

Montagem de Dispositivos Ópticos para Obtenção de Imagens por Contraste de Difração e Atenuação para Análise de Incrustações de Fosfato e Oxalato de Cálcio em Superfícies de Caldeiras

Maycon Fioreze e Marcelo G. Hönnicke

Universidade Federal da Integração Latino-Americana

RESUMO

Incrustações em caldeiras aquotubulares é um problema clássico. Determinados compostos contidos na água de alimentação e/ou reposição da caldeira tendem a adquirir uma condição de supersaturação, se depositando sobre a superfície de troca térmica. Alguns métodos são empregados para detectar a presença destas incrustações, chamados de ensaios não destrutivos (END). Os END são técnicas usadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los. O método proposto neste trabalho é um END que combina radiografia industrial e difração de raios-X. Este método pode detectar incrustações em pequenas concentrações, simultaneamente por difração e por atenuação. Fendas cônicas foram projetadas, construídas e testadas para implementar a técnica de imagem assistida por difração com o objetivo de detectar incrustações de oxalato de cálcio e fosfato de cálcio em superfícies de troca térmica de caldeiras. Neste sentido, a fenda cônica foi projetada para capturar, dentro de um ângulo de difração razoável, o cone de difração de pó mais intenso. Além disso, a abertura angular da fenda cônica foi calculado a fim de maximizar a intensidade difratada, ao mesmo tempo proporcionando resolução angular suficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Incrustações, caldeiras, ensaios não destrutivos.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Norma Regulamentadora N° 13 (NR-13) do Ministério do Trabalho e Previdência Social, caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. Esses equipamentos efetuam processos que são definidos como a operação de adição de energia calorífica ao fluido a ser aquecido para geração de vapor. (Bega, 2003)

As caldeiras se diferem pela disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho, as quais podem ser classificadas como: *i*) aquotubulares (água nos tubos) produzindo vapor superaquecido, *ii*) flamotubulares (fogo nos tubos) produzindo vapor saturado e, *iii*) mistas com fornalha aquotubular e região flamotubular produzindo vapor saturado.

Em caldeiras flamotubulares, os gases circulam pelo interior de tubos imersos em água. Este tipo de caldeira é, geralmente, utilizado em aplicações de menor porte. Já nas caldeiras aquotubulares, a circulação de água ocorre no interior dos tubos e os gases trocam calor com a água por meio da parede desses tubos majoritariamente por radiação. As caldeiras aquotubulares são empregadas em centrais termelétricas e indústrias que demandam uma grande quantidade de vapor ou que carecem de vapor superaquecido. (Stuchi *et al*, 2015)

De acordo com Bega (2003), uma caldeira aquotubular é composta por dois sistemas básicos separados. Um é o sistema vapor-água, também chamado de lado de água da caldeira e, o outro, é o sistema combustível-ar-gás da combustão ou lado de fogo da caldeira. O início do sistema vapor-água é onde a água recebe calor através de uma barreira de metal sólido, sendo aquecida e transformada em vapor, deixando o sistema na forma de vapor. O lado de fogo da caldeira inclui o combustível e o ar de combustão, necessários à queima desse combustível. Nesse sistema, o combustível e o

ar de combustão são completa e cuidadosamente misturados, havendo na câmara de combustão a queima dos mesmos.

O vapor é utilizado em uma vasta gama de indústrias. Aplicações comuns para vapor são, por exemplo, processos aquecidos a vapor em usinas químicas, refinarias e fábricas de processamento de alimentos, propulsão de motores e turbinas movidos a vapor em indústria têxtil, cerâmica e centrais termelétricas, processos de limpeza e remoção de depósitos em superfícies de troca térmica de caldeiras, processos de hidratação na produção de papel ou ração animal e processos de umidificação para preservação de objetos ou controle de infecção.

Por melhor que seja a qualidade da água destinada a abastecer os geradores de vapor, sempre haverá nela gases e sais minerais (também chamados de contaminantes ou de impurezas). Isso ocorre porque, ao serem submetidos a valores mais elevados de temperatura e pressão, os contaminantes, presentes na água, assumem comportamentos muitas vezes indesejáveis às superfícies de troca térmica. (Costa, 2006)

Um dos principais problemas relacionado à qualidade da água de circulação nas caldeiras é a formação de incrustações. As incrustações são deposições de sólidos sobre as superfícies de aquecimento, devido à presença de impurezas: sulfatos, carbonatos de cálcio e/ou magnésio e sólidos em suspensão (óxido de ferro e óxido de cobre). Ainda, devido aos tratamentos inadequados da água, há a presença de sais de cálcio (fosfato de cálcio e/ou oxalato de cálcio). A elevação da concentração desses sais na água da caldeira, devido ao processo de evaporação, faz com que esses compostos ultrapassem seu limite de solubilidade na temperatura em que se encontram. Isso acarretará a formação de dois tipos de depósitos: lamas e incrustações (calcificações). As lamas são mais moles e menos aderentes. As incrustações são mais duras e aderentes e formam-se pelo crescimento cristalino dos sais. (Martinelli, 2003; Sarev, 2003)

Ainda, as incrustações atuam como isolante térmico, reduzindo a capacidade de transferência de calor da chama e dos gases de combustão para a água. Devido à baixa

condutividade térmica dos depósitos eleva-se o consumo de combustível da caldeira para a mesma taxa de produção de vapor. Também causam uma redução da produção de vapor, devido à obstrução do fluxo de escoamento na linha e nas válvulas. Além disso, aumentam as temperaturas de película dos metais, devido ao superaquecimento dos mesmos, podendo causar eventuais rupturas na tubulação ou falhas no sistema gerador de vapor. (Martinelli, 2003)

A norma regulamentadora N° 13 (NR-13) do Ministério do Trabalho e Previdência Social, também determina os parâmetros de segurança para caldeiras, estabelecendo procedimentos de inspeção e manutenção periódica e extraordinária das instalações. O proprietário da caldeira deve ter um programa de inspeção documentado, detalhado e individual para cada caldeira, levando em conta diferenças de concepção, idade, condições de operação e outras particularidades. Este programa deve ser continuamente revisado e atualizado, levando em consideração novas observações e experiências, mantendo um registro histórico de cada inspeção. O programa de inspeção considera a aplicação de técnicas especiais de ensaios não destrutivos e procedimentos desenvolvidos especificamente para caldeiras.

Os ensaios não destrutivos (END) investigam a sanidade dos materiais sem danificar ou introduzir quaisquer alterações nas suas características. Entre as técnicas de END (raios-X ou raios- γ) a radiografia industrial destaca-se pela praticidade e facilidade na detecção de defeitos estruturais (trincas e fissuras). Os sistemas de radiografias industriais baseiam-se na formação da imagem pela diferença da atenuação da radiação ionizante pelos diferentes materiais presentes na amostra em análise. Devido à variação na densidade e/ou composição, os diferentes materiais presentes na amostra atenuarão diferentes quantidades de radiação ionizante. (Andreucci, 2014)

As incrustações (calcificações) encontradas no interior das tubulações das caldeiras aparecem misturadas a outros depósitos de baixa densidade comparados com cobre e ferro, como por exemplo, óxido de ferro ou óxido de cobre, decorrentes do

processo de corrosão. Esses depósitos aparecem na imagem radiográfica com um baixo contraste comparado com o próprio material da tubulação, reduzindo sua detecção na imagem radiográfica.

As técnicas de imagem de raios-X tiveram um grande avanço com o desenvolvimento de novas fontes de raios-X, por exemplo, plasma, gálio líquido e fontes de radiação síncrotron de terceira geração (Shelkovenko *et al.*, 2003; Tuohimaa *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2014). Além disso, avanços no desenvolvimento de novos elementos que compõe a óptica de raios-X como lentes de Fresnel, lentes refratoras compostas e lentes multicamadas de Laue (Vila-Comamala *et al.*, 2012; Snigirev *et al.*, 1998; Evans-Lutterodt *et al.*, 2007; Kang *et al.*, 2006). Detectores de área de alta eficiência e resolução são agora facilmente encontrados (CCDs e “flat panels”).

O método proposto aqui é uma técnica alternativa que combina radiografia industrial e difração de raios-X, para detectar incrustações em estágios iniciais (pequenas concentrações) nas tubulações de caldeiras. Nesta abordagem, calcificações poderão ser detectadas simultaneamente por difração (por explorar a amostra até encontrar um pico de difração) e por atenuação (radiografia industrial).

Visando o desenvolvimento da técnica de imagem assistida por difração, uma fenda cônica (Nielsen *et al.*, 2000; Staron *et al.*, 2014) foi projetada, montada e testada para detecção de incrustações (calcificações). Uma vez que as calcificações de fosfato de cálcio apresentam baixa cristalinidade, concentramos os primeiros testes na detecção de calcificações de oxalato de cálcio. A fenda cônica é capaz de distinguir os cones de difração do oxalato de cálcio sob condição de espalhamento de fundo (incluindo, espalhamento elástico e inelástico), provenientes de outros compostos circundantes. O cobre e o ferro, existente nas ligas metálicas das tubulações não interferirão no ensaio não destrutivo proposto, pois a seção de choque de interação da radiação com a matéria destes compostos é, predominantemente, fotoelétrica.

Os equipamentos de radiografia industrial em geral utilizam tubos de raios-X com alvo de tungstênio (W), onde a energia da radiação característica gerada é da ordem de 60 keV ($W\text{K}\alpha$). Por ser uma energia com alta capacidade de penetração, torna-se difícil a detecção de materiais de baixa densidade. Pretendemos aplicar o nosso método para detecção de objetos de alta e baixa densidade. Para isso escolhemos um tubo de raios-X com alvo de molibdênio (Mo). Consequentemente, a fenda cônica foi projetada para operar em energias de 17,4 keV ($\text{MoK}\alpha$), que é radiação do molibdênio na linha espectral característica $\text{K}\alpha$.

Neste trabalho vamos primeiramente fazer uma breve introdução teórica sobre o processo de transferência de calor em caldeiras aquotubulares, a origem da formação de incrustações e suas consequências e, os principais ensaios não destrutivos empregados em caldeiras.

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CALDEIRAS

A transferência de calor em geradores de vapor é um complexo conjunto de fenômenos que envolvem troca de calor por radiação, convecção e condução térmica. O equacionamento teórico deste conjunto é complicado e exaustivo. Além disso, grande parte do conhecimento adquirido e aplicado nos estudos de troca de calor em caldeiras é fruto de relações empíricas. Muitas informações e dados sobre a troca de calor em caldeiras são propriedades dos fabricantes de equipamentos e, por razões óbvias, não estão disponíveis na literatura aberta. (Bizzo, 2003)

Uma simplificação apropriada é dividir a superfície de troca de calor de caldeiras em superfície de radiação e superfície de convecção. Devido às condições de temperatura, geometria e velocidade de fluidos, a troca de calor na fornalha (onde ocorre a combustão) é basicamente por radiação térmica. A parcela convectiva pode ser desprezada inicialmente.

Considere uma fornalha, onde ocorre a combustão, circundada por superfícies frias de troca de calor. Parte do calor gerado pela combustão é perdido pela chama para as superfícies de troca de calor. Um balanço de energia vai determinar a temperatura de saída dos gases de combustão da zona de radiação, se conhecidas as vazões mássicas de ar e combustível, o poder calorífico inferior do combustível e o calor cedido por radiação. Desprezando as perdas de calor ao ambiente externo, têm-se as seguintes equações, (Bazzo, 1995):

$$\dot{m}_c PCI + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_{ar} h_{ar} = \dot{Q}_r + \dot{m}_g h_g \quad (1)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_{ar} \quad (2)$$

sendo:

$$h = \int_0^f C_p dT = \bar{C}_p (T_f - T_0) \quad (3)$$

onde:

- \dot{m}_c : vazão mássica de combustível (kg s^{-1});
- \dot{m}_{ar} : vazão mássica de ar de combustão (kg s^{-1});
- \dot{m}_g : vazão mássica dos gases de combustão (kg s^{-1});
- h : entalpia específica em relação a uma temperatura de referência, para ar, combustível e produtos de combustão, conforme cada índice (J kg^{-1});
- PCI : poder calorífico inferior do combustível (J kg^{-1});
- \dot{Q}_r : calor trocado por radiação (W);
- C_p : calor específico a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);
- T_f : temperatura do fluido (combustível, ar ou gases de combustão) (K);
- T_0 : temperatura de referência (K).

Os subscritos c , ar e g referem-se ao combustível, ar e gases da combustão, respectivamente.

A temperatura de referência (T_0) pode ser qualquer temperatura arbitrada e, no caso em que combustível e ar são fornecidos à temperatura ambiente, pode-se escrever:

$$T_c \approx T_{ar} = T_0 \quad (4)$$

A temperatura de saída dos produtos de combustão da fornalha (T_g) pode ser calculada por:

$$\dot{m}_c PCI = \dot{Q}_r + \dot{m}_g \overline{C_p} (T_g - T_0) \quad (5)$$

logo:

$$T_g - T_0 = \frac{\dot{m}_c PCI - \dot{Q}_r}{\dot{m}_g \overline{C_p}} \quad (6)$$

A troca de calor, por radiação da chama pode ser determinada preliminarmente pela equação:

$$\dot{Q}_r = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_l} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \sigma A (T_g^4 - T_l^4) \quad (7)$$

onde:

- σ : constante de Stefan-Boltzmann, 5.67×10^{-8} (W m⁻² K⁻⁴);
- ε_g : emissividade da chama;
- ε_l : emissividade efetiva da parede do tubo;
- A : área da superfície de troca de calor (m²);
- T_g : temperatura absoluta de saída dos produtos de combustão (K);
- T_l : temperatura absoluta da superfície de troca de calor (K).

A verdadeira temperatura da chama não é conhecida, pois esta varia em todo o volume da câmara de combustão. A Eq.(7) assume que a temperatura de saída dos produtos de combustão da fornalha representa a temperatura média da fornalha. A emissividade da chama (ε_g) é um coeficiente que depende de diversos fatores, como o combustível, o tipo de queimador, a composição média dos produtos de combustão e a geometria da câmara de combustão.

Os coeficientes de troca de calor por convecção da água evaporando no interior dos tubos são extremamente altos, da ordem de 5000 a 25000 (W m⁻² K⁻¹), representando pouca resistência à troca de calor. As espessuras de parede dos tubos metálicos, bem como a alta condutividade dos metais também pouco contribuem para a resistência térmica sendo que, de uma maneira geral, podemos assumir a temperatura externa das superfícies de troca como sendo de um valor da ordem de 10 a 20 K maior que a temperatura do vapor saturado na caldeira. (Bazzo, 1995)

Caldeiras de vapor possuem geralmente uma seção de convecção térmica, a fim de aproveitar ao máximo a entalpia dos gases de combustão. A temperatura de entrada dos gases de combustão na seção de convecção é a temperatura de saída da fornalha. Consideramos a superfície de convecção tomada como superfícies que não tem vista geométrica com a chama da fornalha, ou seja, as superfícies de convecção não recebem radiação direta da chama. Embora gases aquecidos em alta temperatura também troquem calor por radiação, este mecanismo de troca não será considerado pela menor importância da radiação na zona de convecção. (Bizzo, 2003)

Em caldeiras aquotubulares, a troca de calor por convecção é realizada por escoamento de gases externos aos feixes de tubos. Estes feixes podem apresentar arranjo de tubos alinhados, ou alternados. O arranjo alternado é mais frequentemente utilizado devido aos maiores coeficientes de troca de calor que proporciona.

Devido à natureza complicada do escoamento através de feixes tubulares, não é possível calcular analiticamente os coeficientes médios de transferência de calor por convecção. Correlações foram desenvolvidas para cálculo do número de Nusselt (Nu) com base nas condições de escoamento e parâmetros geométricos do arranjo tubular. O número de Nusselt pode ser calculado levando em conta diferentes faixas para o número de Reynolds (Re), o arranjo dos tubos e a variação das propriedades físicas com a temperatura, segundo a equação (Zukauskas e Ulankas, 1988):

$$Nu = A \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^s Re^n Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (8)$$

onde:

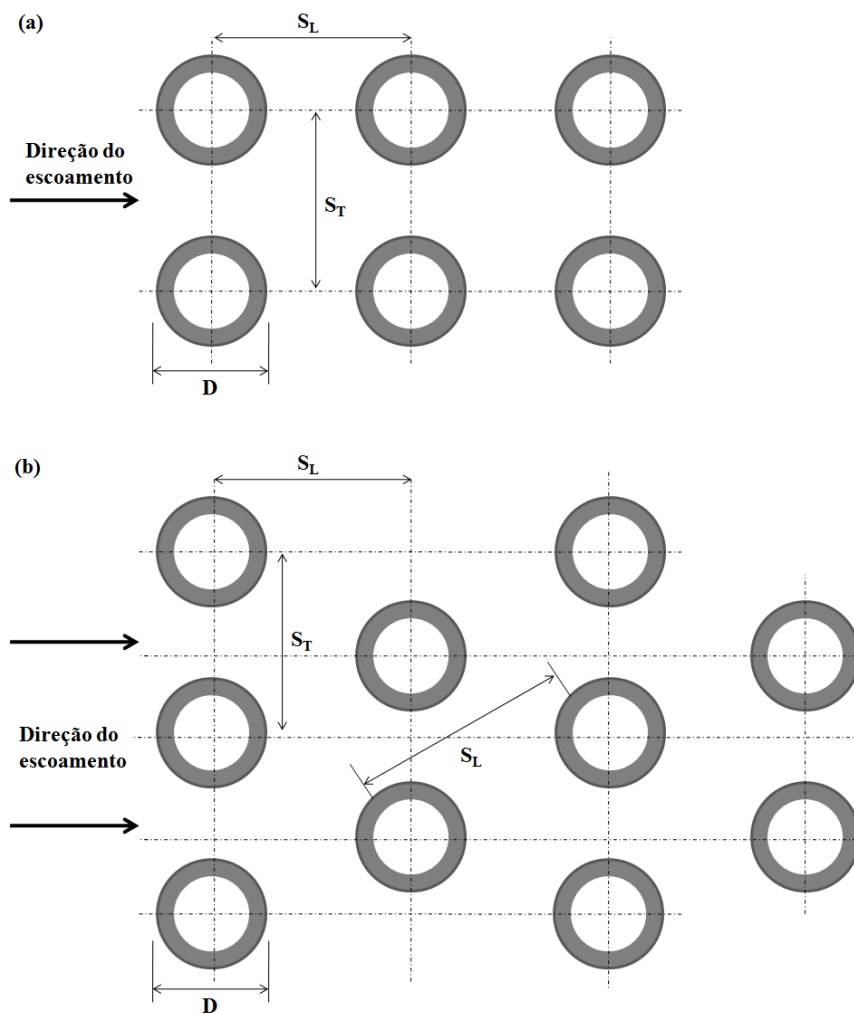
- A : área da superfície de troca de calor (m^2);
- S_T : passo transversal entre tubos (m);
- S_L : passo longitudinal entre tubos (ou entre fileiras de tubos) (m);
- Re : número de Reynolds;
- Pr : número de Prandtl;
- Pr_p : número de Prandtl na temperatura média da parede.

Os índices A , s , n e m devem ser tomados em função do arranjo e do número de Reynolds (Re), conforme a Tabela I:

TABELA I. Índices A , s , n e m devem ser tomados em função do arranjo e do número de Reynolds (Re) (Zukauskas e Ulinkas, 1988).

Arranjo	Faixa de Re	A	s	n	m
Alinhado	0 - 100	0,9	0	0,4	0,36
	100 - 1000	0,52	0	0,5	0,36
	1000 - $2 \cdot 10^5$	0,27	0	0,63	0,36
	$2 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$	0,033	0	0,8	0,4
Alternado	0 - 500	1,04	0	0,4	0,36
	500 - 1000	0,71	0	0,5	0,36
	1000 - $2 \cdot 10^5$	0,35	0,2	0,6	0,36
	$2 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$	0,31	0,2	0,8	0,36

FIGURA 1. Arranjo do feixe tubular de troca térmica em caldeiras aquotubulares. (a) feixe de tubos alinhados e, (b) feixe de tubos alternados.



O calor transferido dos gases de combustão para a água ou fluido de processo é calculado pela equação:

$$\dot{Q}_c = U A \Delta t_{ml} \quad (9)$$

$$\Delta t_{ml} = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln\left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_b}\right)} \quad (10)$$

onde:

- \dot{Q}_c : calor transferido por convecção (W);
- U : coeficiente global de transferência de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$);
- A : área de troca de calor (diâmetro externo dos tubos) (m^2);
- Δt_{ml} : diferença média logarítmica de temperatura (K);
- $\Delta t_a, \Delta t_b$: diferença das temperaturas entre os fluidos nas extremidade do trocador de calor (K).

O coeficiente global de transferência de calor (U) é calculado levando-se em conta as resistências térmicas envolvidas: a resistência interna por convecção no lado da água (R_i), a resistência externa por convecção dos gases de combustão (R_e) e, a resistência por condução de calor através da parede do tubo (R_{tubo}):

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_{tubo}} \quad (11)$$

onde:

$$R_i = \frac{d_e}{h_i d_i} \quad (12)$$

$$R_e = \frac{1}{h_e} \quad (13)$$

$$R_{tubo} = \frac{d_e \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2 k_t} \quad (14)$$

onde:

- d_i : diâmetro interno do tubo;
- d_e : diâmetro externo do tubo;
- h_i : coeficiente de película interno;
- h_e : coeficiente de película externo;
- k_t : condutividade térmica do material do tubo.

No caso de vapor saturado em ebulição, o coeficiente de película interno e externo pode ser adotado entre 5000 e 25000 ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). As taxas de troca de calor por

convecção por gases já não são tão altas quanto a taxas de troca de calor por radiação. Logo, simplificações devem ser feitas com algum cuidado. A resistência térmica por condução através da parede do tubo deve ser calculada sempre que possível. (Bizzo, 2003)

3. INCRUSTAÇÕES EM CALDEIRAS

A concentração de cálcio nas águas subterrâneas varia de uma forma geral de 10 a 100 mg l⁻¹. As fontes primordiais de cálcio são os plagioclásios cálcicos, calcita, dolomita, apatita, entre outros. O carbonato de cálcio é pouco solúvel em água pura. O cálcio é produzido nas águas em forma de bicarbonato e sua solubilidade é função da quantidade de gás carbônico dissolvido. O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é semelhante ao do cálcio. Nas águas subterrâneas, é encontrado em concentrações que variam entre 1 e 40 mg l⁻¹. O magnésio, depois do cálcio é o principal elemento responsável pela dureza das águas. (Masterton *et al.*,1994)

Além das incrustações à base de carbonatos, podem-se mencionar também as incrustações à base de sulfatos. Podem existir também incrustações formadas por depósitos de ferro, que têm coloração escura, sendo sua ocorrência devido à corrosão ou por contaminação de ferro na água. As incrustações formadas podem gerar como consequência, a ruptura de tubos, devido ao superaquecimento ou restrições em seus diâmetros. Elas também reduzem a geração de vapor e podem, muitas vezes, provocar sua contaminação (Santos, 1985).

A condutividade térmica dos principais compostos incrustantes (Tab. II) é significativamente inferior a dos metais que normalmente compõem as caldeiras e seus equipamentos periféricos, notadamente de aço carbono e cobre.

TABELA II. Condutividade térmica dos diversos tipos de incrustações e dos metais que compõem a caldeira (Pastor *et al.*, 2009).

Composto Químico	Condutividade Térmica (kcal m⁻¹ h⁻¹ °C⁻¹)
Incrustação à Base de Carbonato	0,4 - 0,6
Incrustação à Base de Sulfato	0,6 - 2,0
Liga de Aço Carbono	40 - 60
Liga de Cobre	320 - 360

Os valores apresentados (Tab. II) mostram que, quando da ocorrência de incrustações, existe uma resistência muito grande à transferência do calor gerado na câmara de combustão da caldeira para água, o que torna a eficiência do equipamento minimizada.

A restrição da circulação da água no interior das caldeiras ocorre com a formação das incrustações. Há uma redução do volume disponível para água, podendo causar separação prematura do vapor, superaquecimento e aumento das taxas de deposição. Outro fenômeno é a deformação plástica nos tubos, podendo ocorrer o escoamento e rompimento da tubulação. Esse efeito normalmente ocorre quando há incrustação com baixa condutividade térmica. De uma maneira geral, depósitos são indesejáveis. (Martinelli, 2003; Sarev, 2003)

4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

De acordo com Assunção *et al.* (2008) e Andreucci (2014), os principais tipos de ensaios não destrutivos em caldeiras conforme sua finalidade, são os seguintes: (i) Inspeção visual: é um importante recurso na verificação de alterações dimensionais, observação de discontinuidades superficiais visuais, tais como trincas, corrosão, deformação, alinhamento, cavidades, porosidade e muitos outros. (ii) Correntes parasitas: o ensaio detecta mudanças no fluxo das correntes parasitas causadas por variações na peça, para subsequente análise por instrumentação e técnica adequada. (iii) Ultrassom: medições ultra-sônicas de espessura para controlar a vida útil dos tubos,

detectar desgastes anormais e confirmar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) da unidade. Tipicamente as medições de espessura são feitas anualmente. (iv) Líquido penetrante: é um método desenvolvido para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, abertas na superfície de materiais sólidos e não porosos. Dependendo das circunstâncias (tipo do tubo, projeto e carga da caldeira), tubos podem sofrer trincas, tanto de corrosão sob tensão fraturante como de fadiga térmica. (v) Réplica metalográfica: tem por objetivo a avaliação da estrutura metalúrgica do material. A avaliação da estrutura do material pode ser feita através de uma cópia da estrutura metalográfica dos componentes da caldeira em microscópio eletrônico de varredura ou mesmo num microscópio ótico. (vi) Partículas magnéticas: tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. Basicamente, o ensaio consiste na aplicação de um campo magnético no interior do local analisado e, este campo, quando na presença de descontinuidades sofrem desvios gerando campos de fuga. (vii) Termografia: o ensaio baseia-se na detecção de calor distribuído na superfície do objeto, quando este estiver sujeito a tensões térmicas. A medição de temperatura é realizada pela detecção da radiação infravermelha emitida. (viii) Radiografia industrial: o ensaio pode detectar com alta sensibilidade descontinuidades com poucos milímetros de extensão. A radiografia industrial desempenha um papel importante, pois a imagem projetada do filme radiográfico representa a "fotografia" interna da peça, o que nenhum outro ensaio não destrutivo é capaz de mostrar na área industrial.

Os END contribuem para a qualidade dos bens e serviços e redução de custos. Incluem métodos capazes de fornecer informações a respeito do teor de defeitos de um determinado material, ou ainda, do monitoramento da degradação de componentes, equipamentos e estruturas. Entretanto, a escolha do procedimento de inspeção adequado pode afetar grandemente a qualidade da informação obtida podendo levar ao responsável do programa de inspeção a decisões equivocadas.

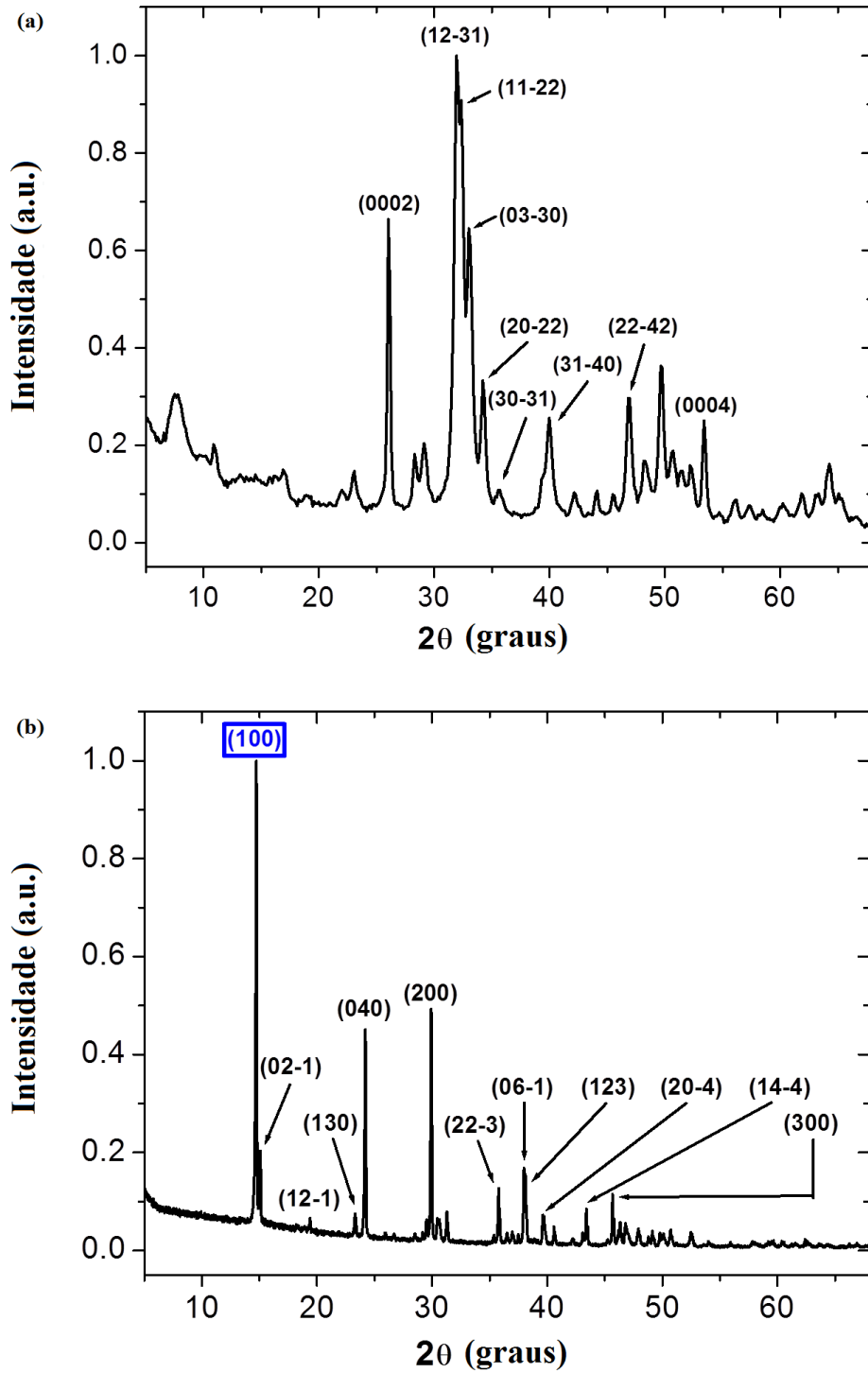
5. IDENTIFICANDO OS DIFERENTES TIPOS DE CALCIFICAÇÕES

A identificação de compostos presentes nas incrustações (calcificações) em tubulações de caldeiras foi realizada, através da análise do padrão de difração de raios-X de policristais, de oxalato de cálcio e fosfato de cálcio, ambos encontrados comercialmente em forma de pó (Figs. 2a e 2b). As medidas foram realizadas com um difratômetro (PANalytical Empyrean) no Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas (LICF) na UNILA.

O objetivo destas medidas foi identificar os picos de difração a serem utilizados para especificar os parâmetros geométricos da fenda cônica. Ambos os compostos, em forma de pó, foram verificados para evitar sobreposição de picos de difração entre os mesmos. As medidas da análise do padrão de difração (Fig. 2) foram realizadas usando um tubo de raios-X com alvo de cobre (Cu). A radiação foi filtrada com níquel (Ni) a fim de trabalhar principalmente com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\sim 8,04$ keV).

Os difratogramas adquiridos foram indexados usando um banco de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*), onde identificamos os pós de fosfato de cálcio e oxalato de cálcio como ICSD 169499 e ICSD 158939, que são fase hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}\text{O}_{25,5}\text{P}_6\text{H}$) e fase *whevellite* ($\text{CaC}_2\text{O}_4\text{H}_2\text{O}$ – oxalato de cálcio mono-hidratado), respectivamente.

FIG. 2. Difratogramas medidos com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\sim 8,04$ keV) para os compostos presentes em calcificações. (a) Para o fosfato de cálcio (fase hidroxiapatita) e (b) para o oxalato de cálcio (fase *whevellite*). O índice de Müller para cada pico correspondente a diferentes planos de difração são apontados.



6. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA FENDA CÔNICA

Para construirmos a fenda cônica precisamos definir alguns parâmetros, seguindo o esquema mostrado na Figura 3, tais como: abertura da ranhura da flange (a), a espessura da flange (t), o raio da ranhura da flange de entrada (R), o raio da ranhura da flange de saída (R') e a abertura angular da fenda cônica (4θ). Com estes, introduzimos os demais parâmetros, como: a distância da amostra até a flange de entrada (D), o comprimento da fenda cônica (L) e a divergência da fenda cônica ($\Delta\theta_{div}$), dados por:

$$D = \frac{R}{\tan\left(\frac{4\theta}{2}\right)} \quad (15)$$

$$L = \frac{R' - R}{\tan\left(\frac{4\theta}{2}\right)} \quad (16)$$

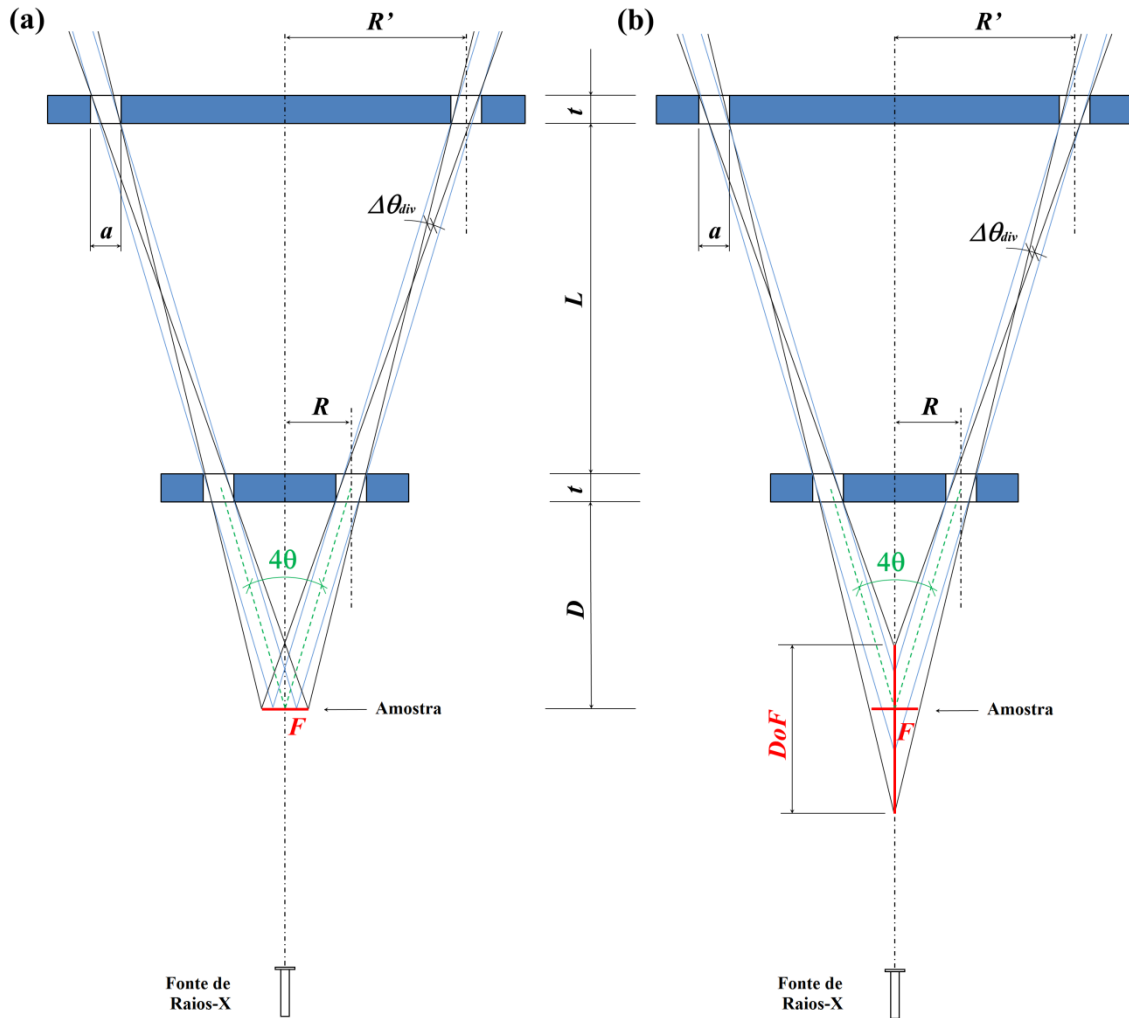
$$\Delta\theta_{div} = 2 \cdot \left[\frac{a - t \cdot \tan\left(\frac{4\theta}{2}\right)}{L} \right] \quad (17)$$

Por fim encontramos dois parâmetros importantes, que são: o foco da fenda cônica (F) e a profundidade de foco da fenda cônica (DoF), dados por:

$$F = \Delta\theta_{div} \cdot D \quad (18)$$

$$DoF = \frac{F}{\tan\left(\frac{4\theta}{2} + \Delta\theta_{div}\right)} \quad (19)$$

FIG. 3. Parâmetros geométricos da fenda cônica. (a) Representação esquemática do foco da fenda cônica (F). (b) Representação esquemática da profundidade de foco da fenda cônica (DoF). Outros parâmetros são definidos como se segue: a abertura da ranhura da flange (a), a espessura da flange (t), o raio da ranhura da flange de entrada (R), o raio da ranhura da flange de saída (R'), abertura angular da fenda cônica (4θ), a distância da amostra à flange de entrada (D), o comprimento da fenda cônica (L) e a divergência da fenda cônica ($\Delta\theta_{div}$).



7. PROJETO E CONSTRUÇÃO DA FENDA CÔNICA

Com os dados e os parâmetros da difração de raios-X definidos e introduzidos nas seções anteriores, procedemos com o projeto e a construção da fenda cônica. Para isso, primeiro foi selecionado o cone de difração do oxalato de cálcio para ser coletado pela fenda cônica. Selecionamos o cone relacionado com o pico de difração mais

intenso mostrado no difratograma (Fig. 2b) indicado pelo índice de Müller na cor azul. Como o difratograma foi obtido com radiação CuK α (~ 8,04 keV) e a fenda cônica foi planejada para operar com radiação MoK α (~17,4 keV), este cone aparecerá em um ângulo de difração mais rasante. Isso ocorre devido à estrutura periódica dos cristais (parâmetro de rede), a qual pode ser comprovada brevemente através da difração de raios-X (*Lei de Bragg*):

$$\lambda = 2.d.\text{sen}(\theta) \quad (20)$$

A Eq.(20) explica porque materiais cristalinos difratam feixes de raios-X a certos ângulos (θ). A variável (d) é a distância entre os planos atômicos em um cristal e, a variável (λ) é o comprimento de onda do feixe de raios-X incidente. Na análise do padrão de difração para o oxalato de cálcio constatamos que o pico de difração (100) aparece em $2\theta_{Cu} = 14,36$ graus (Fig. 2b). O comprimento de onda do CuK α é $\lambda_{Cu} = 1,544$ Å (Ângstrom). A Eq.(20) nos fornece a distância (d) entre os planos atômicos do oxalato de cálcio, onde $d = 6,18$ Å. Sabendo a distância interplanar (d) do oxalato de cálcio, podemos calcular o ângulo ($2\theta_{Mo}$) de difração do feixe de raios-X ao utilizar um tubo de raios-X com alvo de molibdênio (Mo). O comprimento de onda do MoK α é $\lambda_{Mo} = 0,714$ Å e, como vimos a distância entre os planos atômicos do oxalato de cálcio é $d = 6,18$ Å. Mais uma vez, fazendo uso da Eq.(20), encontramos que o pico de difração (100) aparecerá em $2\theta_{Mo} = 6,62$ graus. Lembrando que (2θ) é a metade do parâmetro de abertura angular da fenda cônica (4θ), definido na seção anterior.

As flanges da fenda cônica foram fabricadas em chapas de aço carbono de 1,8 mm de espessura. A tecnologia de corte a laser que encontramos foi responsável pela limitação das dimensões de alguns dos parâmetros da fenda cônica, entre eles: a abertura da ranhura da flange (a), a espessura da flange (t) e o raio da ranhura da flange de entrada (R). Então, com 4θ , a , t e R definidos (Tab. III) foram calculados os demais parâmetros geométricos da fenda cônica (Tab. IV).

TABELA III. Parâmetros geométricos da fenda cônica para radiação MoK α (~17,4 keV): a abertura da ranhura da flange (a), a espessura da flange (t), o raio da ranhura da flange de entrada (R), o raio da ranhura da flange de saída (R') e a abertura angular (2θ).

Fenda cônica	a (mm)	t (mm)	R (mm)	R' (mm)	2θ (graus)
Oxalato de cálcio	2,5	1,8	10,0	29,0	6,07

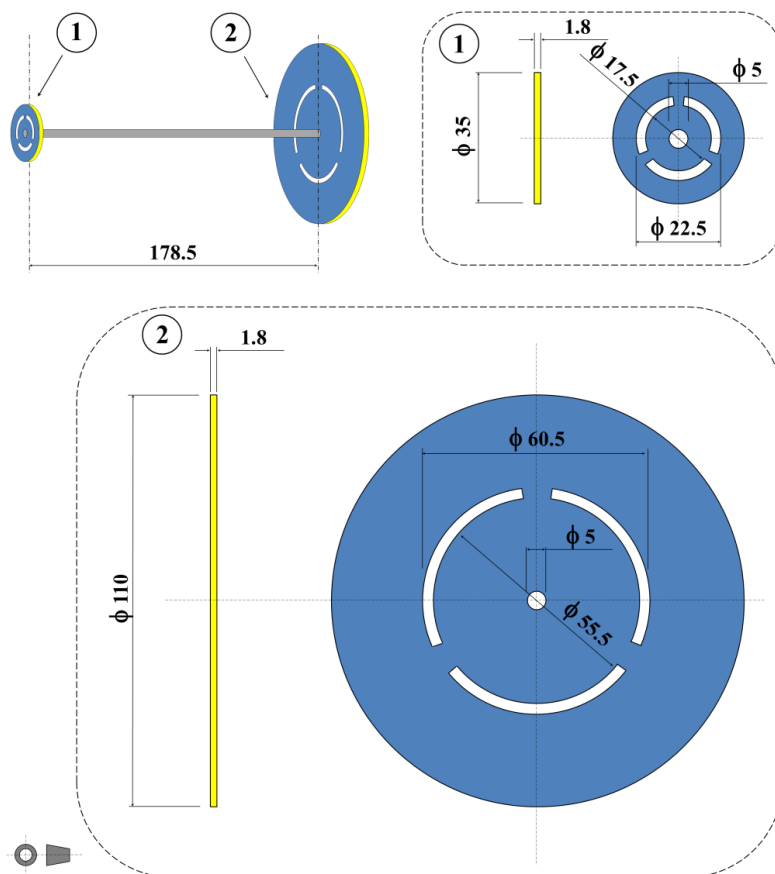
TABELA IV. Parâmetros geométricos da fenda cônica para radiação MoK α (~17,4 keV): a distância da amostra à flange de entrada (D), o comprimento da fenda cônica (L), a divergência ($\Delta\theta_{div}$), o foco da fenda cônica (F) e a profundidade de foco da fenda cônica (DoF).

Fenda cônica	D (mm)	L (mm)	$\Delta\theta_{div}$ (graus)	F (mm)	DoF (mm)
Oxalato de cálcio	94,0	178,7	1,48	2,43	18,3

Os projetos das ranhuras das flanges de entrada e saída da fenda cônica estão mostrados na Figura 4. Observe (Tab. III) que a metade da abertura angular da fenda cônica ($4\theta/2$) tem um valor ligeiramente diferente do que o pico (100) do *whevellite* e ângulo (2θ). No entanto, observe (Tab. IV) que este ângulo pode ser alcançado, uma vez que está na faixa de divergência da fenda cônica ($\Delta\theta_{div}$).

Uma vez que as flanges da fenda cônica são alinhadas por uma haste roscada, o comprimento da fenda cônica pode ser ajustado com precisão. Durante a montagem este ajuste foi realizado para maximizar a intensidade do cone de difração selecionado pela fenda cônica, utilizando um detector de cintilação situado após as ranhuras da flange de saída. É importante salientar que, devido à precisão do corte a laser para fabricação da fenda cônica, a abertura da ranhura da flange (a) foi um limitante para dimensionar os demais parâmetros e para a resolução da fenda cônica. O ideal seria ter uma abertura da ranhura da flange (a) menor, para não captar ruídos (espalhamento) durante a detecção dos picos de difração que a fenda cônica foi projetada. Mais detalhes serão abordados nas seções seguintes.

FIG. 4. Flanges de entrada (1) e de saída (2) da fenda cônica para o oxalato de cálcio, fabricadas por corte a laser em chapas de aço carbono de 1,8 mm de espessura. Na ilustração superior esquerda é mostrada, esquematicamente, a fenda cônica para oxalato de cálcio (fase *whevellite*). O comprimento $L = 178,5$ mm é ajustado através da haste roscada que liga ambas as flanges.



8. TESTES COM AMOSTRA DE OXALATO DE CÁLCIO

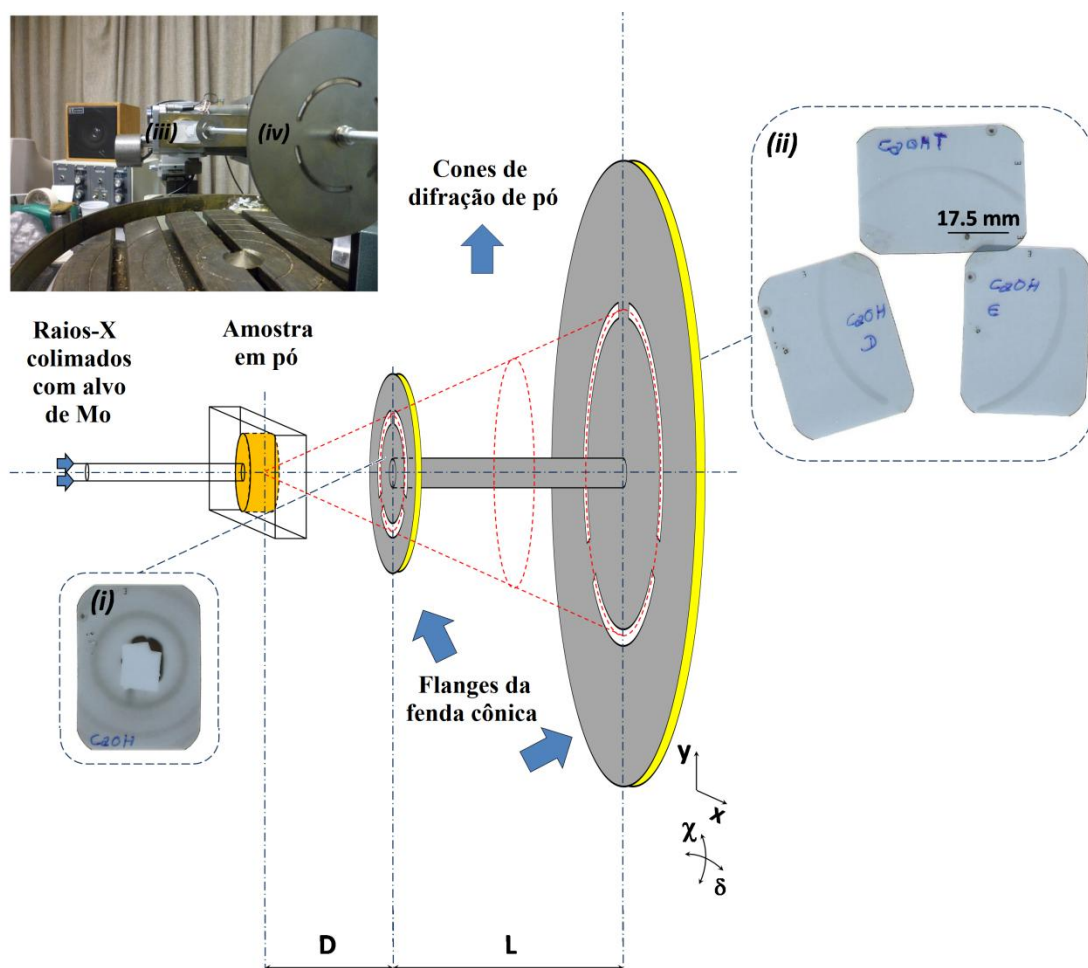
Com a fenda cônica projetada e montada seguimos com os testes com raios-X usando $\text{MoK}\alpha$ ($\sim 17,4$ keV). O primeiro passo era realizar as medidas de difração de pó em geometria de transmissão (Fig. 5), a fim de detectar os cones de difração do oxalato de cálcio na ranhura da flange de entrada da fenda cônica. Para isso, uma amostra de oxalato de cálcio foi montada em um recipiente de plástico (feito de poliamida – Fig. 5iii). Foi escolhido a poliamida como porta-amostra para simular uma amostra real onde há condições de espalhamento.

O recipiente de plástico (porta-amostra) tinha 3 mm de espessura com um furo de 10 mm de diâmetro no seu centro (preenchido com oxalato de cálcio). O diâmetro do furo no porta-amostra foi definido para suportar uma quantidade suficiente de oxalato de cálcio, garantindo que os cristais assumam orientações aleatoriamente distribuídas de forma que todos os planos de reflexão possíveis do oxalato de cálcio tenham igual representação probabilística.

Dados os parâmetros descritos anteriormente na Figura 4, Tabelas III e IV, ajustamos a distância da amostra à flange de entrada (D). Em seguida, procedemos com o alinhamento da fenda cônica com o cone de difração (linha vermelha tracejada na Fig. 5). A fenda cônica foi ajustada nas posições x , y , χ e δ (Fig. 5). O alinhamento foi realizado com ajuste fino da distância (L) verificando a intensidade difratada em todas as três ranhuras da flange de saída utilizando um detector de cintilação.

Nestes primeiros testes já comprovamos a capacidade da fenda cônica. Posicionando o detector de cintilação após as ranhuras da flange de saída e com a amostra de oxalato de cálcio em sua devida posição, o detector demonstrava que havia projeção dos cones de difração. Ao retirar a amostra da direção do feixe incidente de raios-X não havia detecção, ou seja, não havia difração de raios-X nem espalhamento de raios-X pelo ar, detectável após a fenda cônica.

FIG. 5. Representação esquemática da fenda cônica para os testes com amostra de oxalato de cálcio – fase *whevellite*). O feixe de raios-X de entrada ($\text{MoK}\alpha$, $\sim 17,4$ keV) foi colimado em 5 mrad. O feixe aplicado sobre a amostra tem um diâmetro de 0,7 mm. A distância da amostra à flange de entrada (D), o comprimento da fenda cônica (L), as projeções dos cones de difração para o *whevellite* (100) colocados (i) em frente a flange de entrada e, (ii) atrás da flange de saída da fenda cônica. A foto no canto superior esquerdo da figura mostra a fenda cônica montada, para testes, (iii) com a amostra de oxalato de cálcio montada na geometria de transmissão e, (iv) é a flange de saída da fenda cônica.



Ainda, para verificar o alinhamento e a homogeneidade do feixe de raios-X que passa através da fenda cônica, filmes radiográficos foram expostos colocando-os imediatamente em frente a flange de entrada da fenda cônica (Fig. 5i) e logo após a ranhura da flange de saída da fenda cônica (Fig. 5ii). Os tempos de exposição foram determinados em função da energia da radiação utilizada, distância fonte-filme e classe do filme radiográfico. Para os filmes localizados antes da flange de entrada da fenda

cônica o tempo de exposição foi de 6 minutos e, 40 minutos para os filmes radiográficos localizados após a ranhura da flange de saída da fenda cônica. A potência de operação do gerador de raios-X (RIGAKU DENKI 4032/A2) foi mantida em 30 kV x 15 mA para um tubo de raios-X de foco longo e fino (LFF) e alvo de molibdênio (Mo) [tamanho da fonte de 0,4 (V) mm x 1,2 mm (H)] operando em foco ponto.

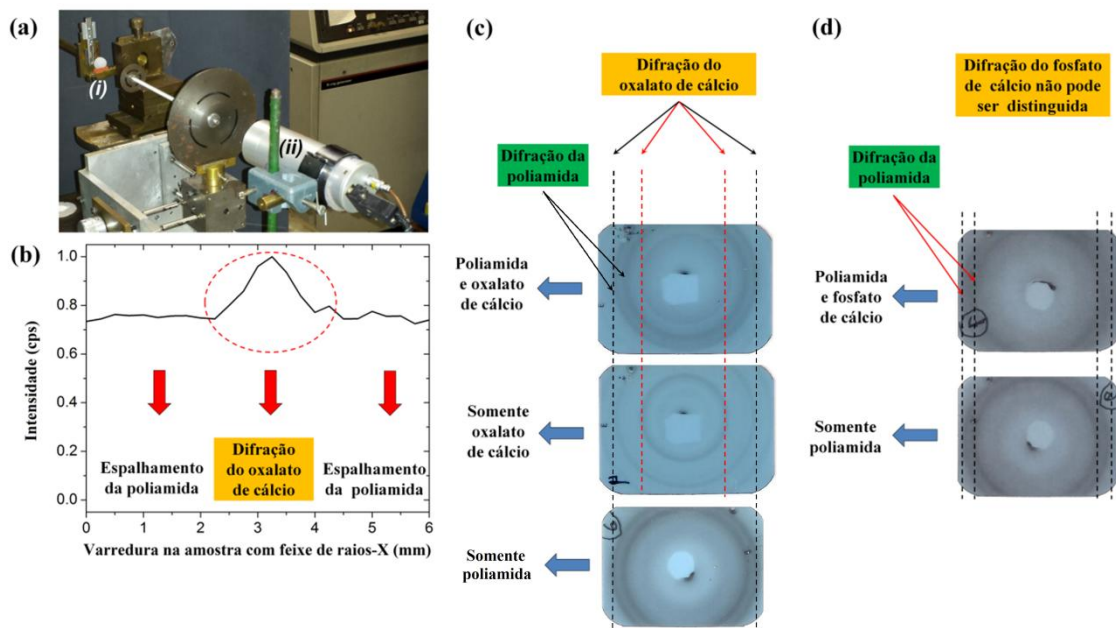
9. SIMULANDO MEDIDAS REAIS

Para verificar se a fenda cônica é capaz de detectar os cones de difração de oxalato de cálcio na presença de outros efeitos de interação da radiação com a matéria (espalhamento Thomson, espalhamento Compton e efeito fotoelétrico) realizamos testes com duas amostras que construímos à base de pó de oxalato de cálcio (fase *whevellite*) e de pó de fosfato de cálcio (fase hidroxiapatita), ambos imersos em poliamida. As amostras foram construídas com discos de poliamida de 15 mm de diâmetro e 4 mm de espessura com um furo de 1,0 mm de diâmetro no seu centro preenchido, na primeira amostra, com pó de oxalato de cálcio (fase *whevellite*) e, na segunda amostra, com pó de fosfato de cálcio (fase hidroxiapatita).

A poliamida apresenta cristalinidade de baixo alcance. As energias utilizadas nos nossos experimentos produzem na poliamida, muito espalhamento Thomson, pouco espalhamento Compton e muito pouca absorção fotoelétrica. Com relação à difração, os cones de difração da poliamida não se sobrepõem aos cones de difração de baixa ordem do oxalato de cálcio.

Dois conjuntos diferentes de medidas (Fig. 6) foram realizados: (i) translação da amostra em frente ao feixe de raios-X, em uma região ao redor do furo de 1,0 mm preenchido com oxalato de cálcio ou fosfato de cálcio (Fig. 6b) e, (ii) exposição de filmes colocando-os imediatamente em frente a flange de entrada da fenda cônica.

FIG. 6. (a) Configuração experimental para testar a fenda cônica sob condições reais de espalhamento. O feixe de raios-X de entrada (MoK α , $\sim 17,4$ keV) foi colimado em 5 mrad. O feixe incidente sobre a amostra tem um diâmetro de 0,7 mm. A amostra (i) foi transladada em frente ao feixe de raios-X de entrada e, o feixe de raios-X difratado foi captado por um detector de cintilação (ii), posicionado após a flange de saída da fenda cônica, ou seja, depois de passar através da fenda cônica. (b) Resultado da varredura, para as amostras de poliamida com oxalato de cálcio como material de preenchimento. (c) Filmes expostos antes da flange de entrada da fenda cônica onde são mostradas as projeções dos cones de difração (anéis) de oxalato de cálcio e poliamida. (d) Filmes expostos antes da flange de entrada da fenda cônica onde são mostradas as projeções dos cones de difração (anéis) de fosfato de cálcio e poliamida. A linha vermelha tracejada em (c), mostra o cone selecionado pela geometria da fenda cônica, onde claramente, não existem projeções dos cones de difração (anéis) sobrepostos.



No primeiro conjunto de medidas que verificamos a capacidade da fenda cônica para nossa técnica de imagem assistida por difração, pudemos detectar um pico na intensidade transmitida através da fenda cônica (ao transladar a amostra, no momento em que o feixe atravessa a região com oxalato de cálcio). Além disso, quando a amostra composta com pó de fosfato de cálcio é utilizada existe uma forte redução na intensidade transmitida através da fenda cônica ($\sim 80\%$, medida não mostrada aqui), uma vez que o feixe de raios-X na entrada é fortemente atenuado pelo fosfato de cálcio (fase hidroxiapatita) e, não há difração selecionada pela geometria da fenda cônica. Isto

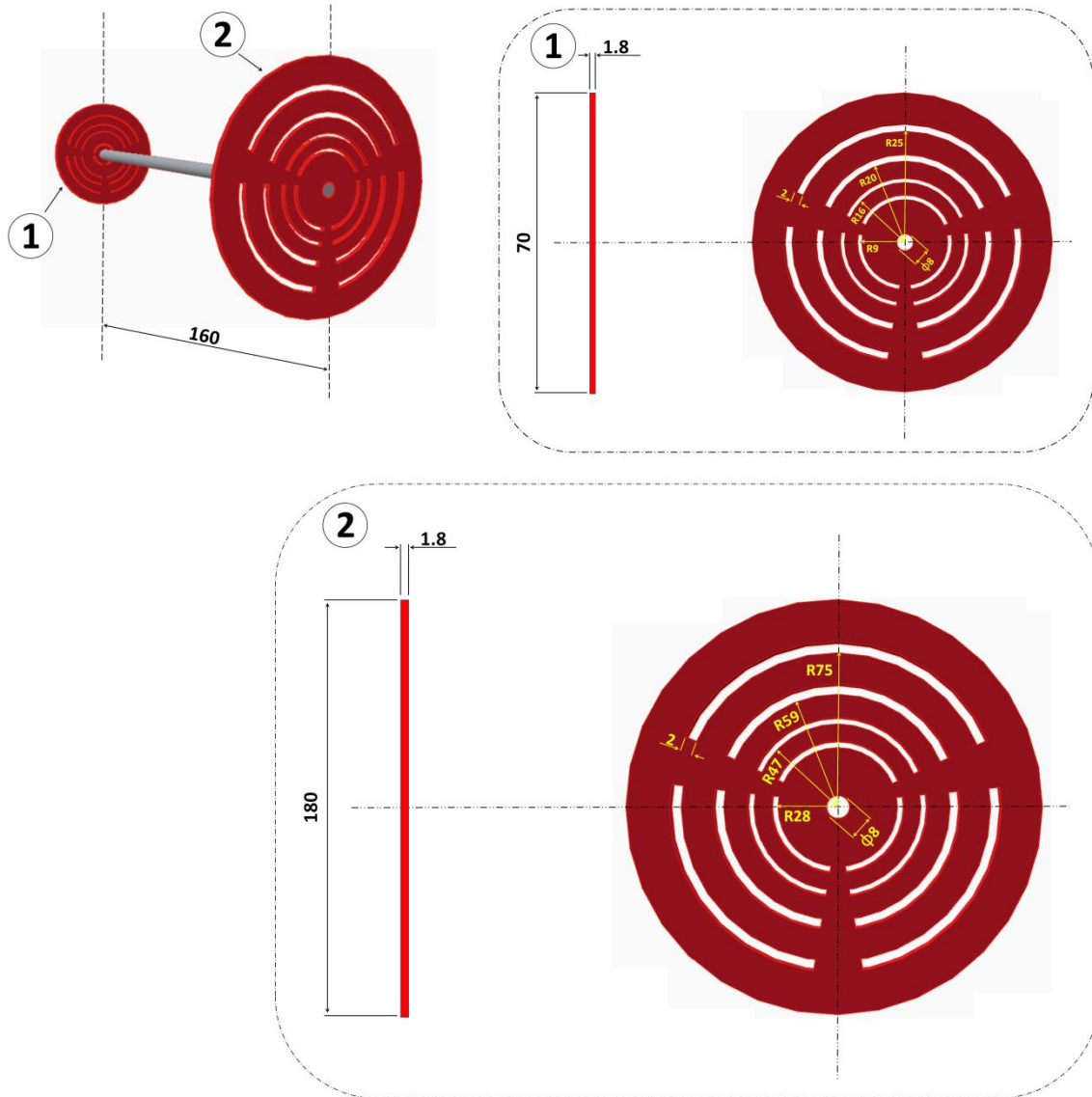
demonstra a capacidade da fenda cônica em também distinguir os dois tipos diferentes de calcificação.

10. FENDA CÔNICA COMPOSTA

A seleção de apenas um cone de difração de baixa ordem do oxalato de cálcio apresentou certa limitação na operação da fenda cônica, especialmente devido à sobreposição com cones de difração/espalhamento de outros materiais leves circundantes.

Para resolver este problema, projetamos e construímos uma fenda cônica (chamamos aqui de fenda cônica composta) que seleciona, simultaneamente, mais de um cone de difração do oxalato de cálcio. As dimensões das flanges da fenda cônica são mostradas na Figura 7.

FIG. 7. Flanges de entrada (1) e de saída (2) da fenda cônica composta para o oxalato de cálcio, também fabricadas por corte a laser em lâminas de aço carbono de 1,8 mm de espessura. Na ilustração superior esquerda é mostrada, a montagem da fenda cônica composta. O comprimento $L = 160$ mm pode ser ajustado através do tubo central que liga ambas as flanges, por anéis de vedação de borracha (O-rings).

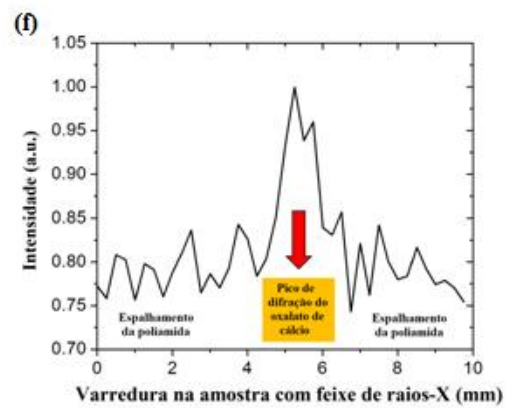
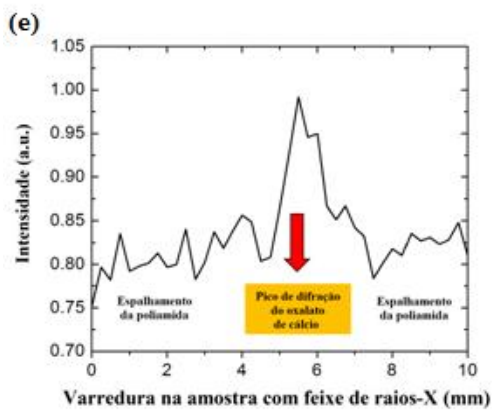
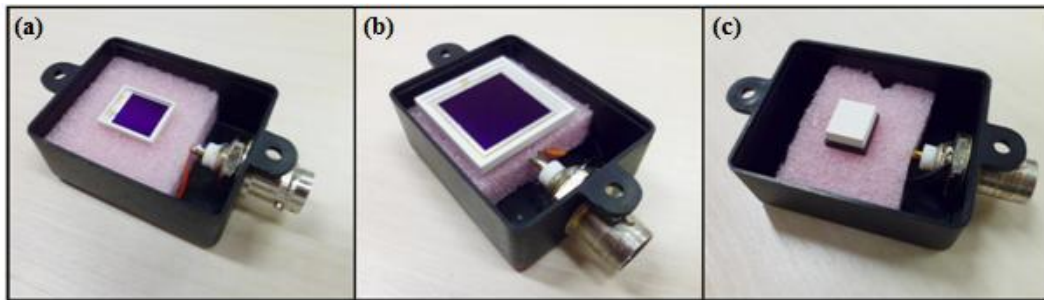


Nesta nova versão da fenda cônica, foi utilizado um tubo de latão com 8 mm de diâmetro externo e 6,5 mm de diâmetro interno (menor tamanho encontrado comercialmente) para unir as duas flanges da fenda cônica. O tubo de latão no lugar do pino roscado (usado na primeira versão da fenda cônica) favoreceu o alinhamento da fenda cônica com o feixe de raios-X de entrada, uma vez que o feixe passa pelo centro

do tubo, ou seja, pelo centro da fenda cônica. Logo, o feixe de entrada também é monitorado, para fins de alinhamento por detectores do tipo fotodiodo PIN conectados à um picoamperímetro, que montamos na UNILA (Fig. 8a-c). Nesse tipo de componente (fotodiodo PIN), quando um fóton atinge um átomo da região intrínseca, ele libera um elétron formando assim um par elétron-lacuna que migram em direções opostas produzindo corrente elétrica. Uma característica importante desse tipo de diodo é que, é preciso apenas uma energia relativamente pequena para liberar os elétrons. Os modelos S3590-09 (Fig. 8a) e S3204-09 (Fig. 8b) diferem apenas em sua área ativa de detecção e corrente de curto circuito. Já o modelo S8559 (Fig. 8c) sua área ativa de detecção (com cristal cintilador acoplado) difere dos dois modelos anteriores, possui uma faixa maior de resposta espectral e maior capacitância de junção, ou seja, maior tempo de resposta.

Ainda, a flange de saída da fenda cônica foi colada ao tubo de latão e a flange de entrada da fenda cônica foi fixada por anéis de vedação de borracha (O-rings). Os resultados das varreduras (ao transladar a amostra em frente ao feixe de raios-X e detectando os múltiplos feixes difratados que passam pelas ranhuras das flanges da fenda cônica) são mostrados nas Figuras 8e-f.

FIG. 8. Fotodiodos do tipo PIN: (a) S3590-09, (b) S3204-09 e (c) S8559. (d) Configuração experimental para testar a fenda cônica composta sob condições reais de espalhamento de raios-X. O feixe de entrada ($\text{MoK}\alpha$, $\sim 17,4$ keV) possui diâmetro de 0,7 mm. Detector do tipo fotodiodo PIN (i) conectado a um picoamperímetro (ii) e um detector cintilador (iv), utilizados para o alinhamento da fenda cônica. Resultados das varreduras, normalizados pela intensidade do pico de difração de mais alta ordem (3ª ranhura da fenda cônica), com potência de operação do gerador de raios-X em 40 kV x 25 mA, para as amostras de poliamida com oxalato de cálcio como material de preenchimento: (e) 3ª ranhura e, (f) 4ª ranhura da fenda cônica composta.



11. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos constatamos que é possível aplicar a técnica de imagem assistida por difração para detecção de incrustações em superfícies de caldeiras. Como exposto anteriormente, é difícil detectar por métodos de ensaios não destrutivos convencionais (por exemplo, a radiografia industrial) a presença de incrustações (calcificações) na superfície de troca térmica das caldeiras, pois a diferença de densidade entre os materiais envolvidos é grande. A presença de superposição de informações dificulta a detecção por meio de radiografia industrial, por exemplo. Neste sentido a detecção utilizando o contraste devido à difração dos cristais de cálcio incrustados na superfície torna-se uma alternativa promissora. Mostramos neste trabalho a eficácia da fenda cônica em encontrar os cones de difração de cristais de cálcio em meios com espalhamento de raios-X. O próximo passo é testar a fenda cônica com amostras de materiais mais densos (que apresentam pouco espalhamento elástico e muita absorção fotoelétrica). Para isso, estamos preparando amostras padrão de oxalato de cálcio imerso em aço ABNT 1020 e em cobre.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UNILA (edital 31/2016) pelo auxílio financeiro concedido para as medidas em campo, ao senhor Roberto Boyde Fontoura da empresa RMP Estamparia e Metalurgia Ltda. que fabricou e nos cedeu gentilmente as flanges da fenda cônica, ao PIBIC/UNILA pela bolsa de estudos, à Fluxo Continuo/Fundação Araucária (302/2013) e CNPq/UNIVERSAL (479404/2013-5) pelo apoio financeiro. Também agradecemos ao Prof. Cesar Cusatis do LORXI/UFPR por ceder gentilmente o laboratório para desenvolvimento do trabalho, ao Dr. Jeffrey W. Keister NSLS II/BNL pelo auxílio nas montagens dos detectores do tipo fotodiodo PIN e ao Técnico Douglas Sergey Domingues da Silva (Departamento de FÍSICA/UFPR) pela assistência na fabricação e montagem da fenda cônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreucci, R., A Radiologia Industrial. ABENDI, (2014).
- Assunção, K. M.; Ribeiro, M. M., Inspeção de Caldeiras. Escola Politécnica - Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP-PROMINP, (2008).
- Bega, E. A.; Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras. Rio de Janeiro: Interciência, 3º Edição, (2003).
- Bazzo, E., Geração de Vapor. 2ª edição, UFSC, 216p, (1995).
- Bizzo, W. A., Transferência de Calor em Caldeiras e Fornos. UNICAMP, (2003).
- Costa, W., Contribuição ao Estudo do Condicionamento Magnético da Água para Fins Industriais. São Caetano do Sul, SP : CEUN-EEM, (2006).
- Evans-Lutterodt, K.; Stein, A.; Ablett, J. M.; Bozovic, N.; Taylor, A.; Tennant, D. M., Phys. Rev. Lett. 99, 134801 (2007).
- Kang, H. C.; Maser, J.; Stephenson, G. B.; Liu, C.; Conley, R.; Macrander, A. T.; Vogt, S., Phys. Rev. Lett. 96, 127401, (2006).
- Liu, L.; Milas, N.; Mukai, A. H. C.; Resende, A. R. D.; Sa, F. H.; J. Synchr. Rad. 21, 904, (2014).
- Martinelli, L. C. J, Geradores de Vapor. Universidade do Rio Grande do Sul - UERGS - UNIJUÍ - Campus Parambi, p. 141, (2003).
- Masterton, W. L.; Slowinski. E. J.; Stanitski, C. L., Princípios de Química. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, (1994).
- Nielsen, S. F.; Wolf, A.; Poulsen, H. F.; Ohler, M.; Lienert, U.; Owen, R. A., J. Synchr. Rad. 7, 103 (2000).
- Pastor, J. R.; Carvalho, A. R. P.; Zibordi, G., Incrustações em Caldeiras. KURITA: Soluções em Engenharia de Tratamento de Água, (2011).

Santos, F. D. F., Tecnologia de Tratamento de Água. São Paulo: Nobel, (1985).

Sarev, A. S., Apostila – Máquinas Térmicas I – Características e Tratamento de Água por Geradores de Vapor. Argal Química Ind. e Com. Ltda. e UNIJUÍ (Universidade Regional Campus Panambi), p. 52, (2003).

Shelkovenko, T. A.; Pikuz, S. A.; Skobelev, I. Yu; Sinars, D. B.; Chandler, K. M.; Mitchell, M. D.; Hammer, D. A., Rev. Sci. Instrum. 74, 1958, (2003).

Snigirev, A.; Kohn, V.; Snigireva, I.; Souvorov, A.; Lengeler, B., Appl. Optics **37**, 653, (1998).

Staron, P.; Fischer, T.; Keckces, J.; Schratte, S.; Hatzenbichler, T., Schell, N.; Muller, M.; Schreyer, A., Mat. Sci. Forum 768-769, 72, (2014).

Stuchi, G. A. D.; Taconelli, M.; Langhi, V. A. B., Geração Termelétrica: Principais Componentes e Tipos de Centrais Termelétricas. São Carlos, (2015).

Tuohimaa, T.; Otengal, M.; Hertz, H. M., Appl. Phys. Lett. 91, 074104, (2007).

Vila-Comamala, J.; Pan, Y. S.; Lombardo, J. J.; Harris, W. M.; Chiu, W. K. S.; David, C.; Wang, Y. X.; J. Synchr. Rad. 19, 705, (2012).

Zukauskas, A.; Ulisnkas, R., Heat Transfer in Tubes in Crossflow, Hemisphere Pub, USA, (1988).

Norma Regulamentadora N°13 (NR-13) – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. Ministério do Trabalho e Previdência Social. Disponível em: <http://www.mtps.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-13-caldeiras-vasos-de-pressao-e-tubulacoes>. Acesso em 22 de julho de 2016.