principais: a) corrosão; b) termodinâmica; c) temperatura; e d) fadiga.

a) Corrosão: a corrosão ficou evidente nos exames laboratoriais, onde se constatou a presença de corrosão comprometendo profundidade que variava de metade e um quarto da espessura das amostras. A ação da corrosão proporciona perda de resistência mecânica causada pela redução de espessura e aumento das tensões de operação do material.

b) Termodinâmica: a temperatura de vaporização da água, sob pressão normal, de uma atmosfera, é de 100°C. Porém, a água no interior do reservatório encontrava-se submetida à pressão aproximada de 4,2 atmosferas. Submetida à pressão de 4,2 atmosferas, a temperatura de vaporização da água corresponde à aproximadamente 145,8°C [10]. Assim, caso houvesse falha em pelo menos um dos termostatos, e este continuasse aquecendo a água, esta aqueceria, ainda no estado líquido, até a temperatura de 145,8°C, quando entraria, então, em ebulição.

c) Temperatura: em condições normais de operação do reservatório (temperaturas compreendidas na faixa de 40°C a 60°C), a força atuante na tampa, calculada através da Eq. 1, era de aproximadamente 49,5 tonelada-força, e a tensão tangencial atuante sobre a estrutura do reservatório calculada através da Eq. 2, era de aproximadamente 32MPa.

Entretanto, observa-se pelo gráfico da Fig. 17 que a tensão de escoamento para um aço similar ao do

reservatório é da ordem de 350MPa para tais condições de operação [13, 14]. Assim, a tensão tangencial aproximada de 32MPa a qual o recipiente sinistrado encontrava-se submetido, se apresenta muito aquém daquela que produziria o escoamento do material.

Também é possível observar pelo referido gráfico que a perda de resistência ao escoamento não é significativa para temperaturas até 250°C. Ou seja, mesmo atingindo temperaturas da ordem de 150°C, o material não sofreria mudanças significativas em sua resistência mecânica. Destarte, descartou-se a temperatura como fator de fragilização da resistência mecânica do material.

Força Atuante na tampa: [11]

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p_{int} \cdot \pi \cdot r_{int}^2 \quad (1)$$

$$F = (4,340 \text{ kgf/cm}^2) \cdot \pi \cdot (60,25 \text{ cm})^2$$

$$F = 49,494 \text{ kgf} \cong 49,5 \text{ toneladas-força}$$

Tensão tangencial atuante: [12]

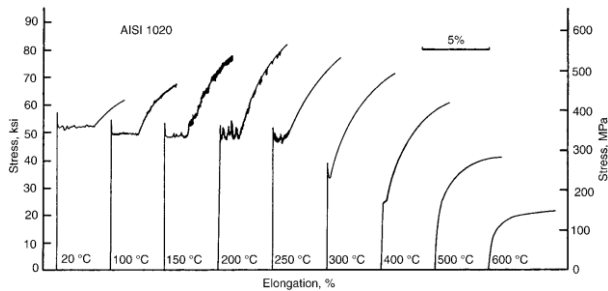
$$\sigma_t = \frac{P_{int} \cdot r_{médio}}{ep} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{(4,340 \text{ kgf/cm}^2) \cdot (60,65 \text{ cm})}{(0,80 \text{ cm})}$$

$$\sigma_t = 329,0262 \text{ kgf/cm}^2 \cong 32 \text{ MPa}$$

d) Fadiga: nas condições normais de trabalho, o reservatório operava em ciclos térmicos entre 40°C e 60°C e, consequentemente, encontrava-se submetido à ciclos de tensão pelos efeitos de dilatação e de contração sucessivos.





**Figura 17.** Região inferior de curvas tensão deformação para aço 1020 em várias temperaturas.

No entanto, constatou-se a ausência de marcas de nucleação em pontos de concentração de tensão, a ausência de marcas de propagação de trinca de fadiga (*beachmarks*), bem como a ausência de estrias de fadiga na região de ruptura. A ausência de tais elementos técnicos afastaram a fadiga térmica como causa determinante da ruptura.

## 7.2. Dinâmica do evento

### 7.2.1. 1ª Hipótese

**1ª Hipótese:** os termostatos do reservatório operaram conforme programados, mantendo a temperatura entre 40°C e 60°C, quando ocorreu a ruptura do reservatório.

Caso os termostatos, estivessem operando conforme programados, a água dentro do reservatório estaria, no máximo, à temperatura de 60°C. Uma eventual ruptura da estrutura metálica do reservatório, fragilizado pela corrosão, proporcionaria o contato da água do reservatório com a atmosfera, submetendo-a à pressão atmosférica (1atm). Porém, sob pressão de uma atmosfera, a água à 60°C encontra-se no estado líquido. Desta forma, esta primeira hipótese promoveria apenas vazamento de água do reservatório, no estado líquido e a uma temperatura de, no máximo, 60°C. Tal hipótese não condiz com a ocorrência de explosão porque não provocaria expansão de vapor d'água. Sendo, portanto, descartada.

### 7.2.2. 2ª Hipótese

**2ª Hipótese:** ocorreu a operação inadequada ou a falha de um ou mais termostatos, sem que a estrutura metálica do reservatório sinistrado tenha sofrido ruptura.

Caso a estrutura metálica do reservatório tenha permanecido íntegra, ou seja, não sofrendo qualquer ruptura inicialmente, uma eventual operação inadequada ou falha de um ou mais termostatos promoveria o aquecimento da água para valores de temperatura acima da 60°C. Em virtude da elevada pressão de 4,2 atmosferas no interior do reservatório, este aquecimento poderia superar a temperatura de 100°C, podendo atingir, no

limite, a temperatura de vaporização da água para esta pressão, 145,8°C. No entanto, foi constatado que a tubulação de respiro (“tubo ladrão”) encontrava-se desobstruída, sendo, portanto, improvável o acúmulo de vapores d'água no interior do reservatório, uma vez que eventuais vapores formados tenderiam a entrar pela canalização e serem liberados pelo respiro devido ao fato de sua densidade ser inferior a da água líquida. Assim, tal hipótese foi descartada uma vez que a não havendo acúmulo de gases no interior do reservatório, não haveria aumento significativo de pressão interna do reservatório que resultasse em sua explosão.

### 7.2.3. 3ª Hipótese

**3ª Hipótese:** ocorreu uma sucessão de fatores caracterizados pela inadequada operação ou falha de pelo menos um dos termostatos e, posteriormente, a ocorrência de uma eventual ruptura da estrutura metálica do reservatório.

No caso da ocorrência dessa sucessão de fatores, a pressão de trabalho usual de 4,2 atmosferas a que a água dentro do reservatório se encontrava submetida proporcionaria o aquecimento desta, ainda no estado líquido, a temperaturas acima de 100°C – entre 100°C e 145,8°C. Uma eventual ruptura da estrutura do reservatório, completamente preenchido com água acima de 100°C, deixaria a água submetida à pressão atmosférica, ou seja, haveria uma brusca queda de pressão de 4,2 atmosferas para a pressão de uma atmosfera. Porém, água em temperatura acima de 100°C, sob pressão de uma atmosfera, existe no estado gasoso. Desta forma, uma brusca queda de pressão de 4,2 atmosferas para uma atmosfera, nas condições de temperatura a que a água do reservatório está submetida, proporcionaria uma súbita mudança de estado físico, do estado líquido para o estado de vapor, de parte do conteúdo de água do reservatório. Assim, o vapor d'água formado subitamente tenderia a expandir-se, porém, por estar confinado no reservatório, proporcionaria um efeito explosivo.

## 7.3. Responsabilidades

Em incidentes desta natureza, é comum as partes envolvidas tentarem se isentar das responsabilidades. Dentre as alegações das partes envolvidas, foram levantadas questões como problemas de fabricação e não enquadramento do reservatório na NR-13 sob a condição de vaso de pressão.

Os exames laboratoriais não evidenciaram quaisquer características que viessem a sugerir problemas de projeto ou de fabricação do reservatório em questão. Para as condições de operação, os reservatórios de armazenamento de água aquecida encontravam-se

enquadrados na NR-13 e deveriam obedecer os prazos máximos de inspeção de segurança, porém, operavam há aproximadamente 18 anos sem serem submetidos a quaisquer inspeções periódicas durante este período.

As provas periciais, entretanto, servirão de fundamentação para determinação das responsabilidades por parte dos magistrados.

## 8. CONCLUSÃO

Reservatórios de armazenamento de água aquecida são equipamentos corriqueiros em diversas aplicações em atividades comerciais, industriais e atividades de lazer e desporto. Muitos deles são enquadrados como vasos de pressão pela NR-13. Entendimentos equivocados da interpretação da norma e/ou negligências no que tange às inspeções de segurança periódicas e manutenções podem resultar em tragédias de grandes proporções, colocando em risco iminente os trabalhadores, moradores das proximidades e pessoas que estejam transitando próximas a estabelecimentos que se utilizam de tais equipamentos, podendo haver perdas irreparáveis. Ressalta-se, portanto, a necessidade de maior rigor na fiscalização por parte de órgãos competentes.

No caso em estudo, as ausências de inspeções de segurança, de manutenção e de fiscalização, contribuíram para que a soma de fatores culminassem na explosão do reservatório, cujas causas determinantes foram: a operação inadequada de pelo menos um dos termostatos – que propiciou a elevação da temperatura da água no interior do reservatório a temperaturas acima de 100°C (entre 100°C e 145,8°C) –, aliada a posterior ruptura da estrutura metálica do reservatório, resultando no processo termodinâmico de súbita vaporização de considerável quantidade de água em virtude da brusca variação de pressão.

## AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos aos familiares pelo apoio incondicional, ao Perito Criminal Edilson Manoel dos Santos do Instituto Geral de Perícias de Santa Catarina (IGP/SC) pelo apoio ao trabalho pericial, ao Laboratório de Materiais (LABMAT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em especial, ao professor Pedro Amedeo Nannetti Bernardini e ao técnico de laboratório Ivens Wagner de Abreu Junior, pela realização dos exames metalográficos laboratoriais, e ao professor José de Pinho Alves Neto do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela revisão do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Bazzo. *Geração de Vapor*. 2ª Edição, Ed. UFSC, Florianópolis-SC, Brasil (1995) 1p.
- [2] E.R. Souza. *Uma contribuição à reformulação da norma regulamentadora 13 (NR-13) na perspectiva da adoção de sistema de gestão de segurança e saúde ocupacional*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, Brasil (2008). Retirado em 01/12/2012, de: [http://bdttd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/6/TDE-2010-12-29T053340Z-3221/Publico/EdilsonRS DISSERT.pdf](http://bdttd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde_arquivos/6/TDE-2010-12-29T053340Z-3221/Publico/EdilsonRS DISSERT.pdf)
- [3] C.A. O. Cruz; G.M.A. Silva. *Caldeiras e vasos de pressão - NR-13: análise do pré-requisito de 1o grau necessário para capacitação dos profissionais que participam dos treinamentos de segurança*. Monografia, Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador-BA, Brasil (2008).
- [4] M.M. Oliveira; R.E. Catai; R. Serta; C.W. Mainardes; M.R.S.O. Canonico. *Análise do gerenciamento de riscos de um sistema de caldeira e vaso de pressão - estudo de caso*. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte-MG, (2011). Retirado em 28/11/2012, de: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011\\_TN\\_ST O\\_138\\_877\\_18237.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_ST O_138_877_18237.pdf)
- [5] M.A. Campos. *Estudo das instalações e operação de caldeira e vasos de pressão de uma instituição hospitalar sob análise da NR 13*. Monografia, Curso de Pós-Graduação, Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma-SC, Brasil (2011). Retirado em 27/11/2012, de: <http://200.18.15.27/bitstream/handle/1/825/M%C3%A1rcia%20Aparecida%20de%20Campos.pdf?sequence=1>
- [6] W. Braga. *Transmissão de calor: introdução ao estudo*. Vol I, Ed. Booklink, Rio de Janeiro-RJ, Brasil (2001) 342p.
- [7] BRASIL. *NR-13 Caldeiras e Vasos de Pressão*. Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978-NR 13, Ministério do Trabalho (1978). Retirado em 21/01/2014, de: [http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr\\_13.pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf)
- [8] ASM International. *ASM Handbook: Metallography and microstructures*. Vol. 9, ASM International, USA (2004) 51-248p.
- [9] W. D. Callister; D.G. Rethwisch. *Materials science and engineering: an introduction*. 8<sup>th</sup> Ed, John Wiley & Sons, Inc. (2010), 393-442p.
- [10] G. Van Wylen; R. Sonntag; C. Borgnakke. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo-SP, Brasil (1995) 519p.
- [11] D. Halliday; R. Resnick. *Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica*. Vol 2, 3ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, Brasil (1994) 79p.
- [12] R.L. Norton. *Machine design: an integrated approach*. 3<sup>rd</sup> ed, Prentice-Hall, USA (2006) 240p.

[13] ASM International. *Atlas of stress-strain curves: CS.012 1020 carbon steel, tensile stress-elongation curves at room and elevated temperatures*. ASM International, USA (2002) 73p.

[14] W.C. Leisle. *The Physical Metallurgy of Metals*. McGraw-Hill and Hemisphere Publishing, USA (1981) 92p.