

AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE E LIMPEZA QUÍMICA DOS SUPERAQUECEDORES DA CALDEIRA DA ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

*Adilson Campo Ferrarini²
Deyson Marcelo Rothen³
Eduardo Luiz Sales Marinho⁴*

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de apresentar a avaliação de integridade realizada em caldeira de Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão para determinação da vida útil residual bem como as implementações das ações recomendadas pela mesma. Para a realização do estudo foram removidas amostras dos principais componentes da caldeira nos quais foram aplicadas técnicas modernas para análise dos mecanismos de danos atuantes. Os principais ensaios aplicados foram análise metalográfica, medição da camada interna de óxidos, tração e fluência acelerada, permitindo estimar a vida útil remanescente do equipamento. As ações recomendadas foram implementadas, sendo a principal delas a limpeza química no superaquecedor secundário. A sua realização permitiu aumentar em um ano a estimativa de vida do componente mais crítico da caldeira.

Palavras-chave: Caldeira; Avaliação de integridade; Vida útil; Ensaios mecânicos; Limpeza química.

GLOBAL INTEGRITY ASSESSMENT AND CHEMICAL CLEANING OF THE SUPERHEATERS OF A BOILER AT ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

Abstract

This paper aims to present the global integrity assessment conducted in a Power Plant Boiler at ArcelorMittal Tubarão in order to determine the estimated remaining life as well as the implementation of recommended actions. Samples were removed from the main boiler components followed by the damage mechanisms characterization. Applied techniques include metallographic analysis, inner oxide scale measurement, tensile and accelerated creep tests, all helpful for the estimated remaining life calculation. The recommended actions were implemented, markedly the chemical cleaning of the superheaters. As a result the remaining life estimation was increased in one year.

Key words: Boiler; Integrity assessment; Remaining life; Mechanical tests; Chemical cleaning.

¹ *Contribuição técnica ao 29º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades,, 13 a 15 de agosto de 2008, Porto Seguro, BA*

² *Especialista de Manutenção Mecânica de Utilidades – ArcelorMittal Tubarão.*

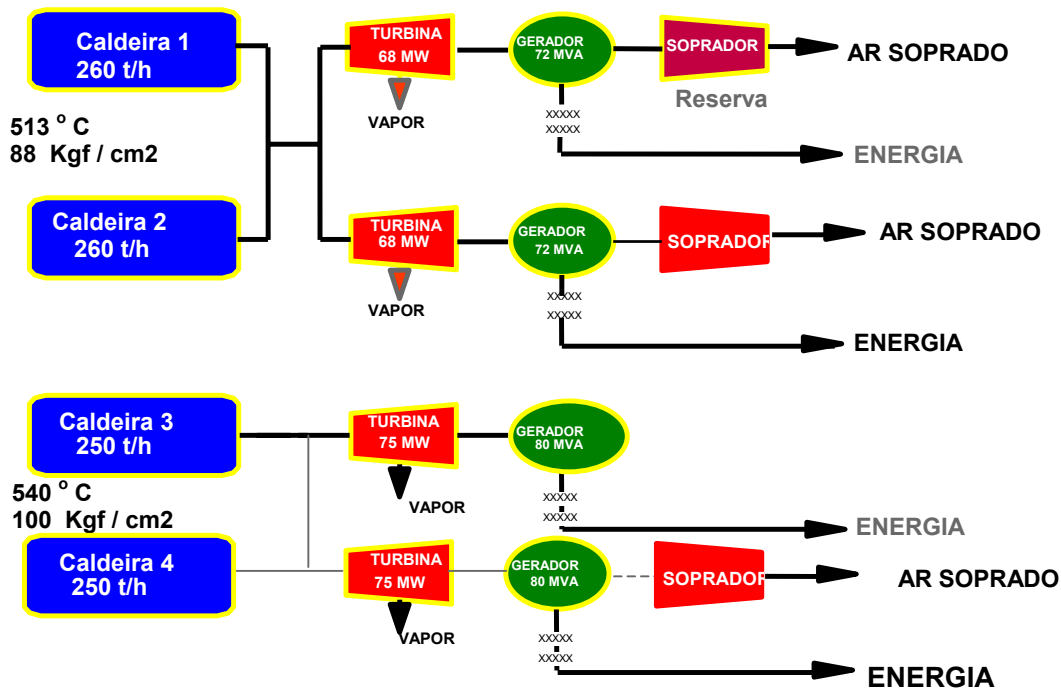
³ *Especialista em Engenharia Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

⁴ *Supervisor de Predição e Inspeção Mecânica – ArcelorMittal Tubarão.*

1 INTRODUÇÃO

A ArcelorMittal Tubarão é auto sustentável na geração de energia elétrica, o sistema de geração cuja principal função é a partir dos vapores gerados pelas caldeiras produzir ar soprado para os três alto fornos, produção de energia e vapor de processo para a usina.

O sistema de geração possui 4 caldeiras, conforme mostrado na figura abaixo, as caldeiras 1 e 2 tiveram seu start-up em 1993 em conjunto com o início de operação da usina, a unidade 3 teve o start-up em 1998 e a unidade 4 em 2004. Em 2003 após 20 de anos de operação das caldeiras 1 e 2 foi iniciado o processo de avaliação de integridade física, o objetivo principal desse trabalho é apresentar o histórico e resultados dessas avaliações e também apresentar de forma detalhada a limpeza química realizada nos super aquecedores secundários das caldeiras, que foi a principal recomendação do estudo, permitindo prolongar em mais um ano a vida útil dos tubos dos super aquecedores, que é um dos principais componentes das caldeiras.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 1. Sistema de geração de energia da ArcelorMittal Tubarão

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Especificação Técnica

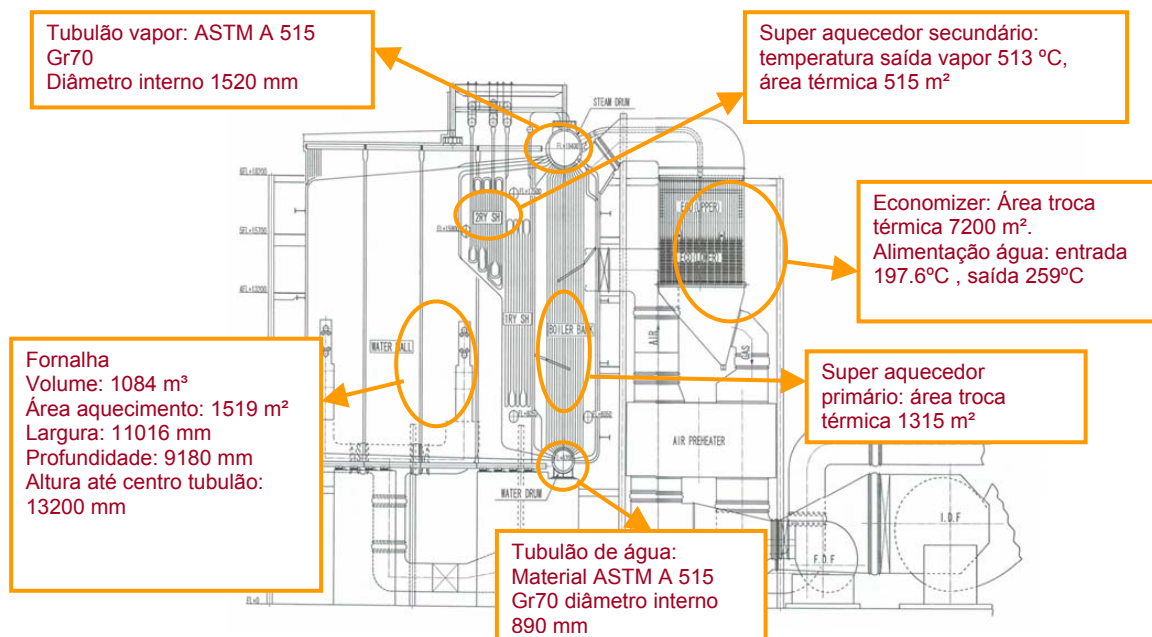
2.1.1 Caldeiras 1 e 2

Quadro 1. Características técnicas das caldeiras

Tipo	Aquotubular, circulação natural com dois tubulões
Fabricante / modelo / ano	MHI (Mitsubishi Heavy Industries) / VU-60 / 1981
Início de operação	August/1983
Maximum continuous rating (MCR)	250 t/h
Range	25% to 100% MCR
Pressão projeto	98 kgf/cm ²
Pressão e temperatura de operação	88 kgf/cm ² / 513°C
Temperatura água de alimentação	197.6 °C
Área aquecimento	3200 m ²
Queimadores	Tangencial
Combustível	Gás de alto forno (BFG), Gás de coqueria (COG) e Alcatrão

Fonte: Manual caldeira ArcelorMittal Tubarão

2.1.2 Vista geral da caldeira



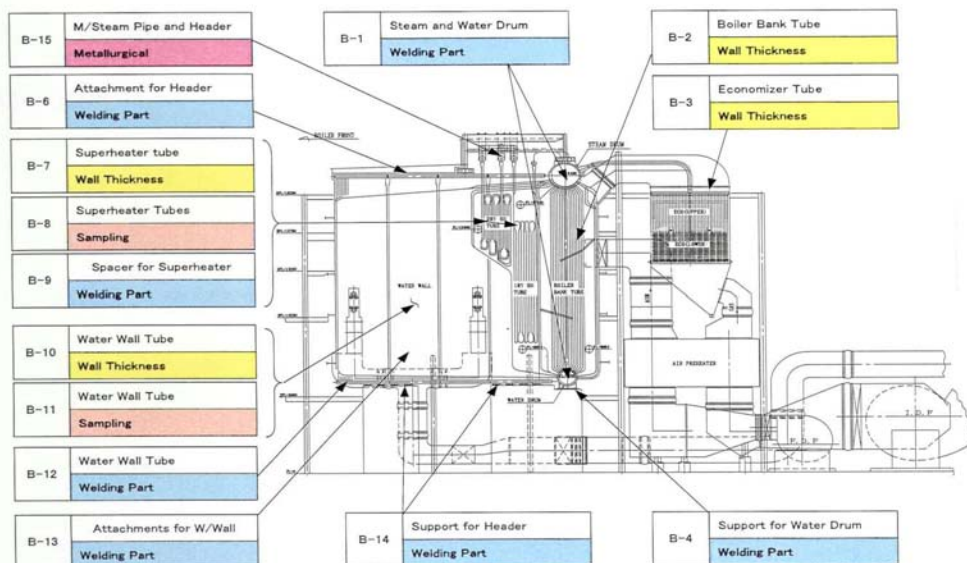
Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 2. Vista geral da caldeira e seus principais componentes

3 HISTÓRICO DAS AVALIAÇÕES

3.1 Avaliação Realizada em 2003

Após 20 de operação foi realizada em abril de 2003 pela empresa MHI (Mitsubishi Heavy Industries), fabricante da caldeira, uma avaliação de integridade baseada no método MLAS (Mitsubishi Metallurgical Life Assessment System), que contempla análise metalúrgica, medição de espessura e ensaios das partes soldadas. O escopo da avaliação de integridade realizada pela MHI pode ser observado na Figura 3.



Fonte: relatório de avaliação de integridade da MHI

Figura 3. Escopo da avaliação de integridade realizada pela MHI em 2003

Foi realizado análise metalúrgica na tubulação principal de vapor, nos tubos e coletores de entrada e saída dos super aquecedores primário e secundário, para análise mais detalhada foram removidas amostras de tubos dos super aquecedores primário e secundário.

Realizado medição de espessura dos tubos da fornalha, super aquecedor primário e secundário, economizador e bank.

Pelos parâmetros utilizados pela MHI, o resultado do estudo foi:

Caldeira 1 – O itens mais críticos foram o coletor de saída e tubos do super aquecedor secundário com vida remanescente de 44.000 horas (5 anos).

Caldeira 2 - O itens mais críticos foram o coletor de saída e tubos do super aquecedor secundário com vida remanescente de 41.000 horas (4 anos e 8 meses).

Recomendação:

- Realizar nova avaliação após 22.000 horas (2,5 anos) de operação a partir dessa avaliação;
- Ampliar remoção de amostra para melhor avaliação.

3.2 Avaliação Realizada em 2005

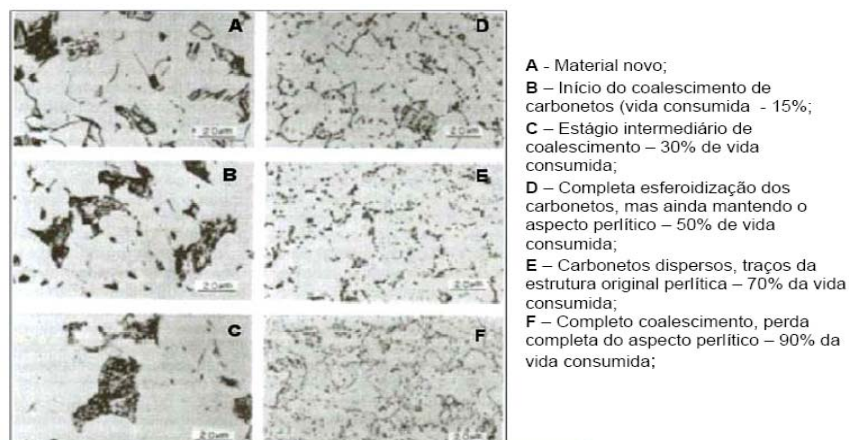
Em outubro de 2005 após 2,5 anos da última avaliação, seguindo a recomendação do fabricante e em conjunto com a inspeção periódica de NR-13 foi realizado uma avaliação de integridade parcial da caldeira 1, parcial porque devido ao curto tempo da parada não foi removido amostras de tubos.

A avaliação foi realizada pela empresa Sofles Engenharia adotando a seguinte metodologia:

- Replica metalográfica;
- Medição da camada de óxido no super aquecedor secundário, através ultra som;
- Medição de espessura geral nos tubos, através de ultra son;
- Medição no campo da dureza dos tubos da caldeira.

Por definição da ArcelorMittal Tubarão, essa avaliação foi realizada somente na caldeira 1, devido aos resultados semelhantes das caldeiras 1 e 2 na última avaliação e também devido a semelhança das condições operacionais.

Essa avaliação foi baseada principalmente na análise metalográfica dos principais componentes da caldeira, utilizando o parâmetro internacional de avaliação microestrutural de Toft e Marsden para aços Cr-Mo, que é explicado na figura abaixo.



A - Material novo;
 B - Início do coalescimento de carbonetos (vida consumida - 15%);
 C - Estágio intermediário de coalescimento - 30% de vida consumida;
 D - Completa esferoidização dos carbonetos, mas ainda mantendo o aspecto perlítico - 50% de vida consumida;
 E - Carbonetos dispersos, traços da estrutura original perlítica - 70% da vida consumida;
 F - Completo coalescimento, perda completa do aspecto perlítico - 90% da vida consumida;

Padronização microestrutural de Toft e Marsden

Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 4. Avaliação micro estrutural de Toft e Marsden para aço Cr-Mo

3.2.1 Resultados

Quadro 2. Resultado avaliação integridade de 2005

Componente	Conclusão
Fornalha	Estágio “B”, vida consumida: 15%
Super aquecedor Primario	Estágio “C”, vida consumida: 30%
Super aquecedor Secundário	Estágio “D/E” + camada de óxido + análise espessura tubos: 4 anos de vida residual
Coletor de saída do Super aquecedor Secundário	“E” stage: replacement needed when performed next shutdown
Coletor de entrada do Super aquecedor Secundário	Estágio “B”, vida consumida: 15%

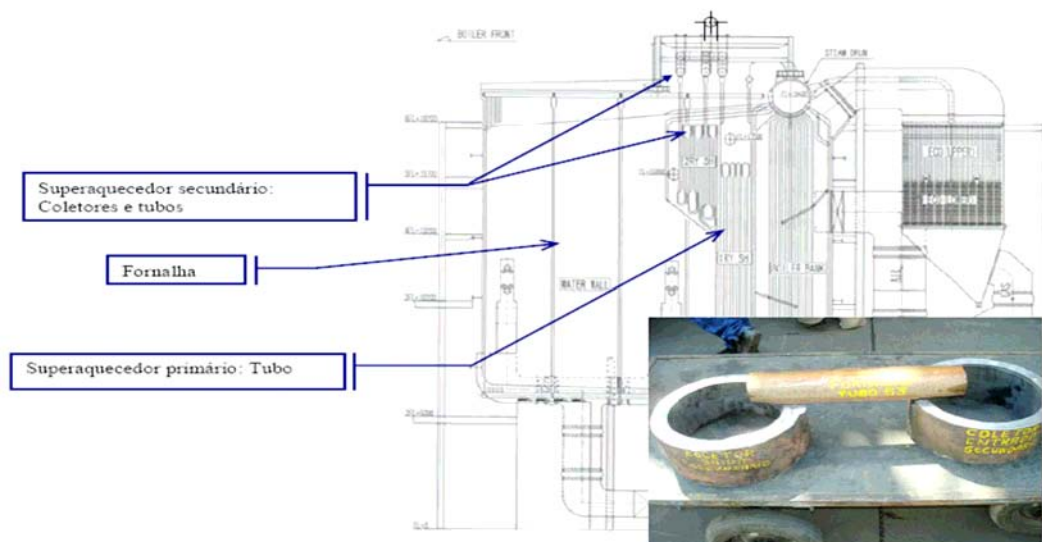
Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

O resultado da avaliação comprovou o resultado da avaliação realizada em 2003, mostrando que os itens críticos das caldeiras são os tubos e o coletor de saída do super aquecedor secundário.

Recomendação: Remoção de amostra para avaliação mais detalhada.

3.3 Avaliação Realizada em 2006

Em abril de 2006 foi realizada avaliação de integridade completa da caldeira 1, com remoção de amostra conforme a Figura 4.



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 5. Mapa de amostras removidas na avaliação de 2006

A avaliação foi realizada pela empresa Sofles Engenharia adotando a seguinte metodologia:

- Análise metalográfica (parâmetro Tofd-Marsden);
- Medição direta da camada de óxido das amostras removidas;
- Teste de tensão;
- Teste acelerado de fluência (parâmetro Larson-Miller)
- Medição de espessura geral nos tubos, através de ultra son;
- Ensaio de Iris nos tubos do bank;
- Réplica metalográfica e ensaio de emissão acústica na tubulação de vapor principal.

Ensaio de Tração - avaliar as propriedades mecânicas dos diferentes componentes após a permanência em serviço. Os valores obtidos nestes ensaios serão comparados com os valores mínimos especificados para os diferentes materiais.

Análise Metalográfica - observação direta da evolução microestrutural e acúmulo de danos que está diretamente associado com a vida remanescente do componente.

Espessura de Camada de óxido Interna - Ultra-som e por metalografia direta. Os resultados serão utilizados para validar a técnica não destrutiva e para a avaliação da temperatura real de serviço destes tubos (dados que serão utilizados diretamente na avaliação da vida remanescente).

Ensaio Acelerado de Fluência - utilizado para avaliação da vida remanescente através da metodologia de LARSON – MILLER, que considera como base a relação $L = T (C + \log tr)$ onde:

C - constante dependente do material;

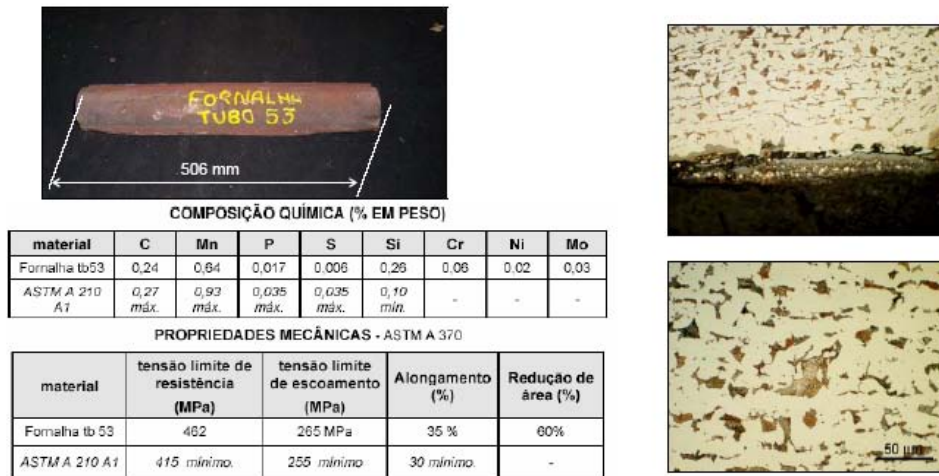
L - constante dependente da tensão aplicada - parâmetro de LARSON – MILLER;

tr – tempo de ruptura;

T - temperatura.

3.3.1 Resultados dos ensaios realizados

- **Fornalha**



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 6. Resultado da avaliação do tubo da fornalha

Estágio inicial de acúmulo (Classificação B - Toft e Marsden) de danos em função do serviço em alta temperatura, não existindo qualquer característica metalúrgica que possa comprometer a operação segura do equipamento. Encontrado depósito de Cobre na superfície interna.

- **Coletor de entrada do super aquecedor secundário**

Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

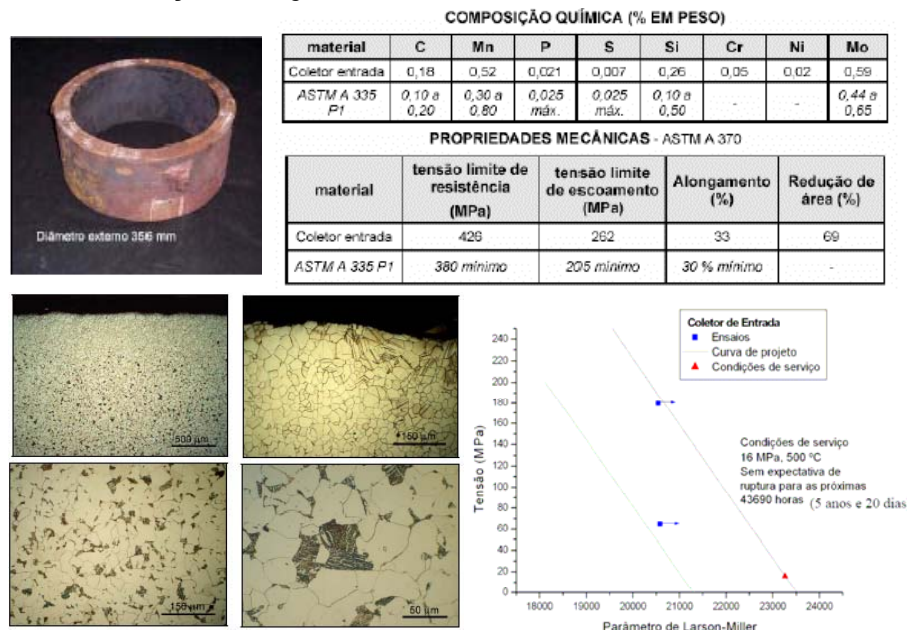


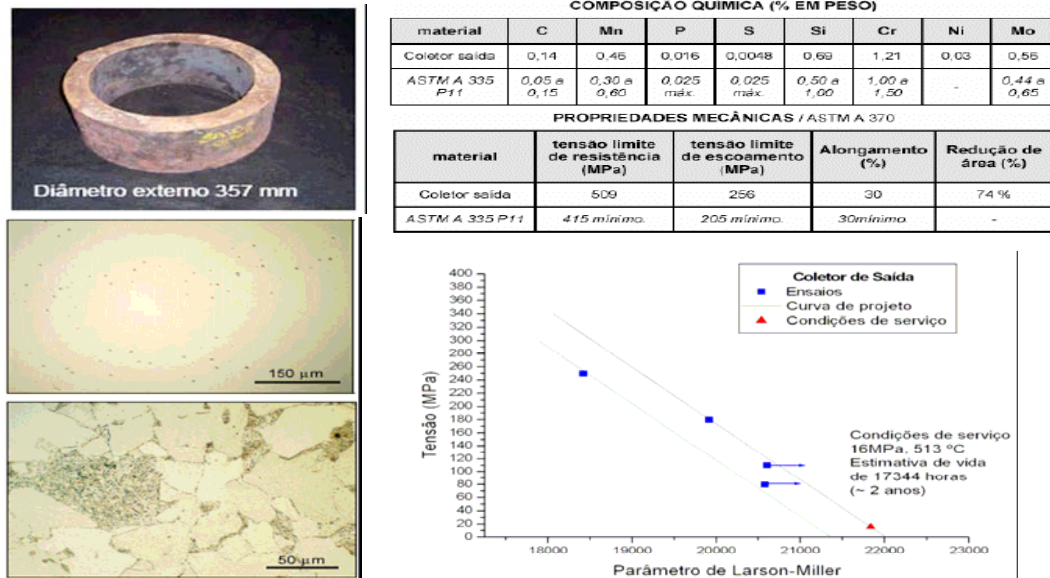
Figura 7. Resultado da avaliação da amostra do coletor de entrada

Sem perda de resistência mecânica do material, as propriedades obtidas no ensaio de tração são superiores ao mínimo especificado.

O coletor apresenta-se em estágio inicial de evolução microestrutural e apresenta (compatível com o estágio B) danos superficiais que não comprometem a sua performance em serviço.

Quanto às características metalúrgicas este componente ainda pode operar com segurança.

- **Coletor de saída do super aquecedor secundário**



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

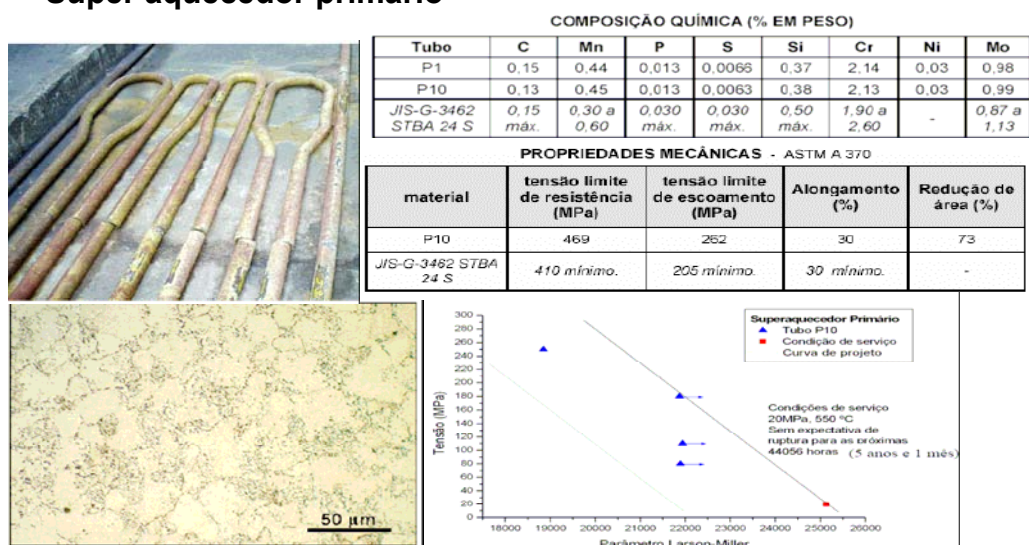
Figura 8. Resultado da avaliação da amostra do coletor de saída

O coletor apresenta-se em estágio avançado de evolução microestrutural (compatível com o estágio E) e apresenta danos que podem comprometer a sua performance em serviço.

Não apresenta perda de resistência mecânica, as propriedades obtidas no ensaio de tração são superiores ao mínimo especificado, sugerindo que em serviço além do coalescimento da microestrutura tenha ocorrido precipitações secundárias que estão aumentando a resistência mecânica.

Os ensaios acelerados de fluência indicaram uma vida remanescente de 2 anos (17.344 horas).

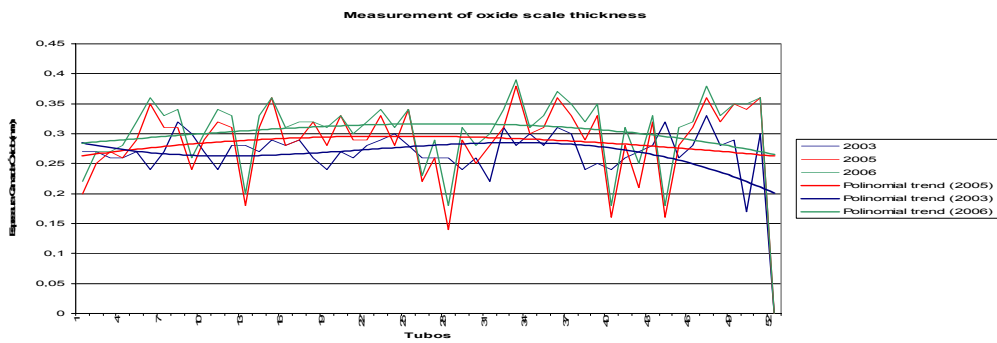
- **Super aquecedor primário**



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

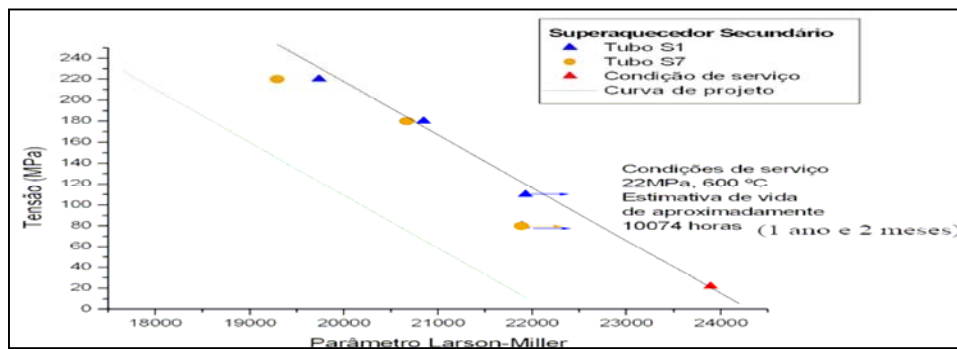
Figura 9. Resultado da avaliação da amostra do super aquecedor primário
 O tubo não apresenta perda de resistência mecânica. O tubo apresenta microestrutura composta de ferrita + carbonetos com aspecto que indica estágio avançado de degradação em função do serviço em alta temperatura (estágio D-E). Estas características associadas aos resultados dos ensaios de fluência indicam vida remanescente de 5 anos e 1 mês (44.056 horas).

- **Super aquecedor secundário**



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 10. Medição da camada de óxido no super aquecedor secundário



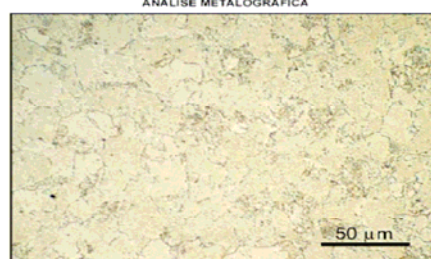
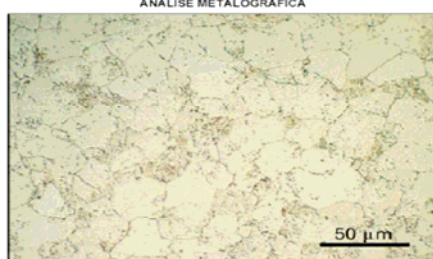
Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 11. Resultado do ensaio acelerado de fluência super aquecedor secundário

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM PESO)

material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
S1	0,18	0,44	0,013	0,0065	0,39	2,15	0,03	0,97
S2	0,14	0,45	0,012	0,0058	0,39	2,14	0,03	0,97
S4-A	0,19	0,45	0,014	0,0054	0,36	2,19	0,02	0,99
S5	0,14	0,43	0,014	0,0054	0,35	2,19	0,02	0,97
S7	0,19	0,44	0,012	0,0062	0,39	2,15	0,03	0,98
S8	0,17	0,44	0,014	0,0051	0,35	2,18	0,02	0,98
S9	0,17	0,45	0,012	0,0062	0,39	2,15	0,03	0,99
JIS-G-3462 STBA 24	0,15 máx.	0,30 a 0,60	0,030 máx.	0,030 máx.	0,50 máx.	1,90 a 2,60	-	0,87 a 1,13

PROPRIEDADES MECÂNICAS - ASTM A 370					PROPRIEDADES MECÂNICAS - ASTM A 370				
material	tensão limite de resistência (MPa)	tensão limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	material	tensão limite de resistência (MPa)	tensão limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
S1	493	294	24	71 %	S7	455	285	29	72
JIS-G-3462-STBA 24	410 mínimo	205 mínimo	30 mínimo	-	JIS-G-3462-STBA 24	410 mínimo	205 mínimo	30 mínimo	-



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 12. Resultado da avaliação da amostra do super aquecedor secundário

Os tubos não apresentam perda de resistência mecânica.

Os tubos apresentam microestrutura composta de ferrita + carbonetos com aspecto que indica estágio avançado de degradação em função do serviço em alta temperatura (estágio D-E). Apresenta uma evolução da camada de óxido.

Estas características associadas aos ensaios de fluência indicam uma vida remanescente de aproximadamente 1 ano e 2 meses (10.074 horas) caso a temperatura de serviço se mantenha em torno de 600°C (manutenção da camada de óxido).

• **Resumo da avaliação**

Quadro 3. Resultado global da avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

RESUMO			
Componentes	Metalografia	Ensaio Acelerado de Fluência	Vida Remanescente
Câmara de Combustão	Classificação Estágio B	-	15% da Vida* Consumida
Superaquecedor Primário	Classificação Estágio C	Condições de Serviço - 22 Mpa - 513 °C	5 anos
Superaquecedor Secundário	Classificação Estágio D/E	Condições de Serviço - 22 Mpa - 600 °C	1 ano e 2 meses
Coletor de Saída do Secundário	Classificação Estágio E	Condições de Serviço - 16 Mpa - 513 °C	2 anos
Coletor de Entrada Secundário	Classificação Estágio B	Condições de Serviço - 16 Mpa - 500 °C	5 anos e 20 dias
Tubulação de Vapor	Classificação Estágio D/E	-	70% da Vida* Consumida

* De acordo com a padronização microestrutural de Toft e Marsden

Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

- **Recomendação**

- Redução da temperatura de saída do vapor de 513 °C para 500 °C, com objetivo de aumentar a vida útil no coletor de saída do super aquecedor secundário;
- Limpeza química nos tubos dos super aquecedor secundário, com objetivo de remover a camada de óxido que atua como elemento térmico, elevando a temperatura de pele dos tubos;
- Instalação de termopares dos tubos dos super aquecedores secundário para medição real da temperatura;
- Remoção de amostra da tubulação e vapor principal para avaliação detalhada.

4 IMPLEMENTAÇÕES DAS RECOMENDAÇÕES

4.1 Redução da Temperatura do Vapor

Seguindo orientação e em consenso com o fabricante a temperatura do vapor de saída foi reduzida sem nenhuma perda ou dano para o sistema.

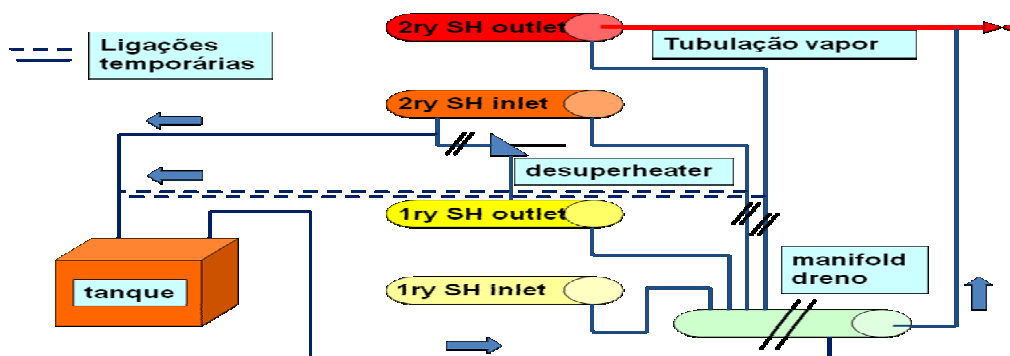


Fonte: Sistema de controle da caldeira da ArcelorMittal Tubarão

Figura 13. Tela do sistema e controle de temperatura da caldeira

4.2 Limpeza Química Super Aquecedor Secundário

Para a realização da limpeza química somente nos tubos e coletores do super aquecedor secundário foram realizadas ligações temporárias conforme figura abaixo. A injeção dos produtos químicos foi realizada através do corte no manifold de dreno e utilizando tubulação de dreno da tubulação principal de vapor, para impedir a circulação dos produtos no demais componentes da caldeira foi bloqueio no desuper, que é a tubulação que conecta o super aquecedor secundário ao primário.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 14. Esquema ligações temporárias para limpeza química

O processo de limpeza química foi realizado por uma empresa especializada com experiência comprovada nesta área, a solução ácida utilizada foi à base de ácido clorídrico, inibida com solução à base de aminas e imidas cíclicas e alifáticas.

As fases da limpeza química foram:

- 1 - Primeira Fase Ácida - %H+ inicial 7,5% com inibidor, temperatura ambiente;
- 2 - Segunda Fase Ácida - %H+ inicial 7,5 % com inibidor, Temperatura ambiente;
- 3 - Complexação - Solução ácida orgânica à base de ácido cítrico 0,5% por 1 hora;
4. Neutralização - Solução alcalina à base de carbonato de sódio, 5000 ppm por 1 hora;
5. Passivação - Solução alcalina oxidante, pH 8,5, à base de nitrito de sódio, 5000 ppm por 1 hora.

A solução suja, ácida, foi drenada sob pressão positiva de nitrogênio, 2 kgf/cm², para o tanque de neutralização.

Na primeira fase ácida foram removidos cerca de 270 kg de depósito e a concentração de ferro final de 7906 ppm, ou 0,7906 %, mostrou que cerca de 40 kg de magnetita foram removidos.

Na segunda fase ácida foram removidos mais 67 kg de depósito e mais 13,2 kg de magnetita.

4.3 Instalação dos Termopares

Um total de 15 termopares foram instalados de forma distribuída para permitir a medição da temperatura de pele dos tubos do super aquecedor secundário.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 15. Foto de montagem dos termopares

5 RESULTADOS ALCANÇADOS

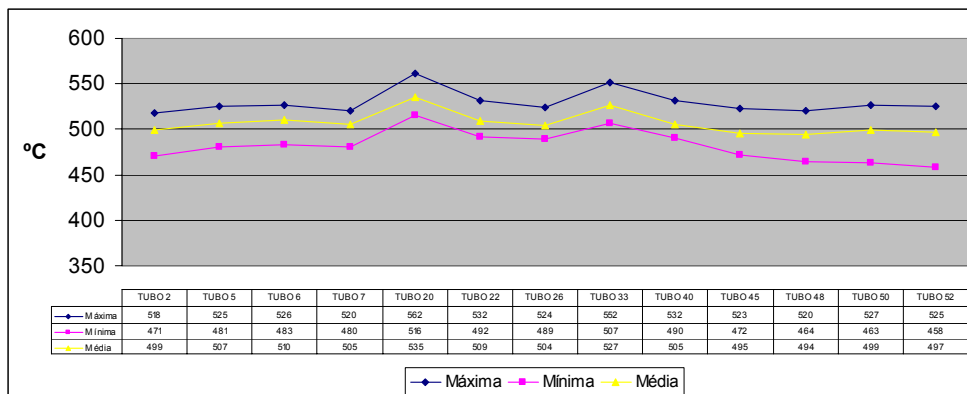
Após a execução do processo de limpeza foi realizada medição de espessura da camada de óxido, através de ultra-som, constatando-se que todos os valores ficaram abaixo da sensibilidade do aparelho, comprovando a eficiência da limpeza química.



Fonte: Relatório de avaliação de integridade da caldeira ArcelorMittal Tubarão

Figura 16. Análise metalográfica amostra de tubo após a limpeza química

O gráfico abaixo mostra os valores de temperatura real de pele dos tubos após a instalação dos termopares, pode ser observado que a temperatura média é de 500°C enquanto que a temperatura calculada com a camada de óxido era de 600°C.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 17. Gráfico de temperatura dos tubos do super aquecedor secundário

6 CONCLUSÃO

Com o novo valor de temperatura de pele dos tubos do super aquecedor secundário e o novo valor de temperatura do vapor de saída, foi revisado o cálculo de vida remanescente obtendo os seguintes resultados:

- Tubos do superaquecedor secundário: 18.007 horas (até fev./2009).
- Coletor de saída do superaquecedor secundário: 17.680 horas (até fev./2009)

Com a implementação das ações recomendadas a vida útil desses componentes foi prolongada em quase dois anos, a próxima etapa de trabalho agora é o planejamento e a programação para substituição desses componentes no ano de 2009.

Todas as avaliações realizadas permitiu o conhecimento detalhado e com segurança das condições de cada componente da caldeira,

REFERÊNCIAS

- 1 ArcelorMittal Tubarão. Manual de operação e manutenção das caldeiras., Vitória 1983.
- 2 ArcelorMittal Tubarão. Relatório de avaliação de integridade das caldeiras., Vitória 2003.
- 3 ArcelorMittal Tubarão. Relatório de avaliação de integridade das caldeiras., Vitória 2005.
- 4 ArcelorMittal Tubarão. Relatório de avaliação de integridade das caldeiras., Vitória 2006.
- 5 ArcelorMittal Tubarão. Relatório de limpeza química das caldeiras., Vitória 2007.