



ANÁLISE DE FALHA DAS TUBULAÇÕES DO GRELHADO DA FORNALHA DE UMA CALDEIRA INDUSTRIAL A VAPOR

Failure analysis of tubes of the furnace floor grate of an industrial steam boiler

Henrique Claro Xavier, Cesar Augusto Maria Zanutto, Vitor Franco Girardi, Jéssica Martha Nunes

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, Presidente Prudente – SP.

e-mail: henrique.cxavier@gmail.com; cesar.zanutto@hotmail.com;
vitorgirardi@unoeste.br; jessicamn.engmec@gmail.com

RESUMO - Este estudo aborda uma análise abrangente do mecanismo de falha nos tubos do grelhado de uma caldeira mista utilizada para gerar vapor saturado em uma planta fabril. Após uma reforma em 2020, a falha precoce nos tubos em 2021 levantou preocupações. Métodos como líquidos penetrantes, medição de espessura e simulação computacional foram empregados neste estudo. Resultados indicaram que o regime de trabalho, ciclos térmicos e carregamento mecânico por flexão contribuíram para as falhas. Desvios no projeto original, como a falta de reforços, e a redução das espessuras recomendadas nos tubos foram identificadas também. A análise multidisciplinar fortaleceu a evidência do mecanismo de falha por corrosão, fadiga e trincas. O estudo identificou causas e também ofereceu valiosas informações para aprimorar a confiabilidade e desempenho da caldeira.

Palavras-chave: caldeira; análise de falha; inspeção industrial; ensaios não destrutivos; microscopia eletrônica de varredura; simulação.

ABSTRACT - This study addresses a comprehensive analysis of the failure mechanism in the grill tubes of a mixed boiler used to generate saturated steam in a manufacturing plant. After a renovation in 2020, early pipe failure in 2021 raised concerns. Methods such as liquid penetrants, thickness measurement and computer simulation were used in this study. Results indicated that the work regime, thermal cycles and mechanical flexural loading contributed to the failures. Deviations in the original design, such as the lack of reinforcements and the reduction in recommended tube thicknesses, were also identified. The multidisciplinary analysis strengthened the evidence of the failure mechanism due to corrosion, fatigue and cracking. The study identified causes and also provided valuable information to improve boiler reliability and performance.

Keywords: boiler; failure analysis; industrial inspection; non-destructive testing; scanning electron microscopy; simulation.

INTRODUÇÃO

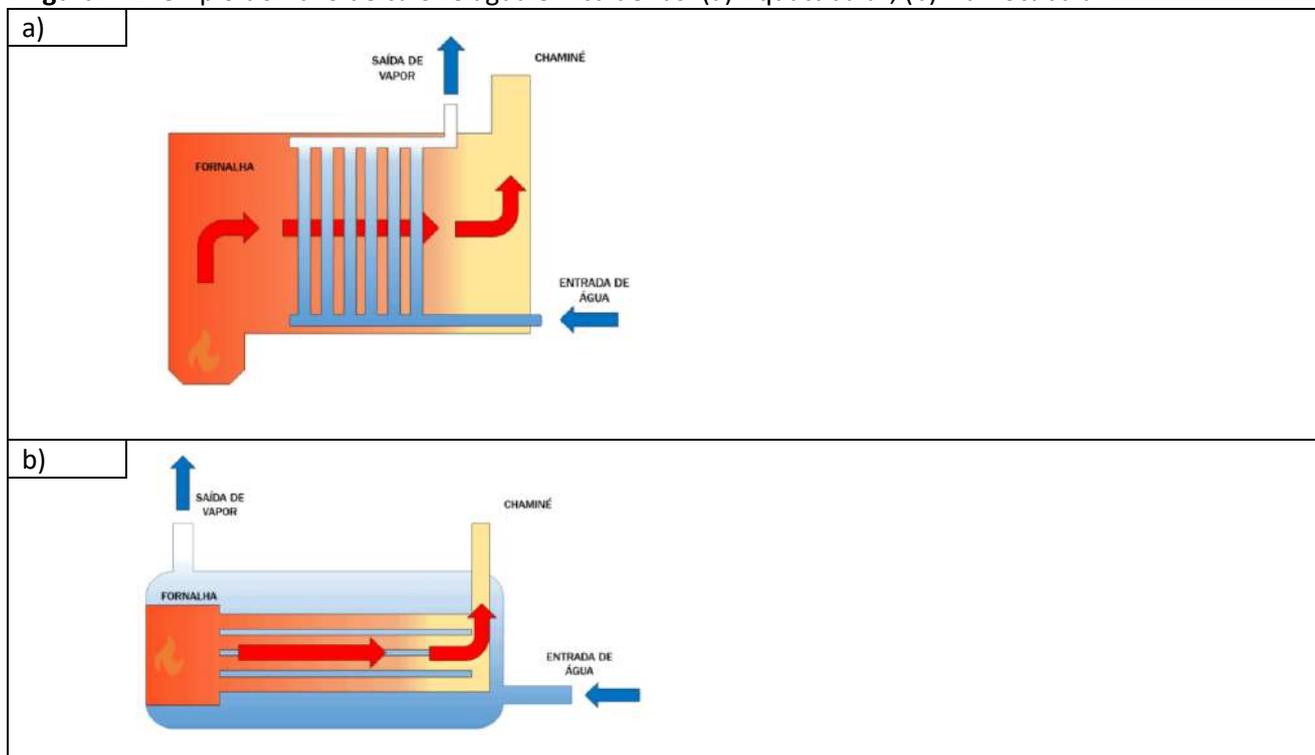
Os sistemas a vapor foram os precursores da revolução industrial ocorrida no fim do século XVII, onde a conversão de energia térmica do vapor em potência útil, possibilitou avanços inegáveis em diversos setores da indústria (Diório, 2019). Apesar de sua função primordial ter sido a geração de potência, com o passar dos séculos as caldeiras ganharam novas atribuições na indústria, como o de aquecimento de fluidos em trocadores de calor, esterilização, vapor de processo e até como matéria-prima em processos de

cozimento de ingredientes por mistura de massa e vapor, sendo de extrema importância para diversos setores (Schwinden, 2019).

Devido à enorme gama de indústrias em que as caldeiras são aplicadas, foi necessário adaptar o equipamento a diversos cenários, levando em consideração o tipo de combustível, a pressão e a vazão de serviço. De forma geral, há dois principais tipos de caldeira, sendo uma aquatubular e a outra flamotubular, onde na primeira a água circula por dentro dos tubos e na segunda os gases resultantes da combustão circulam por dentro dos tubos (Martinelli, 2003). As representações esquemáticas do funcionamento destes equipamentos podem ser visualizadas na Figura 1.

A flamotubular foi o primeiro modelo empregado em escala industrial devido a suas facilidades construtivas e vantagens em manutenções, como a fácil substituição de seus tubos, no entanto, é limitada quanto à vazão e pressão de seu vapor (Pera, 1990). Apesar de sua concepção construtiva ter surgido primeiro, a caldeira do tipo aquatubular ganhou espaço apenas após a ocorrência de incidentes graves com o modelo flamotubular, tornando-se uma alternativa viável para contornar os riscos envolvidos na geração de vapor nas indústrias do século XIX (Pera, 1990). As aquatubulares têm vantagens nos quesitos vazão e pressão, sendo ideais para aplicações de alta demanda, além disso, possuem uma eficiência térmica superior em relação a suas irmãs flamotubulares.

Figura 1. Exemplo do fluxo de calor e água em caldeiras: (a) Aquatubular; (b) Flamotubular.



Fonte: adaptado de (BURNTECH, 2023).

CALDEIRA ESTUDADA

O atual estudo trata de um modelo ligeiramente diferente dos citados anteriormente, mas que foram a base para a fabricação da estudada, que pode ser observada na Figura 2. Trata-se de uma caldeira do tipo mista, a qual derivou da necessidade de queima de combustíveis sólidos em caldeiras flamotubulares de baixa capacidade (Bizzo, 2003). Possui uma fornalha externa do tipo aquatubular, constituída por paredes d'água, que aproveitam o calor da chama de combustão, já os gases resultantes da queima passam internamente por feixes de tubos, constituindo a porção flamotubular do equipamento. Este modelo torna-se viável apenas quando há material sólido de combustão barato ou resíduos à disposição, pois seu rendimento é menor até que o dos modelos flamotubulares convencionais (Bizzo, 2003).

Figura 2. Caldeira estudada da empresa Fosferpet.



Fonte: fotografado pelos autores.

Além das características citadas, a fornalha da caldeira em questão possui grelha (fornalha de queima em grelha), componente pouco utilizado em caldeiras de grande porte devido a limitações de cunho prático e econômico, que incluem queima parcial do combustível, perdas por infiltração nos casos de alimentação manual, necessidade de fluxo contínuo das cinzas e cargas de alimentação limitadas pela resistência estrutural da grelha, por exemplo. No entanto, seu uso ainda é comum em aplicações de médio e pequeno porte por se adaptar ao uso de diversos tipos de combustíveis sólidos (Bazzo, 1995).

A caldeira estudada é do tipo horizontal mista, geradora de vapor saturado, da fabricante VILERI (2010), modelo CFH 4000, e gera vapor de processo para produção de rações na empresa Fosferpet. O consumo de vapor da planta é realizado em dois pontos, na extrusora, para cozimento e adição de umidade na massa de ração, e na secadora, que através de trocadores de calor e ventilação forçada, realizam a secagem dos pellets extrudados de ração. Vale ressaltar que a planta possui apenas uma caldeira geradora de vapor, o que a torna indispensável ao processo de fabricação. Além disso, a importância desse tipo de investigação torna-se ainda mais evidente quando é notável que o objeto de análise apresenta modos de falha que oferecem riscos de vida àqueles que estão ao seu entorno, tais como incêndios, explosões e intoxicações (Magrini, 1994).

Dada sua importância para o processo e tendo em vista seu desgaste natural sem manutenção adequada, foi necessário realizar uma reforma geral no equipamento após nove anos de operação, onde foram trocados todos os feixes de tubos, incluindo o grelhado. Cerca de 17 meses após a reforma, o grelhado apresentou fissuras na face superior de seus tubos, concentrados na região do fundo da fornalha, levando à necessidade de substituição ao atingir apenas 15% da vida útil do componente original. Nesse sentido, este trabalho busca estudar as causas que levaram o grelhado a falhar, investigando as evidências físicas deixadas pela falha, em conjunto com informações da literatura, ensaios não destrutivos e ferramentas computacionais, além de análises com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de partes do grelhado.

ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

O ensaio por líquidos penetrantes (LP) é um método não destrutivo para detectar discontinuidades superficiais abertas em materiais. Originado na indústria ferroviária para inspecionar eixos e equipamentos de aço, o método evoluiu ao longo do tempo. A introdução do método de penetrantes fluorescentes, anos depois, teve destaque na indústria aeronáutica, visando a detecção de defeitos em ligas não ferrosas. O aprimoramento contínuo por meio de pesquisas e melhorias em produtos levou o método a alcançar seu estágio atual (Andreucci, 2019).

O ensaio por LP consiste em detectar discontinuidades das superfícies dos materiais, tais como: trincas, poros, bites, furos, pontos extremos de zona termicamente afetada por soldas, em todos os materiais ferrosos, desde que não sejam materiais porosos ou com superfícies muito espessas. Esse método é comumente utilizado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio (Andreucci, 2019). Um exemplo de execução de ensaio LP com aerossol pode ser visto na Figura 3.

Figura 3. Exemplo de execução de um ensaio por líquido penetrante.



Fonte: fotografado pelos autores.

O método de aplicação do LP consiste em fazer com que ele penetre na abertura da descontinuidade e após a remoção do excesso da superfície, o líquido que fica retido na cavidade da fissura, furo ou descontinuidade, é absorvido mediante um segundo líquido chamado revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície em uma coloração rosa. O ensaio de LP tende a ser fácil e simples diante de outros ensaios para encontrar descontinuidades de materiais ferrosos (Andreucci, 2019). Esse ensaio desempenha um papel crucial na manutenção, integridade e segurança de ativos do setor industrial, contribuindo diretamente para a eficiência operacional e prevenindo possíveis falhas que poderiam resultar em danos significativos.

ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM

O ensaio de medição de espessura por ultrassom (MEU) constitui um método não destrutivo com o objetivo de identificar defeitos ou descontinuidades internas em diversos tipos e formas de materiais, sejam eles ferrosos ou não. Esses defeitos resultam do próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser examinado, como bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas, entre outros (Andreucci, 2018). Um exemplo de MEU pode ser visto na Figura 4.

Figura 4. Exemplo de medição de espessura por ultrassom.



Fonte: fotografado pelos autores.

A MEU apresenta uma variedade de pontos positivos notáveis no que diz respeito à análise de dados e operabilidade. Sua alta sensibilidade para detectar trincas e fissuras internas destaca-se como uma característica crucial, proporcionando uma avaliação minuciosa da integridade do material. Além disso, a dispensa de processos intermediários para a interpretação de dados não apenas agiliza, mas também simplifica significativamente o processo de inspeção, resultando em eficiência operacional (Andreucci, 2018).

A precisão da análise diante das características sonoras específicas de cada material é outra vantagem distintiva desse método. Essa precisão não apenas contribui para a confiabilidade dos resultados, mas também permite uma avaliação mais refinada da condição estrutural do material em questão. A eficácia na detecção de desgaste por corrosão superficial ou intermediária adiciona uma camada adicional de utilidade a essa abordagem, fornecendo informações cruciais sobre o estado de conservação do material (Andreucci, 2018). Em termos de segurança estrutural, a agilidade e resposta imediata do método de medição por ultrassom destacam-se como atributos essenciais. Essa capacidade permite a identificação imediata de áreas com espessuras insuficientes que possam comprometer a segurança da estrutura.

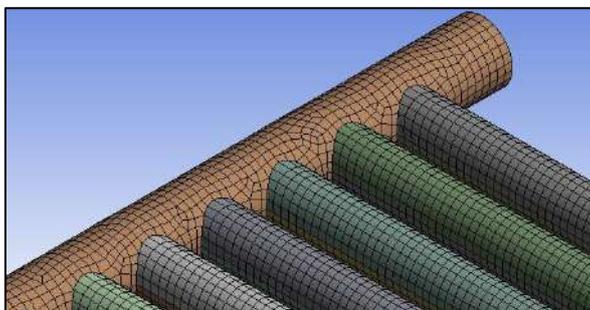
ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

A simulação computacional desempenha um papel fundamental nas análises e aprimoramentos de produtos e projetos empresariais, frequentemente utilizando o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method*, abreviado como FEM). Essa abordagem é essencial em áreas como engenharia e ciências físicas, permitindo compreender o desempenho de objetos complexos em diversas condições (Alves, 2022). Ao antecipar o comportamento da realidade, é comum utilizar modelos simplificados, adaptando-os para representar aspectos específicos.

O FEM visa antecipar e validar o comportamento de materiais, analisando geometrias com carregamentos mecânicos e restrições (Alves, 2022). Ao subdividir a geometria em partes sólidas menores, essa técnica simplifica a resolução eficiente de problemas complexos. A substituição de variáveis desconhecidas por elementos finitos, como triângulos ou quadriláteros, caracteriza esse método, contribuindo para a análise precisa de estruturas e materiais em diversas áreas.

Conforme (Alves, 2022), os elementos finitos são conectados por pontos nodais, formando uma malha, que podem ser visualizados na Figura 5. A precisão do método depende da quantidade, tamanho e tipos de elementos e nós na malha, visto que as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos são resolvidas de forma aproximada devido às subdivisões na geometria. Essa abordagem é crucial na engenharia e ciências aplicadas, proporcionando uma valiosa ferramenta para otimizar processos.

Figura 5. Exemplo de pontos nodais e malhas.



Fonte: elaborado pelos autores.

A malha permite que o problema físico seja aproximado por um conjunto discreto de equações, resolvíveis numericamente para obtenção de soluções aproximadas. Quanto mais refinada e precisa a malha, melhor será a representação do comportamento do sistema sob análise, embora isso também implique em maior demanda computacional. Assim, a geração e o refinamento adequados da malha são aspectos essenciais para obter resultados confiáveis na simulação por elementos finitos (Alves, 2022).

O FEM é aplicável para resolver e diagnosticar problemas de análise estrutural, oferecendo dados sobre deslocamentos, deformações e esforços. Ele permite a representação de diversos cenários, possibilitando a avaliação do desempenho de produtos com base em critérios como resistência, estresse e fadiga. Além disso, diferentes variantes do FEM possibilitam análises em áreas como térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética e fluidos. Sua aplicabilidade abrange desde casos simples, com comportamento linear, até situações mais complexas, incluindo grandes deslocamentos ou contato entre partes em uma montagem (Alves, 2022).

METODOLOGIA

A caldeira em análise, modelo CFH 4000 da VILERI, foi fabricada em 2010 e é empregada na geração de vapor saturado para a produção de rações pela empresa Fosferpet. Possui uma configuração única, consistindo em uma fornalha externa aquatubular e uma porção flamatubular, adaptada para a queima de combustíveis sólidos.

Após nove anos de operação, a caldeira passou por uma reforma geral, incluindo a substituição de todos os feixes de tubos, incluindo o grelhado. Entretanto, cerca de 17 meses após a reforma, foram identificadas fissuras na face superior dos tubos do grelhado, que pode ser visto na Figura 6, concentradas na região do fundo da fornalha. A necessidade de substituição surgiu quando o componente atingiu apenas 15% de sua vida útil original.

Os ensaios por LP foram conduzidos para identificar descontinuidades superficiais no material da caldeira, como trincas, poros e bites. As amostras foram preparadas seguindo um procedimento recomendado (Andreucci, 2019). O procedimento envolveu a aplicação do penetrante, remoção do excesso e utilização do revelador para visualizar as descontinuidades.

Figura 6. Grelhado da caldeira em estudo.



Fonte: fotografado e editado pelos autores.

A MEU foi aplicada para detectar defeitos ou descontinuidades internas na espessura dos materiais da caldeira. Reconhecido por sua alta sensibilidade na detecção de trincas internas, o método seguiu as normas e práticas recomendadas por Andreucci (2018). As medições por ultrassom, realizadas com o medidor de espessura da marca Benetech, modelo GM100, permitiram avaliar a integridade do material, identificando áreas com espessura insuficiente.

Partes do grelhado da fornalha foram submetidas à MEV para uma análise detalhada da morfologia da superfície e identificação de características microestruturais que pudessem contribuir para as falhas. A MEV é um tipo de microscopia em que um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material. O Microscópio Eletrônico de Varredura “Carl Zeiss”, modelo “EVO LS15”, do Departamento de Física e Química da UNESP (Universidade Estadual Paulista) de Ilha Solteira foi utilizado para realizar a análise da superfície de trincas encontradas nos tubos do grelhado.

A simulação computacional por elementos finitos foi conduzida para prever e validar o comportamento do grelhado da caldeira sob diversas condições operacionais. O software escolhido para executar as simulações foi o ANSYS e o escolhido para modelagem 3D do grelhado foi o SOLIDWORKS, ambos utilizados nas mais diversas classes de problemas de engenharia.

A geometria do grelhado da caldeira foi modelada e subdividida em elementos finitos, com a malha gerada considerando quantidade, tamanho, tipos de elementos e nós para garantir precisão na representação da geometria. Diferentes cenários foram simulados, contemplando variações de temperatura, pressão e carga térmica. A precisão das simulações foi avaliada em relação à malha utilizada, considerando a demanda computacional para resultados confiáveis.

Os resultados dos ensaios não destrutivos, da MEV e das simulações por elementos finitos foram integrados para uma análise comparativa. Evidências físicas das falhas identificadas nos ensaios foram confrontadas com as simulações computacionais, buscando uma compreensão abrangente das causas das fissuras no grelhado da caldeira.

A abordagem multidisciplinar, incorporando ensaios não destrutivos, MEV, simulações por elementos finitos e análise comparativa, oferece uma base sólida para investigar as causas das falhas no grelhado da caldeira. A integração dos resultados possibilita conclusões embasadas e a formulação de recomendações para mitigar riscos e melhorar a confiabilidade do equipamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a aplicação dos métodos de ensaio, análise e simulação no grelhado da caldeira, voltada para a produção de vapor saturado na empresa Fosferpet, os resultados revelaram informações cruciais sobre a integridade estrutural do grelhado, sendo estes explícitos a seguir.

Com o acesso ao grelhado que sofreu a falha, ficou evidente que os aspectos mais marcantes da estrutura eram o grau de deformação de seus tubos (conforme pode ser visto na Figura 6) e a quantidade de soldas realizadas em recorrentes paradas para manutenção corretiva, explícitas na Figura 7. A parte do grelhado da caldeira que foi escolhida para ser avaliada, em função da grande quantidade de reparos, pode ser observada na Figura 8, a qual mostra em detalhes essa região.

Figura 7. Soldas realizadas na estrutura em manutenções corretivas.



Fonte: fotografado pelos autores.

Figura 8. Parte escolhida do grelhado para as análises.



Fonte: fotografado pelos autores.

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios por LP destacaram fissuras na face superior dos tubos do grelhado, principalmente na região do fundo da fornalha, mostradas na Figura 9. É possível notar que vários locais indicaram a presença de trincas e discontinuidades em diferentes níveis, sendo uma delas mostrada em detalhes na Figura 10. Além disso, pode-se notar que em praticamente todas as soldas realizadas, houve o destaque de fissuras.

Figura 9. Fissuras na face superior dos tubos do grelhado na região do fundo da fornalha.



Fonte: fotografado pelos autores.

Figura 10. Fissura de um tubo do grelhado em detalhes.



Fonte: fotografado pelos autores.

A MEU aplicada no presente estudo proporcionou uma análise detalhada das espessuras dos materiais do grelhado da caldeira. Por meio desta técnica, foi possível identificar áreas com variações significativas de espessura nos tubos, com reduções de até 18% da originalmente utilizada na reforma do grelhado. A fotografia mostrada na Figura 11 destaca visualmente a área específica do componente onde foi observada essa variação de espessura.

Figura 11. Local observado com a menor espessura de tubo.



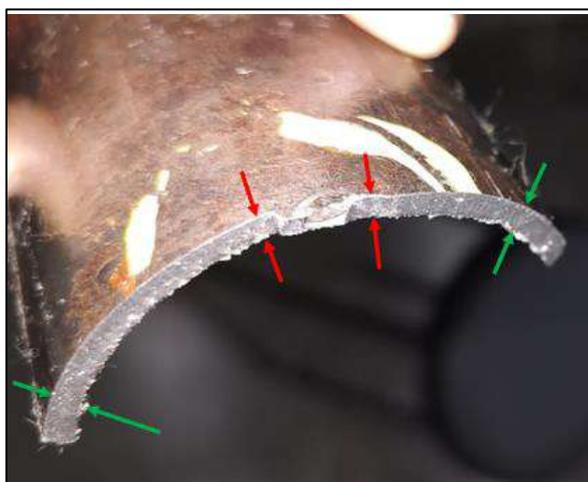
Fonte: fotografado pelos autores.

ANÁLISE VISUAL

A análise visual, pós ensaios não destrutivos, revelou irregularidades superficiais, sugerindo um ambiente propício para o surgimento de falhas. A análise revelou afinamento da parede na região superior dos tubos da grelha, tornando essa área mais suscetível à falha. Além disso, como mostra a Figura 12, é possível observar o afinamento de espessura nos tubos nas regiões da falha. Outro ponto de análise é a existência de uma deformação na superfície do tubo, junto ao local da trinca, característica que gera um estado de tensão residual que, por sua vez, favorece o surgimento de trincas (Pelliccione, 2014).

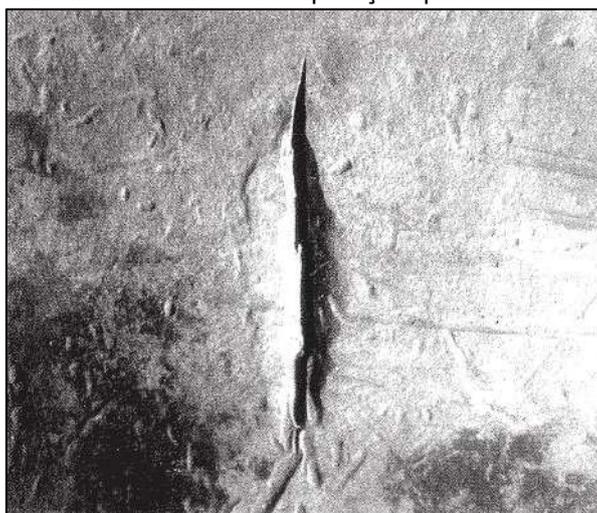
Comparando a Figura 13, relatada pela empresa NALCO (2011), que mostra uma fissura de um tubo de uma caldeira de recuperação que falhou, com a Figura 14, que mostra uma fissura do grelhado em estudo, observa-se que em ambas há uma irregularidade superficial que pode contribuir com o surgimento da trinca. Outras irregularidades superficiais parecidas foram encontradas no grelhado, sendo possível associá-las ao impacto da lenha durante a alimentação manual da caldeira, que certamente deixou essa região propícia para o surgimento de trincas.

Figura 12. Secção transversal de um tubo do grelhado indicando afinamento de espessura na região da falha.



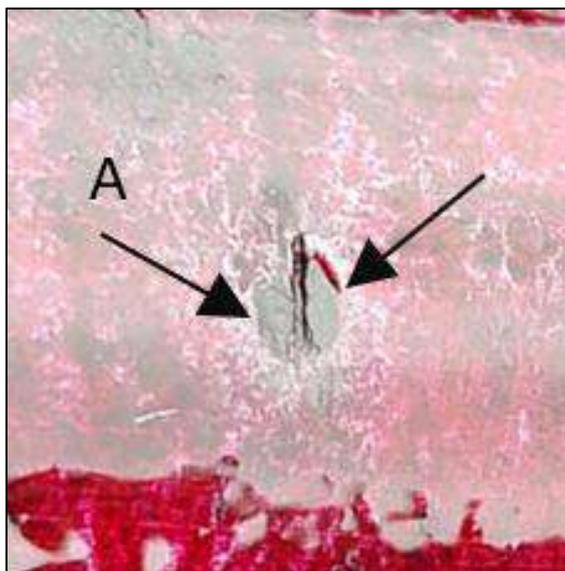
Fonte: fotografado e editado pelos autores.

Figura 13. Fissura de um tubo de uma caldeira de recuperação que falhou.



Fonte: adaptado de NALCO (2011).

Figura 14. Fissura no grelhado em estudo.



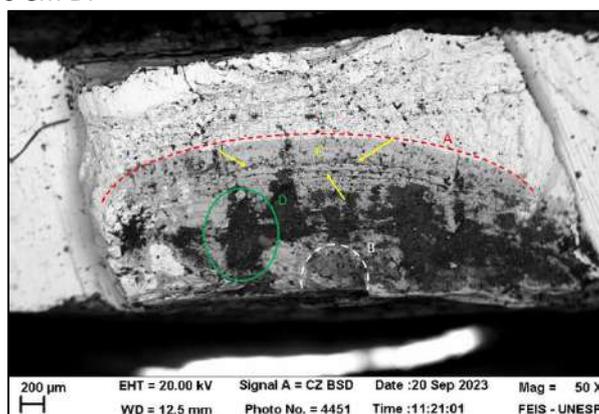
Fonte: fotografado pelos autores.

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MORFOLÓGICA UTILIZANDO MEV

Para a caracterização da superfície da trinca, uma porção afetada do tubo foi seccionada e levada ao laboratório. Com o auxílio de uma serra de ourives, procedeu-se à separação das duas faces de uma trinca, expondo as superfícies de interesse. Durante o processo, observou-se que a trinca não era completa, não se estendendo até a porção interna do tubo. A MEV foi adotada para realizar uma análise minuciosa da morfologia da superfície do grelhado.

A Figura 15 representa a caracterização visual da estrutura do grelhado, proporcionando uma perspectiva microestrutural da falha. Nesta imagem, a morfologia da trinca é destacada, apresentando informações cruciais, como estriações associadas à fadiga. Obtida por meio da MEV, a figura revela a região limite entre as áreas mais escuras e claras, indicando a frente de propagação da trinca. Nota-se que a trinca não penetrou integralmente o material, encontrando-se em estágio de desenvolvimento. As estriações na região de propagação, conforme observaram, corroboram com os efeitos da fadiga no material, como discutido por He *et al.* (2022), em relação ao regime de operação da caldeira durante o incidente.

Figura 15. Indicação da frente de propagação de trinca em A, ponto de nucleação da trinca em B, estriações em C e partículas de corrosão em D.



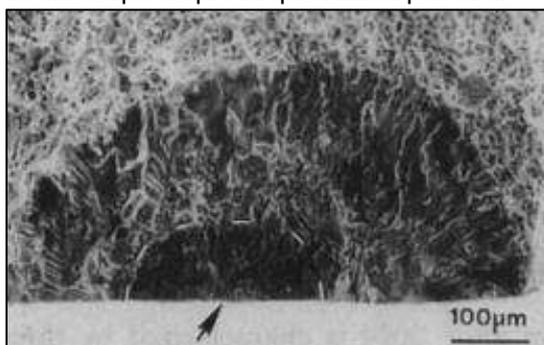
Fonte: elaborado pelos autores.

Durante o período de operação da caldeira analisada, que funcionava 16 horas por dia devido à baixa demanda fabril, observaram-se partidas e paradas diárias, gerando ciclos de oscilação de temperatura e carregamento mecânico por flexão. A alimentação manual de lenha, juntamente com partidas e desligamentos rápidos e variações constantes na demanda de vapor, contribuíram para o

fenômeno de fadiga observado, tanto térmica quanto mecânica. Esses padrões operacionais estão em consonância com as análises de Pelliccione (2014) em situações semelhantes.

Além das características mencionadas, a Figura 15 revela que a superfície da trinca apresenta um formato semicircular, com um ponto visível de nucleação e evidências de corrosão pronunciada. Essa morfologia assemelha-se à trinca indicada por Piascik e Willard (1993) na Figura 16, assim como às partículas de corrosão identificadas na Figura 17, provenientes de um corpo de prova do estudo do autor sobre Quebras por Corrosão e Fadiga (*Corrosion Fatigue Cracking*, abreviada como CFC). Ao comparar a superfície da trinca analisada com a descrita por Piascik e Willard (1993), observam-se similaridades significativas.

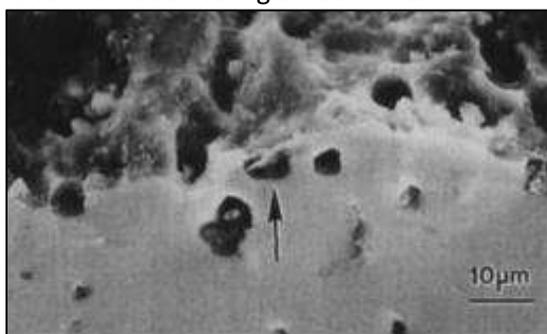
Figura 16. Superfície da trinca de um corpo de prova que falhou por CFC.



Fonte: adaptado de Piascik e Willard (1993).

O estudo do mecanismo CFC revelou que sua ocorrência está associada a um ambiente com tensão cíclica e oxidação espontânea no material, condições presentes na caldeira analisada, como fadiga térmica e mecânica, gases da combustão e particulados. Adicionalmente, caldeiras sujeitas a partidas e desligamentos rápidos, com tubos expostos a cargas de flexão, mostram maior suscetibilidade a falhas por CFC, conforme relatado pela empresa NALCO (2011).

Figura 17. Partículas de corrosão identificadas na região da trinca.



Fonte: adaptado de Piascik e Willard (1993).

CONSIDERAÇÕES SOBRE O MECANISMO DE FALHA

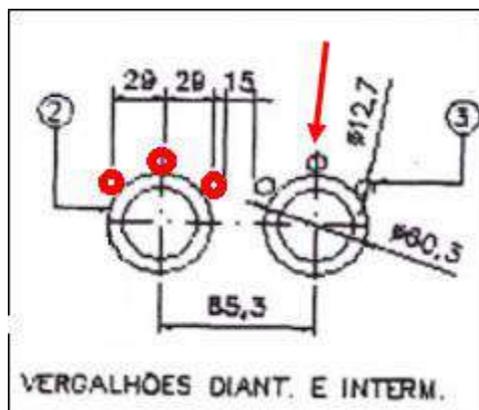
A combinação de carga cíclica, fadiga térmica e mecânica, aliada a irregularidades superficiais, favoreceu o desenvolvimento das trincas. Embora o mecanismo CFC elimine o limite de carga em fadiga e reduza o número de ciclos para falha (NALCO, 2011), é possível inferir que a diminuição da espessura nas tubulações foi um fator determinante para a falha precoce observada. Conforme destacado por Sampaio (2021), tubos com maior espessura apresentam maior resistência à fadiga em comparação com aqueles de menor espessura.

O mecanismo CFC, como uma ação sinérgica de corrosão e fadiga, implica que qualquer fator favorecedor de falhas em um dos mecanismos também contribuirá para a falha conjunta. Adicionalmente, a ausência de reforços em barra redonda tornou a estrutura do grelhado suscetível a deformações por cargas de flexão e impactos da lenha, uma vez que esses reforços atuavam como proteção para os tubos.

RECOMENDAÇÕES DO MANUAL DA CALDEIRA

Uma análise comparativa entre a grelha instalada e as recomendações do manual da caldeira revelou inconsistências. Notou-se uma redução significativa na espessura dos tubos, especialmente na região superior do grelhado, onde as falhas foram identificadas. A ausência de reforços estruturais também contribuiu para a fragilização do componente. A Figura 18 mostra uma imagem retirada do manual do fabricante.

Figura 18. Secção transversal dos tubos, segundo o manual da caldeira, com o local da barra redonda de reforço destacado.



Fonte: adaptado do manual do fabricante.

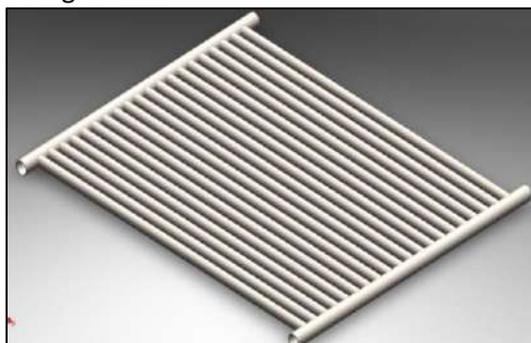
A primeira inconsistência notada foi em relação à espessura de parede dos tubos da grelha, além de seus coletores transversais, e a segunda relacionada aos reforços estruturais. O manual especifica a utilização de tubos NBR5590 de 2.1/2" com 7,01 mm de espessura para a grelha e tubos de 3" com 7,62 mm de espessura para os coletores, além de reforços estruturais em barra redonda maciça com 1/2" em cima dos tubos da grelha, como pode ser visto nas marcações em vermelho da Figura 18.

No entanto, constatou-se a utilização, na reforma do grelhado, de tubos ASTM A178 de 2.1/2" com 3,05 mm de espessura para a grelha, tubos NBR5590 de 3" com 5,49 mm de espessura para os coletores e reforço estrutural ausente (SERVAMIL, 2020). Nota-se que houve uma redução de aproximadamente de 56% na espessura dos tubos da grelha e uma redução de aproximadamente 28% na espessura dos tubos dos coletores transversais.

ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A aplicação da análise de elementos finitos desempenhou um papel crucial na antecipação e validação do comportamento da caldeira, oferecendo dados abrangentes sobre deformações e esforços. A Figura 19 mostra o modelo 3D concebido do grelhado, utilizado nas simulações. A simulação por elementos finitos, executada no software ANSYS com modelagem no SOLIDWORKS, proporcionou uma compreensão aprofundada do comportamento do grelhado em diversas condições operacionais. A análise considerou a carga de lenha aplicada durante a operação diária, contribuindo para uma compreensão detalhada da distribuição de tensões no grelhado.

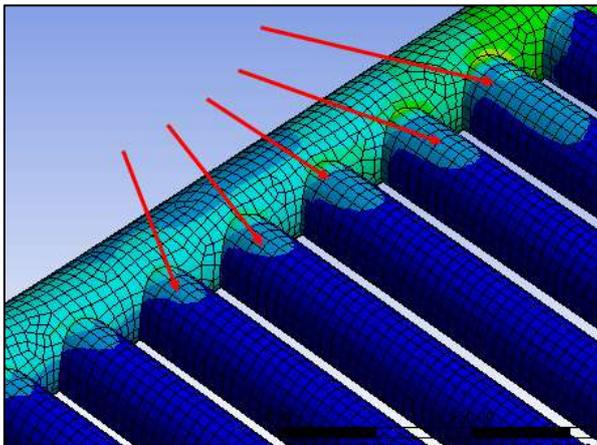
Figura 19. Modelo 3D concebido do grelhado.



Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 20 ilustra a distribuição de tensões na região das falhas, podendo ser observado que as maiores tensões estão localizadas na junção soldada entre os tubos da grelha e dos coletores, com uma distribuição heterogênea em função da posição distribuída da carga simulada.

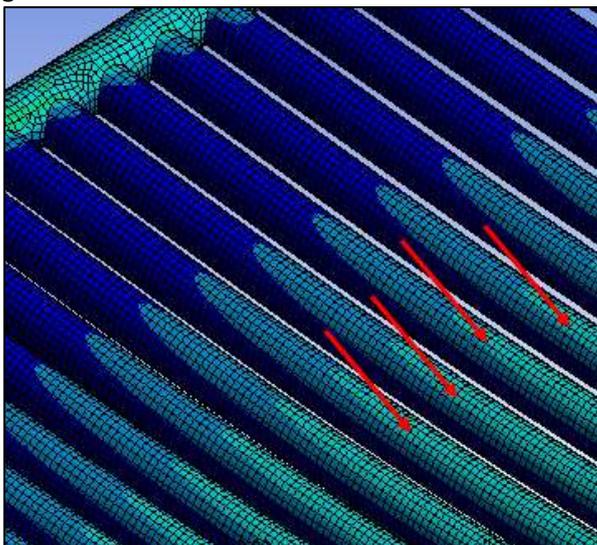
Figura 20. Região com as maiores tensões.



Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 21 destaca as tensões da região central do grelhado, que mostram que há concentrações de tensões, forçando a estrutura para baixo, em função das condições do processo, que poderiam ter sido mitigadas com a utilização de barras redondas maciças como reforço na parte superior do grelhado.

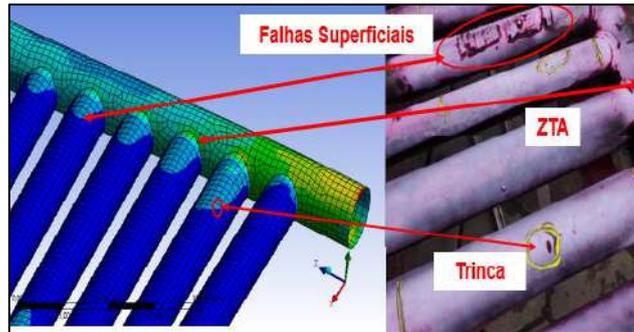
Figura 21. Região central do grelhado.



Fonte: elaborado pelos autores.

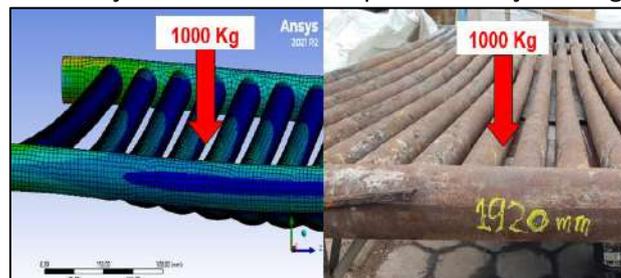
As Figuras 22 e 23 visam evidenciar as correspondências entre o método dos elementos finitos e o grelhado da caldeira real analisado. A análise desses pontos de convergência facilita a identificação das áreas de falhas e deformações mecânicas nas tubulações, atribuídas à fragilidade do material diante das condições operacionais aplicadas.

Figura 22. Convergência das regiões propícias a falhas por fadiga mecânica.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 23. Convergência da deformação mecânica sofrida pelas tubulações do grelhado analisado.



Fonte: elaborado pelos autores.

Pode-se observar, nas Figuras 22 e 23, a correlação entre os pontos de falhas computacionais e as falhas reais identificadas, sendo:

- Regiões com falhas superficiais com presença de solda;
- Regiões de zona termicamente afetada (ZTA) devido processo de soldagem;
- Região de trinca por processo de CFC encontrada pelos autores;
- Regiões com deslocamento vertical devido ao peso das cargas aplicadas ao grelhado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou de maneira abrangente a análise do mecanismo de falha no grelhado de uma caldeira mista horizontal geradora de vapor saturado, empregando métodos como líquidos penetrantes, medição de espessura, caracterização de superfície de trinca com MEV e simulação computacional. O trabalho fornece insights valiosos para orientar ações corretivas e preventivas, visando melhorias na confiabilidade e desempenho da caldeira. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram alcançadas:

O regime de trabalho da caldeira, operando algumas horas por dia devido à baixa demanda fabril, possivelmente contribuiu para as falhas observadas, tanto termicamente quanto mecanicamente;

- As partidas e paradas diárias, gerando ciclos de oscilação de temperatura e carregamento mecânico por flexão, associadas à alimentação manual de lenha, são indicadas como causas potenciais das irregularidades superficiais nas tubulações;

O desvio do projeto original do grelhado, evidenciado pela falta de reforços redondos maciços na parte superior dos tubos, contribuiu para o surgimento de irregularidades superficiais;

A diminuição das espessuras recomendadas no projeto original não apenas deixou a estrutura mais suscetível à fadiga, mas também contribuiu para as deformações acentuadas;

A redução na espessura dos tubos, a ausência de reforços estruturais e a presença de deformações indicam características do mecanismo de falha CFC;

- A análise multidisciplinar, que envolveu ensaios não destrutivos, MEV, simulações por elementos finitos e análise comparativa, fortaleceu a evidência do CFC como o provável mecanismo responsável pela falha no grelhado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos que contribuíram positivamente para o desenvolvimento deste trabalho. À equipe técnica, aos colegas e aos colaboradores, expressam-se a gratidão pela dedicação e pelas valiosas contribuições. O sucesso deste trabalho é resultado do esforço conjunto de todos.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. **Desenvolvimento de produtos utilizando simulação virtual**: procedimentos e aplicações. Rio de Janeiro: Alta Books, 2022.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo: Abendi, 2018.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes**. São Paulo: Abendi, 2019.

Bazzo, E. **Geração de vapor**. 2.ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 2003.

BURNTECH. Saiba quais são os principais tipos de caldeiras industriais. **Blog da BURNTech**, 4 dez. 2023. Disponível em: <https://blog.burntech.ind.br/caldeiras-industriais/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

Diório, A. **Geração e distribuição de vapor**. Londrina: Distribuidora Educacional, 2019.

HE, J. Z.; LU, J. N.; DENG, X. Y.; XING, X. Q. Premature fracture of high-strength suspension springs caused by corrosion fatigue cracking. 9. 2022.

MAGRINI, R. O. **Riscos de acidentes na operação de caldeiras**. São Paulo: Fundacentro, 1994.

MARTINELLI, L. C. **Geradores de Vapor**. Panambi: Universidade Regional do Noroeste do Estado, 2003.

NALCO. **The nalco guide to boiler failure analysis**. 2. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2011.

PELLICCIONE, A. **Análises de falhas em equipamentos de processo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

PERA, H. **Geradores de vapor**. 2. ed. São Paulo: Fama, 1990.

PIASCIK, R. S.; WILLARD, S. A. **The growth of small corrosion fatigue cracks in alloy 2024**. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 1993.

SAMPAIO, T. C. **Estudo da sensibilidade à fadiga de uma junta tubular soldada**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.52041/srap.15107>

SCHWINDEN, M. C. **A evolução da NR-13 ao longo dos anos e seus impactos**. Tubarão: Repositório Universitário da Ânima (RUNA), 2019.

SERVAMIL. **Serviços de reforma na caldeira vileri**. Sertãozinho: Servamil Equipamentos Industriais, 2020.

VILERI. Características técnicas da caldeira horizontal CFH 4000. Pelotas: Vileri Engenharia Industrial 2010.