



DESAFIOS PARA FABRICAR AS MAIORES CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO DO MUNDO

TURBIVAP por Fábio Lima

1-INTRODUÇÃO

A produção de caldeiras é um processo de fabricação único. Os componentes da caldeira de recuperação, feitos de tubos, tubulações e barras de membrana, são fabricados em oficinas, transportados para o local e montados para serem finalmente operados como uma unidade.

A fabricação é parcialmente em série, se a fabricação dos componentes for vista como um trabalho detalhado. No entanto, a fabricação de caldeiras também pode ser classificada como produção individual.

As maiores caldeiras de recuperação têm suas próprias características típicas, não apenas as dimensões e o peso, mas também seus próprios critérios de projeto.

Portanto, as peças de pressão da caldeira de recuperação podem ser categorizadas como um produto soldado, não como uma máquina em relação à fabricação.

Essa abordagem oferece uma boa possibilidade de compreender o papel das tolerâncias e das contrações de soldagem relacionadas ao produto final. Basicamente, não há componentes "móvels" nas peças de pressão.

Os produtos soldados normalmente têm uma imagem de trabalho manual, pelo menos combinada com um tamanho grande e flexível. Embora o objetivo seja o processo de produção mecanizado ou automatizado, a soldagem no local é extremamente difícil de mudar de soldagem manual para um tipo mais produtivo.

O tamanho da caldeira de recuperação moderna aumentou, como mostrado na figura 1, e os fatores industriais são principalmente econômicos. Isso também se aplica à fabricação de caldeiras.

O próprio produto se desenvolveu. A demanda por pressão e temperatura mais altas leva ao

uso de materiais mais ligados e/ou ao aumento da espessura das paredes do componente final.

A fabricação está se tornando mais regulamentada. Isso resulta em instruções, procedimentos e especificações detalhados, bem como em mão de obra mais qualificada e treinada.

Os requisitos de fabricação e qualidade mudaram nas últimas décadas. A tecnologia de fabricação de caldeiras de recuperação é hoje regulamentada por dois códigos/normas principais: a Seção 1 da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) e a Norma Europeia EN 12952, principalmente as partes 5 e 6.

Essas normas fornecem instruções muito detalhadas sobre como produzir componentes de caldeiras. Além disso, caldeiras a serem construídas fora dos EUA e da Europa geralmente se baseiam nas normas mencionadas anteriormente.

Questões de saúde, segurança e meio ambiente na fabricação tornaram-se cada vez mais importantes.

Não apenas durante a fabricação de novas caldeiras, mas também durante o serviço dessas gigantes, uma série de requisitos devem ser atendidos.

O ambiente no local é claramente diferente de 60 anos atrás. Isso pode ser facilmente percebido ao observar as figuras 2 e 3.

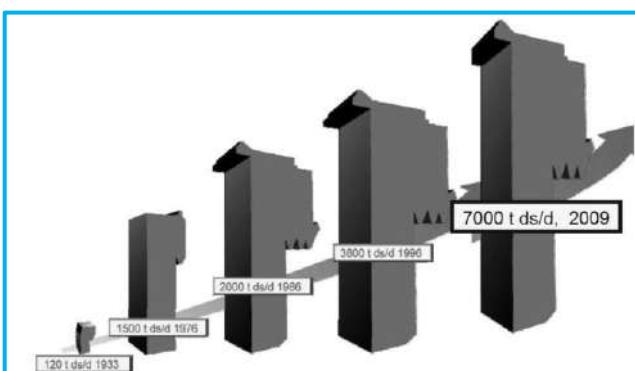


Figura 1: aumento relativo do tamanho e da capacidade das caldeiras de recuperação.

Comentários: Em 2017 entrou em operação no Brasil uma caldeira de recuperação para queimar 8.900 tss/d (as fired). Já em 2021 entrou em operação uma caldeira de recuperação com uma capacidade de queima de 14.000 tss/d (as fired).

Está previsto para entrar em operação em 2027, aqui mesmo no Brasil, uma caldeira de recuperação química com capacidade de queima de 15.000 tss/d (acredito que virgem).

Fica a pergunta, qual será o limite de queima de uma caldeira de recuperação?

Já sabemos que temos fabricantes com estudos para caldeiras de recuperação com capacidade para 20.000 tss/d.



Figura 2: as atitudes em relação às questões de segurança do trabalho mudaram, foto do local de montagem de uma caldeira, ano de 1951.

 RECEBA CONTEÚDO TÉCNICO NO WHATSAPP



Figura 3: caldeira de recuperação de 7.000 tss/d em construção, 2009.

2-TAMANHO E FABRICAÇÃO DA CALDEIRA (Dimensões e pesos)

As dimensões da caldeira naturalmente afetam a produtividade, além de representarem um desafio para a fabricação.

A redução de custos do produto favorece componentes, dimensões e pesos maiores. Uma das caldeiras de recuperação gigantes de 7.000 tss/dia que foi construída em 2009 possui as seguintes dimensões: o piso da fornalha mede 16,5 x 18,0 m e a altura da fornalha é de cerca de 66 m.

O comprimento total da tubulação da parte de pressão é superior a 460.000 metros. O peso elevado também afeta a forma como está caldeira é fabricada.

O peso total das peças de pressão da caldeira de recuperação gigante é de cerca de 5.200 toneladas e a carga total suspensa na operação atinge 11.000 toneladas.

3-MANUSEIO E TRANSPORTE

O manuseio de material base, como tubos muito longos, pode ser difícil devido à flexibilidade.

O comprimento dos tubos dos economizadores é superior a 24 m. Portanto, até mesmo o transporte da fábrica de tubos para a oficina de fabricação de componentes é desafiador e, portanto, tubos com soldas de topo são aceitos atualmente.

Os tubos dos economizadores são soldados por aletas e as soldas de topo precisam ser retificadas.



Figura 4: fexes de tubos economizadores conforme recebidos na oficina de fabricação de caldeiras.



ACESSE OUTROS CONTEÚDOS



Dá-se atenção especial à elevação no local. Os componentes de grande porte da caldeira de recuperação, como o superaquecedor e os elementos

economizadores, são muito flexíveis e a flambagem dos componentes durante a elevação é evitada com o uso de estruturas de elevação especiais, vários pontos de elevação ou pelo menos dois guindastes.

A capacidade de elevação da oficina pode limitar o peso dos componentes a serem manuseados como uma única peça. Além disso, o transporte rodoviário da oficina para o local deve ser bem planejado.

O peso frequentemente causa problemas no local devido à necessidade de guindastes com maior capacidade de elevação. Estes costumam ser muito mais caros.

Os tambores de vapor para as caldeiras de recuperação de grande porte ainda são fabricados na oficina. Apenas alguns fabricantes internacionais conseguem produzir tambores com grande diâmetro externo e espessura de parede superior a 100 mm.



Figura 5: tambor de vapor de 20 m de comprimento e 132 toneladas a caminho do local para a caldeira de recuperação química de 6.000 tss/dia.

Os procedimentos de fabricação do tambor são mais detalhados e os parâmetros de fabricação permitidos têm uma variação muito estreita. O transporte e a elevação do tambor exigem guindastes e veículos extremamente pesados.

4-DETALHES DOS COMPONENTES

A soldagem está sempre relacionada ao tipo de junta, embora a tendência seja para conjuntos de componentes maiores.

A fabricação de caldeiras de recuperação, sejam elas pequenas ou grandes, possui três tipos principais de juntas: soldas de topo, soldas de bico e soldas de barra de membrana a filete de tubo, conforme mostrado na Figura 6.

O soldador deve lidar com todos esses tipos de juntas. A principal diferença é a localização da junta em uma caldeira de recuperação grande. É crucial ter soldadores que não tenham medo de altura.

A curvatura de tubos é semelhante em caldeiras de recuperação pequenas e grandes.

Como mais vapor é produzido em caldeiras de recuperação grandes, diâmetros externos de tubos maiores devem ser usados.



Isso significa espessuras de parede mais grossas e/ou materiais mais resistentes e, portanto, a necessidade de máquinas de curvatura mais pesadas.

O aquecimento do tubo ou cano pode ser usado para reduzir as forças necessárias durante a curvatura.

O aquecimento por indução é normalmente usado para tubos de grande diâmetro externo.

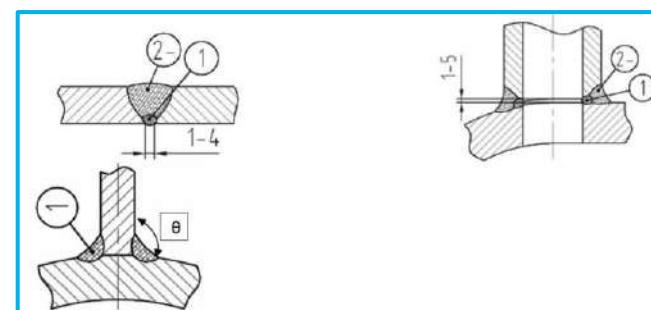


Figura 6: três tipos principais de juntas: solda de topo, solda de bico (junta em t) e solda de filete.



5-INFLUÊNCIA DO DESIGN DO PRODUTO

5.1-CLASSES DE MATERIAIS

Tubos compostos foram utilizados pela primeira vez na fornalha inferior da caldeira de recuperação em 1971.

A camada externa era de qualidade padrão AISI 304. O aço inoxidável requer um ambiente de trabalho mais limpo, especialmente durante a soldagem.

A contaminação do aço carbono deve ser evitada a todo custo.

No final da década de 80, ligas especiais à base de níquel, como as camadas externas de tubos compostos 825 e 625, foram introduzidas na parte inferior da fornalha.

O nível de impurezas na área da junta soldada deve ser minimizado na oficina ou no local.

Motores elétricos especialmente projetados devem ser utilizados perto da área de limpeza para evitar explosões caso solventes como acetona sejam utilizados.

Uma parede de membrana para uma caldeira de recuperação de grande porte pode ter mais de 200 tubos e 400 soldas de filete duplo.

As tolerâncias dos tubos e as contrações de soldagem afetam as dimensões finais da parede. Métodos especiais devem ser utilizados para atingir o tamanho adequado da parede.

Além disso, diferentes tipos de tubos compostos e membranas apresentam diferentes coeficientes de expansão térmica e contrações.

A necessidade de uma classe específica depende da temperatura, do ambiente, dos padrões do cliente e do fabricante.

Quase todos as fornalhas de caldeira possuem sua própria combinação de materiais. Portanto, a experiência é fundamental para obter as dimensões corretas.

5.2-PROJETO

Não há espaços extras em uma caldeira de recuperação enorme. A tendência é para um design muito compacto. A ordem de fabricação e montagem é bem planejada, como mostrado na figura 7.



Figura 7: o layout compacto é um dos principais fatores que afetam a ordem de montagem.

5.3-FADIGA

Tubos longos, embora conectados entre si, são extremamente flexíveis. A fadiga mecânica é um dos critérios essenciais de projeto mecânico.

O risco de falha por fadiga pode ser reduzido por contornos de solda mais suaves ao material de base. A vida útil em fadiga pode ser aumentada se o ângulo θ mostrado na Figura 6 for maior. Isso significa soldadores habilidosos ou retificação adicional mais dispendiosa.

CONHEÇA
NOSSOS CURSOS



5.4-FLUÊNCIA

As temperaturas mais altas do material ocorrem na faixa de fluência em grandes caldeiras de recuperação. As cargas de fluência se originam da pressão interna, bem como da carga mecânica externa.

O uso de aços de alta liga resistentes à fluência leva a tratamentos térmicos de pré-aquecimento e pós-soldagem com procedimentos exatamente especificados. Os parâmetros de soldagem e os consumíveis de soldagem são selecionados para atender aos requisitos de fluência.

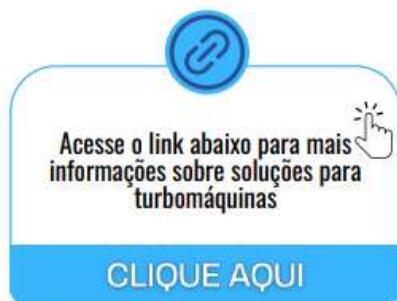


5.5-CORROSÃO

A possível corrosão da superfície de aquecimento também afeta a fabricação. A temperatura entre passos de solda é limitada para aços inoxidáveis, e o resfriamento até o nível adequado leva a tempos de espera.

A corrosão pode ser reduzida na área do superaquecedor pela seleção adequada dos consumíveis de soldagem, bem como pelo aporte térmico correto durante a soldagem.

A contaminação dos aços inoxidáveis pelo aço carbono deve ser evitada no produto final. É difícil, ou pelo menos improdutivo, proteger grandes áreas contra poeira ou faíscas de aço carbono.



5.6-FABRICAÇÃO EM OFICIAL OU LOCAL

Componentes maiores exigem áreas maiores para serem fabricados na oficina. Os requisitos de design do produto refletem o tamanho da oficina e vice-versa.

As dimensões do espaço da oficina fornecem diretrizes para o processo e o projeto mecânico. A mudança na área de trabalho é drástica, como pode ser visto na figura 8.

As oficinas hoje se parecem muito com os escritórios de antigamente, e há espaço suficiente reservado para a produção dos componentes grandes.



Figura 8: oficinas de Tampella provavelmente de 1940 e 1970.

5.7-PRÉ-TRATAMENTOS

Tubos ferríticos são normalmente jateados com grade para remover a camada de óxido e as impurezas. Isso é feito para aumentar a produtividade da soldagem e elevar o nível de qualidade.

5.8-USINAGEM

A perfuração de furos e a fabricação de ranhuras exigem unidades de usinagem maiores e mais pesadas para componentes de caldeiras de recuperação de grande porte.

A exigência de precisão também aumenta devido ao comprimento dos componentes, bem como à possibilidade de soldagem mecanizada.

5.9-TRATAMENTOS TÉRMICOS DE PRÉ-AQUECIMENTO E PÓS-SOLDAGEM (TTPP)

O pré-aquecimento é realizado antes da soldagem e é localizado, apenas próximo às juntas soldadas.

A diferença entre pequenas e grandes recuperações do controle de temperatura de pré-aquecimento advém das espessuras de parede e dos tipos de material utilizados. O tratamento térmico pós-soldagem é mais desafiador. Os tamanhos das fornalhas limitam a execução do TTPP como um único componente.

A solução para isso é realizar o TTPP em várias etapas ou localmente. A sobreposição da área do TTPP é necessária se o componente for tratado termicamente em etapas. A sobreposição da área significa tempos de tratamento térmico mais longos para a área exposta.

O limite dos parâmetros de tratamento térmico onde operar é estreito e resulta em processos de controle mais sofisticados relacionados à soma do tempo e da temperatura fornecida à peça de trabalho.

5.10-COFORMAÇÃO

A conformação consiste principalmente em dobramento, sendo também necessária a redução do tamanho dos tubos. Naturalmente, a conformação de chapas concentra-se no tambor, coletores e casco.

Componentes maiores, juntamente com materiais de alta resistência, necessitam de equipamentos mais potentes para realizar a conformação, e ainda mais a conformação a quente.

O controle da temperatura durante a conformação a quente de materiais mais espessos exige medições de temperatura sofisticadas, além de habilidade. Um dos principais fatores na conformação é a razão entre o raio de curvatura (R) dividido pelo diâmetro externo (D).

Menor R/D é necessário para compactar o superaquecedor em um espaço menor. Isso significa dobramento a quente ou a frio, com parâmetros de dobramento mais detalhados e especificados.

Mais conhecimento relacionado aos parâmetros de dobramento, como forças de compressão durante a conformação, é frequentemente necessário para realizar a dobra do superaquecedor, especialmente usando tubos compostos e tubos de aço inoxidável sólido.



5.11-SOLDAGEM

A quantidade de soldagem aumenta drasticamente na fabricação de caldeiras de recuperação gigantes. Portanto, a tendência é a mecanização e a produção automatizada, a fim de manter os custos de produção baixos.

Os economizadores podem ter cerca de 350 km de comprimento entre o tubo e a aleta, e o comprimento da solda de filete composta na fornalha pode ser de aproximadamente 100 km.

Os desafios para mecanizar ou automatizar o processo de fabricação são as dimensões dos componentes, as tolerâncias do material do tubo base e as contrações de soldagem.

As juntas de solda não podem ser localizadas antes e durante o processo de fabricação com precisão suficiente para posicionar a tocha de soldagem exatamente na posição correta.

A mecanização da soldagem no local é ainda mais desafiadora, não apenas porque o trabalho é realizado em níveis elevados. É necessária uma enorme quantidade de andaimes e a proteção contra os efeitos do vento e da chuva.

As raízes das soldas são soldadas com o processo de soldagem TIG, que requer gás de proteção.

O gás de raiz também é necessário para materiais altamente ligados e uma boa blindagem para a área da raiz é difícil de ser alcançada devido às longas distâncias do local aberto e da área da raiz da junta de soldagem.

5.12-MÃO DE OBRA

Soldadores são qualificados há 40 anos na fabricação de caldeiras. É importante que soldadores que fabricam caldeiras de recuperação de grande porte entendam os procedimentos.

As informações sobre métodos, parâmetros e regras de fabricação estão disponíveis nesses documentos. Todas essas caldeiras de recuperação gigantes modernas estão localizadas fora da Escandinávia.

Naturalmente, trabalhadores qualificados podem ser encontrados na Ásia, especialmente na América do Sul.

A transferência dos requisitos de fabricação também exige supervisores de fabricação muito experientes. Não basta transferir informações técnicas e de qualidade, mas também compreender a cultura e o método de trabalho locais.

5.13-QUALIDADE

Os requisitos básicos de qualidade provêm dos códigos e normas utilizados. Além disso, os fabricantes possuem suas próprias regras baseadas em seus projetos e os clientes possuem padrões de fábrica.

Para garantir que o trabalho seja realizado de acordo com o contrato e as normas, são utilizados inspetores autorizados, inspetores terceirizados do lado do cliente e, naturalmente, o próprio pessoal do fabricante.

Para fabricar caldeiras de recuperação de grande porte, o fabricante deve possuir um sistema de garantia da qualidade, que será continuamente revisado e verificado nas auditorias.

Os mesmos métodos de inspeção são utilizados para caldeiras de recuperação de pequeno e grande porte, apenas com uma quantidade maior de isótopos em vez da inspeção por raios X.

A rastreabilidade das soldas é muito comum nas juntas de caldeiras de recuperação: quais procedimentos de fabricação foram utilizados, registros de como a fabricação foi realizada e quem realizou o trabalho, sem desconsiderar a rastreabilidade do material.

Relatórios de não conformidade são utilizados como ferramenta para registrar componentes ou suas peças caso não atendam a todos os requisitos estabelecidos antes do início da fabricação.

6-CONCLUSÃO

A principal diferença entre a fabricação de caldeiras de recuperação de grande porte e as de pequeno porte reside basicamente na dimensão e no peso dos componentes.

Isso significa mais desafios durante o transporte dos componentes da oficina até o local. O içamento dos componentes deve ser planejado com mais detalhes.

O design do produto, a maior vazão de vapor e os parâmetros de vapor mais elevados levaram à

produção de materiais mais espessos, bem como ao uso de materiais mais ligados.

A fabricação deve levar em consideração a flexibilidade do projeto mecânico e finalizar as soldas com contornos suaves para evitar fadiga. Soldador de caldeiras de recuperação de grande porte no local será uma das últimas profissões manuais, embora a produtividade e, portanto, a mecanização e a produção automatizada sejam o objetivo.

A fabricação não é o fator limitante para a produção de caldeiras de recuperação ainda maiores, mas a produtividade pode diminuir.

A qualidade da fabricação foi aprimorada, resultando em uma operação mais confiável.

As caldeiras de recuperação de grande porte foram pioneiras nos requisitos de qualidade e, se caldeiras de recuperação de pequeno porte forem fabricadas no futuro, adotarão os mesmos padrões e requisitos das caldeiras de recuperação de grande porte atuais, mesmo que esse detalhe não seja necessário.

*Esse artigo é a tradução com comentários do artigo original **Challenges to manufacture world's largest recovery boiler**, escrito por Kari Makela, da Metso Power.*

7-SOBRE O AUTOR

LinkedIn

Fábio Henrique Lucas da Costa
[Ver perfil](#)

Coordenador de Recuperação Química e Utilidades

fabiocosta@turbivap.com.br

Nota: As opiniões e informações contidas nesta publicação, não refletem necessariamente a opinião da TURBIVAP.

