

ANÁLISE DE FALHA EM JUNTA SOLDADA DE CALDEIRA COMO FONTE DE DADOS PARA INSPEÇÕES DE CONFIABILIDADE

Alexandre Y. Nakayama, nakayama@klabin.com.br¹
Márcio L. Martins, mlmartins@klabin.com.br¹

¹Klablin S.A., Fazenda Monte Alegre s/n, Telêmaco Broba - PR

Resumo: A execução de juntas soldadas em caldeiras de alta pressão é um item crítico para a confiabilidade de operação. Deste modo, quando há ocorrência de falha em soldas, as causas devem ser detectadas e exploradas para que sejam evitados eventos similares em outros locais, pois a quantidade de juntas soldadas em partes de pressão de caldeira é elevada e a consequência da falha pode ser catastrófica. Neste trabalho foram realizados ensaios em uma junta soldada que apresentou falha para detectar a causa e extrapolar as conclusões da análise para as demais soldas a fim de evitar eventos similares.

Palavras-chave: soldagem, inspeção, ensaio não-destrutivo, caldeira.

1. INTRODUÇÃO

O setor de Papel e Celulose está incluído entre os mais intensivos em utilização de energia elétrica e térmica. Dentro das indústrias do setor, a cogeração é um item importante na viabilidade econômica e da alta competitividade brasileira no mercado internacional (Velázquez, 2000). Para a geração de vapor, as indústrias de celulose que utilizam o processo Kraft de polpação, bem como as integradas de papel e celulose, fazem uso de trocadores de calor, comumente denominados caldeiras, que empregam majoritariamente como combustível a lixívia produzida no próprio processo Kraft e biomassa em geral, cavacos e cascas de madeira da base florestal não utilizada no processo de produção de celulose.

Para a produção em larga escala de celulose, as caldeiras utilizadas são de grande porte e operadas em pressões elevadas (média de 160 bar nas plantas modernas). Na fabricação destes equipamentos, o processo de soldagem na união dos tubos é crítico demandando alta confiabilidade de execução e posteriores inspeções após início de operação. Falhas em juntas soldadas em partes de pressão de caldeiras são intoleráveis haja vista os custos envolvidos e os riscos para a segurança das pessoas e patrimonial.

Este trabalho aborda a análise de falha de uma junta soldada na região do economizador de uma caldeira de leito fluidizado circulante com capacidade de produção de 250 ton/h de vapor com queima de biomassa e pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) de 12,35 MPa como balizador para posteriores inspeções no feixe de tubos do economizador de modo a proporcionar confiabilidade operacional dentro do intervalo de inspeções da NR-13. Esta caldeira está localizada em uma indústria integrada de papel e celulose e fornece vapor para geração de energia por um turbogerador com extração para utilização do vapor como energia térmica para o processo de secagem do papel.

2. CALDEIRA LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

O leito fluidizado tem como objetivo o aumento da eficiência energética em caldeiras com o uso de combustíveis de baixo poder calorífico associado a um alto teor de umidade e cinzas, como é o caso de plantas de papel e celulose integradas que utilizam cascas e resíduos do processo florestal (Velázquez, 2000). A fluidização circulante envolve uma quantidade de material base com granulação fina, no caso da caldeira do estudo de caso é utilizada areia, que é atravessado por um fluxo de ar insuflado de baixo para cima.

Conforme Foust *et al.* (1982), quando é atingido um certo fluxo de ar, a suspensão tem comportamento equivalente a de um fluido cuja principal vantagem é agitação vigorosa do leito proporcionando uma uniformidade de temperatura, mesmo em processos extremamente exotérmicos, e alta taxa de transferência de calor e massa entre fluido e sólidos.

Na caldeira deste estudo de caso, a combustão em leito fluidizado ocorre na fornalha de seção transversal retangular fechada por paredes de tubos com membranas para condução de água onde ocorre a troca de calor. O gás de combustão sobe pela fornalha e entra nos ciclones. A maior parte das partículas sólidas do gás de combustão é removida por força centrífuga nos ciclones e retorna para a fornalha através do duto de retorno. Após a passagem pelos ciclones, o gás de

combustão em alta temperatura se direciona para o segundo passe da caldeira por onde flui pelos feixes de tubos dos super aquecedores, evaporadores, economizadores e pré aquecedores de ar. Após fluir e consequentemente trocar calor nos feixes de tubos, o gás de combustão passa pelos precipitadores eletrostáticos para separação da areia residual e cinzas antes de exaustão pela chaminé. O fluxo do gás de combustão é indicado pelas setas vermelhas e o retorno dos particulados pesados para a fornalha após a passagem pelos ciclones pelas setas amarelas na Fig. 1.

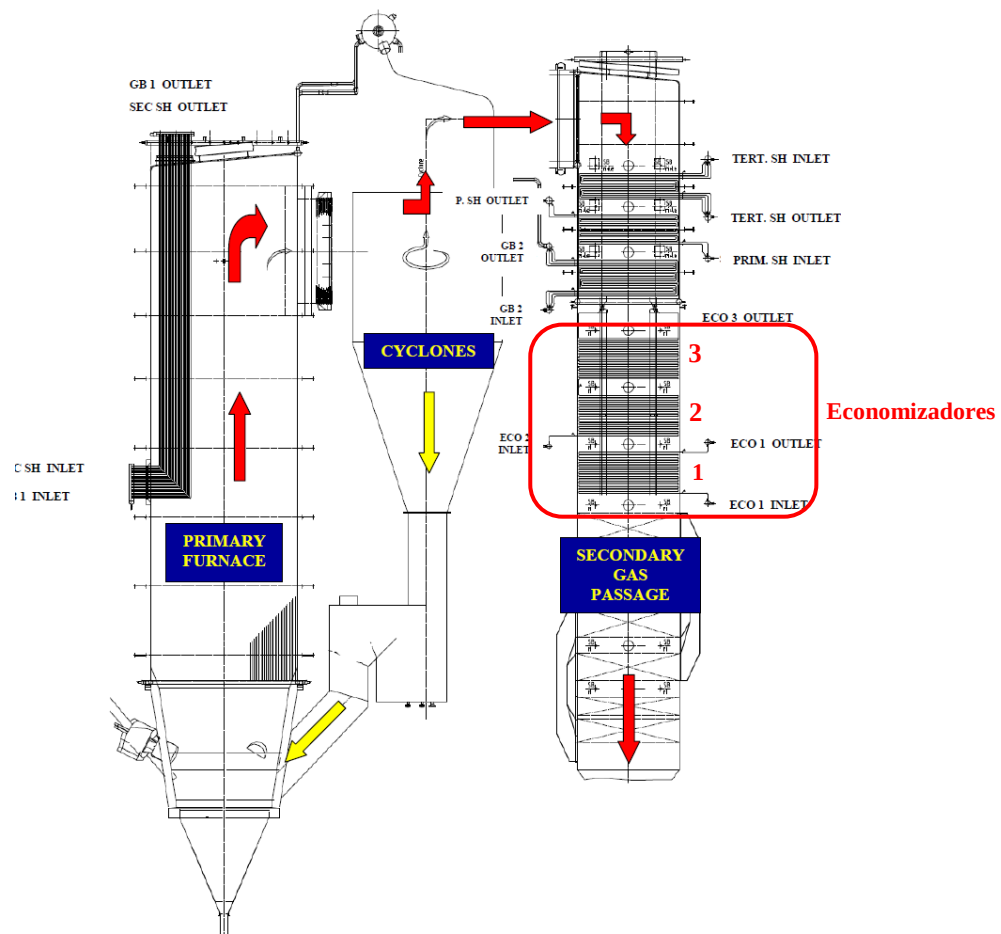


Figura 1. Desenho esquemático da caldeira do estudo de caso indicando fluxos do gás de combustão (setas vermelhas), do retorno de partículas para fornalha (setas amarelas) e a região dos feixes de tubos dos economizadores.

3. FALHA EM JUNTA SOLDADA DO FEIXE DE TUBOS DO ECONOMIZADOR 3

Nos feixes de tubos dos economizadores, a água desmineralizada de alimentação recebe calor dos gases de combustão com o objetivo de elevação de temperatura antes da entrada nos evaporadores. A caldeira do estudo de caso possui três feixes de economizadores numerados de um a três no sentido oposto ao dos gases de combustão. A Fig. 1 destaca a região dos feixes de economizadores no segundo passe de passagem dos gases de combustão.

O feixe do economizador 3 é construído em tubos de aço carbono ASTM A-192 de 31,8 mm de diâmetro externo e 3,81 mm de espessura de parede unidos por processo de soldagem. Durante operação da caldeira, uma das juntas soldadas indicada na Fig.2 apresentou falha permitindo o vazamento de água de alimentação em alta pressão no segundo passe de gases de combustão. Devido vazamento e os danos causados nos tubos adjacentes, houve despressurização da caldeira e consequente parada não programada para manutenção corretiva. Este processo de parada envolve, além da despressurização, o resfriamento da parte interna da caldeira para acesso para manutenção e leva em torno de 48 horas.

A junta soldada que apresentou falha foi realizada na montagem da caldeira, isto é, os trechos de tubos retos e dobrados vieram desmontados e foram soldados no local formando as serpentinas onde o feixe está localizado. A Fig. 2 apresenta esquematicamente uma serpentina do economizador 3. O feixe é composto por 72 serpentinas conectadas a dois coletores, um de entrada de água de alimentação e um de saída que direciona a água para o conjunto de evaporadores onde ocorre a transformação para vapor saturado.

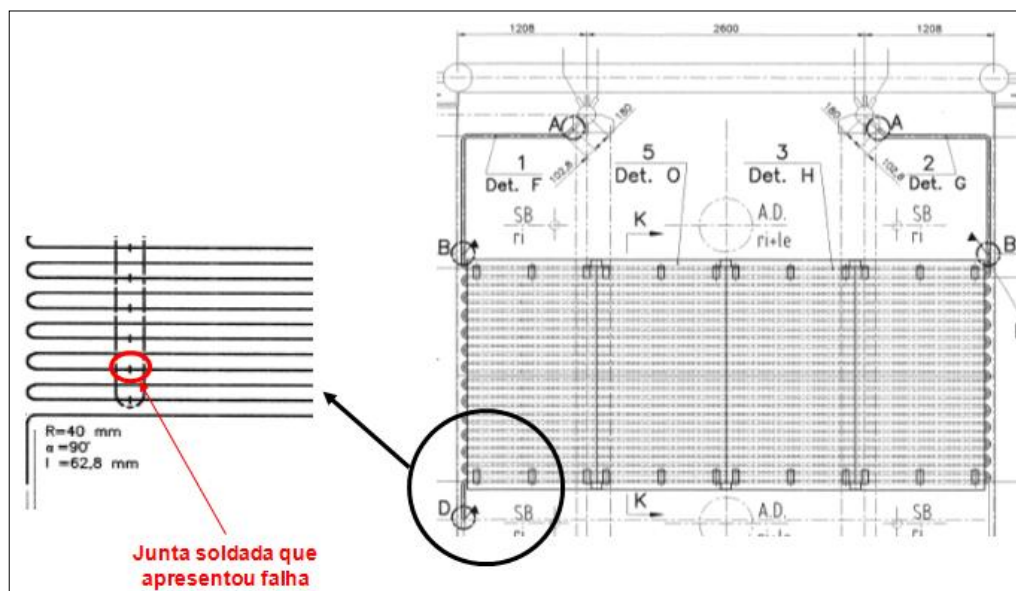


Figura 2. Desenho esquemático de uma serpentina do feixe do Economizador 3 e a localização da junta soldada que apresentou falha.

O reparo do feixe de tubos é realizado pelo corte da junta soldada e tamponamento da serpentina. A junta soldada foi cortada conforme a Fig. 3 para análises laboratoriais de falha e verificar possíveis desvios de execução tendo como base a norma ASME seção IX para soldagem de tubos de caldeira e vasos de pressão.



Figura 3. Junta soldada que apresentou falha.

4. ANÁLISE DA JUNTA SOLDADA

Para garantia de que a junta soldada resistirá às solicitações consideradas no projeto ou que a tubulação mantenha a integridade estrutural durante o uso, faz-se necessário o atendimento das características e propriedades da junta soldada constantes em normas específicas. Na indústria de fabricação de equipamentos de processamento químico contínuo e geração de vapor, as principais normas de projeto são ASME B31.1 e ASME B31.3 para tubulações de vapor e processos respectivamente e ASME I e VIII para caldeiras e vasos de pressão. Todas estas normas referenciam a ASME seção IX para qualificação e especificação dos procedimentos de soldagem (Filho, 2004).

Conforme Wainer et al. (1992) a isenção de defeitos não é imperativa, porém há restrições em relação à quantidade e extensão destes defeitos. Os defeitos possíveis em juntas soldadas são: porosidade, distorção, desalinhamento, trinca, inclusão e de geometria. Para averiguação, constatação destes defeitos e mesurá-los, faz-se necessário recursos de inspeção visual e ensaios não destrutivos.

Os defeitos de soldagem podem acarretar problemas na operação de caldeiras e a falha neste tipo de equipamento pode surgir de um procedimento de solda inadequado para o material de construção dos tubos ou mal executado pelo soldador, podendo gerar uma alteração microestrutural indesejável, como a formação de fases frágeis, principalmente a martensita (Vecchi, 2009).

Desta forma, a junta soldada que apresentou falha no economizador 3 foi retirada para averiguação e mensuração dos defeitos e descontinuidades. Esta junta soldada foi limpa com escova manual e rotativa para remoção de óxidos,

produtos de corrosão e produtos de combustão. As características geométricas do cordão foram mensuradas com os seguintes resultados médios:

- Largura de cordão: 8,5 mm.
- Desalinhamento entre tubos: 0,4 mm.
- Reforço do cordão: 0,6 mm.
- Penetração da raiz: 0,1mm.

Conforme ASME IX, das características geométricas, apenas a penetração de raiz está abaixo de 0,4 mm de extravazamento especificado em função da dimensão da junta. Por inspeção visual da parte interna do cordão podem ser verificados defeitos como mordedura, poros e falta de fusão conforme Fig. 4.

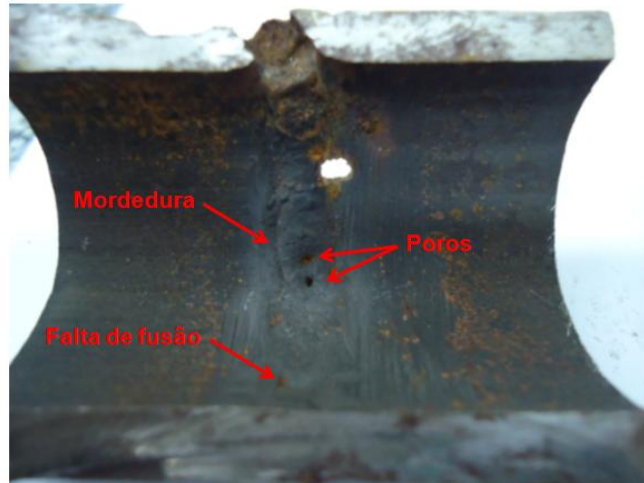


Figura 4. Inspeção visual na parte interna do cordão.

Com a superfície isenta de impurezas e umidade foi realizado o ensaio por líquido penetrante, com tempo de penetração de 15 minutos, e posterior inspeção visual após aplicação do revelador. A Fig. 5 mostra a revelação do ensaio por líquido penetrante (LP) da parte interna do cordão de solda onde se pode observar o defeito volumétrico de porosidade aflorando na superfície do cordão.

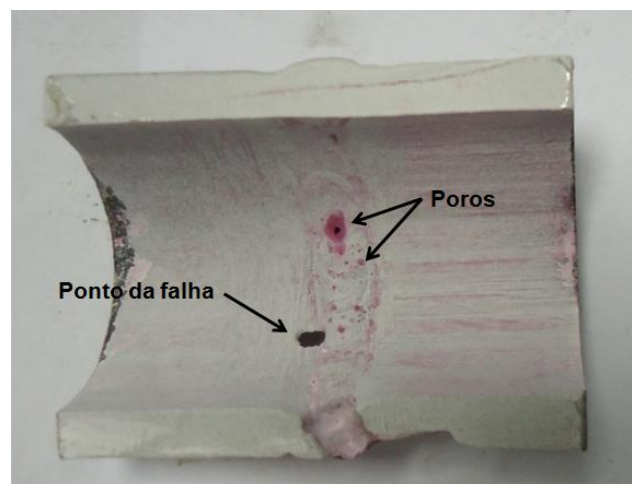


Figura 5. Revelação do LP na parte interna do cordão de solda.

Na parte interna do cordão foram revelados poros que não estão expostos na parte externa, porém apresentaram dimensão maior que o limite segundo ASME XI de 1,6 mm de diâmetro e distância mínima entre poros de 1,6 mm. Conforme Fortes (2004), a porosidade, quando aflorada na superfície do cordão pode agir como entalhe e concentrador de tensão favorecendo a falha prematura por fadiga, por exemplo.

Foi realizado também o ensaio de radiografia na junta soldada com equipamento de fonte de raio-X marca Comet e detector Perkin Elmer tipo flat panel. Os poros detectados no ensaio por LP também foram detectados na radiografia sendo o poro de maior dimensão realçado conforme Fig. 6.



Figura 6. Radiografia do cordão de solda.

A metalografia com intuito de averiguar as condições de morfologia e estrutura dos materiais do cordão de solda e adjacências (metal de solda, metal de base e zona afetada pelo calor) foi realizada com o lixamento (granas 220, 400, 600 e 1200 nesta sequência) e polimento (alumina 1 micrometro e 0,5 micrometro nesta sequência). O ataque foi realizado com o reagente Nital 2% e visualização em microscópio ótico Olympus BX51M.

A microestrutura característica no núcleo, meia espessura do tubo, apresenta uma matriz de ferrita com perlita e tamanho de grão ASTM 9 conforme micrografias da Fig. 7. Para caracterização do material base dos tubos foi feita uma espectrometria de emissão ótica em equipamento Baird com a composição obtida mostrada na Tab.1. O projeto original da caldeira especifica o material de construção da serpentina do economizador conforme norma ASTM A-192.

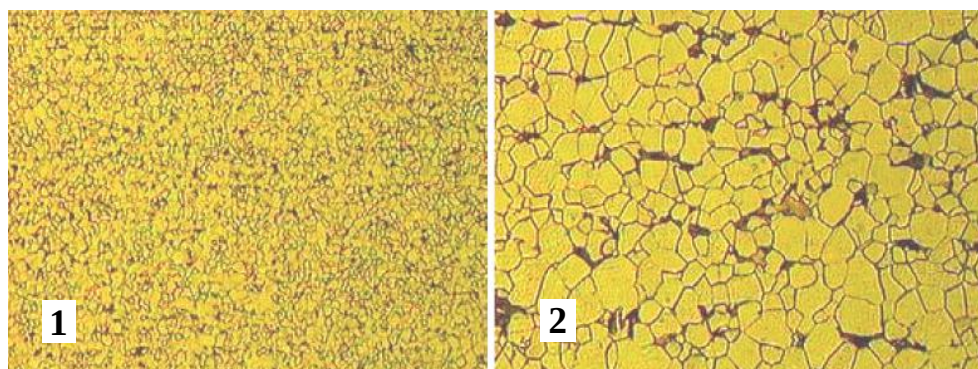


Figura 7. Microestrutura composta de uma matriz de ferrita com perlita. (1) aumento 100x. (2) aumento 400x.

Tabela 1. Composição especificada para ASTM A-192 e resultado obtido da amostra por espectrometria ótica (% em peso).

	C	Si	Mn	P	S
ASTM A-192	0,06-0,18	0,25 _{máx}	0,27-0,63	0,048 _{máx}	0,058 _{máx}
Ensaio amostra	0,109	0,216	0,511	0,016	0,028

5. CONCLUSÃO

Através dos ensaios realizados na junta soldada que apresentou falha, foram verificados defeitos muito relacionados à execução do cordão. Penetração de raiz menor que a recomendada pela ASME, presença de poros e mordedura neste cordão trouxeram a preocupação de que pudesse haver defeitos similares disseminados nas serpentinas do feixe do economizador. São no total, apenas em um dos economizadores, 72 serpentinas com pelo menos 29 juntas soldadas executadas em cada serpentina na montagem da caldeira.

Os defeitos detectados são estruturais da solda por fusão e, conforme Modenesi (2001), têm bastante relação com a execução do cordão através de parâmetros como contaminações dos metais base e consumíveis, distúrbios na proteção da poça, corrente de soldagem e comprimento do arco.

Especificamente na junta soldada ensaiada, a causa mais provável de início da falha foi porosidade no cordão que aflorou na superfície e atuou como concentrador de tensão levando a trinca por fadiga e consequentemente permitindo o vazamento do fluido conduzido. Pela metalografia não foi detectada a formação de estrutura frágil martensítica na zona afetada pelo calor (ZAC), região esta que não se fundiu na soldagem, porém sofreu mudanças microestruturais resultantes do calor induzido. Para Fortes (2005), a ZAC pode se tornar um elo fraco em uma junta soldada primeiramente porque sua estrutura granular não é tão refinada e, portanto é mais fraca que o metal base circunvizinho ou o metal de solda e em segundo lugar uma estrutura cristalina frágil martensítica pode se formar em caso de resfriamento rápido em alguns tipos de aço. Nenhuma destas circunstancia foi verificada pela metalografia.

O metal base foi conferido por espectrometria ótica e o resultado condiz com a especificação de projeto ASTM A-192, eliminando a causa de falha por aplicação do metal base diferente da especificação de projeto. Desta forma, os resultados dos ensaios realizados sugerem que a causa da falha tem relação bastante estreita com a execução do cordão.

A execução da solda e controle de seus parâmetros possivelmente sofreram desvios durante montagem da caldeira. Extrapolando os resultados dos ensaios da junta deste estudo de caso para a quantidade de soldas de montagem da caldeira, há possibilidade de defeitos e descontinuidades semelhantes estarem iniciadas ou em progressão nas demais regiões da caldeira, não apenas nos economizadores, mas também evaporadores, superaquecedores e paredes de tubos da fornalha. Assim, para confiabilidade operacional da caldeira, devem ser empregadas técnicas de inspeção para detectar defeitos estruturais em soldas por fusão como radiografia a ultrassom Phased Array, pois as evidências coletadas pelos ensaios sugerem que não houve desvio dos materiais de construção, consumíveis e operacionais (qualidade da água, arraste de sólidos nos gases de combustão, pressão da caldeira) que contribuiu sobremaneira para a falha da junta soldada.

O ultrassom Phased Array tem a vantagem de ter uma área ativa do transdutor maior que o ultrassom tradicional, aumentando a varredura devido diversidade de ângulos de feixes além de maior velocidade de inspeção. Outras características essenciais desta técnica para a aplicação na inspeção em locais de acesso restritos são a pequena superfície do transdutor e o recurso de varrer o feixe sem a necessidade de se mover a sonda. Convém realçar que a aplicação desta técnica de inspeção na caldeira deste estudo de caso é válida para as juntas onde há acesso para o transdutor porque as serpentinas formam o feixe do economizador com grande proximidade entre tubos e desta forma mesmo o transdutor Phased Array tem restrição de acesso.

6. REFERÊNCIAS

- Filho, J.S.P., 2004, “Análise de Efeitos de Testes Hidrostáticos em Vasos de Pressão”, Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Fortes, C., 2004, “Metalurgia da Soldagem”, Esab HandBook, São Paulo, Brazil, 94 p.
- Fortes, C., 2005, “Eletrodos Revestido”, Esab HandBook, São Paulo, Brazil, 64 p.
- Foust, A.S., Wensel, L.A., Clump, C.W., Maus, L., and Andersen, L. P., 1982, “Princípios das Operações Unitárias”, Ed. Ltc, São Paulo, Brazil, 682 p.
- LacTec., 2015, Relatório de Inspeção N° 1053”, Inspection Report, Curitiba, Brazil, 20 p.
- Modenesi, P.J., 2001, “Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas”, Brochure, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SpectroScan., 2015, “Relatórios de Inspeção N° 11162”, Inspection Report, Curitiba, Brazil, 11 p.
- Velázquez, S.M.G., 2000, “Cogeração de Energia no Setor de Papel e Celulose”, Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Vecchi, R.D., 2009, “Regulamentos Técnicos de Apoio para Atendimento à NR13”, Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Wainer, E., Brandi, S.D. and Mello, F.D., 1992, “Soldagem: Processos e Metalurgia”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 504 p.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

FAILURE ANALYSIS IN BOILER WELDED JOINT AS SOURCE OF DATA FOR RELIABILITY INSPECTIONS

Alexandre Y. Nakayama, nakayama@klabin.com.br¹

Márcio L. Martins, mlmartins@klabin.com.br¹

¹Klabin S.A., Fazenda Monte Alegre s/n, Telêmaco Broba - PR

Abstract. *Welding joints in high pressure boiler are critical items for operation reliability. Thus, when a weld failure occurs the causes must be detected and exploited so that similar events in other parts of the boiler can be prevented. The welded joints quantity in a boiler is high and the consequences of a failure can be catastrophic. In this paper, tests were performed in a welded joint that failed during boiler operation in order to detect the causes and extrapolate the conclusions of the analysis to other welds to prevent similar event occurrences.*

Keywords: *welding, inspection, non destructive testing, boiler.*