

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

RODRIGO LUCAS BORTOLUZZI

**ESTUDO DA EROSÃO POR CINZA VOLANTE EM DIFERENTES TIPOS DE
LIGAS DE AÇO APLICADAS EM CALDEIRA DE GRANDE PORTE**

Bagé

2015

RODRIGO LUCAS BORTOLUZZI

**ESTUDO DA EROSÃO POR CINZA VOLANTE EM DIFERENTES TIPOS DE
LIGAS DE AÇO APLICADAS EM CALDEIRA DE GRANDE PORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Corrêa Ferreira

Bagé

2015

Rodrigo Lucas Bortoluzzi

**ESTUDO DA EROSÃO POR CINZA VOLANTE EM DIFERENTES TIPOS DE
LIGAS DE AÇO APLICADAS EM CALDEIRA DE GRANDE PORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Materiais.

Dissertação de Mestrado defendido em: 21, de agosto de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Corrêa Ferreira, Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Felipe Amorim Berutti
UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio
UNIPAMPA

Prof. Dr. Flávio André Pavan
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, persistência e paz.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cristiano Corrêa Ferreira, pela paciência, confiança e apoio durante todo o estudo, interessado e comprometido com os nossos objetivos.

Aos Prof. Dr. Flavio Pavan e ao Prof. Dr. Wladimir Hernandez Flores pelo tempo dispensado nas análises e discussões.

Aos bolsistas, Juliana de Abreu Fontes, Douglas Ramos Mendes, Leara Barcelos Pereira, Rosane Teresinha Heck e Ricardo Moehleck de Melo, pela dedicação de horas e horas nas digitalizações e ensaios.

A todos os professores do programa de pós-graduação em engenharia que contribuíram com conhecimentos e amizades.

A Eletrobras CGTEE que viabilizou a realização deste trabalho, em especial aos engenheiros Antônio Siqueira, Homero Leite Soares, Felipe Ferreira e José Hermínio Borba, pelo apoio técnico, e administrativo.

Aos inspetores Pedro Fonseca, Ervin Barreto e Anderson Cougo, pelas inspeções realizadas, discussões técnicas e no empenho na qualidade deste trabalho.

A todos empregados da Eletrobras CGTEE que contribuem no dia a dia para um futuro melhor da nossa companhia.

Aos meus pais, que são meus exemplos de honestidade, resiliência, conhecimento e respeito, amo vocês.

Meu agradecimento especial vai ao meu amor eterno e incondicional, minha companheira de todas as horas, Blenda Medeiros Agostinho Bortoluzzi. Percorreremos juntos esta caminhada, com foco e respeito, foi difícil mais prazeroso! Dedico esta dissertação a minha amada esposa.

Meus filhos amados, Luigi e Alice pela paciência e carinho.

A todos os colegas e professores que não tenha citado aqui, muito obrigado!

E finalmente aos professores membros da Banca Examinadora pelas valiosas contribuições a esta tese.

Pouco conhecimento faz com que as
criaturas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam humildes.
É assim que as espigas sem grãos erguem
desdenhosamente a sua cabeça para o céu,
enquanto que as cheias as abaixam para a terra,
sua Mãe!

Leonardo da Vinci

ÍNDICE

1	Introdução.....	17
2	Objetivo geral	21
2.1	Objetivos específicos.....	21
3	Revisão de Literatura.....	22
3.1	Caldeira de Vapor.....	22
3.2	Economizador.....	25
3.3	Erosão	28
3.3.1	Erosão-corrosão	28
3.3.2	Erosão por partículas sólidas em meio gasoso	31
3.4	Carvão mineral	39
3.5	Cinza Volante	42
4	Metodologia	47
4.1	Coleta de material – Cinza volante e Ligas metálicas	48
4.2	Caracterização das Cinzas Volantes	49
4.3	Análise das Ligas Metálicas pelos Processos de ALCP e ALTB	49
4.3.1	Modelagem Computacional em 3D CAD	51
4.3.2	Simulação CFD.....	54
4.3.3	Fabricação e instalação das estruturas de suporte e ensaio.....	59
4.4	Análise das ligas metálicas através de ensaios nos CP ALCP e ALTB63	
4.4.1	Ensaio de pesagem ALCP e ALTB.....	65
4.4.2	Medição de dureza ALCP.....	67
4.4.3	Medição de Espessura ALCP	67
4.4.4	Digitalização 3D, ALCP e ALTB	67
4.4.5	Rugosidade ALTB.....	70
5	Análise Dos Resultados e Discussões	72

5.1	Difração de raio x (cinza volante)	72
5.2	Resultados pesagem	74
5.2.1	Pesagem ALCP	74
5.2.2	Pesagem ALTB.....	78
5.3	Espessura ALCP	80
5.4	Resultados Medições de Dureza ALCP.....	84
5.5	Resultado do ensaio de rugosidade ALTB	85
5.6	Digitalização 3D ALCP e ALTB	85
5.6.1	Digitalização ALCP	85
5.6.2	Digitalização ALTB	88
6	Conclusões.....	90
7	Sugestões de trabalhos futuros:	92
8	Referências	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho geral da Caldeira 4.	24
Figura 2 - Arranjo geral do passe traseiro em vista isométrica.....	25
Figura 3 - Vista frontal do passe traseiro, duto de gases e localização do Economizador 1.	26
Figura 4 - Representação de uma serpentina e 18 tubos do Economizador I..	27
Figura 5 - Efeito da temperatura na erosão-corrosão de liga metálica de aço carbono SAE 1018.	30
Figura 6- Ângulo de incidência e relativa perda volume por diferentes ângulos de incidência.	32
Figura 7 - Erosão do alumínio, ouro e magnésio.....	33
Figura 8 - Efeito da temperatura e ângulo de impacto em diferentes tipos de aço.	35
Figura 9 - Desgaste percentual dos tubos do Economizador.....	37
Figura 10 - Mecanismo de remoção de materiais dúcteis.	38
Figura 11 - Desgaste erosivo em materiais frágeis.	39
Figura 12 – Taxa de erosão em função da temperatura, velocidade, composição química e ângulo de impacto	43
Figura 13 - Velocidade máxima para economizadores caldeiras a carvão pulverizado.....	45
Figura 14 - Fluxograma geral do processo de desenvolvimento do trabalho. ...	48
Figura 15 - Modelagem 3D do ALCP.	52
Figura 16 - Desenho esquemático de equipamento de erosão de partículas sólidas.	53
Figura 17 - Ejetor misturador (A) e Válvula rotativa (B).....	54
Figura 18 - Detalhes de configurações do Software Utilizado.	57
Figura 19 - Resultado da simulação no <i>SolidWorks Flow Simulation</i>	58
Figura 20 - Perfil de velocidade no bico acelerador.	59
Figura 21 - (A) Suporte e CP, (B) Detalhe da fixação dos tubos, (C) Posicionamento dos CP, (D) CP identificados após remoção da caldeira, (E) Detalhe da fixação dos CP' no suporte no interior da caldeira e (F,G) Posição dos corpos de prova no interior da caldeira.	60
Figura 22 - Corpo de prova ALTB, após polimento.	62

Figura 23 - Bancada de testes (ALTB).....	63
Figura 24 – Cronograma e orientação do CP dentro da caldeira.	64
Figura 25 - Corpos de provas erodidos com cinza volante, em diferentes materiais (ALTB).	65
Figura 26 - CP (ALCP), e indicação de dias acumulados de testes.	66
Figura 27 - Câmara e processo de digitalização (a) e processo de digitalização das imagens (b).....	69
Figura 28- Processo de digitalização 3D.....	70
Figura 29 - Corpo de prova e equipamento de ensaio de rugosidade.....	71
Figura 30 - Difratoograma da cinza volante, escala logarítmica.....	72
Figura 31 - Difratoograma da cinza volante em escala linear.....	73
Figura 32 - Composição da cinza volante.	73
Figura 33 - Comparação entre os conjuntos 1 e 2.	75
Figura 34 - Perda de peso entre C1 e C 2.	77
Figura 35 - Perda de peso em miligramas nos testes de erosão (ALTB).	79
Figura 36 - Reduções de espessuras médias nos conjuntos 1 e 2.	81
Figura 37 - Perda de espessura na posição de 50 mm nos conjuntos 1 e 2....	82
Figura 38 - Perfil de perda de espessura de todas as ligas metálicas nos conjuntos 1 e 2.....	83
Figura 39 – Imagem colorimétricas obtidas na região 0 a 100mm dos CP's....	86
Figura 40 - Imagens colorimétricas obtidas na região de teste, dos CP's.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Composição química dos materiais aplicados.	27
Tabela II - Composição química da madeira e dos combustíveis fósseis sólidos.	40
Tabela III - Classificação dos carvões pelo rank , segundo ASTM.	41
Tabela IV - Análise de composição química do cinza volante.....	43
Tabela V - Acompanhamento de medições de peso.....	75
Tabela VI - Resultados dos testes de erosão (ALTB).	78
Tabela VII - Valores das reduções de espessuras nos conjuntos 1 e 2.	80
Tabela VIII - Medições de dureza ALCP.	84
Tabela IX - Resultado do ensaio de rugosidade, μm	85
Tabela X- Dados dos resultados obtidos até da posição 0 a 1500 mm.....	86
Tabela XI - Dados dos resultados obtidos, CP's ASTM A106B e ASTM A213T91.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALCP	Avaliação de Ligas Metálicas Submetidas as Condições de Processo;
ALTB	Avaliação de Ligas Metálicas Submetidas a Teste de Bancada;
SIN	Sistema Interligado Nacional;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
NOS	Operador Nacional do Sistema;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IEA	Agência Internacional de Energia;
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas;
ELT	Eletrobras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.;
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica;
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
CFD	Simulação Dinâmica de Flúidos Computacional;
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais;
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos;
CAD	Desenho Assistido por Computador;
SW	SolidWorks;
CP	Corpo de Prova;
VER	Elemento Representativo de Volume;
CPU	Unidade de Processamento Central;
FRX	Fluorescência de Raios x;
T _v	Taxa de Erosão Volumétrica (cm ³ /g);
T _m	Taxa de Erosão Mássica (mg metal/kg de erodente);
m _i	Massa Inicial da Amostra (g);
m _f	Massa Final da Amostra (g);
ρ _{ap}	Densidade do Revestimento (g/cm ³);
m _e	Massa de Erodente (g);
ε _{vT}	Taxa Total de Erosão de Volume;
ε _{vD}	Volume de Material Removido por Mecanismo de Deformação;
ε _{vC}	Volume de Material Removido por Mecanismos de Corte;

M	Massa Total de Partículas que Colidem;
K	Componente de Velocidade Normal à Superfície;
K1	Proporcionalidade Constante;
C	Constante;
V	Velocidade da Partícula;
P	Constante de Tensão de Escoamento Plástico;
α	Impacto ângulo;
ROM	Carvão de Mina;
DRX	Difração de Raios x;
<i>FEA</i>	Análise de Elementos Finitos;
UNS	Sistema de Numeração Unificada para Ligas Metálicas

RESUMO

Esta pesquisa estudou o desgaste por erosão atuante nos tubos de troca térmica do economizador de uma caldeira por meio de testes in loco, testes em laboratório seguindo os padrões da norma (ASTM G76-95) e simulações computacionais. Durante as análises, foram avaliados os comportamentos das ligas de aço como: ASTM A213T2, ASTM A213T22, ASTM A213T91, ASTM A210C e ASTM A106B, em função das variáveis velocidades, concentração, composição da cinza volante, temperatura e erosão quando expostos às mesmas condições operacionais.

Esta investigação objetivou fornecer subsídios às premissas de projeto e seleção de materiais, bem como aumentar o tempo de vida útil dos componentes quando submetidos a condições adversas na caldeira em função das variáveis observadas. O controle da erosão e desgaste dos tubos tem como propósito a contribuição para a redução dos custos de manutenção, verificando-se falhas nos tubos do economizador prematuras, que causam indisponibilidades forçadas da caldeira o que gera prejuízos de grande vulto.

Utilizou-se difração de raio x para análise de composição mineralógica das cinzas volantes.

Para auxiliar na escolha da região de estudo, foram realizados cálculos de simulação CFD com o propósito de verificar o local exato onde a ação da velocidade dos gases de exaustão mais prejudicam os dutos no interior do economizador da caldeira.

A avaliação da erosão por cinza volante, oriunda da Caldeira 4, do Complexo Termelétrico de Candiota, ocorreu em duas etapas distintas. A primeira foi realizada em condições de processo e, a segunda, em testes de bancada. Os testes em condições de processo foram acompanhados por ensaios para avaliar a evolução do desgaste das ligas de aço, como, pesagem, medição de espessura por ultrassom, digitalização em scanner 3D e dureza. O teste de bancada utilizou, como referência, a norma ASTM G76-95, fornecendo parâmetros para a confecção das amostras, assim como a própria bancada de testes. Os ensaios foram fundamentais para quantificar os resultados, como, pesagem e digitalização em scanner 3D.

Os resultados encontrados por meio deste estudo possibilitaram um maior conhecimento dos mecanismos de erosão nas ligas de aço com o uso das cinzas volantes. Dessa forma, foi possível encontrar soluções para melhorar as premissas de projeto, assim como identificar os limites de aplicação dos materiais estudados em um projeto dessa natureza.

Palavras chave: Erosão, Cinza Volante, Ligas Metálicas, Caldeira, Modelagem e Simulação.

ABSTRACT

This research studied the erosion mechanism active in heat exchange tubes of a boiler by means of in site tests, laboratory tests following the standard (ASTM G76-95) and computer simulations. During the analysis, we evaluated the behavior of alloy steel such as: ASTM A213T2, ASTM A213T22, ASTM A213T91, ASTM A210C and ASTM A106B, in function on the variable speed, concentration, fly ash composition, temperature and erosion when exposed to the same conditions operational.

This objective investigation to provide inputs on design assumptions and material selection, and increase the service life of components when subjected to adverse conditions in the boiler depending on the observed variables. Control of erosion and wear of the tubes are intended to contribute to the reduction of maintenance costs, checking for failures in premature economizer tubes, causing forced outages boiler which generates large-scale losses.

It was used x ray diffraction for the analysis of mineralogical composition of fly ash.

To auxiliary in choose the region the study, were performed CFD simulation studies with the purpose the verify the exact place where the action of the velocity of the exhaust gases more prejudice the ducts inside the boiler economizer.

The assessment of erosion by fly ash, coming from the boiler 4, the Thermoelectric Complex Candiota, occurred in two distinct stages. The first was realized in process conditions and, the second in bench tests. The tests in process conditions were followed tests to assess the evolution of wear of alloy steel, as, weighing, measuring thickness by ultrasound, 3D scanner and hardness. The test bench utilize as a reference to ASTM G76-95, providing parameters for confection the samples, as well as own bench tests. The tests were fundamental to quantify the results, as, weighing and scanning 3D.

The results found by means of this study allowed a more knowledge of erosion mechanisms in alloy steel with the use of fly ash. In this way, it is possible to find solutions to improve the design assumptions, as identify the application limits of the materials studied in a project of this nature.

Keywords: Erosion, Fly Ash, Alloys Steels, Boiler, Modeling and Simulation.

1 Introdução

Devido à necessidade de se obter elevadas disponibilidades operacionais das geradoras de energia à carvão mineral, ao longo dos anos, tem-se notado que existe uma preocupação muito grande, no meio científico, em estudar o comportamento em relação à resistência à erosão de seus componentes. É de conhecimento que as propriedades e as características desses componentes são suscetíveis a alterações quando em contato com matérias-primas específicas de uma região, como é o caso do carvão encontrado na região de Candiota, Rio Grande do Sul. Por esse motivo, detalhar a *performance* desses materiais é de fundamental importância para o bom funcionamento de todo o sistema.

As usinas termelétricas à base de carvão mineral, em todo o mundo, enfrentam sérios problemas de manuseio e descarte das cinzas produzidas. O alto teor de cinzas entre 30 a 60% no carvão, no caso da Índia, faz com que esses problemas sejam mais complexos. Em usinas de energia movidas a carvão da Índia, mostram que a erosão induzida por cinzas volantes tem sido um problema constante. Esta erosão tem implicações técnico-econômicas de longo prazo sobre o ciclo de vida dos componentes de usinas de energia. Onde as partículas de cinza colidem com as superfícies de aço dos componentes das caldeiras e o material sofre erosão na superfície. Em casos de erosão severa, os componentes são perfurados prematuramente e produzem falhas que podem comprometer a sua integridade estrutural e gerar danos mais complexos. O prejuízo causado não se restringe ao custo de substituição dos componentes, mas também ao custo de paralisação da produção de energia, o que justifica a importância em analisar e prever a taxa de erosão dos componentes para caldeiras a carvão mineral no setor industrial. Esta avaliação permite aperfeiçoar o desenvolvimento das estratégias de manutenção preventiva ou a substituição antecipada desses componentes evitando paradas forçadas¹.

Os mecanismos de degradação são muito estudados. A erosão por cinza volante é um mecanismo de falha relevante em caldeiras de grande porte e contribui de forma significativa para redução de disponibilidade do gerador de

vapor no processo de geração de energia elétrica, através da utilização de carvão mineral.

O Complexo Termelétrico de Candiota possui cinco caldeiras instaladas, que são denominadas por Fase A, B e C, conforme suas fases de implantação, sendo que todas apresentam os mecanismos de erosão nas suas caldeiras. Atualmente a Eletrobras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELT CGTEE) realiza manutenções anuais a fim de agir de maneira preventiva, evitando falhas em tubos e partes expostas. Este monitoramento das condições dos equipamentos ocorre através de ensaios não destrutivos nos locais com maiores incidências de falhas pelo uso de técnicas consagradas como; medição de espessura por ultrassom que identifica os tubos com baixa espessura, para que estes sejam preventivamente substituídos conforme os critérios pré-estabelecidos.

Os referenciais teóricos encontrados sobre erosão mostram regras gerais com baixo detalhamento. Os materiais pesquisados se restringem a apresentar informações sobre velocidades limites, e os estudos mais precisos informam limites de velocidades em relação à composição química do material erodente. Outro aspecto observado é o sigilo industrial que restringe o acesso a fontes mais detalhadas.

Neste contexto, o trabalho foi estruturado em dois pilares, Avaliação das Ligas metálicas Submetidas a Condições de Processo (ALCP) no ambiente da própria caldeira e Avaliação das Ligas metálicas Submetidas a Teste de Bancada que ocorreu em laboratório (ALTB).

Utilizaram-se, como material de estudo, as ligas metálicas usualmente aplicadas a caldeiras de grande porte e que são aplicadas nos bancos de serpentinas de caldeiras, como: ASTM A213T2², ASTM A213T22², ASTM A213T91², ASTM A210C³ e ASTM A106B⁴.

A cinza volante é o material agente da erosão, ora denominado de material erodente. Realizou-se neste a análise de difração de raio x (DRX) que auxiliou na obtenção da composição química.

Os corpos de provas analisados (ALCP) foram disponibilizados pela ELT - CGTEE, e submetidos a ensaios de dureza, peso e espessura. O monitoramento das variáveis nos tubos ocorreu através de medições periódicas, do durômetro que contribuiu na obtenção dos valores

característicos dos materiais. A pesagem por meio do uso de balanças analítica e comercial que monitoraram a perda de massa, e, dessa forma, encontraram-se os valores quantitativos dos corpos de prova. A medição de espessura por ultrassom identificou as áreas de mais baixa espessura nos tubos, evidenciando as áreas mais críticas em relação às condições ambientais.

Em síntese, a ALCP ocorreu em condições de trabalho, pois foi realizada no interior da Caldeira 4 da Unidade 4 do Complexo Termelétrico de Candiota. Os CP foram instalados nos locais previamente identificados como mais alta erosão na caldeira.

Na ALTB por sua vez, foi realizado estudo de análise de elementos finitos, da língua inglesa denominado *Finite Element Analysis* - FEA, para a montagem do equipamento de erosão, baseado na Norma Internacional ASTM G76-95⁵ para análise.

A bancada de teste foi desenvolvida através de modelagem 3D/CAD e simulação de FEA, possibilitando a obtenção de parâmetros para realização dos testes de erosão. Para viabilização deste processo de análise, foi necessário construir um silo com aquecimento devido à característica do erodente em reter umidade. A bancada, de maneira geral, foi composta por sistema de ar-comprimido, bico de aceleração, câmara de teste, válvula rotativa de dosagem, silo aquecido de cinza volante, estação de regulagem de ar comprimido, regulagem de temperatura do silo e ferramenta de inclinação do corpo de prova.

Os CP analisados pelo método ALTB, foram disponibilizados pela ELT - CGTEE e submetidos a ensaios de dureza, peso e digitalização em scanner 3D. O durômetro contribuiu para obtenção dos valores reais que foram utilizados como características dos CP. O monitoramento das variáveis nos tubos ocorreu com a pesagem através do uso de balança analítica que monitorou a perda de massa, e, dessa forma, encontraram-se os valores quantitativos dos corpos de provas. A digitalização 3D possibilitou identificar as áreas de mais baixa espessura nos CP.

Diante dessas informações, pôde-se afirmar que o trabalho visou avaliar o potencial de erosão por cinza volante nos componentes da caldeira, com o objetivo de auxiliar os profissionais ligados no meio e que utilizam o carvão para produção energia. O carvão, encontrado na Região da Campanha

Gaúcha, em especial o de Candiota, classifica-se como um dos mais importantes recursos naturais desta região. Porém o potencial de erosão de suas cinzas não foi completamente elucidado, gerando uma quantidade significativa de falhas em componentes vitais do processo de geração de energia, da mesma forma, os equipamentos utilizados no interior da caldeira e, em especial no economizador, carecem de estudos mais específicos em relação ao comportamento dos materiais nas condições de trabalho.

2 Objetivo geral

O estudo tem como objetivo geral estudar a erosão por cinza volante comparando diferentes tipos de ligas metálicas aplicadas em caldeiras de grande porte, utilizando o carvão mineral da região de Candiota/RS.

2.1 Objetivos específicos

- Indicar as condições desfavoráveis na aplicação de materiais metálicos sob pressão submetidos às partículas erodentes de cinza leve;
- Realizar testes *in loco*, colocando ligas de aço em formato tubular no interior da caldeira e, dessa forma, avaliar o potencial do mecanismo de erosão na caldeira em estudo;
- Realizar testes em laboratório seguindo os padrões a norma ASTM G76-95⁵;
- Realizar simulações computacionais com o propósito de prever as geometrias desfavoráveis à integridade das ligas metálicas;
- Avaliar o comportamento de diferentes ligas de aço em função das variáveis como velocidade, composição da cinza volante, temperatura e erosão quando expostas às mesmas condições operacionais;
- Desenvolver uma metodologia de análise com o uso do equipamento *scanner* 3D, a fim de determinar a erosão na superfície de ligas metálicas;
- Avaliar o potencial das cinzas locais em gerar erosão nos componentes da caldeira em estudo.

3 Revisão de Literatura

Neste capítulo, serão apresentadas às pesquisas científicas e livros publicados pelos autores que contribuem para fundamentação do trabalho expostos às normas utilizadas durante a investigação. Neste mesmo capítulo, serão abordados, também, assuntos relacionados ao tema de estudo como: a caldeira, o economizador, a erosão, a velocidade limite, o carvão mineral, a cinza e a geometria do duto de condução de gases.

3.1 Caldeira de Vapor

Pode-se definir como caldeira de vapor todo o equipamento que, utilizando a energia química liberada durante a reação de combustão, promove a mudança de fase da água do estado líquido para o de vapor, a uma pressão várias vezes maiores que a atmosférica⁶.

A caldeira é o equipamento onde ocorre essa mudança de fase da água, sendo a sua principal função a produção de vapor através do aquecimento da água.

Os geradores de vapor são construídos de acordo com normas ou códigos vigentes no País e de forma a melhor aproveitar a energia liberada pela combustão em relação ao tipo de combustível, por isso a sua estrutura é bastante diversificado. As unidades modernas e de grande porte são, normalmente, equipadas com os seguintes componentes: fornalha, caldeira, superaquecedor, economizador e aquecedor de ar⁷.

As caldeiras de vapor são classificadas atendendo a critérios como: aplicação principal, disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho, força motriz para a circulação do fluido de trabalho, nível de pressão durante a operação, tipo de combustível ou fonte de calor, tecnologia de combustão, tiragem de ar e gases de combustão e disposição da fornalha e superfície de aquecimento⁶.

Existem diversas aplicações na indústria que utilizam vapor como parte integrante do processo produtivo, como, vapor como fonte motriz para máquinas térmicas, vasos de pressão para esterilização de materiais diversos, vasos de pressão de cozimento de alimentos, entre outros⁷.

A Caldeira em estudo foi construída em meados da década de 1980. Sua principal função é a de gerar energia elétrica, bem como, auxiliar na geração de vapor necessário para diversos processos como, por exemplo: o fornecimento de vapor que auxilia no aquecimento de óleo combustível, produção de água desmineralizada, transporte de cinza, formação de vácuo inicial no condensador e selagem dos mancais da turbina.

A circulação de gases e de fluido no interior da Caldeira é do tipo aquatubular, que se caracterizam pela passagem da água no interior dos tubos, possui uma fornalha para a queima do combustível, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Em volta da fornalha esta a parede d'água, constituídas por tubos pelos quais passa água que é aquecida até vaporizar⁸.

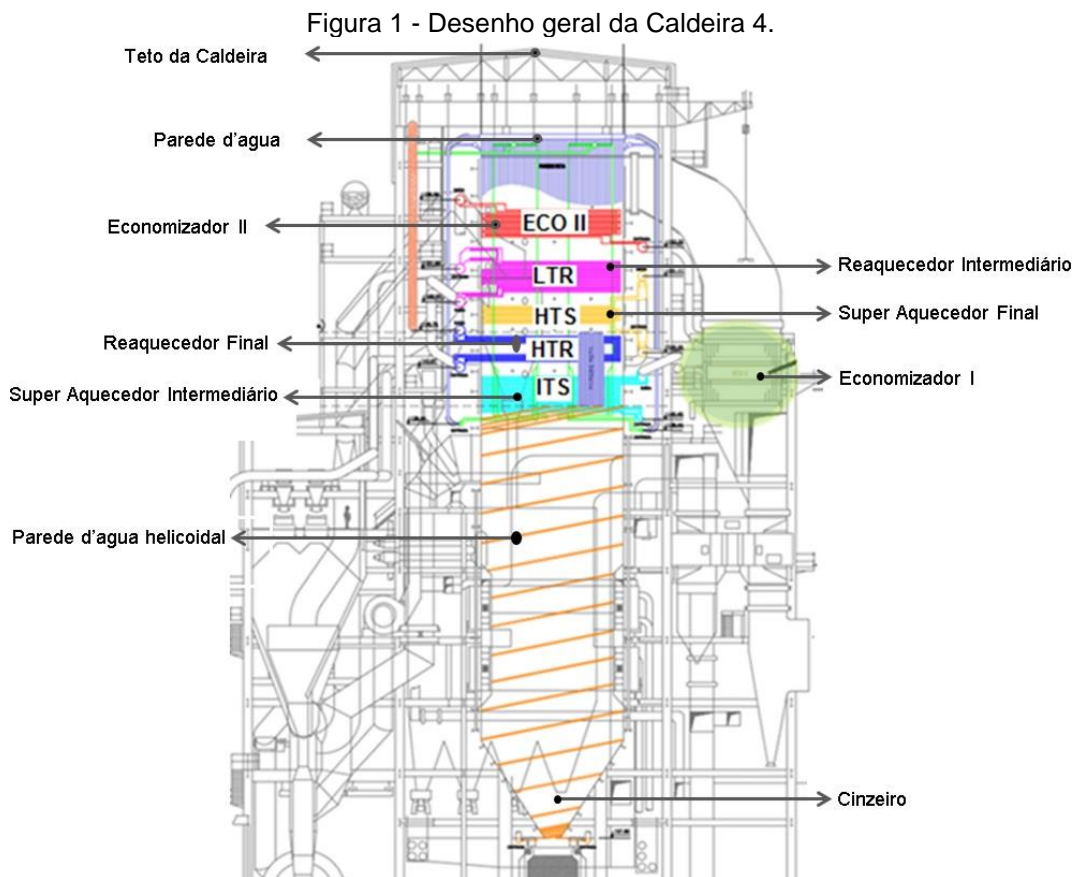
A Caldeira é de circulação forçada conhecida por caldeiras de passe forçado, dispensa a instalação de tubos de grande diâmetro. Como equipamentos constituintes destas caldeiras, destacam-se o gerador de vapor radiante por unidade tipo *once-through* com separador seco, evaporador formado pelas paredes d'água com tubos espiralados na parte inferior da fornalha e verticais na parte superior, dois economizadores, dois superaquecedores sendo um radiante e outro convectivo e dois reaquescedores convectivos, cujo fabricante é a Stein Industrie.

Outras características deste equipamento pode-se citar:

- Altura de 64 metros, com secção quadrada de aproximadamente de 11 metros;
- Produção de vapor de 576 toneladas por hora;
- Pressão de saída do vapor superaquecido de 175 kgf/cm²;
- Pressão de saída do vapor reaquescido de 39 kgf/cm²;
- Temperatura de saída do vapor superaquecido de 538°C;
- Fornalha com tiragem balanceada;
- Temperatura da câmara de combustão de 1.200°C;
- Depressão na câmara de combustão de 5-10 mm H₂O;
- Utiliza carvão CE3300, processado por meio de moinhos de bolas para torná-lo pulverizado que é considerado um tipo de queima tangencial indiretos, queimadores basculantes com possibilidade de regulação do ângulo de inclinação de + 30° até - 30°;

- Possui 16 queimadores a carvão e 8 queimadores a óleo combustível.

Conforme ilustra a Figura 1⁹.



Fonte: ELT CGTEE, 2013⁹.

A Figura 1 representa o desenho geral da Caldeira 4 integrante da Unidade 4, com destaque a identificação dos bancos de serpentinas e paredes de água. De maneira simplificada, podemos descrever a trajetória do fluido; o acesso na caldeira se dará primeiramente pelo Economizador I, seguindo para o Economizador II; após, irá percorrer os tubos inclinados da parede da água helicoidal e reta, na sequência irá acessar os bancos de serpentinas dos superaquecedores intermediários e finalmente, em condições ideais de pressão e temperatura, 175 kg/cm² e 538 °C irá acessar a turbina de vapor. Após realizar o trabalho, o fluido retornará aos bancos de serpentinas de reaquecimento, intermediário e assim, irá acessar a turbina de baixa pressão.

3.2 Economizador

Os Economizadores são trocadores de calor que ajudam a melhorar a eficiência térmica da caldeira, ao extraírem o calor dos gases de exaustão da combustão, aquecendo a água de alimentação antes de sua entrada no tambor e/ou na própria caldeira, também evitando choques térmicos. São instalados a partir da secção de convecção e de reaquecimento da unidade, sendo constituídos por feixe de tubos com coletores nas extremidades, podendo ser construídos de tubos lisos ou aletados^{6, 7, 10}.

A Caldeira 4 possui dois economizadores, denominados Economizador I e Economizador II, instalados após os superaquecedores e reaquecedores, no passe traseiro da caldeira, conforme ilustrado na Figura 1.

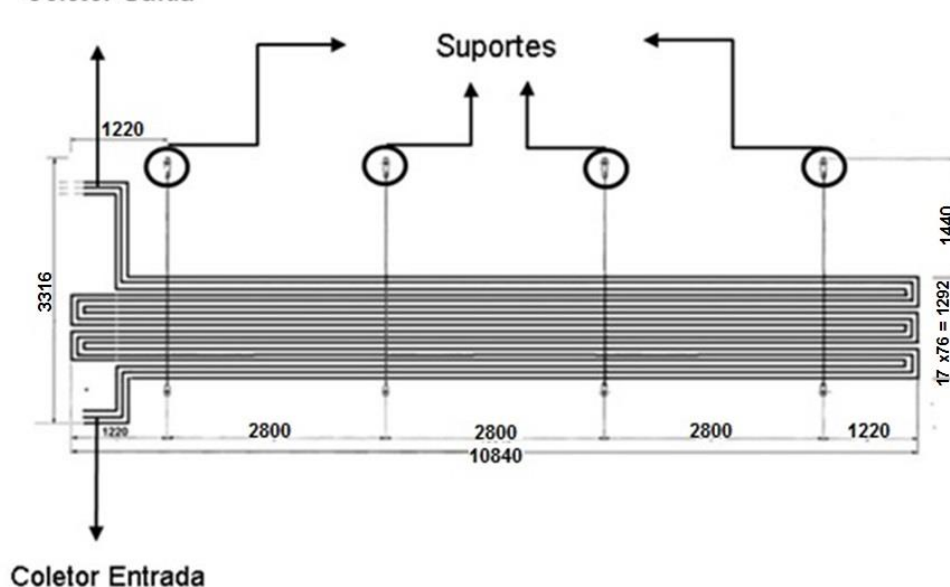
A combustão do carvão é realizada na câmara de combustão que é envolvida pela parede helicoidal, tubos levemente inclinados. Após o fluxo de gases resultantes da combustão, segue para o passe traseiro da caldeira, ilustrado no arranjo geral do passe traseiro, Figura 2, acessando pelos dutos indicados no detalhe 1.

Na Figura 2 são representados de forma geral os dutos de condução dos gases de exaustão, sendo constituído de dois dutos semelhantes de seção retangular de 4.320 mm por 4.200 mm, segundo indica os itens 1 e 2, após convergem para uma única seção retangular de 11.000 mm por 6.000 mm indicado no item 3, onde está localizado o banco de serpentinas do Economizador 1, após se encontram mais dois dutos semelhantes de seção retangular de 2.800 mm por 4.840 mm, conforme o item 4. Na mesma Figura 2, identificamos o local de instalação dos CP dos testes em ALCP.

Figura 2 - Arranjo geral do passe traseiro em vista isométrica.

Os tubos do Economizador I são tubulações lisas com 11 metros de comprimento, possuem um coletor de entrada e um coletor de saída, tendo 54 serpentinas enfileiradas e 24 tubos dispostos um sobre o outro, com um espaçamento de 76 mm, de acordo com o modelo da Figura 4.

Figura 4 - Representação de uma serpentina e 18 tubos do Economizador I



Fonte: Autor, 2013.

As ligas metálicas são selecionadas de acordo com as condições de trabalho, específicas a cada local da caldeira de grande porte. Grande parte dos projetistas adota a norma ASME Seção I, que padroniza o tipo de ligas metálicas, especificamente nos Economizadores são aplicadas as ligas ASTM A213 e ASTM A210 listadas na Tabela I. Deve-se enfatizar que a composição química padrão dos materiais aplicados são definidas pela norma ASME Seção II e ASTM^{2,3,4,12,13}.

Tabela I - Composição química dos materiais aplicados.

Norma		Composição Química dos Aços (%)												
Padrão	Grau	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Ni	Al	Nb	N	Cu
					Max									
A213	T11	0.05-0.15	0.50-1.00	0.30-0.60	0.025	0.025	1.00-1.50	0.44-0.66	-	-				
A213	T12	0.05-0.15	≤0.5	0.30-0.60	0.025	0.025	1.90-2.60	0.87-1.13	-	-				
A213	T91	0.08-0.12	0.20-0.50	0.30-0.60	0.01	0.02	8.00-9.50	0.85-1.05	0.18-1.25	≤0.04	≤0.04	0.06-0.10	0.03-0.07	
A210	C	≤0.36	≥0.10	0.29-1.06	0.035	0.035	-	-	-	-	-	-	-	
A106	B	≤0.30	≥0.10	0.29-1.06	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.15	≤0.08					≤0.40

Fonte: ASME e ASTM^{2, 3, 4, 13}.

3.3 Erosão

Erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido¹⁴.

O fenômeno de erosão ocorre com a perda progressiva de material inicial de uma superfície sólida, causado pela interação mecânica entre a superfície e um fluido, por um fluido de componentes múltiplos, ou interferência das partículas líquidas ou sólidas¹⁵.

A erosão é frequentemente observada em uma grande variedade de condições ambientais, principalmente naquelas que envolve transporte de fluidos (líquidos ou gases), com ou sem a presença de particulados. Como exemplos de equipamentos e componentes que estão sujeitos a este tipo de desgaste, citam-se: transportadores pneumáticos, turbinas, tubulações, bombas, válvulas, conexões, entre outros¹⁴.

Destacam-se seis diferentes tipos de erosão: erosão por partículas sólidas em meio gasoso, erosão por partículas sólidas em meio líquido, erosão devido à ação de líquidos, erosão-corrosão, erosão por cavitação e erosão térmica¹⁶.

Serão detalhadas de forma mais específica, nesta revisão bibliográfica, a erosão-corrosão e a erosão por partículas sólidas em meio gasoso, as mais discutidas na interação entre cinza volante e ligas metálicas nas condições ambientais da região da caldeira.

3.3.1 Erosão-corrosão

Neste tipo de mecanismo, a interação entre a erosão e oxidação pode resultar em uma sinergia na perda de massa no material alvo, sendo muitas vezes mais prejudicial do que a corrosão e a erosão em ações separadas. Existe uma necessidade de distinguir as circunstâncias em que cada um deles é a causa predominante de perda de material e para descrever o modo de perda real.

A corrosão dependente das taxas de crescimento das camadas de óxido, a composição da liga e a temperatura são determinantes. A erosão está diretamente ligada à gravidade da ação erosiva (fluxo de partículas, a

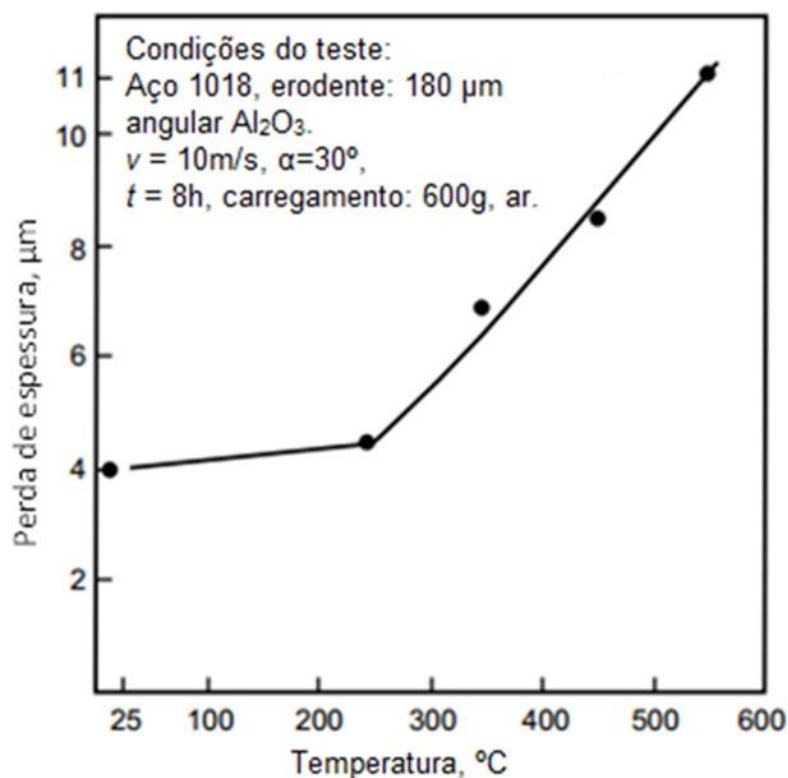
velocidade, ângulo de choque) em uma aceleração da taxa de perda de material¹⁷.

As condições necessárias para o mecanismo erosão-corrosão devem contemplar altas velocidades das partículas erodentes e temperaturas elevadas. Ligas que exibem boa resistência à oxidação (ou resistência à corrosão de alta temperatura), são endurecidas por partículas duras da segunda fase e susceptíveis para ser candidatos promissores para a aplicação. Velocidades mais baixas das partículas, o comportamento erosão-corrosão pode ser fortemente dependente do tipo de escamas de óxido formada sobre a liga. Aços de baixa liga e aços que formam óxidos de ferro podem sofrer muito mais ataque erosão-corrosão¹⁸.

A perda de peso para aços com teor de cromo de moderado e alto, ou seja, UNS K91560 (T91), UNS S30403 (304L) e UNS S30815 (253MA), ocorrem com aumento da velocidade de impacto das partículas em toda a faixa de temperatura, 350°C a 650°C, enquanto para a liga metálica de aço carbono baixa liga, UNS K12822 (16Mo3), eventualmente diminuir a partir de 550°C a 650°C, com as mais baixas velocidades. No caso da liga metálica de aço carbono baixa liga, tal comportamento pode ser explicado por uma mudança no regime de erosão-oxidação, devido a um aumento significativo da taxa de oxidação, enquanto que, no caso das ligas metálicas de aço com teor de cromo de moderado e alto, o modo de erosão-oxidação predominante continua a ser a mesma em todas as condições de ensaio^{19, 20}.

Na Figura 5 é apresentado o efeito da temperatura sobre a erosão-corrosão de aço de carbono, em ar, com ângulo de impacto a 30°, velocidade da partícula de 10 m/s com partículas de alumina de tamanho médio de 180µm. Nota-se um aumento no mecanismo de erosão-corrosão com o aumento da temperatura, a partir de aproximadamente 270°C²¹.

Figura 5 - Efeito da temperatura na erosão-corrosão de liga metálica de aço carbono SAE 1018.



Fonte: A.V. Levy, 1993²¹.

O tipo de partículas erodentes também é fundamental para o mecanismo, podendo os cantos das partículas erodentes de alumina romper e aderir a superfície acoplado na superfície do alvo, ou partes da própria partícula pode ser marteladas na superfície, ou seja, embutir o que resulta no desenvolvimento de uma camada de superfície que pode modificar a oxidação e/ou o comportamento da erosão do alvo e, possivelmente, reduzir a taxa de perda de material erodido²².

O resultado final do processo de erosão-corrosão será maximizado a partir do momento em que a taxa de oxidação aumenta, por ação da erosão a camada de óxido é removida localmente, possibilitando a ação novamente da oxidação o que torna o processo sinérgico¹⁷.

A norma ASTM G119-04 apresenta um guia para o cálculo da sinergia entre desgaste e corrosão²³.

3.3.2 Erosão por partículas sólidas em meio gasoso

A erosão corresponde à degradação da superfície sólida do objeto sob o efeito de impactos de partículas, de gotículas, de um jato (gás, água e vapor), ou da ação de um escoamento turbulento. Os fatores que influenciam a erosão, em um ambiente inerte, são: condições de fluxo do fluido (ângulo de impacto de partícula, velocidade da partícula, rotação de partícula, concentração de partículas no fluido, composição da partícula e temperatura); propriedades da partícula (tamanho, forma, dureza e resistência à fragmentação) e propriedades de superfície (estresse em função da força, temperatura de deformação e dureza na temperatura de trabalho, a tenacidade à fratura e tensão residual)^{24, 25, 26}.

Neste regime, a taxa de formação de óxido é tão lenta que a remoção de óxido tem uma contribuição insignificante na perda de material, ocorrendo predominantemente pela remoção de metal. No entanto, a presença de uma película de óxido pode modificar a interação erosão-oxidação, alterando parâmetros superficiais, físicos ou mecânicos. Como por exemplo, o coeficiente de atrito ou a dureza. Este regime poderá ser encontrado em temperaturas baixas e, para as ligas metálicas muito resistentes à oxidação, sob condições de erosão muito agressivas em que o componente erosivo suprime completamente a contribuição da oxidação. O comportamento da liga metálica, neste regime, será estabelecido por erosão, com os efeitos ambientais a ser contabilizados através das suas influências sobre as propriedades mecânicas da liga metálica e do material erodente¹⁷.

O desgaste erosivo de revestimentos metálicos está fortemente correlacionado aos defeitos superficiais presentes nas microestruturas, particularmente porosidade e microtrincas²⁷.

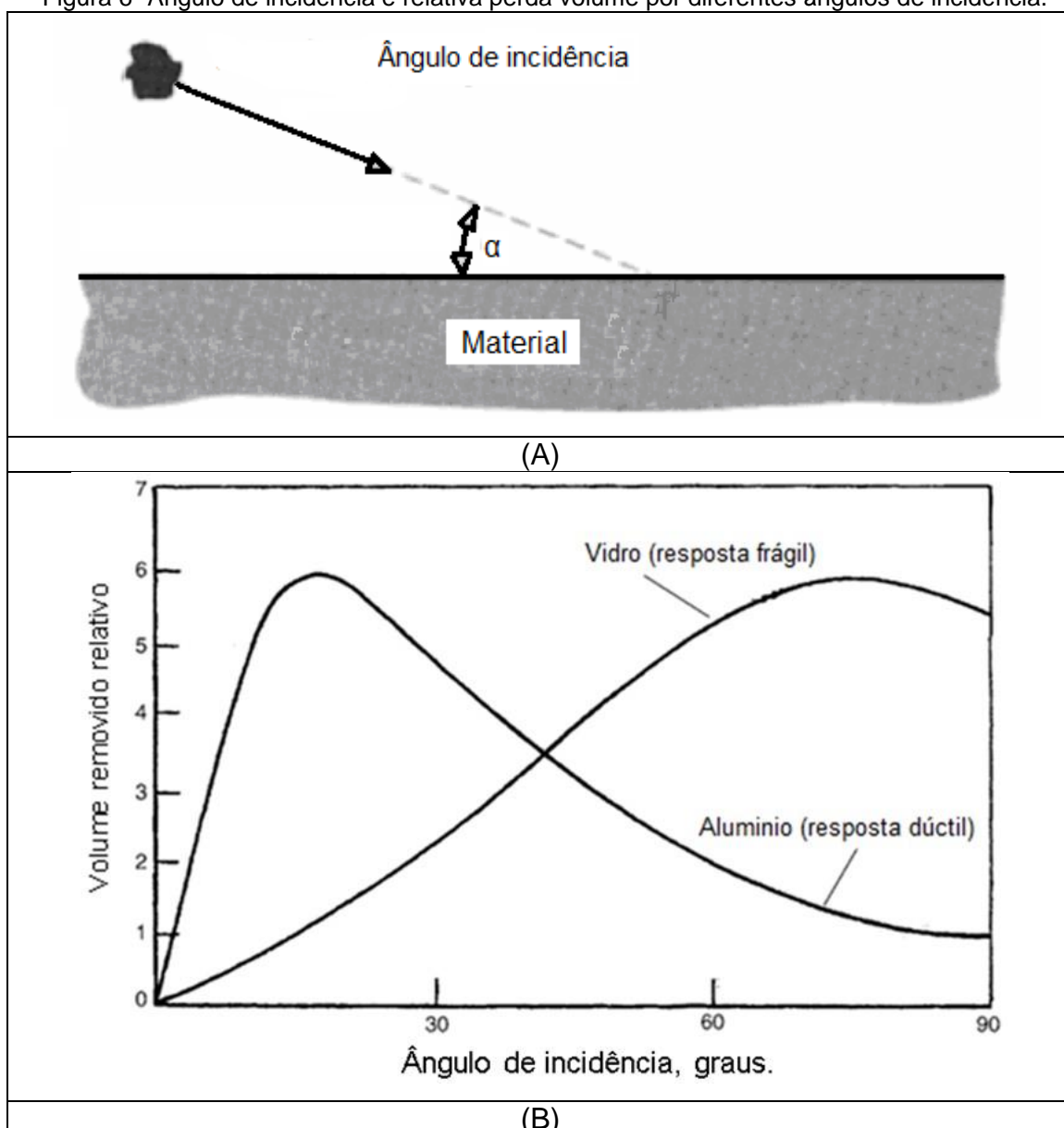
Os fatores apresentados serão descritos de maneira mais detalhada a seguir.

3.3.2.1 Condições de fluxo do fluido em meio gasoso

O ângulo de incidência é definido pela trajetória da partícula erosiva e a superfície do material erodido, como mostra a Figura 6(A)¹⁴.

Como regra geral, o ângulo de incidência é determinante para o mecanismo de erosão, para um material dúctil, tal como o alumínio, o ataque máximo erosão ocorre para ângulos de incidência baixos, menos de 30° em relação à direção do impacto das partículas e o mínimo ataque próximo de 90° . No entanto, para o material frágil, tal como o vidro, o ataque máximo de erosão ocorre em ângulos de incidência altos, próximo a 90° em relação à direção do impacto das partículas e o mínimo abaixo de 30° , como é ilustrado na Figura 6(B)¹⁴.

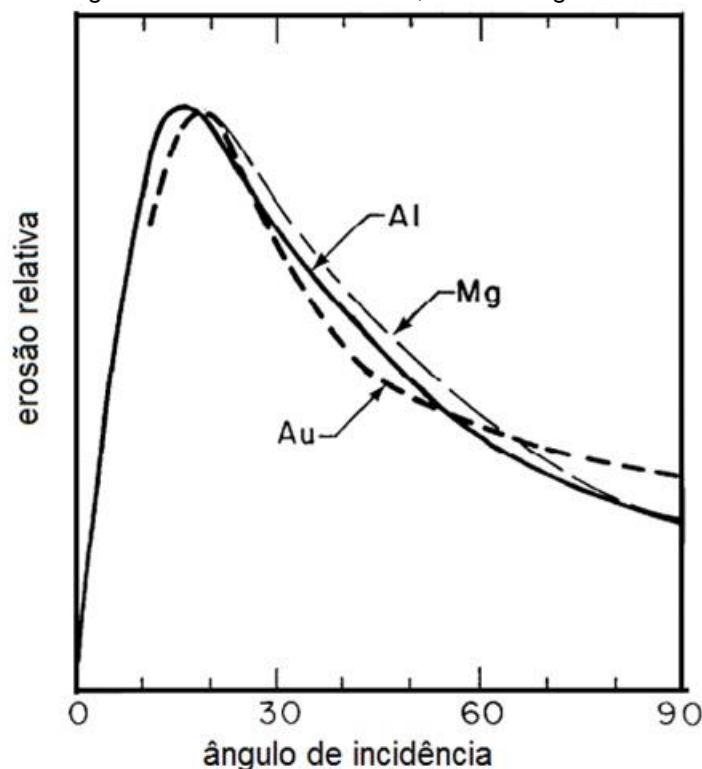
Figura 6- Ângulo de incidência e relativa perda volume por diferentes ângulos de incidência.



Fonte: Adaptado I. Finnie, 1995²⁵ Apud^{18,14}.

Em materiais com o comportamento dúctil, o ângulo de impacto de partículas é uma característica muito importante, ou seja, sobrepõe as térmicas e físicas, tendo a variação da perda de peso com o ângulo de impacto é muito semelhante para materiais amplamente diferentes. A Figura 7 mostra o comportamento de ligas de diferentes propriedades térmicas para os materiais como o alumínio (Al), o ouro (Au) e o magnésio (Mg)²⁵.

Figura 7 - Erosão do alumínio, ouro e magnésio.



Fonte: Finnie I, 1995²⁵.

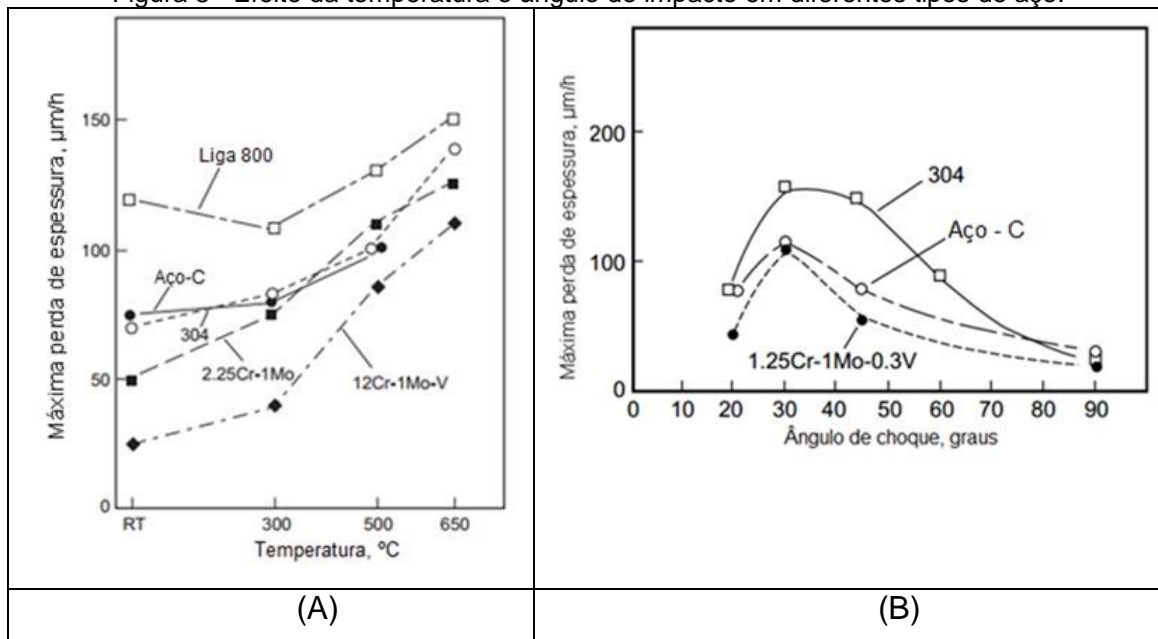
Na Figura 7 vê-se que as taxas de erosão, nas superfícies de aço sujeitas a uma corrente de partículas de cinzas volantes, variam com o ângulo de impacto das partículas. Para baixo valor de ângulo de impacto, a taxa de erosão aumenta, com a taxa de erosão máxima ocorrendo com um ângulo de impacto de até 30°. Depois disso, a taxa de erosão diminui com o aumento do ângulo de impacto^{25, 28}.

As taxas de erosão em ângulos baixos têm a tendência de aumentar significativamente com o aumento da temperatura, mas, com alto impacto nos ângulos, o efeito da temperatura é insignificante^{28, 29}.

Na Figura 8(A), o efeito da temperatura e a taxa de erosão de várias ligas metálicas, em atmosfera de argônio, com ângulo de incidência de 20°, velocidade de 120m/s, concentração de material erodente de 120g/m³, e partículas de sílica de 120µm de tamanho médio. Para cada liga metálica apresentada na Figura 8(A) a taxa de erosão tem a tendência de sofrer um acréscimo com o aumento da temperatura²⁹.

A Figura 8(B) mostra o efeito do ângulo de impacto sobre a taxa de erosão para as ligas metálicas de aço carbono, 1.25Cr-1Mo-0,3V e tipo 304. Condições de teste, a 300°C em uma atmosfera de argônio, com 120 m/s de velocidade das partículas, 120g/m³ concentração das partículas erodentes, e partículas de sílica de tamanho médio de 120µm. O ataque erosivo máximo foi encontrado em um ângulo de choque das partículas erodentes próximo a 30°, em ângulo de 90° de impacto ocorre mínima perda de espessura. O teste foi realizado numa atmosfera inerte (ambiente de argônio), sem ação de meio corrosivo. A liga metálica do AISI 304 sofreu maior erosão do que as ligas metálicas de aço carbono e Cr-Mo-V, sugerindo que aços inoxidáveis podem ser menos resistentes ao ataque erosivo do que aços ferríticos quando a oxidação não está envolvida. Isto é ainda mais fundamentada pelos dados que incluíram carbono aço, 2.25Cr-1Mo (ASTM A213T22), e aço 12Cr-1Mo – V (DIN X20CrMoV12-1) em comparação com o AISI 304 e Alloy 800 (UNS N08800). A liga metálica Alloy 800 sofreu o pior ataque erosivo desde a temperatura ambiente até 650°C (1200°F) quando a oxidação não estava envolvida^{21, 29}.

Figura 8 - Efeito da temperatura e ângulo de impacto em diferentes tipos de aço.



Fonte: Y. Shida, 1985²⁹.

Perturbações de fluxo em determinadas áreas, às vezes, podem criar condições que são mais propícias ao ataque erosivo. O escoamento das cinzas volantes na região do passe traseiro do Economizador pode mudar de direção, devido a estrutura física ou mesmo o próprio banco de serpentinas, criam um fluxo de gás não uniforme, e sua distribuição desigual de cinzas volantes causadas por forças centrífugas potencializam o ataque erosivo¹⁰.

O efeito erosivo dos gases de combustão, na superfície externa do tubo, é ocasionado pela alta velocidade de colisão de abrasivos como quartzo alfa e partículas, a temperatura do metal e do gás. Diante disso, pode-se informar que a velocidade nos tubos dos Economizadores é uma das principais responsáveis por falhas ocorridas³¹.

Como regra usual, as velocidades máximas de projeto em economizadores devem estar na ordem aproximada de 15m/s ou inferior. Como exemplo, eles informam que os locais, em que ocorrem velocidades superiores a 30m/s, é comum encontrar falhas por erosão nos tubos expostos às cinzas volantes entre 10.000 a 50.000 horas de operação³².

A perda de metal deve ser insignificante quando a velocidade está no intervalo entre 15 a 20m/s, no entanto, com as velocidades entre 30 a 40m/s, o desgaste da erosão é suficientemente elevado para fazer com que as falhas do tubo ocorram após 10.000-50.000 horas em serviço²⁶.

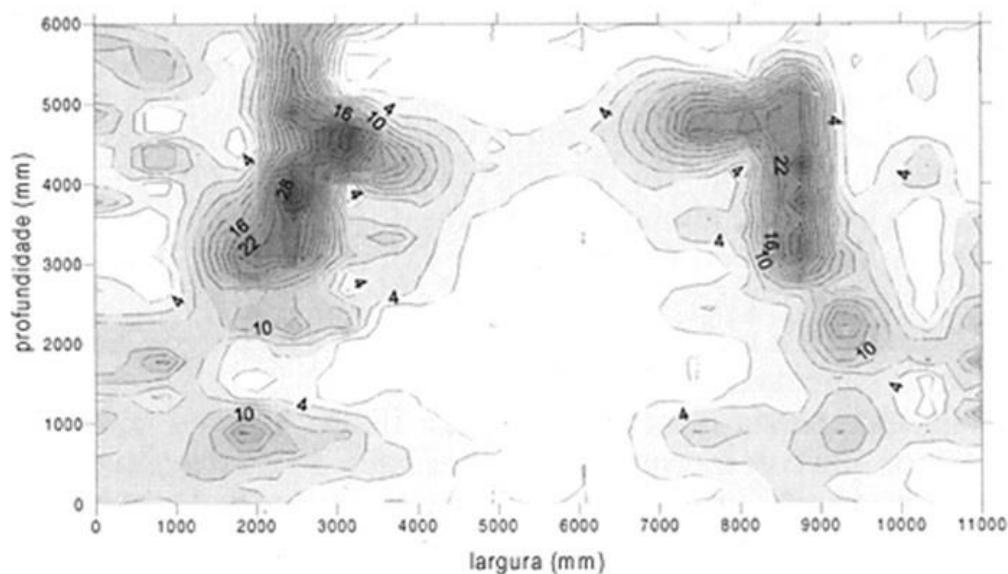
Cerca de 60-80% das cinzas resultantes da combustão de carvão deixa o forno com os gases de combustão. A velocidade do gás não deve ultrapassar os limites especificados, a fim de controlar a erosão das partículas de cinzas. Dependendo da quantidade de cinza e a sua composição, a velocidade é geralmente limitada entre 15,2 a 18,2m/s^{10, 33}.

A solução mais comum para escoamentos em dutos curvos é a colocação de várias chapas direcionadoras na região da curva, de modo a transformar o duto em vários dutos paralelos de menor seção, como informa Idelchick (1986)³⁴.

Em estudos já realizados na Caldeira 4, conforme escrito por Indrusiak (1997), os resultados mostraram que a configuração geométrica do duto é tal que, além do deslocamento da região de maior velocidade do perfil em direção à parede côncava que é característico de escoamento em dutos curvos, ainda ocorre a separação da camada limite na parede convexa, formando-se uma região de recirculação e reduzindo-se a seção útil de escoamento. Essas características explicam que as erosões nos tubos são mais acentuadas nos pontos situados mais próximos às paredes côncavas. Em síntese, o local onde ocorre o problema é o economizador e dutos de condução dos gases de exaustão³⁵.

O desgaste dos tubos é bem mais acentuado naqueles situados mais próximos à parede côncava da curva, como pode ser visto na Figura 9, na forma de isolinhas. O desgaste foi calculado pela diferença entre duas medições de espessura de parede, realizadas com um intervalo de quatro meses adimensionalizadas pela espessura nominal e, como o economizador está logo abaixo da união dos dois dutos curvos, o gráfico mostra duas regiões com maior desgaste. A profundidade 0 mm corresponde à continuação da parede convexa do duto. A parte superior corresponde à região próxima à continuação da parede côncava das curvas. Esses dados foram encontrados nos Relatórios de Inspeção 091/95 e 115/95 da empresa geradora³⁵.

Figura 9 - Desgaste percentual dos tubos do Economizador.



Fonte: Maria Luiza Sperb Indrusiak, 1997³⁵.

3.3.2.2 Propriedades da partícula erodente

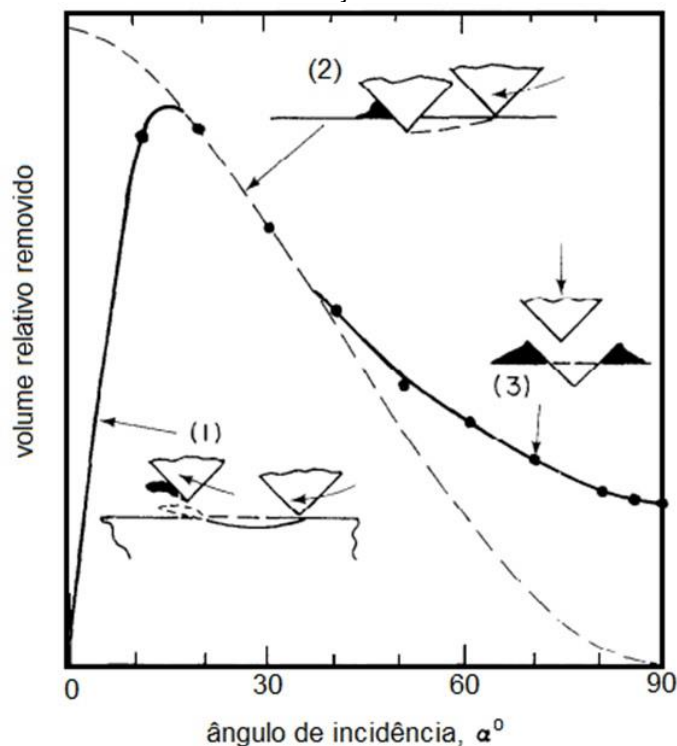
Pode-se informar que os dois componentes mais importantes das cinzas volantes são, sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Os minerais com alumina cristalina “livre” são altamente abrasivos. Na maior parte do carvão mineral utilizado, as cinzas resultantes da combustão, a alumina está presente em uma forma mais suave, como vidro alumino-silicato com algumas agulhas mulita dispersas e uma matriz vítrea^{1,36}.

Os componentes presentes em cinzas volantes que contribuem mais para a erosão são sílica (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3); ambos os óxidos são relativamente duros e abrasivos. Enquanto que as sílicas, são encontradas em percentagens mais elevadas do que o óxido de ferro que é mais denso e, produz um impacto maior¹⁰.

3.3.2.3 Propriedades de superfície das ligas metálicas

Mecanismo de remoção de materiais dúcteis. A Figura 10 mostra o mecanismo de remoção de materiais dúcteis. A variação prevista na remoção de volume com curvas de ângulo 1 e 2, valores experimentais para a curva 3 que normalizou no mesmo valor de máxima erosão²⁵.

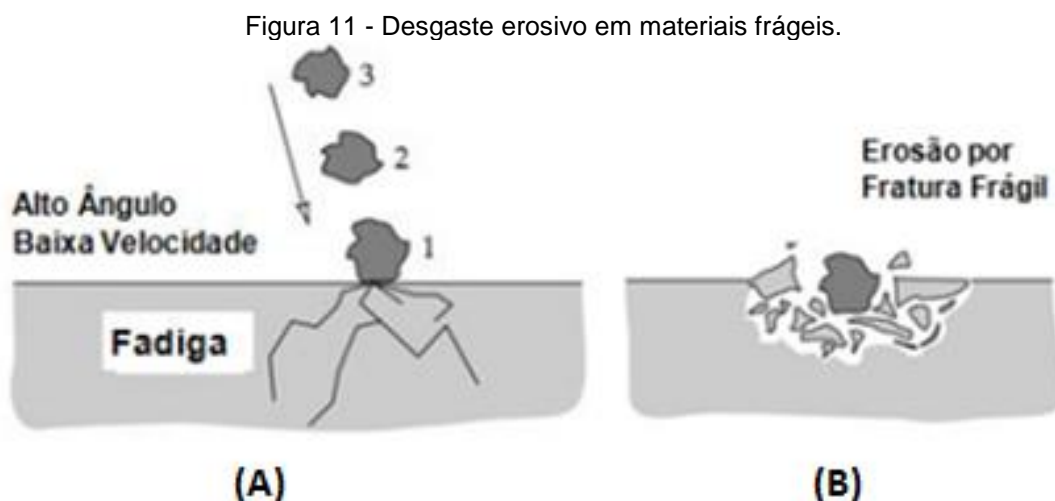
Figura 10 - Mecanismo de remoção de materiais dúcteis.



Fonte: Finnie I, 1995^{25,37}.

Na Figura 10, observa-se que, em ângulos baixos (em torno de 30°) de passagem, a partícula atinge a superfície alvo com maior poder de remoção de partículas, formando uma cratera e, em seguida, deixa a superfície representada pela curva (1). Na região da curva (2), o corte deixa o material empilhado nas laterais ou na extremidade da cratera. Este material é raspado presumivelmente com relativa facilidade, sendo removido por partículas subsequentes. Na curva (3), as partículas colidem com faces planas causando dessa forma poucos danos.

Desgaste erosivo em materiais frágeis, a incidência do erodente em baixo ângulo, facilita a reflexão destas partículas, tendo como consequência o desvio de sua trajetória. A medida que se aumenta o ângulo de incidência para algo próximo de 90°, observa-se um aumento da taxa de desgaste devido aos mecanismos de micro fadiga, os quais promovem a nucleação e propagação de micro trincas sucedidas do arrancamento de uma significativa porção do material, conhecido por lascamento. A Figura 11(A, B) ilustra em detalhes o mecanismo de desgaste erosivo predominante em materiais frágeis sob alto ângulo de incidência³⁷.



Fonte: Norton, 2013³⁷.

A Figura 10(A) observa-se que os impactos de partículas erodentes causam micros fissuras, já na Figura 10(B) representa as micros fissuras que propagam e evoluem para micro partículas que se desintegram, gerando a erosão por fratura frágil.

Propriedades de superfície das ligas metálicas são muito importantes para avaliar o correto comportamento erosivo, porém não devem ser utilizadas como os únicos critérios de seleção de materiais para aplicações em desgaste erosivo. Por exemplo, a dureza superficial é um importante parâmetro mas não deve ser utilizada como único critério de seleção de materiais para aplicações em desgaste erosivo³⁷. O mecanismo de desgaste erosivo está diretamente associado ao ângulo de incidência do erodente, ao ambiente erosivo e às propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

3.4 Carvão mineral

O carvão mineral é um combustível sólido, originado da madeira depositada pelas forças naturais em camadas no solo, onde os hidrocarbonetos foram convertidos em carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio dentro das condições ideais de pressão e temperatura³⁸.

Origem e formação do carvão sempre foram temas de estudos científicos e, mesmo, para especulações por parte de geólogos, químicos e, até, de engenheiros metalurgistas das grandes siderúrgicas em todo o mundo.

O clima, o tipo de vegetação e a área de desenvolvimento da matéria vegetal foram os fatores que deram origem às características dos carvões. Estas características dependem também das condições de deposição e das condições geológicas. A evolução do carvão a partir de matéria vegetal iniciou-se por degradação em ambiente aquático de estruturas celulares de matéria orgânica e vegetal por ação de fungos e bactérias. Embora não existam evidências concretas da conversão de um componente em outro, visto que os processos que originaram os carvões duraram milhões de anos, considera-se que os carvões pertencem a uma série de combustíveis fósseis sólidos, que começa na turfa e termina no antracito. A Tabela II mostra a composição elementar de cada combustível na sua evolução geológica³⁹.

Tabela II - Composição química da madeira e dos combustíveis fósseis sólidos.

Composição	Madeira e Combustíveis Fósseis					
	Madeira	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito	Grafite
Carbono	44-52	50-68	55-75	74-96	90-96	100
Oxigênio	43-42	35-28	26-19	20-3	3-0	0
Hidrogênio	5-6	7-5	6-9	5-1	3-1	0

Fonte: ULHÔA, 2003⁴¹.

O carvão possui altos índices de carbono, menores apenas que o antracito e a grafite. Por outro lado, tem baixo teor de oxigênio e hidrogênio quando comparado com os demais combustíveis sólidos.

A classificação do carvão não é uma tarefa simples, devido à complexidade das propriedades químicas e físicas. A multiplicidade de esquemas de classificação para os carvões tem sido propostos durante anos, segundo Bustin et al. *Apud*⁴⁰.

O carvão pode ser classificado segundo a quantidade de carbono, hidrogênio, oxigênio e poder calorífico, podendo ser linhito, sub-betuminoso, betuminoso e semi-antracito³⁸.

Em 1981, foi utilizado, nos Estados Unidos, o sistema padrão ASTM baseado na classificação de matéria volátil e no valor calorífico, desconsiderando parâmetros geológicos. A Tabela III mostra a classe e grupo do carvão, conforme limites de fixação de carbono, limites de matéria volátil, limites de valor calorífico e características de aglomeração.

O *rank* de um carvão se refere ao grau de coalificação suportado pela matéria orgânica, sendo calculado pelo conteúdo da mistura, da energia específica, da refletância da vitrinita ou da matéria volátil, estes são os parâmetros, segundo Gammidge (2001) e Correia da Silva *et al* (1987), apud⁴⁰.

Tabela III - Classificação dos carvões pelo *rank*, segundo ASTM.

Classe (rank)	Grupo	Limites de fixação do carbono (%)		Limites de matéria volátil (%)		Limites de valor colérico (Btu/libra)		Características de aglomeração
		Igual ou maior que	Menor que	Maior que	Igual ou menor que	Igual ou maior que	Menor que	
I. Antracito	Meta-antracito	98	-	-	2	-	-	Não aglomeração
	Antracito	92	98	2	8	-	-	
	Semi-antracito	86	92	8	14	-	-	
II. Betuminoso	Carvão betuminoso baixo volátil	78	86	14	22	-	-	Aglomeração comum
	Carvão betuminoso médio volátil	69	78	22	31	-	-	
	Carvão betuminoso alto volátil A	-	69	31	-	14.000	-	Aglomeração
	Carvão betuminoso alto volátil B	-	-	-	-	13.000	14.000	
	Carvão betuminoso alto volátil C	-	-	-	-	11.500	13.000	
						10.500	11.500	
III. Sub-betuminoso	Carvão sub-betuminoso A	-	-	-	-	10.500	11.500	Não aglomeração
	Carvão sub-betuminoso B	-	-	-	-	9.500	10.500	
	Carvão sub-betuminoso C	-	-	-	-	8.300	9.500	
IV. Linhito	Linhito A	-	-	-	-	6.300	8.300	Não aglomeração
	Linhito B	-	-	-	-	-	6.300	

Fonte: ASTM, 1981. Apud⁴⁰.

O carvão ROM, minerado em Candiota, encontra-se disposto em dois bancos de carvão, com espessura aproximada de 2 metros em cada camada, separados por uma camada de argilito de 80 centímetros de espessura, que é considerada de possível separação.

Segundo Pacheco (2008)⁴⁰, podemos tecnicamente caracterizar o carvão ROM de Candiota com: teor de cinzas na ordem de 50% para a camada superior e 52% para a camada inferior, o teor de enxofre total de aproximadamente 2,0%, sendo que menos de 0,9% corresponde a enxofre orgânico. O enxofre sulfático apresenta valores abaixo de 0,3% e a classificação segundo o *rank*, Tabela III, de acordo como os resultados, é sub-betuminoso C⁴⁰.

Estudos realizados com o carvão de Candiota mostram que os parâmetros das análises químicas e petrológicas estão em níveis perfeitamente aceitáveis para a geração de energia térmica⁴².

3.5 Cinza Volante

A produção de cinzas na caldeira, em geral, depende da produção de energia elétrica no turbogerador, do consumo específico da unidade geradora de vapor e do teor de cinza do carvão³⁸.

A combustão pulverizada produz dois tipos característicos de cinzas chamadas de volante e pesada. A cinza volante, após a combustão, é conduzida através do fluxo de gases de exaustão até os filtros eletrostáticos, conhecidos também como precipitadores eletrostáticos. A cinza pesada, após a combustão, tem sua precipitação sobre a bacia de extração úmida ou cinzeiro da caldeira, sendo recolhida através de arraste por réguas.

Aproximadamente 15% das cinzas produzida são retiradas da fornalha pela via úmida, cinza pesada. O restante, cerca de 84,9%, é retirado pelos precipitadores eletrostáticos, via seca. O restante é conduzido à atmosfera através dos gases de exaustão, e esses percentuais dependem da eficiência dos equipamentos do processo.

A erosão por cinza volante é um dos mecanismos de falha mais relevante nas caldeiras que utilizam o carvão de Candiota, pois contribui de forma significativa para diminuição de disponibilidade do gerador de vapor no processo de geração de energia elétrica através da utilização de carvão mineral e, o Economizador 1, é o componente sob pressão da caldeira mais afetado pelo efeito erosivo da cinza volante.

A erosão tem impacto em equipamentos como: o trocador de ar rotativo, o precipitador eletrostático, os ventiladores centrífugos de grande porte, os dutos de condução carvão pulverizado, como os queimadores de carvão, os dutos de condução de gases de exaustão, entre outros, porém com menor impacto na disponibilidade da unidade geradora.

O carvão mineral normalmente vem associado a um percentual de cinza volante, e, conforme o percentual resultante do processo de combustão do carvão mineral, o processo de erosão pode ser mais ou menos significativo em uma usina ou componentes expostos ao fluxo de gás e cinza.

A CIENTEC⁴³ analisou, através da técnica de fluorescência de raios x, a composição química das cinzas volantes provenientes da queima do carvão nas caldeiras, os resultados estão registrados na Tabela IV.

Tabela IV - Análise de composição química do cinza volante.

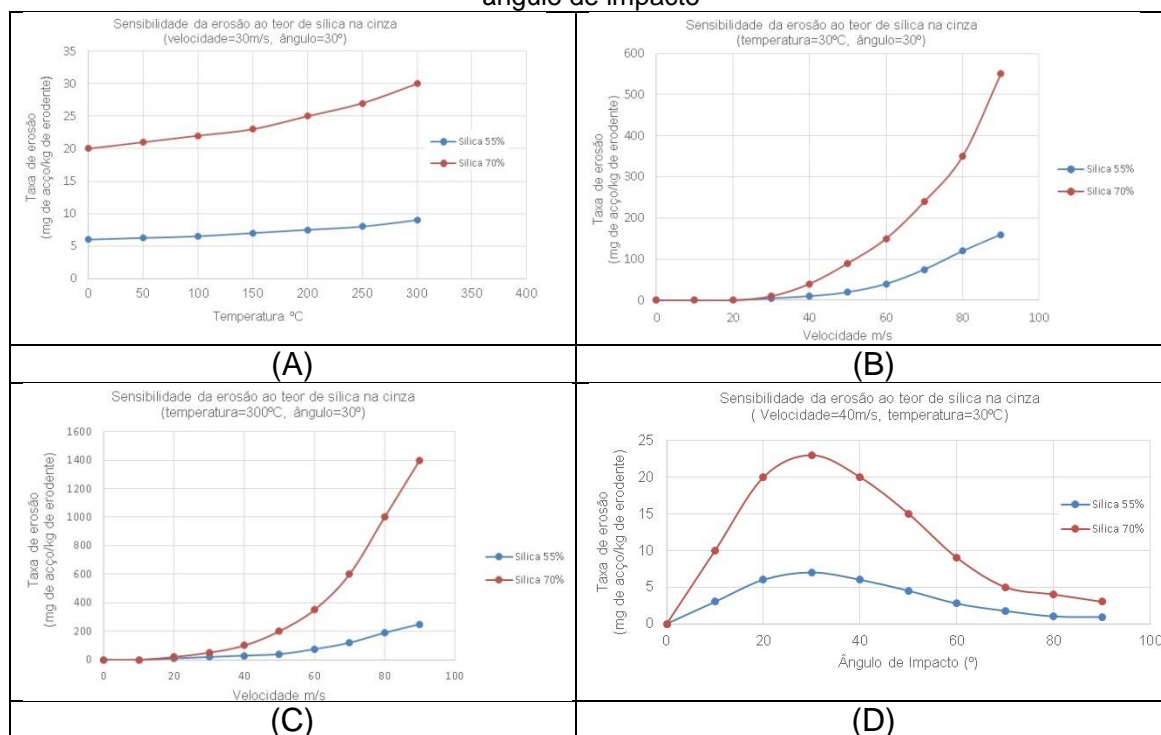
		Composição química da cinza volante												
		dez/02	jan/03	fev/03	mar/03	abr/03	mai/03	jun/03	ju/03	ago/03	set/03	out/03	nov/03	MÉDIA
Óxido de Silício	% SiO ₂	66,00	66,00	68,00	66,00	66,00	66,00	65,00	66,80	68,00	65,30	67,50	65,50	66,34
Óxido de Alumínio	% Al ₂ O ₃	20,40	20,80	19,70	21,10	20,10	20,60	19,40	20,30	18,80	20,40	19,80	19,80	20,10
Óxido de Ferro	% F ₂ O ₃	6,20	6,50	5,71	7,72	6,07	6,78	5,75	5,77	6,61	5,66	5,46	5,78	6,17
Óxido de Titânio	% TiO ₂	0,60	0,60	0,64	0,68	0,69	0,68	0,67	0,63	0,70	0,65	0,61	0,64	0,65
Pentóxido de Fósforo	% P ₂ O ₅	< 0,1	< 0,1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08
Óxido de Cálcio	% CaO	2,00	1,80	1,80	1,10	2,20	1,20	3,19	1,31	1,03	2,25	1,20	2,03	1,76
Óxido de Magnésio	% MgO	0,70	0,60	0,65	0,63	0,65	0,62	0,65	0,65	0,56	0,69	0,66	0,67	0,64
Óxido de Sódio	% Na ₂ O	0,18	0,16	0,06	0,04	0,08	0,08	0,14	0,10	0,09	0,10	0,10	0,14	0,11
Óxido de Potássio	% K ₂ O	1,80	1,80	1,75	1,87	1,80	1,83	1,75	1,88	1,79	1,83	1,76	1,76	1,80
Óxido de Enxofre	% SO ₃	1,00	0,90	0,95	0,50	1,17	0,57	1,84	0,94	0,72	1,72	0,94	1,65	1,08

Fonte: CIENTEC, 2003⁴³.

Através desta Tabela IV, pode-se perceber que os óxidos de silício e de alumínio estão presentes de forma considerável em média 86,44% da composição da cinza volante. Os óxidos de ferro, cálcio e potássio tem valores consideráveis, porém menos representativos.

A Figura 12 (A,B,C,D) representa a taxa de erosão em função da variação do percentual de sílica em condições análogas de velocidade, ângulo de incidência e temperatura¹.

Figura 12 – Taxa de erosão em função da temperatura, velocidade, composição química e ângulo de impacto



Fonte: Adaptado de S.K. Das, 2008¹.

A Figura 12 (A) ilustra as variações das taxas de erosão em função da temperatura, com velocidade de impacto das partículas de 30 m/s e ângulo de incidência de 30°, o material alvo é aço carbono. O percentual de partículas de sílica nas cinzas é de 55% e 70% na Figura 12 (A). Os resultados de taxa de erosão aumentam com a temperatura. A uma temperatura de 300°C, observa-se que a taxa de erosão é de 31mg/kg para 70% de teor de sílica, significativamente, maior em comparação com o teor de sílica de 55% na cinza, 9mg/kg. Um aumento de cerca de 15% do teor de sílica nas cinzas tem uma parcela importante no incremento sobre a taxa de erosão, que aumentou mais de 200% sob condições idênticas de impacto das partículas¹.

Já a Figura 12 (B) mostra as taxas de erosão em função da velocidade partícula para uma liga de aço carbono, com ângulo de impacto de 30°, temperatura ambiente de 30°C e teores de sílica de 55% e 70%, respectivamente. Observa-se que a taxa de erosão é de cerca de 47 mg/kg para percentual de 70% de sílica, em comparação com o teor de sílica de 55%, onde a taxa de erosão é de 14mg/kg, a uma velocidade de impacto 40 m/s. Com um incremento de aproximadamente 15% no teor de sílica da cinza tem-se um impacto significativo sobre a taxa de erosão, aumentando 235%, aproximadamente, sob condições de impacto de partículas semelhantes. Ainda podemos observar que ambos os números de taxa de erosão retratam uma relação linear com baixas velocidades de impacto e aumenta a uma taxa mais rápida para valores mais elevados.

A Figura 12 (C) mostra as taxas de erosão em função da velocidade da partícula com teor de sílica de 55% e 70%, respectivamente, para o aço de carbono com ângulo de impacto 30° a temperatura de 300°C. Observamos que a taxa de erosão, quando o percentual de sílica é de 70% presente na cinza volante, é de cerca de 74 mg/kg, em comparação com o teor de sílica de 55%, onde a taxa de erosão é 22 mg/kg de erodente a uma velocidade de impacto de 40m/s. Demonstrando que um aumento de cerca de 15% no teor de sílica da cinza tem um impacto significativo sobre a taxa de erosão, que aumentou em mais de 200% sob partículas semelhantes nas condições de impacto.

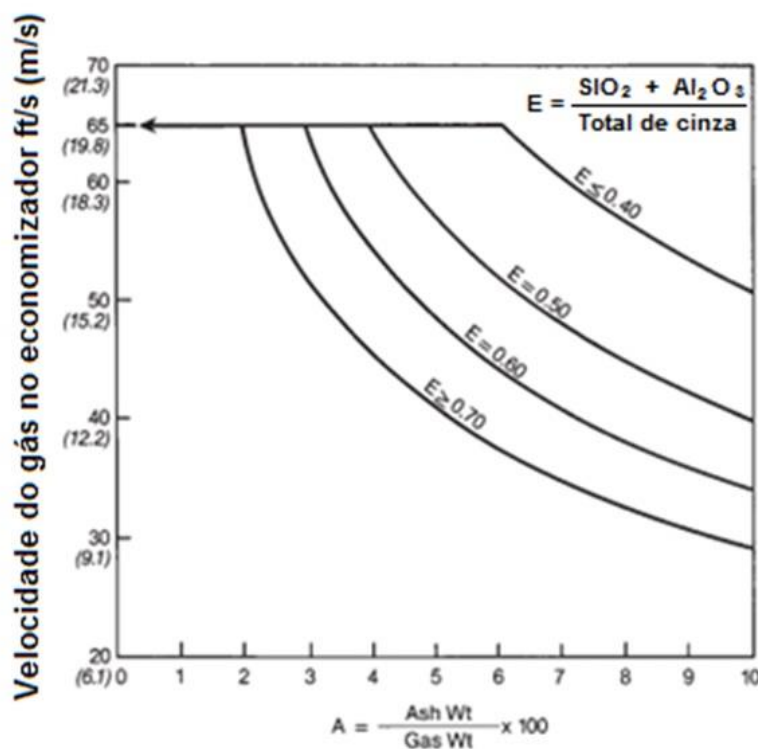
A Figura 12 (D) mostra a taxa de erosão em função do ângulo de impacto com teor de sílica de 55% e 70% na Figura 12 (D) nas cinzas volantes, respectivamente, para o aço de liga 1.25Cr-1Mo-V, com uma velocidade de

impacto de partículas de 40 m/s e a temperatura ambiente. Para 70% de teor de sílica, é cerca de 23 mg/kg comparando com o teor de sílica de 55%, onde a taxa de erosão de 7 mg/kg a um ângulo de impacto de 30°. Um aumento de cerca de 15% do teor de sílica de cinzas tem um significativo impacto sobre a taxa de erosão, que aumentou mais de 200% em condições de impacto de partículas semelhantes.

O ábaco do gráfico da Figura 13 a seguir mostra a velocidade máxima recomendada conforme os percentuais de óxido de silício e óxido de alumínio⁴⁴.

A taxa de erosão de determinados componentes da caldeira é estimada a partir da definição dos percentuais de abrasivos, sílica e alumina, presentes no particulado dos gases de exaustão e, a partir desses dados, define-se a velocidade limite de trabalho. Sendo assim, parte-se da premissa de que não se podem controlar as características do combustível fóssil, porque não será possível diminuir a quantidade de cinza do mesmo. Assim, a velocidade deverá respeitar um limite, que precisará ser menor quanto maior for à presença de componentes abrasivos constituintes dos gases de exaustão⁴⁴.

Figura 13 - Velocidade máxima para economizadores caldeiras a carvão pulverizado.



Fonte: Adaptado Babcock & Wilcox Company⁴⁴.

Ao analisar o gráfico da Figura 13, percebemos que, considerando o somatório de óxido de silício e óxido de alumínio, estaremos limitando a velocidade do gás no economizador em aproximadamente 12 m/s, a fim de evitar erosão-corrosão.

Um pequeno aumento no nível de sílica na cinza pode agravar consideravelmente as taxas de erosão. Isso é indicativo que a sílica nas cinzas desempenha um papel vital na avaliação do potencial de erosão de cinzas volantes¹.

4 Metodologia

O estudo foi fundamentado na comparação entre ligas metálicas, com a finalidade de verificar quais apresentaram maior resistência ao efeito de erosão por cinza volante.

Utilizaram-se técnicas de caracterização, necessárias para identificar a composição química do material erodente, a cinza volante.

O trabalho utiliza dois modos de análise que são denominados da seguinte forma: ALCP e ALTB.

Na etapa ALCP, os corpos de provas foram instalados no interior da própria caldeira, especificamente, no Economizador I onde foram ensaiados nas condições reais de processo, durante os meses de janeiro de 2014 a maio de 2015.

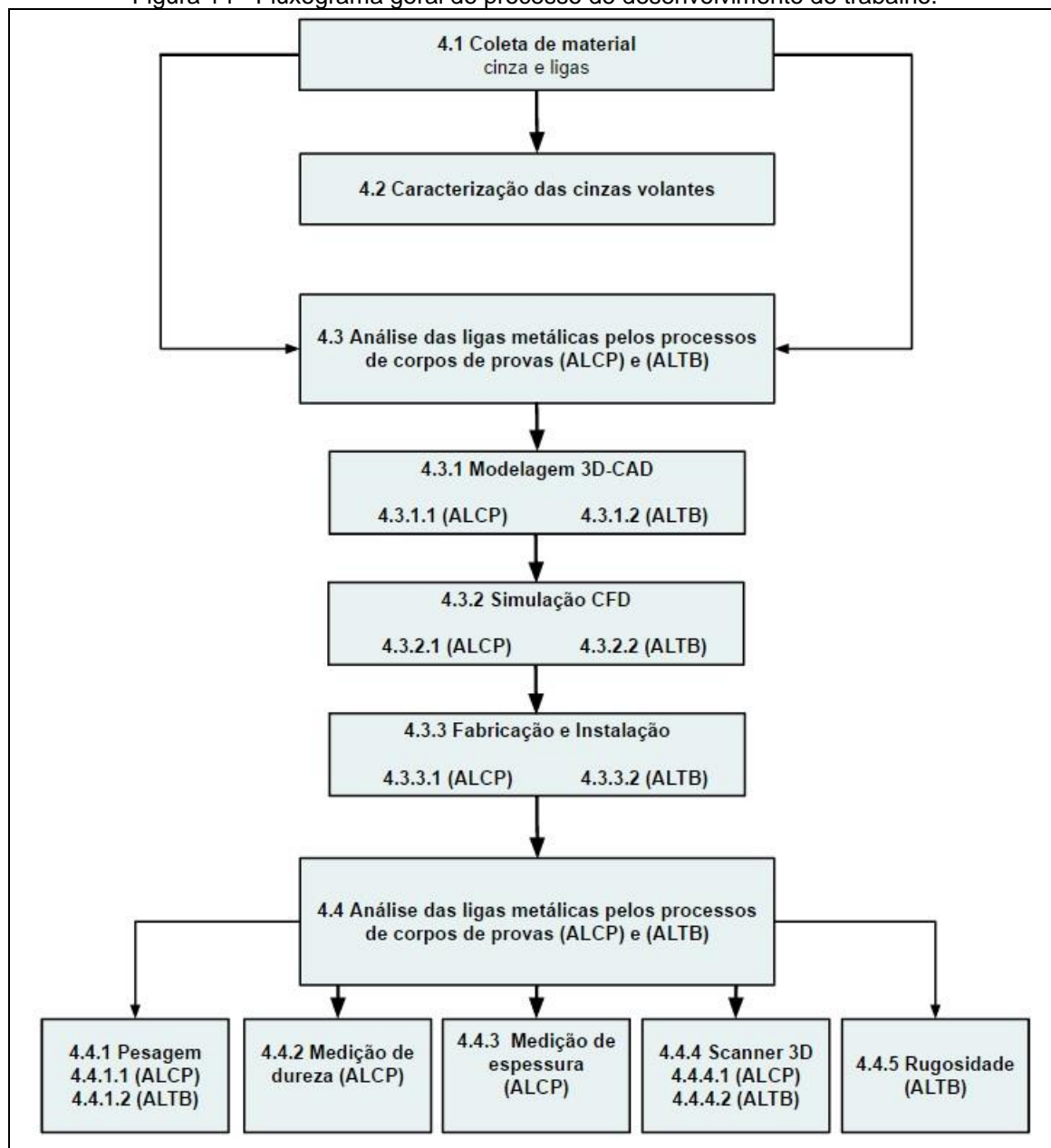
Já a etapa ALTB caracterizou-se por construir uma bancada de teste, fundamentada nas condições e especificações da ASTM G76-95⁴⁵.

As ligas metálicas aplicadas tanto nos testes ALCP quanto nos de ALTB, são idênticas às aplicadas nas caldeiras, como por exemplo, as ligas, a ASTM A210C³ e a ASTM A106B⁴ que são, normalmente, encontradas nos Economizadores.

As demais ligas analisadas são as utilizadas em locais mais críticos da caldeira onde a temperatura considerada é significativa, como: ASTM A213 T11², ASTM A213 T22² e ASTM A213 T91².

A Figura 14 mostra o fluxograma geral do processo de desenvolvimento do trabalho.

Figura 14 - Fluxograma geral do processo de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor, 2014.

A seguir, será desenvolvido o processo metodológico aplicado a cada etapa.

4.1 Coleta de material – Cinza volante e Ligas metálicas

A ELT-CGTEE disponibilizou 10 segmentos de tubos de 1.500 mm de comprimento, sendo dois modelos idênticos de cada liga metálica para serem analisadas, nos testes de ALCP.

Para os testes de ALTB foram disponibilizados 4 segmentos de tubos de 100 mm de comprimento, um de cada liga metálica. As cinzas volantes foram coletadas (20 kg) no dia 18 de agosto de 2014.

4.2 Caracterização das Cinzas Volantes

A técnica de DRX é usada para análises de estruturas cristalinas. É importante para caracterização de materiais lamelares, possibilitando determinar as posições relativas dos átomos existentes na rede cristalina de um sólido e assim determinar a cristalinidade, estrutura e distância interplanar dos materiais. É possível também, acompanhar a variação da distância basal quando o material sofre alguma reação, troca iônica, intercalação ou modificação química⁴⁶.

Os difratogramas foram obtidos com geometria focalizante de Bragg-Brentano ($\theta/2\theta$)⁴⁷ utilizando um equipamento da marca Rigaku modelo ULTIMA IV. A potência no tubo de raio x foi de 40 kV e 20 mA, com passo de 0,02°, no intervalo angular de 5° a 90°, e tempo de integração de 2 segundos por ponto. O material medido foi acondicionado sobre uma lâmina de vidro com uma cavidade de 0,5 mm de profundidade e área de 1,5 x 1,5 mm. Para identificação das fases cristalinas e aplicação do método RIR (*reference intensity ratio method*)⁴⁸ para análise semi-quantitativa, usou-se o programa comercial PDXL.

4.3 Análise das Ligas Metálicas pelos Processos de ALCP e ALTB

Na análise dos tubos por ALCP avaliou-se a erosão nas ligas metálicas que foram submetidas às condições reais do processo de operação no interior da caldeira.

Nesta etapa, primeiramente, identificou-se os locais de maior abrasividade, no segundo momento desenvolveu-se uma estrutura com a finalidade de servir de sustentação das amostras com dimensões apropriadas para permitir o acesso fácil para instalação e também para a retirada dos tubos. Os processos de retirada e instalação foram realizados durante as curtas paradas da caldeira que ocorrem sem prazo determinado para manutenção.

Durante os períodos de retirada do material do interior da Caldeira (Economizador I), foram feitos os seguintes testes nos tubos: pesagem medição de dureza e ultrassom. Deve-se salientar o uso do scanner 3D, conforme Item 4.4.4, que ocorreu no período que antecede a colocação dos tubos no Economizador e na retirada final, em função, do tempo elevado em realizar a digitalização de cada peça.

Os dados operacionais da caldeira foram monitorados durante todo o período onde se avaliaram o consumo de carvão e a vazão de ar total.

Já para as ligas submetidas às condições ALTB os tubos das ligas metálicas ASTM A106B, ASTM A213 T11, ASTM A213 T22 e ASTM A213 T91 foram submetidos a ensaios de desgaste erosivo acelerado com o objetivo de avaliar a resistência à erosão, possibilitando a comparação com a resistência ao desgaste do material atualmente empregado.

Neste processo utilizou-se como referência a norma ASTM G76 - 95, “*Standart Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets*”⁴⁵, e, através desta, desenvolveu-se o equipamento necessário para o teste, bem como, prepararam-se os corpos de prova. Em síntese, a norma descreve um método padrão para a realização de ensaios de erosão por partículas sólidas usando um gás de arraste.

Através deste método, pode-se classificar quais os materiais mais resistentes à erosão sob condições específicas de testes, calculando a taxa de desgaste erosivo a partir das equações 1 e 2:

$$T_v = \frac{m_i - m_f}{m_e \times \rho_{ap}} \quad \dots(1)$$

$$T_m = \frac{m_i - m_f}{m_e} \quad \dots(2)$$

Onde, T_v é a taxa de erosão volumétrica (cm^3/g); T_m é a taxa de erosão mássica ($\text{mg metal/kg de erodente}$); m_i é a massa inicial da amostra (mg); m_f é a massa final da amostra (mg); ρ_{ap} densidade do revestimento (g/cm^3) e m_e massa de erodente (kg).

Na Equação (1), o valor da erosão é a perda de volume de material da amostra dividida pela massa total de partículas abrasivas que atingem o CP ($\text{mm}^3.\text{g}^{-1}$).

Na Equação (2), o valor da erosão é a perda de massa de material da amostra dividida pela massa total de partículas abrasivas que estão impactando no CP (mg.kg^{-1}).

No processo de ALTB foram realizados ensaios de desgaste erosivo acelerado com o objetivo de avaliar a resistência à erosão dos diferentes tipos de materiais, objetivando a comparação das amostras de materiais em ângulos de incidência e quantidade de material erodente.

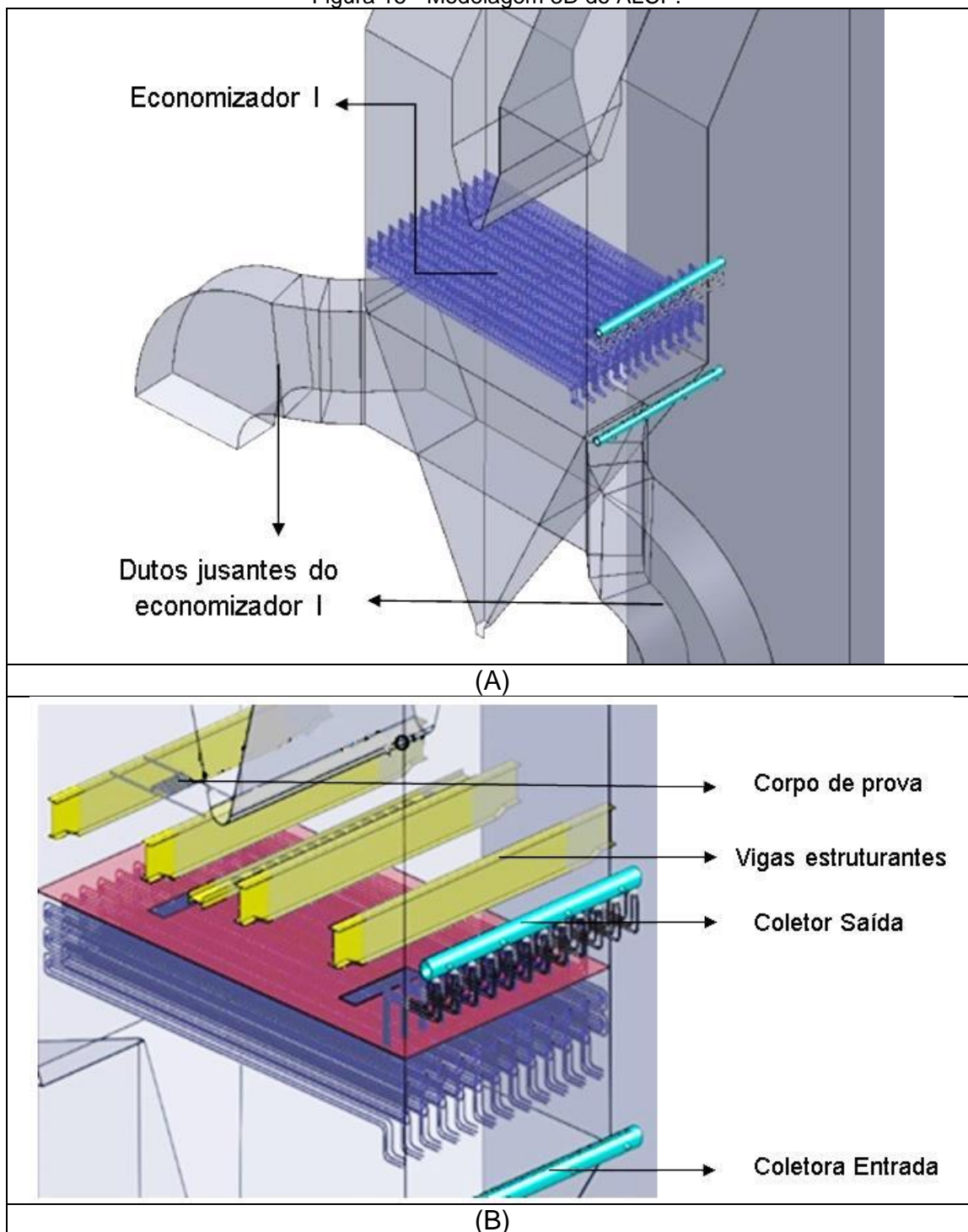
4.3.1 Modelagem Computacional em 3D CAD

4.3.1.1 Modelagem Computacional em 3D CAD – ALCP

O processo experimental iniciou pela modelagem tridimensional dos dutos e do banco de serpentinas do Economizador da Caldeira, através da representação gráfica em *software* de Desenho Assistido por Computador (CAD) denominado *Solidworks Versão 2010*.

A Figura 15(A) mostra o banco de serpentinas do Economizador envolvido pelo duto de condução de gases, em transparência. O banco de serpentinas é constituído de um conjunto de 56 serpentinas paralelas. Uma serpentina é representada na Figura 4, com 18 tubos horizontais empilhados na direção vertical. Cada tubo possui um diâmetro externo de 38 mm e comprimento de 10.840 mm. Deve-se ressaltar que todos esses conjuntos foram modelados de maneira fiel em relação a sua geometria de acordo com a Figura 3, também foram representados os elementos estruturais como vigas. Na Figura 15(B) estão representados os suportes dos bancos de serpentinas, em amarelo através das vigas estruturais além do coletor de saída e de entrada nesta mesma figura observa-se o local de instalação dos CP.

Figura 15 - Modelagem 3D do ALCP.

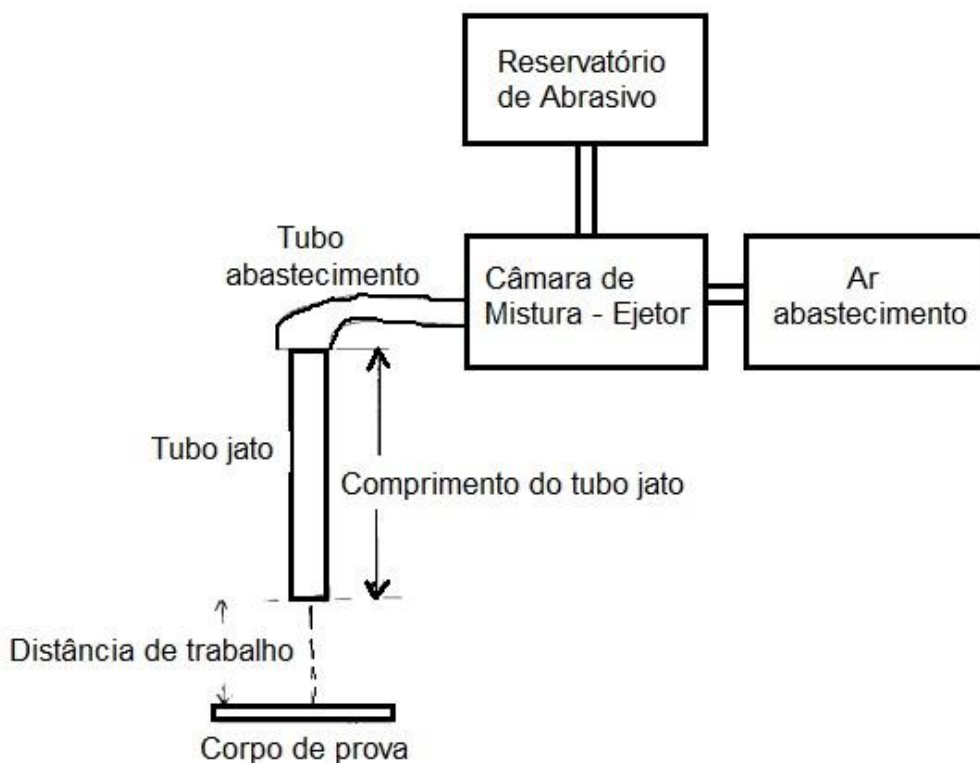


Fonte: Autor, 2013³⁰.

4.3.1.2. Modelagem Computacional em 3D CAD – ALTB

Na construção do equipamento utilizado para o teste de bancada, foi necessário manter requisitos da Norma ASTM G76-95⁵, conforme desenho esquemático encontrado na Figura 16.

Figura 16 - Desenho esquemático de equipamento de erosão de partículas sólidas.



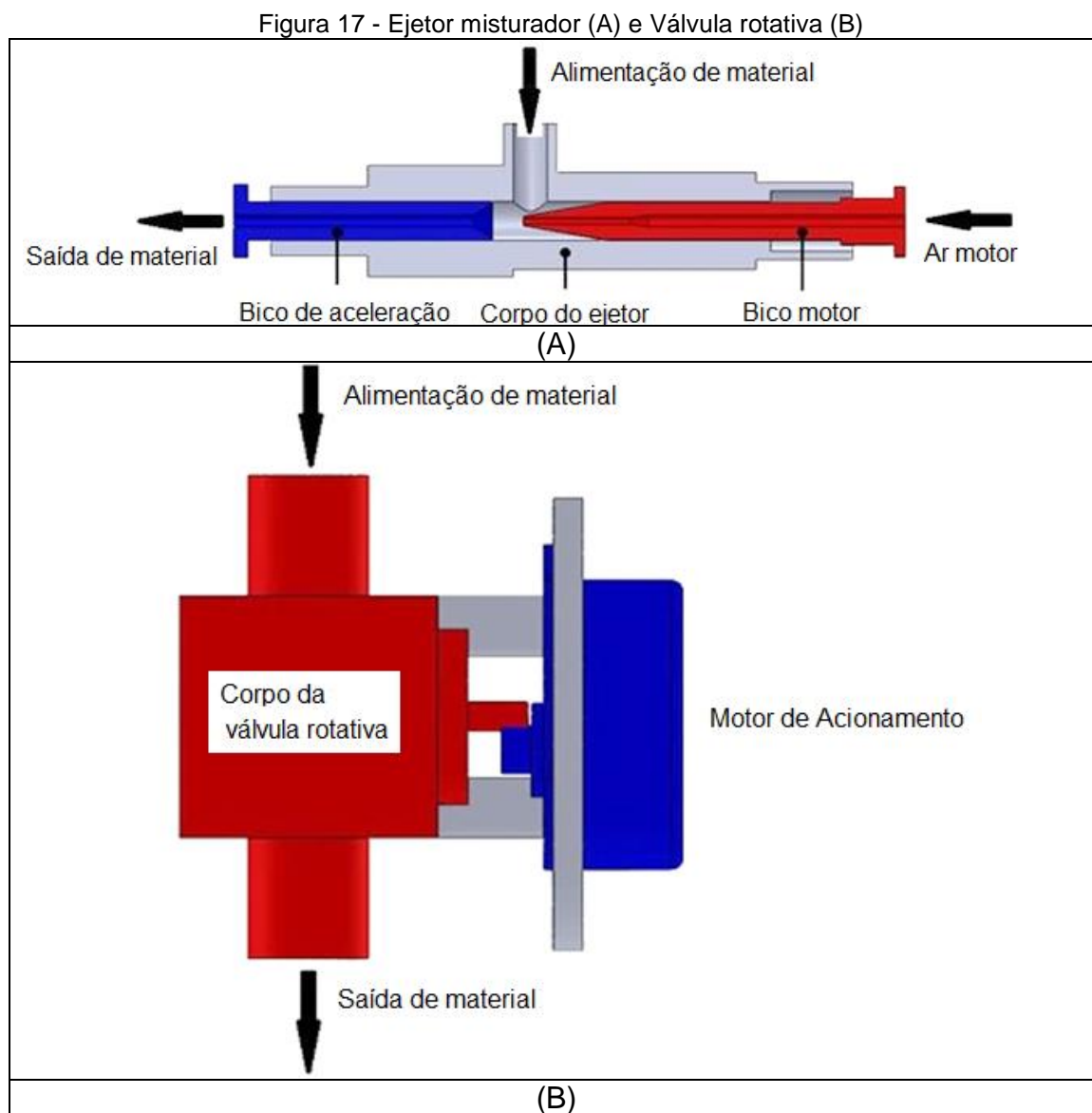
Fonte: Adaptado ASTM G76-95⁴⁵.

O desenho esquemático da Figura 16 mostra os principais componentes da bancada de testes, o tubo jato constituído em aço SAE 1045 e usinado com 50 mm de comprimento, após sofreu tratamento por têmpera, a câmara de mistura foi concebida em aço inox AISI 304. A distância de trabalho utilizada foi de 10 mm que foi padrão para todos os testes. O ar de abastecimento foi gerado através de compressor de pistão e a estrutura em geral foi construída em aço carbono SAE 1020.

A Figura 17(A) ilustra o bocal de jateamento, denominado de ejetor misturador que consiste do corpo do ejetor, do bico motor ajustável, de um canal de alimentação de material erodente onde na sua saída existe um bico de aceleração.

A função principal do bico motor é disponibilizar o gás, necessário para transportar o material erodente, succionando-o do canal de alimentação, que após projetará o gás e a cinza volante através do bico de aceleração. O bico de aceleração é projetado para equalizar a vazão e a turbulência no canal, obtendo um fluxo homogêneo. Já a Figura 17(B) apresenta a válvula rotativa, com a função de manter um fluxo de material erodente continuado e

equalizado, sem flutuação de quantidade, a ser instalada a montante do canal de alimentação da Figura 17(A).



Fonte: Autor, 2014.

4.3.2 Simulação CFD

A técnica *Computational Fluid Dynamics* (CFD) alia os recursos encontrados no ambiente (CAD) com análises da dinâmica dos fluídos computacional, denominada de fluidodinâmica computacional ou dinâmica dos fluídos computacional encontradas no ambiente (CAE) desses softwares de simulação. A tecnologia (CFD) é descrita de maneira generalizada como a simulação numérica dos processos físicos e ou físico-químicos que apresentam escoamento. A predição dos campos velocidades, pressão, temperaturas e

propriedades turbulentas, é efetuada através de modelos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento⁵⁰.

Os resultados das análises de CFD foram utilizados para aumentar a transferência de calor em projeto de diferentes tipos de Economizador⁴⁹. Também serve para localizar picos de velocidade na região do Economizador. Em seu estudo, Patel et al.(2014)⁵⁰ detectou que a magnitude da velocidade é mais baixa para as curvas a jusante do que as curvas a montante do economizador e definiu que as proteções metálicas são úteis para reduzir os picos de velocidade, e, portanto, úteis na redução da taxa de erosão.

Sendo assim, a análise CFD realizada no Economizador para o processo ALCP é útil para se ter uma visão da distribuição do fluxo de gás. Os esforços são feitos para medir a velocidade e distribuição de pressão de gases de combustão nas curvas das serpentinas do Economizador e será útil para encontrar o efeito do parâmetro de funcionamento na taxa de erosão, velocidade e distribuição de pressão no interior do Economizador. Para Deendayal et al. (2010)⁵¹ o CFD evoluiu como uma importante ferramenta para modelagem de Caldeiras a carvão e é útil para quantificar o fluxo de gás de combustão e temperatura de distribuição no Economizador da caldeira.

Já, para o processo ALTB o CFD auxiliou na determinação dos parâmetros de testes, como velocidade e pressão, possibilitando os ajustes necessários durante os testes de erosão.

O *SolidWorks Flow Simulation* é uma ferramenta CFD que utiliza como princípio a conservação da massa, trabalha com volume finito, em regiões de fluidos. *SolidWorks Flow Simulation* resolve as equações de Navier-Stokes, que são formulações de leis massa, momento e de conservação de energia⁵².

Observou-se que o *software* não disponibiliza as equações de Navier-Stokes utilizadas na concepção das simulações, constituindo em segredo industrial.

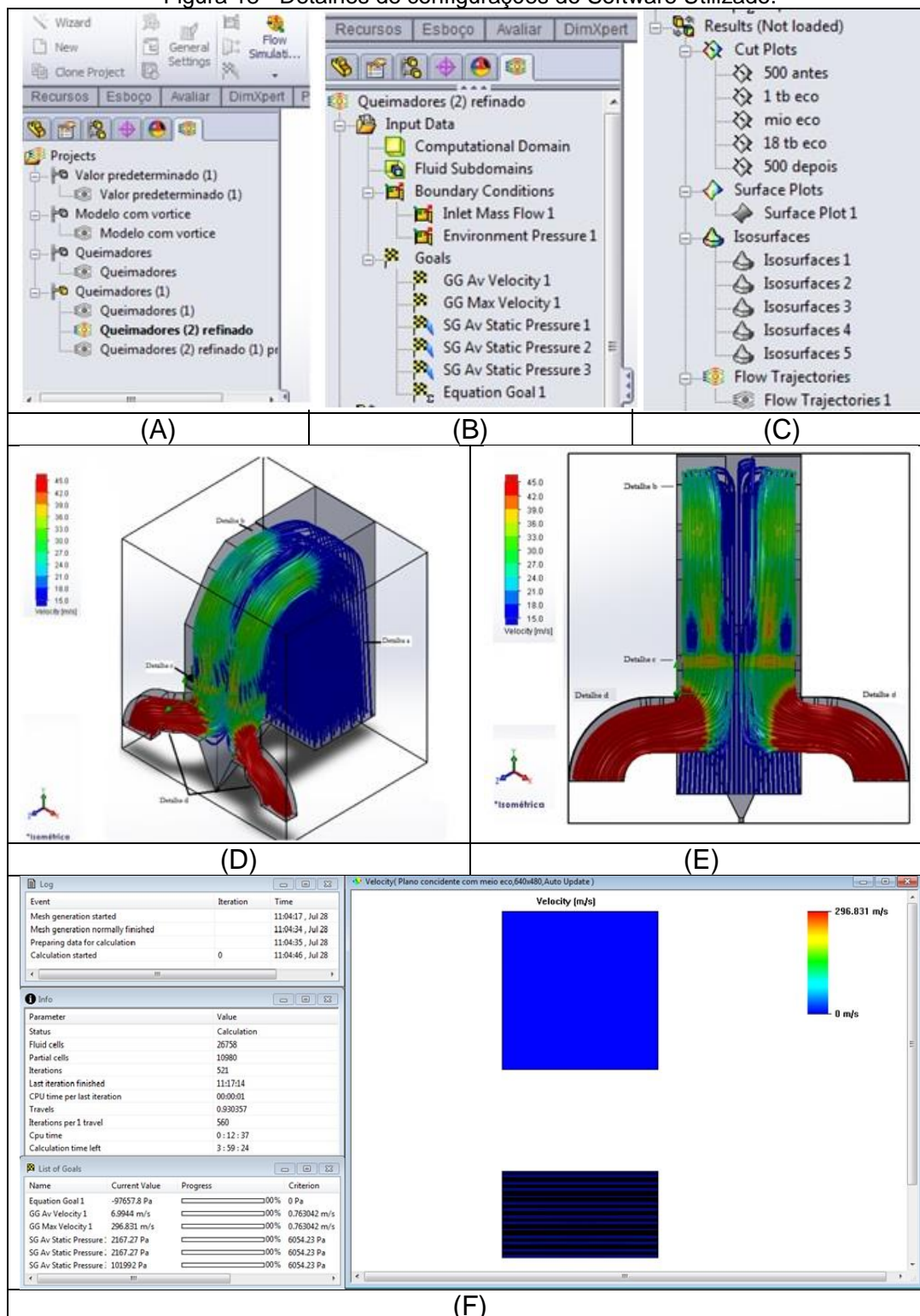
4.3.2.1 Simulação CFD – ALCP

A análise de CFD desta etapa do trabalho serviu para localizar os locais de mais altas velocidades, e assim, posicionar os corpos de prova nas condições mais severas encontradas no interior da caldeira.

Utilizou-se o módulo de simulação dinâmica de fluido computacional (CFD) denominado *Flow Simulation* aplicativo do Solidworks versão 2010 para avaliar o comportamento da velocidade dos gases de exaustão, especificamente, no interior dos dutos. Os dados de entrada necessários para a realização da simulação foram obtidos a partir da operação do sistema de exaustão e, através, do balanço de massa. Dessa forma, utilizou-se a vazão de gás de exaustão de 273,8 kg/s e pressão estática 221 mm CA.

A Figura 18(A) mostra o menu de projetos onde, inicialmente, efetuaram-se as simulações com um modelo mais simples, comparando-se os valores de entrada e saída, diminuindo o tempo de processamento nas primeiras análises do modelo. Após concluirmos a convergência desses modelos partiu-se para outro mais refinado, com malhas mais adaptadas. Na Figura 18(B), encontram-se os dados do processo que envolve a seleção dos gases, vazão de massa de entrada, pressão no sistema, seleção dos dados de saída. Na Figura 18 (C) selecionam-se os resultados desejados, para, dessa forma, obter cortes, iso-superfícies, superfícies e trajetória de fluxo, conforme os resultados obtidos neste processo, utiliza-se a trajetória de fluxo e corte que representa a velocidade, Figura 18 (D) e 18 (E). A Figura 18 (F) apresenta uma das simulações, ou seja, fornece diversas informações como: número de células do fluido, CPU, interações e percentual de metas atingida no momento. O estudo proposto teve um tempo de processamento de 22 horas e 34 minutos, tempo considerado altamente dependente do *hardware* utilizado, como por exemplo, o processador Intel 7, 8 *Gigabytes* de memória RAM e 2 *Gigabytes* de placa de vídeo dedicada.

Figura 18 - Detalhes de configurações do Software Utilizado.



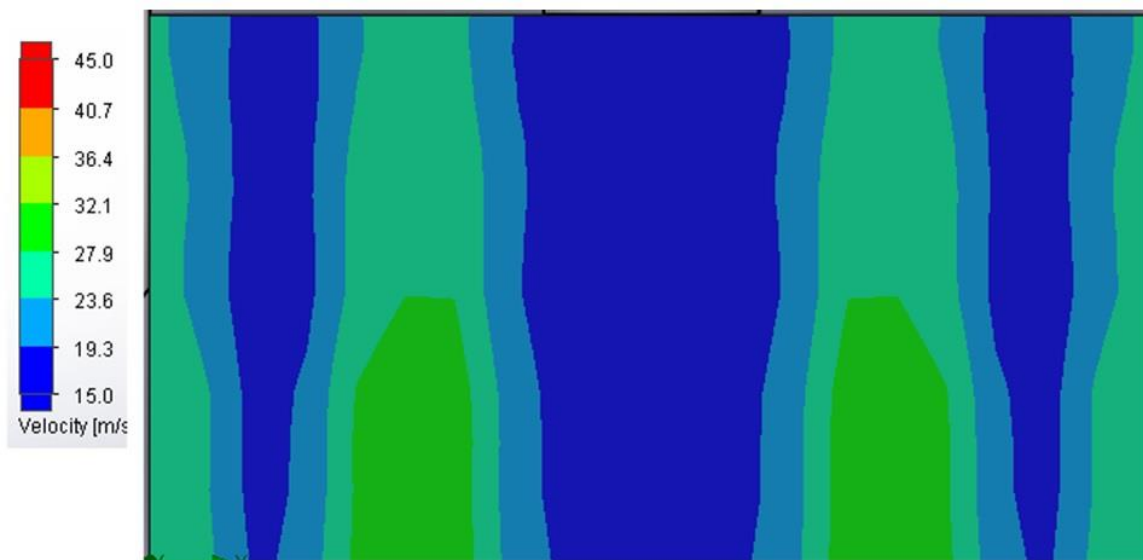
Fonte: Autor, 2013³⁰

Para auxiliar na validação do procedimento de análise computacional compararam-se os resultados obtidos na simulação com os encontrados por outros autores que estudam o comportamento desses equipamentos em

condições análogas e também por inspeções realizadas nos equipamentos da própria caldeira, conforme já explicitado no item 3.6.

Na Figura 19, representam-se os resultados de velocidades em corte transversal ao fluxo de gases de exaustão, região do Detalhe C da Figura 18 (E), 500 mm acima do Economizador, onde em azul, representa-se a menor velocidade obtida e, em vermelho, a maior velocidade durante a simulação. No mapa a região de mais alta velocidade para região foi no intervalo de 27,9 m/s a 32,1 m/s. Identifica-se a área de maior taxa de abrasão por cinza volante, conforme Figura 19, velocidade na ordem de 32 m/s que conforme foi informado na revisão de literatura ocorrerão falhas de 10.000 a 50.000 horas de operação.

Figura 19 - Resultado da simulação no *SolidWorks Flow Simulation*.



Fonte: Autor, 2013³⁰.

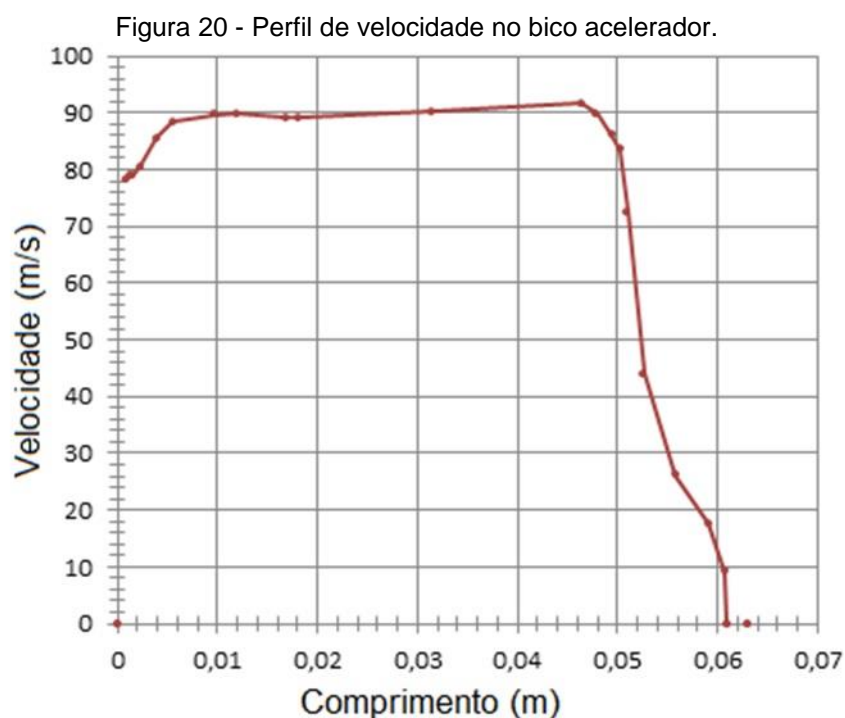
4.3.2.2 Simulação CFD – ALTB

Para conhecer melhor os parâmetros e assim posicionar os corpos de prova nas condições desejadas de velocidade e pressão, submeteram-se os desenhos elaborados em CAD com análises da dinâmica dos fluídos computacionais, CFD.

Da mesma forma que no item anterior utilizou-se novamente o módulo de simulação dinâmica de fluídos computacional, denominado *Flow Simulation* aplicativo do Solidworks versão 2010.

Os dados de entrada necessários para a realização da simulação foram a vazão de gás que foi de 8 l/min e pressão estática 2,5 kg/cm². O estudo proposto teve um tempo de processamento de 4 horas e 4 minutos.

O gráfico da Figura 20 mostra o perfil de velocidade no bico acelerador.



Fonte: Autor, 2014.

Ao analisarmos a Figura 20 percebe-se que, a partir do comprimento 0,01m até 0,045m ocorre à estabilização da velocidade, que após, sofre uma desaceleração brusca de velocidade devido à saída do bico acelerador.

4.3.3 Fabricação e instalação das estruturas de suporte e ensaio

4.3.3.1 Fabricação e instalação – ALCP

Para a realização desta etapa foram confeccionados 10 tubos de 1.500mm de comprimento, constituídos de liga de aço como: ASTM A106 Grau B⁴, ASTM A213 T91², ASTM A 213 T22², ASTM 213 T11² e ASTM A210C³, sendo 2 tubos de cada liga metálica.

A Figura 21(A) mostra o conjunto de CP e as diferentes colorações são indicativas do material aplicado, apenas para representar a posição no desenho. Além disso, os CP foram fabricados de maneira a permitir a fácil

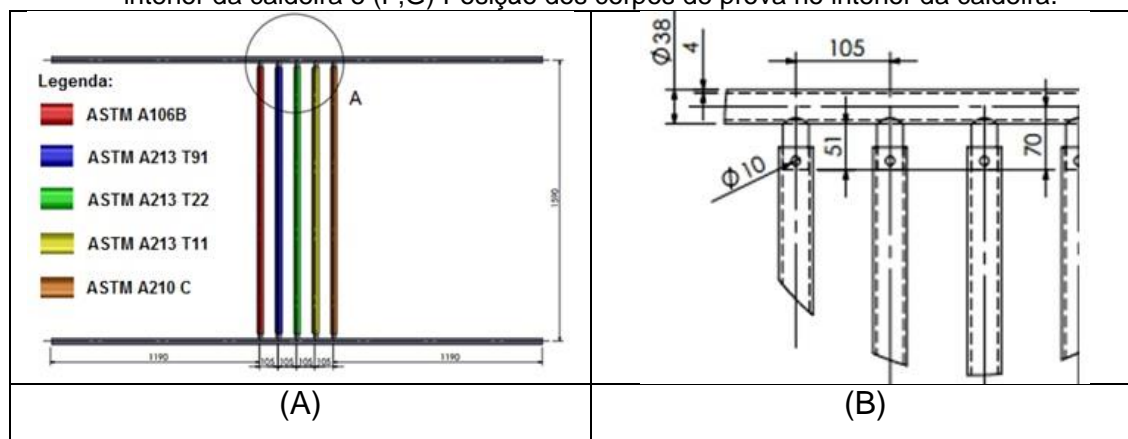
remoção e instalação, devido aos curtos períodos em que existe a disponibilidade para realização dos ensaios necessários ao acompanhamento do processo erosivo.

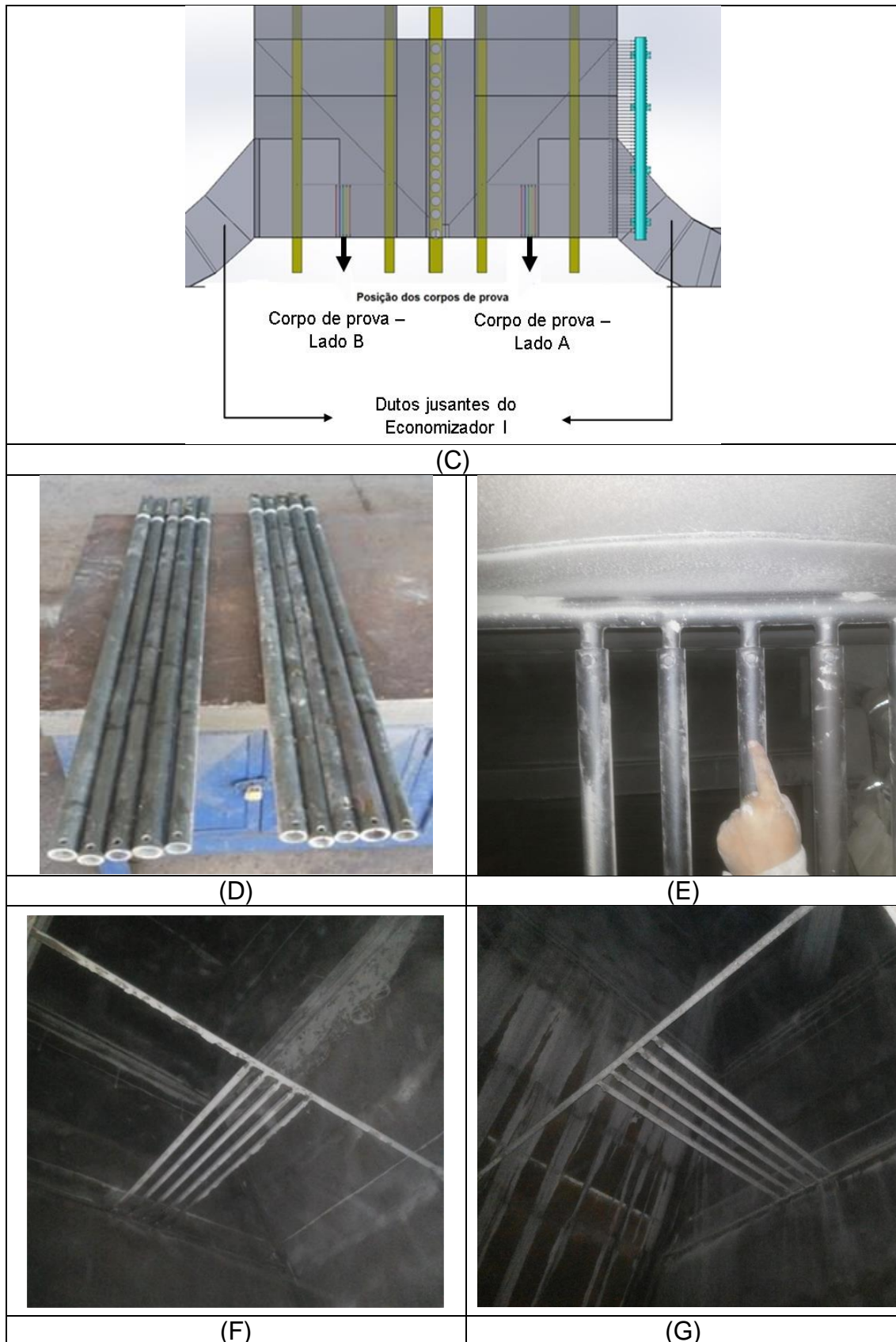
A Figura 21 (B) mostra os detalhes de fixação. Para remover o tubo, basta à retirada do parafuso de uma extremidade e recuar o mesmo em uma direção, após desencaixar uma extremidade o tubo pode ser removido. Nas extremidades dos tubos, foram realizados furos de 10 mm de diâmetro e localizados a 20 mm da extremidade, necessário para sua fixação com parafusos tipo M10.

A Figura 21 (C) mostra o posicionamento dos CP identificando o local de instalação, que coincide com o local de maior velocidade como apresentado na Figura 19, do item 4.3.2.1. Já a Figura 21 (D) mostra uma foto dos corpos de prova após remoção da caldeira para análise.

As Figuras 21 (E, F e G) mostram fotos dos CP antes da remoção da caldeira para análise. A Figura 21 (E) mostra os detalhes de fixação dos CP dos conjuntos C1 e C2. A Figura 21 (F) ilustra o posicionamento dos CP dos conjuntos C1. A Figura 21 (G) apresenta o posicionamento dos CP dos conjuntos C2.

Figura 21 - (A) Suporte e CP, (B) Detalhe da fixação dos tubos, (C) Posicionamento dos CP, (D) CP identificados após remoção da caldeira, (E) Detalhe da fixação dos CP' no suporte no interior da caldeira e (F,G) Posição dos corpos de prova no interior da caldeira.





Fonte: Autor, 2014.

4.3.3.2 Fabricação e instalação – ALTB

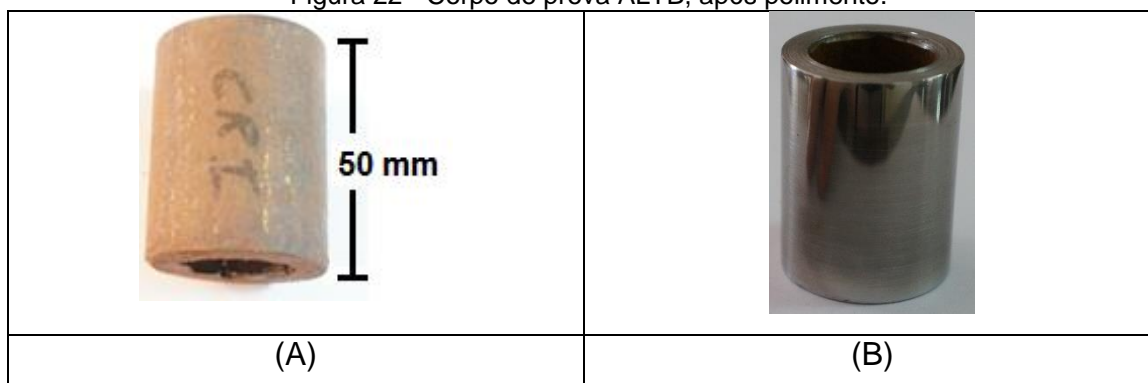
O processo de fabricação das amostras foi realizado conforme estabelecido na Norma ASTM G76-95, nos parâmetros de dimensão, 10 mm de largura e 30 mm.

Foram preparados 20 CP de aço, sendo 5 amostras de tubo de cada aço ASTM A213 T11², ASTM A213 T22², ASTM A106 B⁴ e ASTM A213 T91².

Os tubos apresentavam 100 mm de comprimento, e, após o recebimento iniciou-se o processo de lixamento que se realizou através do uso de um torno mecânico a fim de dar um acabamento uniforme aos corpos de prova. Nesta fase, utilizou-se lixa de granulometria 80 até 1200 mesh.

A Figura 22 (A) mostra o corpo de prova antes do processo de lixamento e a Figura 22 (B) mostra o corpo de prova após o processo de lixamento. O processo de lixamento tem, por objetivo, eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento na face a ser erodida.

Figura 22 - Corpo de prova ALTB, após polimento.

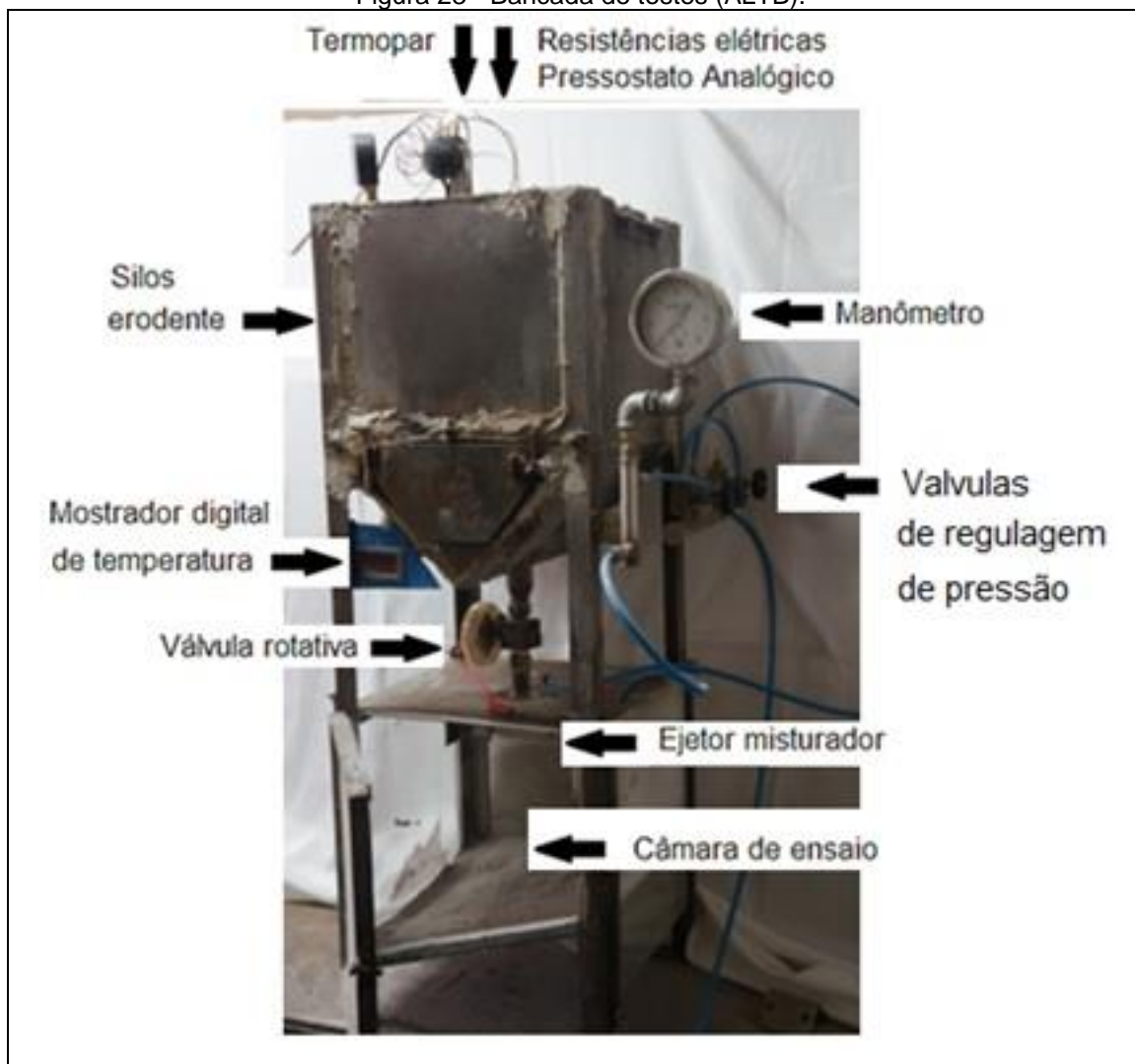


Fonte: Autor, 2014.

Após lixamento os tubos foram cortados dando origem aos corpos de prova com dimensões de 25 mm de largura por 40 mm de comprimento.

A Bancada de Teste de Erosão em Materiais, foi desenvolvida com o intuito de proporcionar a comparação entre resistência a erosão de diferentes ligas metálicas, possibilitando comparar as características mecânicas, com o material erodente produzido na Caldeira 4, ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Bancada de testes (ALTB).



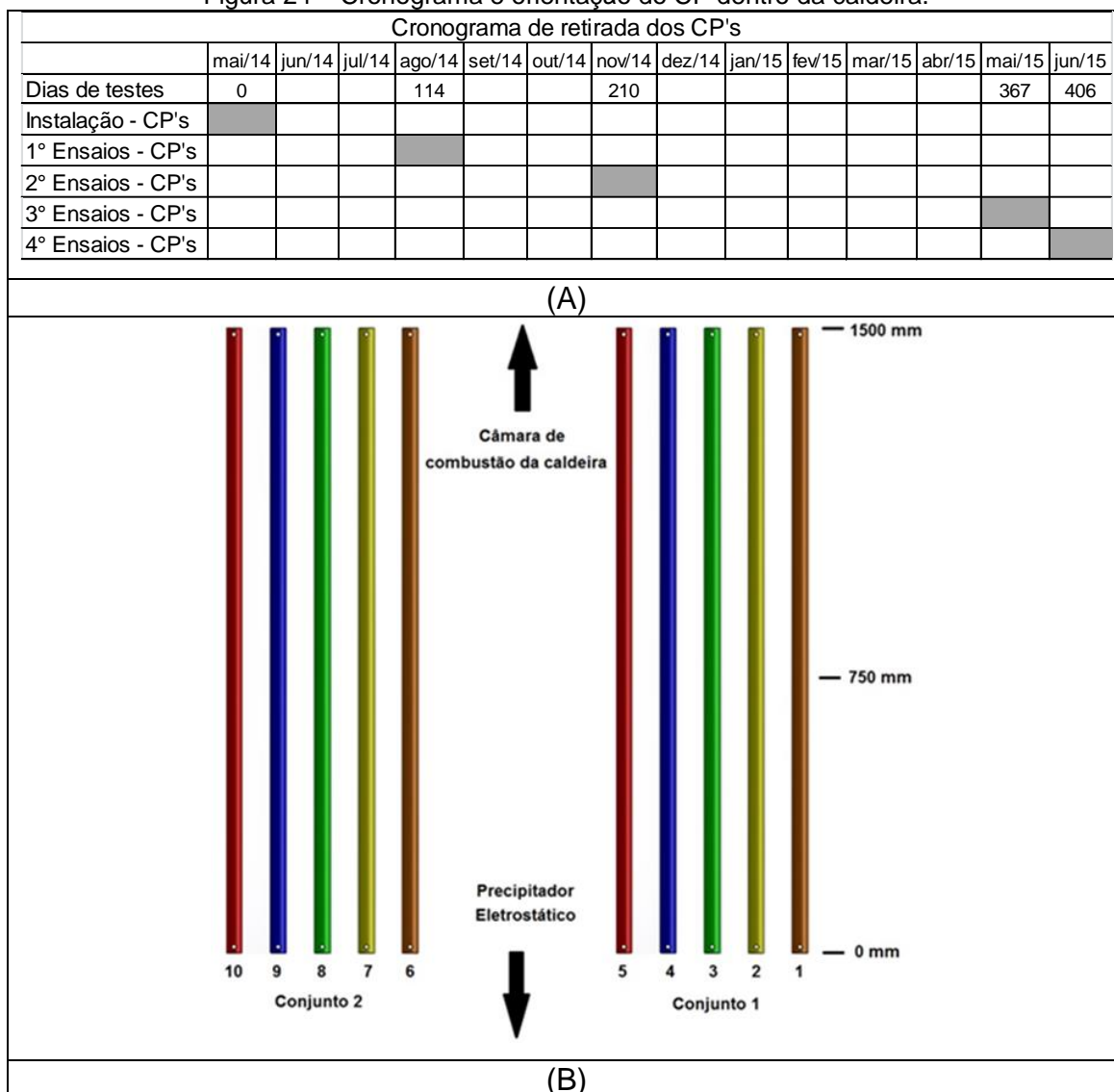
Fonte: Autor, 2014.

4.4 Análise das ligas metálicas através de ensaios nos CP ALCP e ALTB

Os ensaios realizados pelo processo de ALCP são importantes para obtenção dos resultados quantitativo e qualitativo, sendo assim, se apresenta a metodologia adotada para cada ensaio. Durante os 18 meses de duração do trabalho, foram possíveis quatro retiradas dos corpos para análise. Os ensaios foram realizados nos dias 01 de maio de 2014, 22 de agosto de 2014, 26 de novembro de 2014, 02 de maio de 2015 e 10 de junho de 2015, devido às paradas da caldeira para manutenção, conforme cronograma de retirada dos CP, Figura 24(A), os períodos de realização dos ensaios ALCP foram incertos porque ocorreram apenas após o desligamento da caldeira.

A maior dificuldade encontrada foi durante a retirada e reposição dos conjuntos de corpo de prova, ou seja, conforme Figura 24(B). Antes da retirada realizava-se a marcação dos tubos mantendo a sequência e o lado de conexão no suporte. Após os tubos foram levados à bancada para realização dos ensaios programados. A Figura 24(B) mostra a forma de numeração dos tubos.

Figura 24 – Cronograma e orientação do CP dentro da caldeira.



Fonte: Autor, 2015.

Em relação ao procedimento ALTB pode-se destacar que a realização do teste de erosão acelerada ocorreu após a verificação dos ajustes necessários do equipamento, onde a erosão foi avaliada através dos seguintes

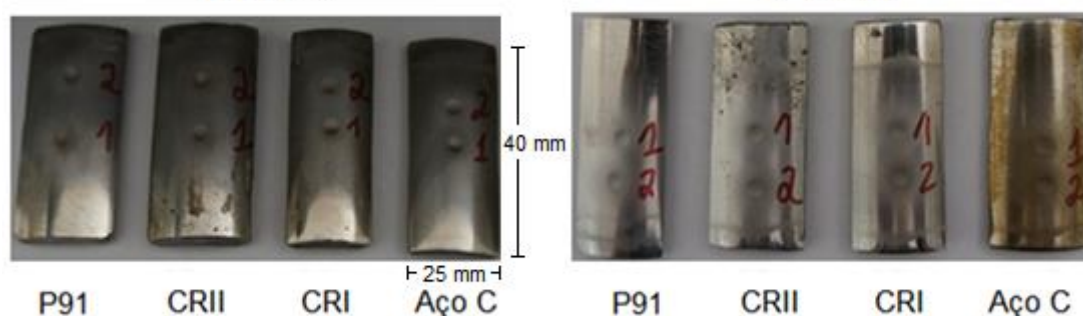
parâmetros: Pressão estática de 2,5 kg/cm²; Tempo de erosão 4 e 8 minutos e ângulo de incidência de 90°.

Os procedimentos adotados nos testes ocorreram do seguinte modo:

- Aqueceu-se o silo de erodente (Figura 23) a 200°C durante 2 horas;
- Estabilizou-se a pressão estática em 2,5 kg/cm², através da válvula globo de ¼”;
- Estabilizou-se o fluxo de gás;
- Ligou-se a válvula rotativa;
- Posicionaram-se os CP nas condições de teste;
- Ligou-se o cronômetro;
- Abriu-se a válvula de alimentação de erodente;
- Ao final do tempo de erosão, retirou-se o CP;
- Substituiu-se pelo próximo, repetindo o processo.

A Figura 25 mostra a imagem dos CP erodidos.

Figura 25 - Corpos de provas erodidos com cinza volante, em diferentes materiais (ALTB).



Fonte: Autor, 2014.

4.4.1 Ensaio de pesagem ALCP e ALTB

4.4.1.1 Pesagem ALCP

Balança marca Toledo, modelo 520/5, peso máximo 30 kg, peso mínimo 200 g com erro de $\pm 5\%$.

Inicialmente esperou-se por 48 horas para resfriamento da caldeira e na sequência ocorreu à retirada dos tubos e a marcação dos CP, conforme Figura 24(B). Ainda no local no interior da Caldeira 4, a marcação é extinta durante o processo de operação devido à temperatura de operação.

A Figura 26 mostra os CP numerados e retirados da caldeira para realização do ensaio. Na extremidade dos tubos, foram constatados os efeitos da erosão, observamos que ficou desenhado o parafuso sextavado utilizado na fixação.

Figura 26 - CP (ALCP), e indicação de dias acumulados de testes.



Fonte: Autor, 2015.

Deve-se destacar que durante a retirada dos tubos do interior da caldeira, foram adotados os seguintes cuidados visando não alterar as condições, como: realização de limpeza com estopa e espátula, a fim de remover a cinza volante depositada nos tubos, também foram realizadas batidas dos tubos na vertical, retirando o material depositado internamente.

4.4.1.2 Pesagem ALTB

Nesta etapa foram feitas medições de peso, balança marca Bel, modelo Mark M214A, peso máximo 210g, erro de 0,001g. Os procedimentos adotados antes da realização dos testes foram: Aquecer o CP a 200°C e aguardar 1 hora, secagem; Realizar a pesagem do CP. Após a realização do teste de erosão realizou-se novamente um aquecimento dos corpos de prova a 200°C e aguardou-se 20 minutos e após, fez a pesagem do CP. O teste 1 ocorreu com um tempo de erosão de 8 minutos, e o teste 2 foi realizada com tempo de 4 minutos. Os testes de erosão foram realizados em duplicatas.

4.4.2 Medição de dureza ALCP

Os procedimentos realizados nos processos ALCP, no dia 01 de maio de 2014.

Foram feitas medições de dureza, no equipamento durômetro marca Time Hardness Tester, modelo TH130, serial 0000018547000018.

4.4.3 Medição de Espessura ALCP

Os procedimentos foram realizados de acordo com o cronograma de retirada dos CP Figura 24 (A), dias em que ocorreu a paralização da caldeira para manutenção. As medidas realizadas foram na posição de 50, 100, 200, 750, 1300, 1400 e 1450 mm.

O equipamento foi calibrado em bloco padrão de calibração de espessura com tolerância de 0,05mm. O acoplante utilizado foi à base de carboxi metil celulose, adequado à temperatura de medição, ambiente.

A calibração foi efetuada antes de cada jornada de trabalho e não ultrapassou o tempo de 30 minutos de serviço contínuo, sem ser novamente verificada. A cada interrupção do serviço, foi verificada a calibração, antes do reinício do mesmo.

A realização de ensaio de medição de espessura por ultrassom (ME) utilizou os equipamentos de fabricação da *Parametric*, modelo do ultrassom MG2-DL e transdutor modelo D794, frequência de 5MHz, diâmetro 7,2 mm, range de medição de espessura no mínimo de 0,75 mm a 50,00 mm.

4.4.4 Digitalização 3D, ALCP e ALTB

4.4.4.1 Digitalização 3D, ALCP

O equipamento Handy Scan 3D, modelo UNISCAN, é uma importante ferramenta e que serviu de apoio no levantamento do perfil superficial dos tubos e para traçar o perfil de desgaste da seção e, dessa forma, podem-se aferir os resultados encontrados nos demais estudos.

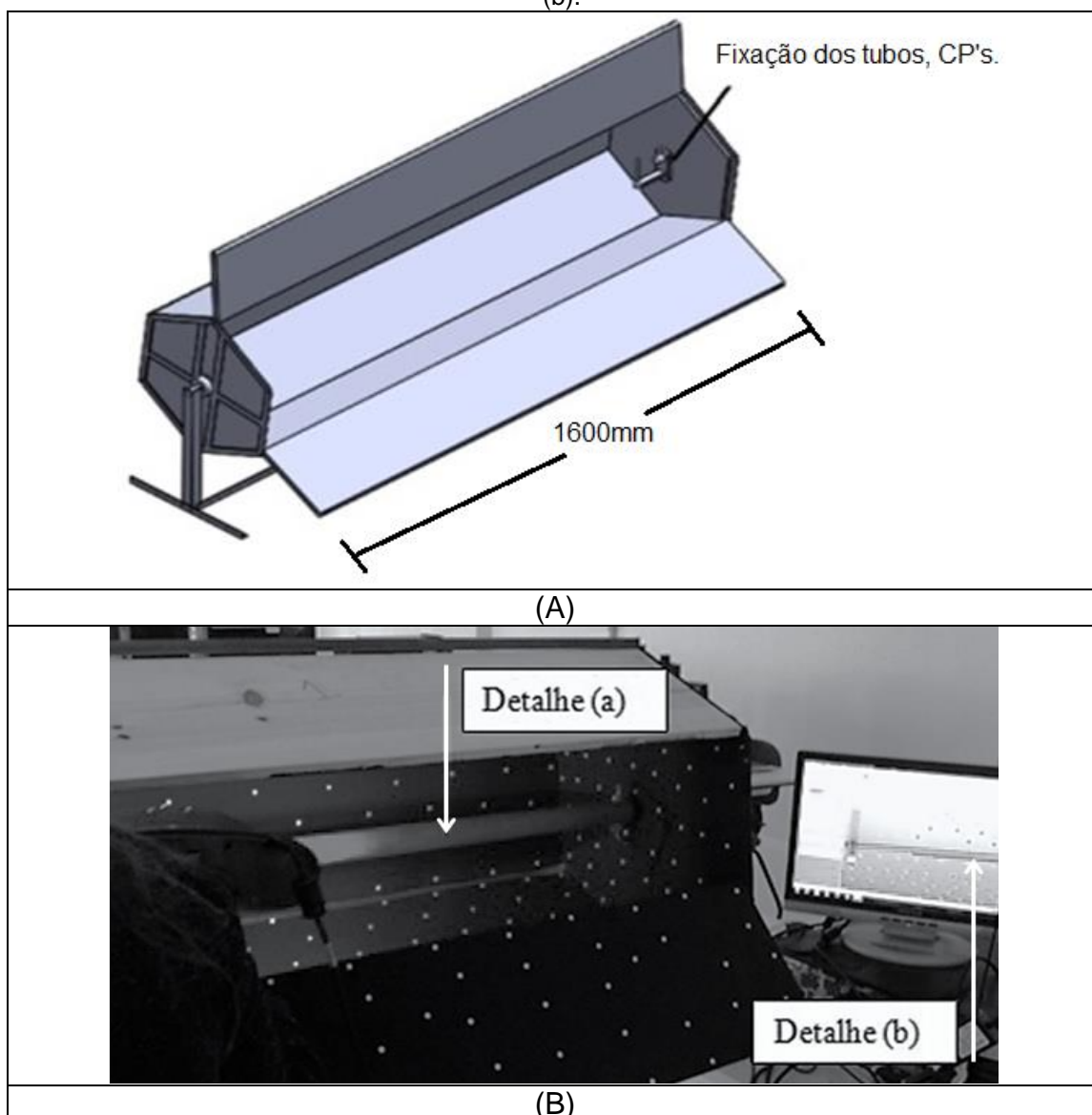
Deve-se informar que o *software* de aquisição de dados 3D possui um sistema de auto posicionamento que reconhece padrões dos alvos reflexivos e adquire a nuvem de pontos – conjunto de milhares de pontos descritos num

único sistema de coordenadas (X, Y, Z). Esse padrão de alvos reflexivos, referências, obedece a uma distância entre 20 a 100 mm e é distribuído de forma uniforme, mas não linear, de modo que o digitalizador possa localizar ao menos 4 alvos reflexivos, para que o modelo de posicionamento seja capaz de calcular a sua posição no sistema de coordenadas. Devido ao pequeno diâmetro do tubo, tornou-se complexa essa distribuição de alvos reflexivos ao longo de sua superfície, respeitando os critérios de disposição destes alvos. Em função disso, optou-se por fixar os alvos reflexivos em superfícies auxiliares, em vez de fixar os alvos refletores diretamente nos tubos. Após encontrar o método de digitalização 3D mais adequado e eficaz para a digitalização dos tubos e prepará-los para tal processo, iniciou-se a aquisição de dados que é descrita como sendo uma varredura do laser ao longo de toda a superfície do objeto, onde o *scanner* digitaliza as informações necessárias para a construção da nuvem de pontos da superfície⁵⁷.

Para que o equipamento pudesse digitalizar com melhor performance foi desenvolvido para este trabalho um equipamento em formato de prisma de base hexagonal de dimensões 1600mm de comprimento e 600mm de diâmetro que permitiu diminuir o tempo de digitalização, bem como, captar maior número de pontos proporcionando assim uma melhor resolução na imagem obtida ao final do processo. A Figura 27(A) mostra a imagem do equipamento para digitalização destes tubos e que se denominou de câmara de digitalização.

Já Figura 27(B) mostra o processo de digitalização de um dos tubos onde no detalhe "(a)", desta Figura, é ilustrado o tubo sendo digitalizado pelas lentes do *scanner 3D* e o detalhe "(b)", por sua vez, mostra a imagem do tubo gerada no *software* de aquisição VX elements.

Figura 27 - Câmara e processo de digitalização (a) e processo de digitalização das imagens (b).



Fonte: Autor, 2014.

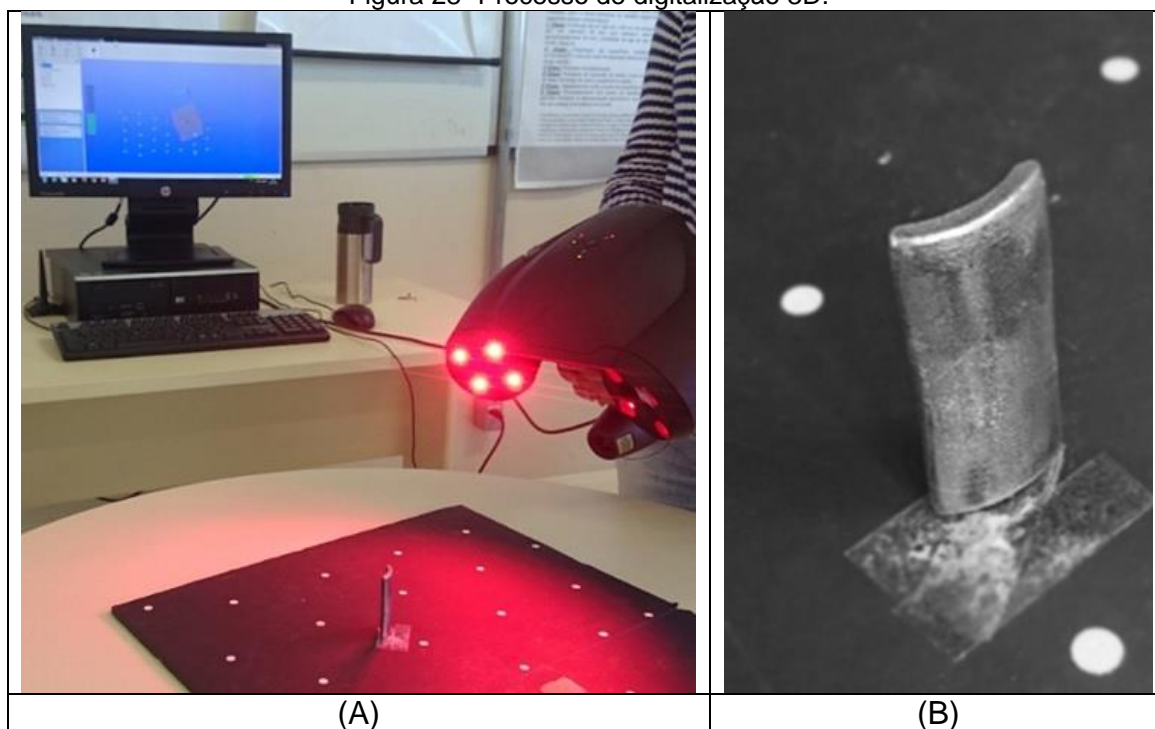
4.4.4.2 Digitalização 3D, ALTB

O processo de digitalização foi realizado de maneira análoga ao apresentado no item anterior, porém, para o equipamento funcionar com melhor desempenho para os CP que são em tamanho diferente dos anteriores, 25 mm de largura por 40 mm de comprimento, neste caso, foi preparada uma superfície preta com pontos reflexivos necessários a sua orientação espacial, além disso, foi necessário utilizar o recobrimento da superfície das peças devido à reflexividade. O material de recobrimento é de fabricação da METAL-CHECK do Brasil Indústria e Comércio Ltda, modelo revelador D70-E59.

A Figura 28 mostra o processo de digitalização de uma peça onde na Figura 28 (A) é ilustrado o CP sendo digitalizado pelas lentes do scanner 3D e mostra a imagem do mesmo gerada no software de aquisição VXelements, a Figura 28 (B), por sua vez, mostra o CP, detalhe de fixação e os pontos reflexivos com distância próxima a de 10 cm entre eles.

Deve-se informar também que se utilizou, no software de aquisição de dados do scanner 3D denominado de VXelements, a resolução de 0,8 mm para este tipo de peça. Ao final, enviou-se a nuvem de pontos em formato "TXT" para o software aplicativo CAD, denominado Solidworks 2013. A partir desta etapa, iniciou-se o processamento dos dados no Solidworks o que permite fornecer a representação geométrica das peças para fins de análise volumétrica da erosão.

Figura 28- Processo de digitalização 3D.



Fonte: Autor, 2014.

4.4.5 Rugosidade ALTB

Os ensaios de rugosidade foram realizados com o equipamento de fabricação de Beijing Time High Technology Ltda, modelo Roughness Tester TR200.

O procedimento adotado antes dos testes: Nivelar o equipamento ao corpo de prova em base de granito calibrada e, em seguida realizar, o ensaio de rugosidade, conforme Figura 29.

Figura 29 - Corpo de prova e equipamento de ensaio de rugosidade.



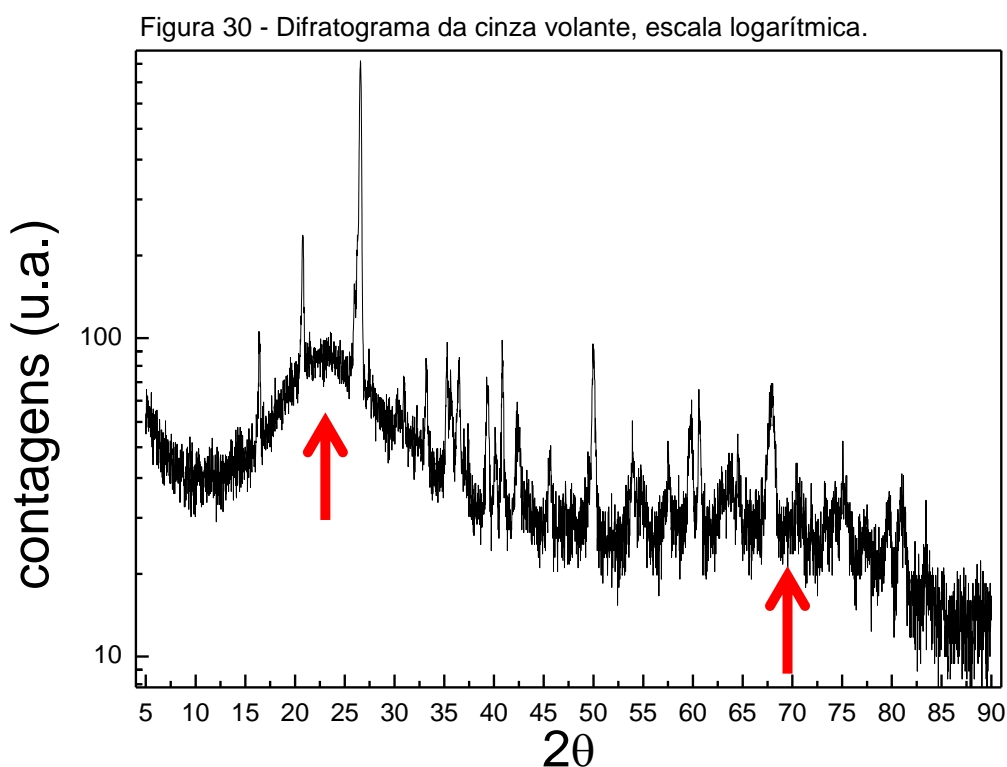
Fonte: Autor, 2014.

5 Análise Dos Resultados e Discussões

Serão apresentados os resultados e discussões das ALCP e ALTB.

5.1 Difração de raio x (cinza volante)

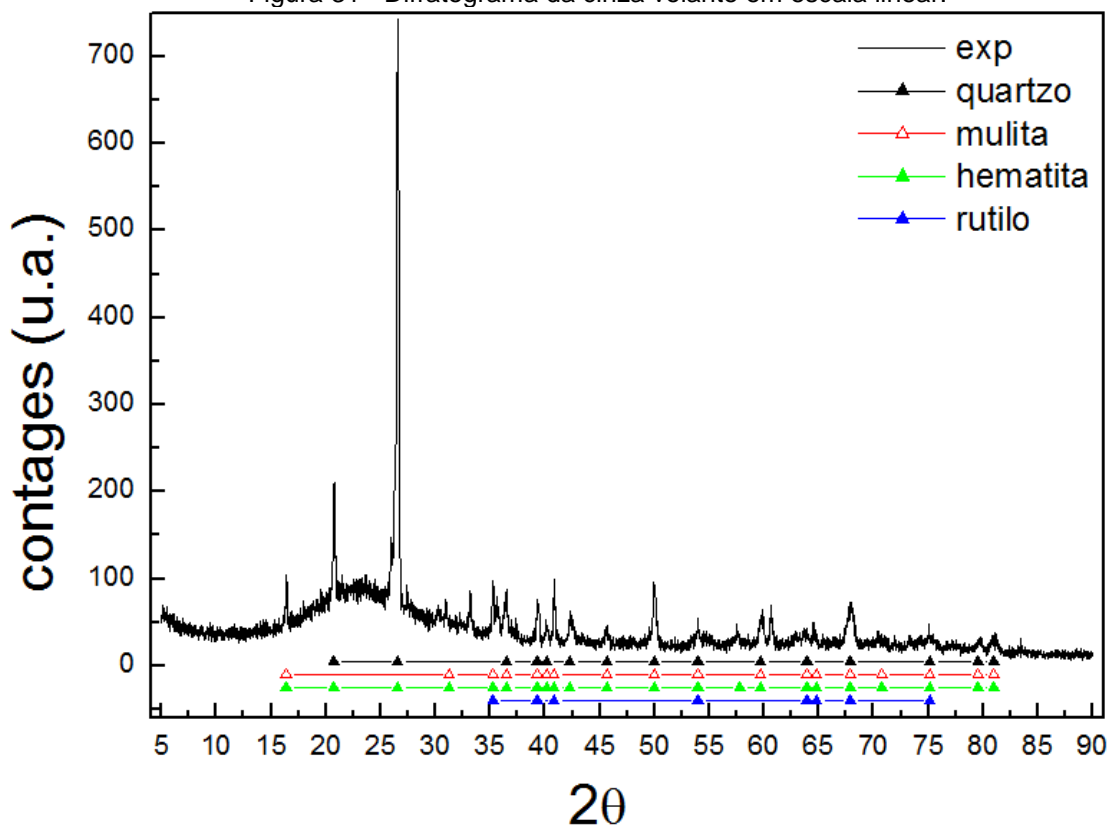
A Figura 30 mostra o difratograma com o eixo das contagens em escala logarítmica. Percebe-se que as contribuições das fases cristalinas, picos, estão sobrepostos às duas ondulações com larguras mais elevadas em relação aos picos, nas regiões entre 10° e 35° e entre 50° e 85° . Esse comportamento é característico de sistemas que apresentam contribuições de fases amorfas⁵⁴.



Fonte: FLORES, 2015⁵⁵.

O mesmo difratograma, com eixo das contagens em escala linear, é apresentado na Figura 31. As identificações das fases cristalinas padrões, contendo as posições dos picos correspondentes, estão indicadas pelas barras abaixo da medida. No gráfico da Figura 31, é apresentado o resultado da análise semi-quantitativa das fases cristalinas que foram identificadas no difratograma, quartzo, mulita, hematita e rutilo.

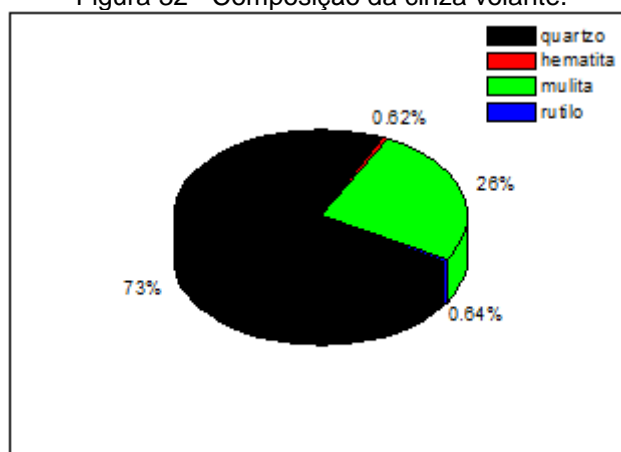
Figura 31 - Difratoograma da cinza volante em escala linear.



Fonte: FLORES, 2015⁵⁵.

A Figura 32 mostra, em percentuais, a composição dos compostos, através do difratograma, observa-se que 73% do material são compostos de quartzo, e um percentual 26% de mulita.

Figura 32 - Composição da cinza volante.



Fonte: FLORES, 2015⁵⁵.

O quartzo é um mineral cuja composição química consiste de dois átomos de oxigênio e um átomo de silício (SiO_2). É bastante resistente a

ataques químicos e físicos⁵⁹. Já, a mulita é um dos aluminosilicatos mais importantes da tecnologia cerâmica, sendo o único composto intermediário estável no sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, com a composição de $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$, correspondendo a 71,8% em massa de Al_2O_3 ⁵⁴.

Comparando os resultados acima com o item 3.5 e, especificamente, a Tabela IV, tem-se predominantemente óxido de silício e óxido de alumínio no teor das cinzas utilizadas, que aumenta significativamente o potencial de erosão do erodente. Além disso, segundo SK Das (2008)¹, nota-se que ocorre um significativo aumento na taxa de erosão quando ocorre o aumento do percentual de sílica no erodente.

5.2 Resultados pesagem

5.2.1 Pesagem ALCP

A Tabela V ilustra os resultados das pesagens realizadas nos CP da ALCP, os resultados da pesagem P1 foram descartados durante as análises dos resultados devido ao revestimento do tubo durante o processo de fabricação e o tempo de armazenagem.

O somatório de perda de peso de todos os CP do C1 foi de 180 gramas, enquanto o C2 perdeu 280 gramas de peso, diante disso, foi feita uma investigação mais específica sobre as condições ambientais em diferentes pontos entre os dutos a montante do Economizador I da Caldeira 4, conforme Figura 2, detalhe 2 do Item 3.2. Observou-se que a vazão dos gases de exaustão e pressão nos dutos não são idênticos causando um desequilíbrio de vazões de gases de exaustão, assim um dos lados do Economizador I recebe um fluxo de gases maior que o outro, e a velocidade dos gases de exaustão do lado da instalação, do C2 é maior, tendo, como consequência, um aumento de erosão, conforme destacam também os autores^{10, 26, 31 - 33}. Os resultados da simulação computacional de fluxo de gases representado na Figura 19, Item 4.3.2.1, não considerou este desequilíbrio.

Os CP não são exatamente iguais em peso inicial. Também salienta-se que os períodos de testes são diferentes, ou seja, o período mais longo é entre a posição P3/P4, conforme cronograma da Figura 24.

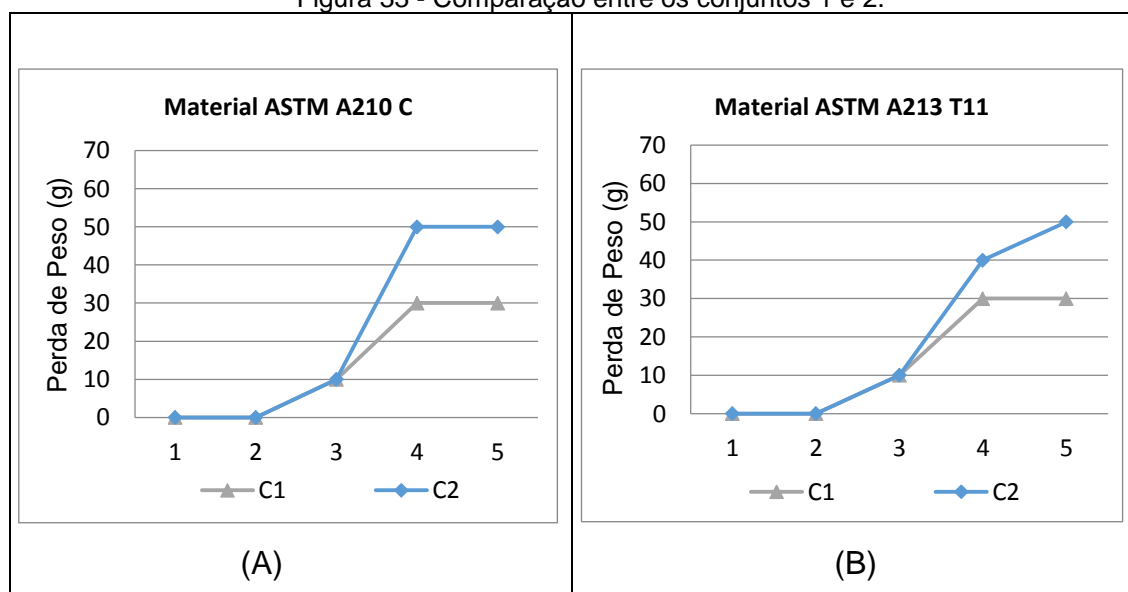
Tabela V - Acompanhamento de medições de peso.

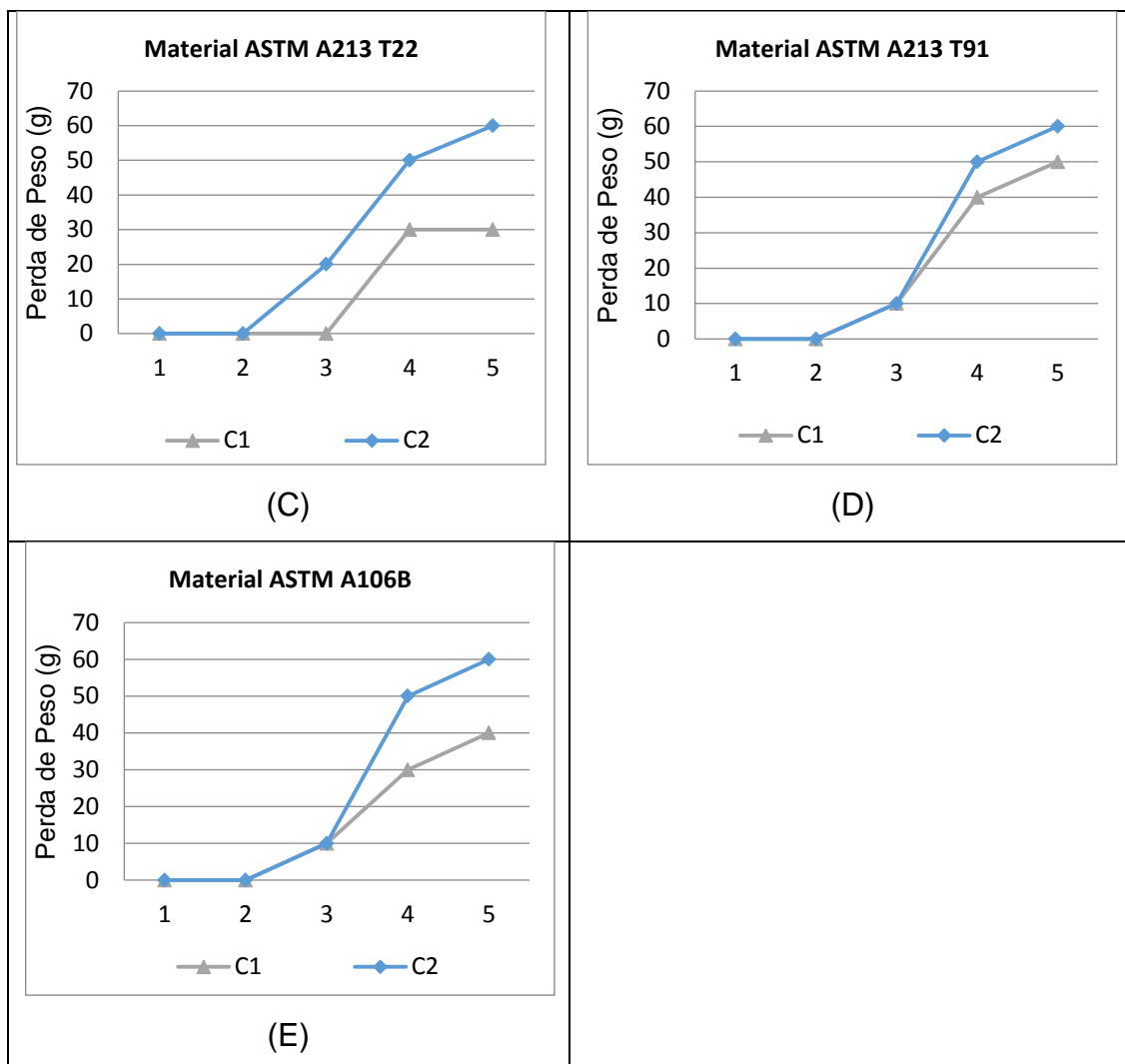
	Material	Medições de Pesos					
		P1 (kg)	P2 (kg)	P3 (kg)	P4 (kg)	P5 (kg)	P2 - P5 (g)
Conjunto 1	ASTM A210 C	7,39	7,35	7,34	7,32	7,32	30,00
	ASTM A213 T11	7,41	7,39	7,38	7,36	7,36	30,00
	ASTM A213 T22	6,66	6,63	6,63	6,60	6,60	30,00
	ASTM A213 T91	8,89	8,85	8,84	8,81	8,80	50,00
	ASTM A106 B	4,97	4,96	4,95	4,93	4,92	40,00
Conjunto 2	ASTM A210 C	7,40	7,34	7,33	7,29	7,29	50,00
	ASTM A213 T11	7,43	7,42	7,41	7,38	7,37	50,00
	ASTM A213 T22	6,65	6,61	6,59	6,56	6,55	60,00
	ASTM A213 T91	8,92	8,86	8,85	8,81	8,80	60,00
	ASTM A106 B	4,95	4,93	4,92	4,88	4,87	60,00

Fonte: Autor, 2014.

A Figura 33, relacionou-se o comportamento específico de cada liga metálica e se comparou a perda de peso em locais de instalação do Conjuntos 1 e 2. Neste caso o Conjunto 1 (C1) está representado na cor cinza, e o Conjunto 2(C2) na cor azul.

Figura 33 - Comparação entre os conjuntos 1 e 2.





Fonte: Autor, 2014.

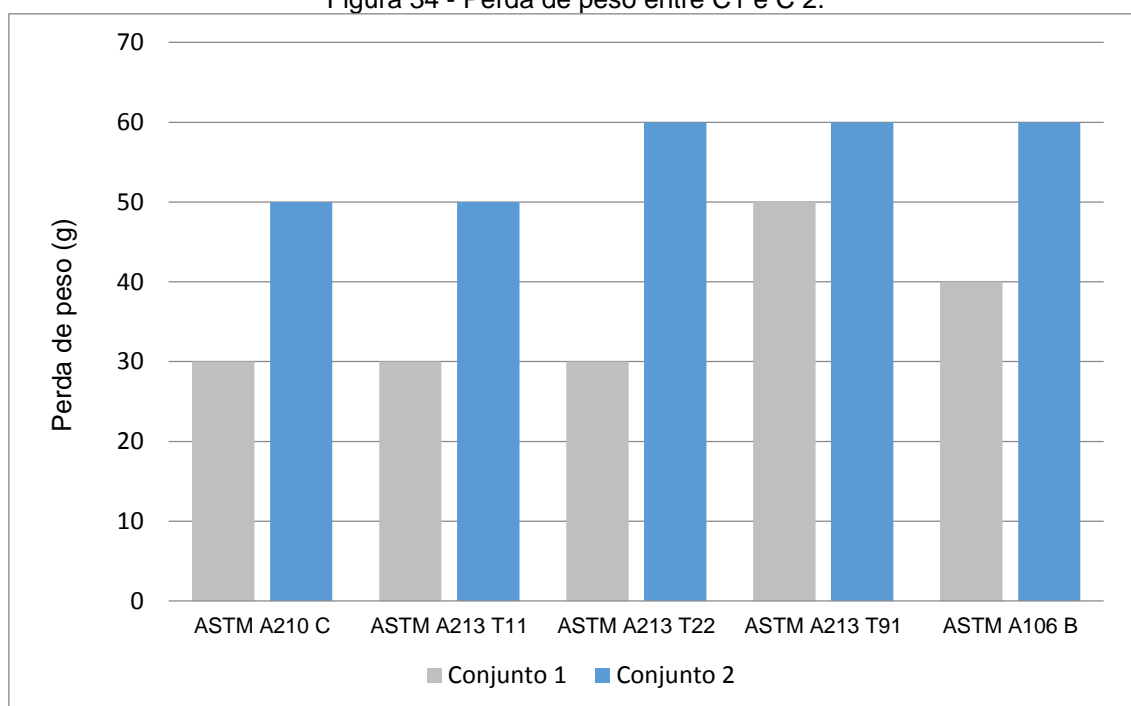
Na Figura 33 (A, B, C e E) ligas metálicas são o ASTM A210C, ASTM A213 T11, ASTM 106B, respectivamente, percebe-se que o comportamento da perda peso do C1 foi menor que do C2, isto ocorre devido a diferença de velocidade dos gases de exaustão nos dutos. No resultado de perda de peso, entre as pesagens P4/P5 a diferença foi mínima, 10g, devido ao tempo de exposição ser menor e as condições operacionais serem mais amenas.

A maior diferença entre os conjuntos 1 e 2 ocorre na liga metálica ASTM A213T22, Figura 33 (C), percebe-se que o comportamento da perda peso do C1 foi a metade do C2 na medição. No resultado de perda de peso entre as pesagens P2/P3 verificamos um descolamento entre o C1 e o C2, onde o C1 não ocorreu redução de peso, enquanto o C2 perdeu 20 g, assim as diferentes condições ambientais no interior da Caldeira foram mais impactantes nessa liga metálica, suficientes para modificar o comportamento da erosão.

Na Figura 33 (D) a liga metálica ASTM A213T91, percebe-se que o comportamento da perda peso do conjunto 1 foi a mais expressiva dentre as ligas metálicas estudadas, com 50 g de perda de peso, porém o C2 manteve-se com desempenho muito próximo ao do C1 com 60 g de perda de peso, conclui-se que as diferentes condições ambientais no interior da Caldeira não foram suficientes para modificar o comportamento da erosão.

Na Figura 34, a perda total de peso dos aços de mesma liga em locais de instalação diferentes, conjuntos 1 e 2, observa-se que as ligas ASTM A210C, ASTM A213 T11, ASTM A213 T22 e ASTM 106B obtiveram um comportamento semelhante.

Figura 34 - Perda de peso entre C1 e C 2.



Fonte: Autor, 2014.

A Figura 34 mostra um desempenho superior à resistência à erosão, das ligas metálicas ASTM A210 C e ASTM A213 T11, especificamente em relação a variável peso, a variação de peso nos conjuntos 1 e 2, foram as menores. Sendo que as ligas metálicas nos conjuntos 1 e 2, ASTM A210 C e ASTM A213 T11, obtiveram um percentual de 40% e 16,6%, menos perda de peso do que a liga metálica de pior resultado, ASTM A213T91, respectivamente.

Conforme o Item 3.3.2.1, a Figura 8 (B) mostra o efeito do ângulo de impacto sobre a taxa de erosão para as ligas metálicas de aço carbono e AISI

304. A liga metálica Tipo ANSI 304 sofreu muito mais com a erosão do que aço carbono em ambiente inerte, sugerindo que aços inoxidáveis não podem ser mais resistentes ao ataque da erosão como ocorre nos aços ferríticos quando a oxidação não está envolvida^{21, 29}. O desempenho nas condições dos ALCP da liga metálica ASTM A213 T91 foi inferior às demais ligas metálicas, mesmo com percentuais de elementos de ligas mais numerosos, a exemplo do Cr entre 8,0-9,5, conforme Tabela I, Item 3.2, indicando que não ocorre o mecanismo de corrosão de forma predominante ou até mesmo de maneira contributiva.

5.2.2 Pesagem ALTB

A Tabela VI ilustra os resultados da pesagem realizada nos corpos de prova submetidos ao teste de ALTB, e os testes foram realizados utilizando-se a seguinte configuração: ângulo de 90°, pressão de 2,5 kg/cm² e 50 gramas de material erodente, o tempo de erosão foi realizado com 8 minutos e após 4 minutos de tempo de erosão. Ao realizar o teste mantendo as condições físicas, e apenas variando o tempo de teste de erosão permitiu a comparação em função da concentração de material erodente.

Tabela VI - Resultados dos testes de erosão (ALTB).

Material (ASTM)	Peso Médio Inicial (g)	Peso Médio Erodido (g)	Peso Médio Perda (g)	Desvio Padrão	Pressão	T _m
					(kg/cm ²)	mg metal/kg erodente
Resultados dos testes de erosão com tempo de erosão de 8 minutos						
A213 T91	34,7216	34,7140	0,0076	0,0018	2,5	139,2682
A213 T22	42,9384	42,9286	0,0098	0,0020	2,5	196,6921
A213 T11	35,0067	34,9981	0,0085	0,0005	2,5	169,1850
A106 B	25,8503	25,8381	0,0122	0,0003	2,5	233,2042
Resultados dos testes de erosão com tempo de erosão de 4 minutos						
A213 T91	30,0728	30,0660	0,0069	0,0011	2,5	133,0460
A213 T22	36,2043	36,1967	0,0076	0,0008	2,5	149,4322
A213 T11	34,6233	34,6157	0,0076	0,0014	2,5	150,9262
A106 B	27,8191	27,8112	0,0079	0,0018	2,5	155,5676

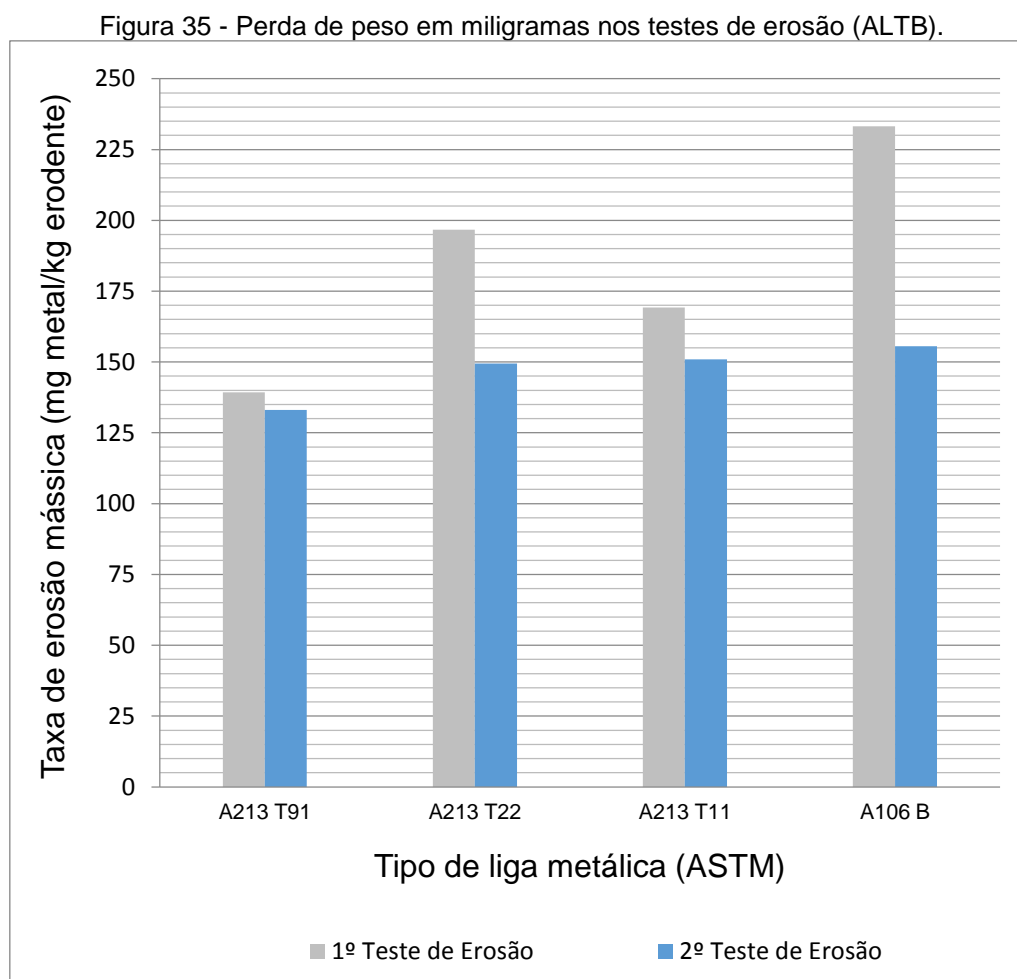
Fonte: Autor, 2014.

Na Tabela VI observa-se que a maior Taxa de erosão mássica (T_m) ocorre na liga metálica ASTM A106B, tanto para o tempo de 8 minutos quanto para o tempo de 4 minutos de erosão. Já a menor T_m ocorre no corpo de prova de liga metálica ASTM 213 T91, para ambos os testes de erosão. Conclui-se

que no teste de bancada ALTB a liga metálica mais afetada pelo efeito erosivo nas condições de teste é a ASTM A106B.

O desvio padrão dos resultados de T_m para o teste de erosão no tempo de 4 minutos é 9,8185 e de 40,0049 para o tempo de erosão de 8 minutos, indicando que o comportamento erosivo para altas concentrações de material erodente se mostra pouco relevante o tipo de liga metálica aplicada, ou seja, dependendo da concentração de material erodente a liga metálica se torna pouco irrelevante.

A Figura 35 ilustra a T_m nos testes de erosão 1 e 2 onde se levam em consideração as mesmas ligas metálicas.



Fonte: Autor, 2014.

Comparando os testes realizados, Figura 35, observa-se que as maiores T_m ocorrem nas ligas metálicas do primeiro teste erosivo, tempo de 8 minutos,

indicando um processo erosivo mais agressivo em concentrações menores de material erodente.

5.3 Espessura ALCP

Os ensaios de medição de espessura ocorreram utilizando a técnica de ultrassom, conforme Item 4.4.3. Os resultados do primeiro ensaio foram descartados durante as análises dos resultados, devido ao revestimento do tubo durante o processo de fabricação e o tempo de armazenagem.

Para cada liga metálica da Tabela VII foi calculado a redução de espessura da posição de medição, pela diferença de espessura de agosto de 2014 e a espessura de junho de 2015, 292 dias de testes, de acordo com o cronograma de retiradas dos CP, Figura 24 (A).

Tabela VII - Valores das reduções de espessuras nos conjuntos 1 e 2.

	Liga Metálica Norma	Posição de medição de Espessura (mm)							Médias
		50	100	200	750	1300	1400	1450	
Conjunto 1	ASTM A210 C	0,77	0,68	0,62	0,28	0,36	0,19	0,29	0,456
	ASTM A213 T11	0,95	0,48	0,10	0,19	0,29	0,23	0,23	0,353
	ASTM A213 T22	1,07	0,51	0,39	0,08	0,10	0,35	0,00	0,357
	ASTM A213 T91	1,11	0,74	0,31	0,12	0,18	0,25	0,25	0,423
	ASTM A106 B	1,14	0,23	0,05	0,06	0,17	0,14	0,13	0,274
Conjunto 2	ASTM A210 C	0,80	0,59	0,18	0,17	0,29	0,31	0,36	0,386
	ASTM A213 T11	1,86	0,53	0,37	0,07	0,20	0,04	0,12	0,456
	ASTM A213 T22	1,73	0,55	0,29	0,12	0,20	0,29	0,29	0,496
	ASTM A213 T91	1,12	0,49	0,22	0,12	0,37	0,36	0,25	0,419
	ASTM A106 B	1,52	0,40	0,27	0,24	0,19	0,29	0,24	0,450

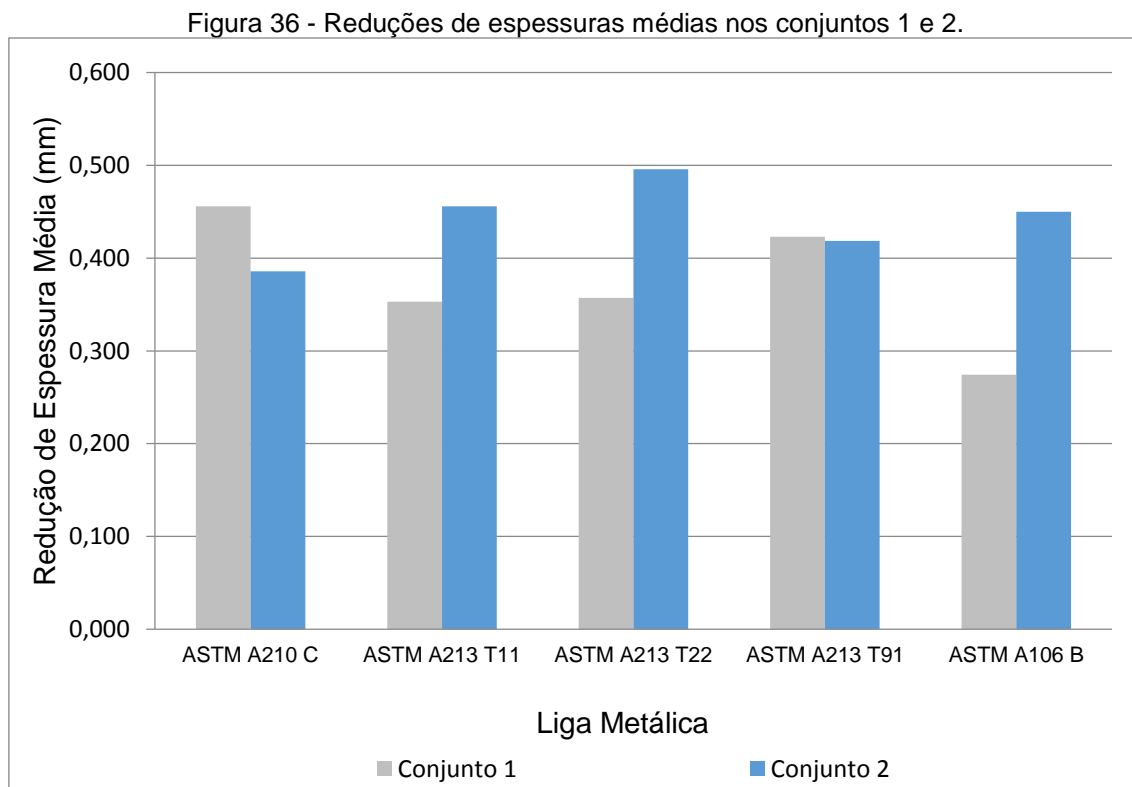
Fonte: Autor, 2015.

A Tabela VII apresenta os valores de reduções de espessura dos conjuntos 1 e 2, para diferentes posições no CP. As maiores perdas de espessura nas superfícies externas dos tubos ocorreram próximas à parede côncava do Economizador I e, conseqüentemente, maiores efeitos erosivos ocorreram até o ponto distante 100 mm da extremidade do tubo, na direção do precipitador eletrostático, conforme Figura 2 e Figura 24.

Por sua vez, as menores reduções de espessura ocorrem de 100 a 1500 mm. Isto ocorre, devido ao fato da velocidade dos gases serem menos

elevadas nessas áreas, além de haver uma menor concentração de material erodente, em função, da força centrífuga.

Na Figura 36 comparam-se os resultados de reduções de espessuras médias dos conjuntos 1 e 2, identificando que uma maior redução ocorre nas ligas do C2, com redução média do C1 de 0,373 mm e do C2 de 0,441 mm, representando uma diferença na redução média de 15,42%.



Fonte: Autor, 2015.

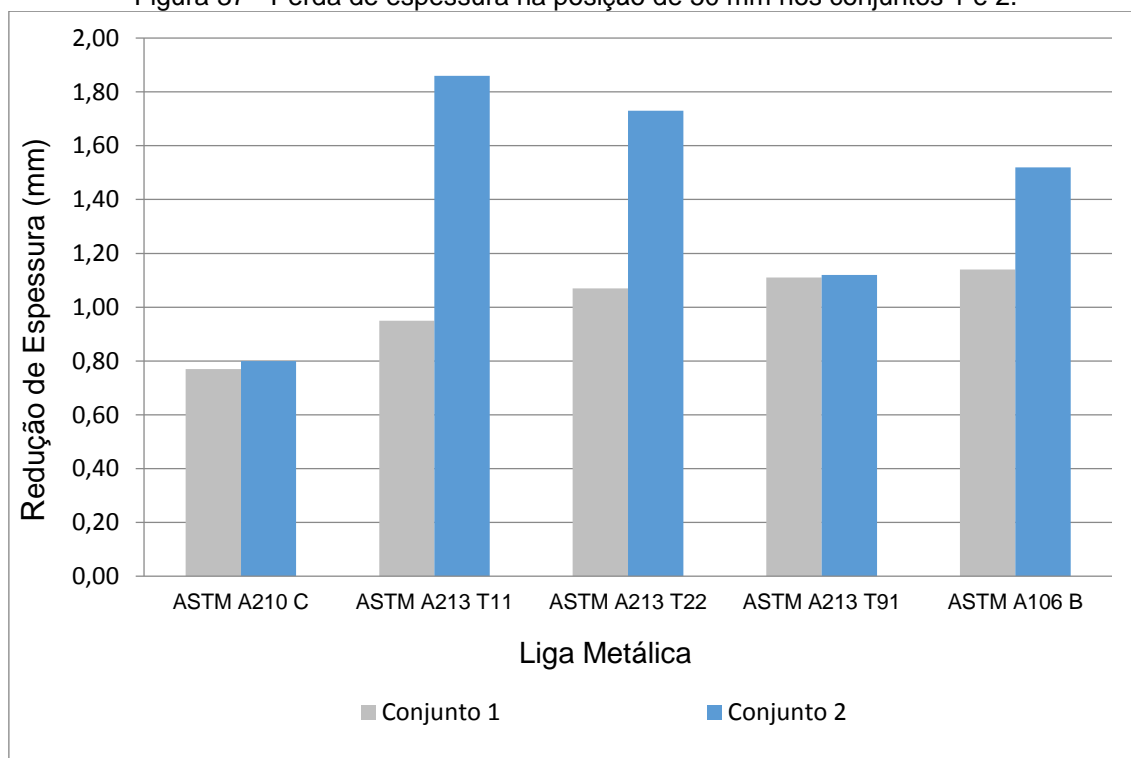
Na Figura 36 referente ao C1 nota-se que o maior efeito erosivo ocorreu no corpo de prova constituído pela liga metálica ASTM A210 C. Diante disso, conclui-se que a liga metálica ASTM A210 C, nesta situação, é a mais suscetível ao mecanismo de erosão. Já o menor efeito do mecanismo de erosão ocorreu no corpo de prova constituído pelas ligas metálicas ASTM A106 B, se considerarmos uma média. Em síntese, conclui-se que no teste do C1 (ALCP) a liga metálica que foi menos afetada pelo efeito erosivo foi a ASTM A106B, considerando o resultado da média das espessuras em todas as posições. A liga metálica ASTM A106 B, obteve um percentual médio de redução em todas as posições de 60,19% da espessura erodida da liga

metálica ASTM A210C B no C1, ou seja, obteve um percentual médio de redução em todas as posições de 39,91% a menos.

Na Figura 36 referente ao C2 nota-se que o maior efeito erosivo ocorreu no corpo de prova constituído pela liga metálica ASTM A213 T22. Diante disso, conclui-se que a liga metálica ASTM A213 T22, nesta situação, é a mais suscetível ao mecanismo de erosão. Já o menor efeito do mecanismo de erosão ocorreu no CP constituído pelas ligas metálicas ASTM A210 C, se considerarmos uma média. Em síntese, conclui-se que no teste do C2 ALCP a liga metálica que foi menos afetada pelo efeito erosivo foi a ASTM A210 C, considerando o resultado da média das espessuras em todas as posições. A liga metálica ASTM A210 C, Figura 36, obteve um percentual médio de redução em todas as posições de 77,81% da espessura erodida da liga metálica ASTM A213 T22 no C2, ou seja, obteve um percentual médio de redução em todas as posições de 22,19% a menos.

As Figuras 36 e 37 mostram um comportamento análogo da liga metálica ASTM A213 T91 nos conjuntos 1 e 2, com valores muito semelhantes.

Figura 37 - Perda de espessura na posição de 50 mm nos conjuntos 1 e 2.



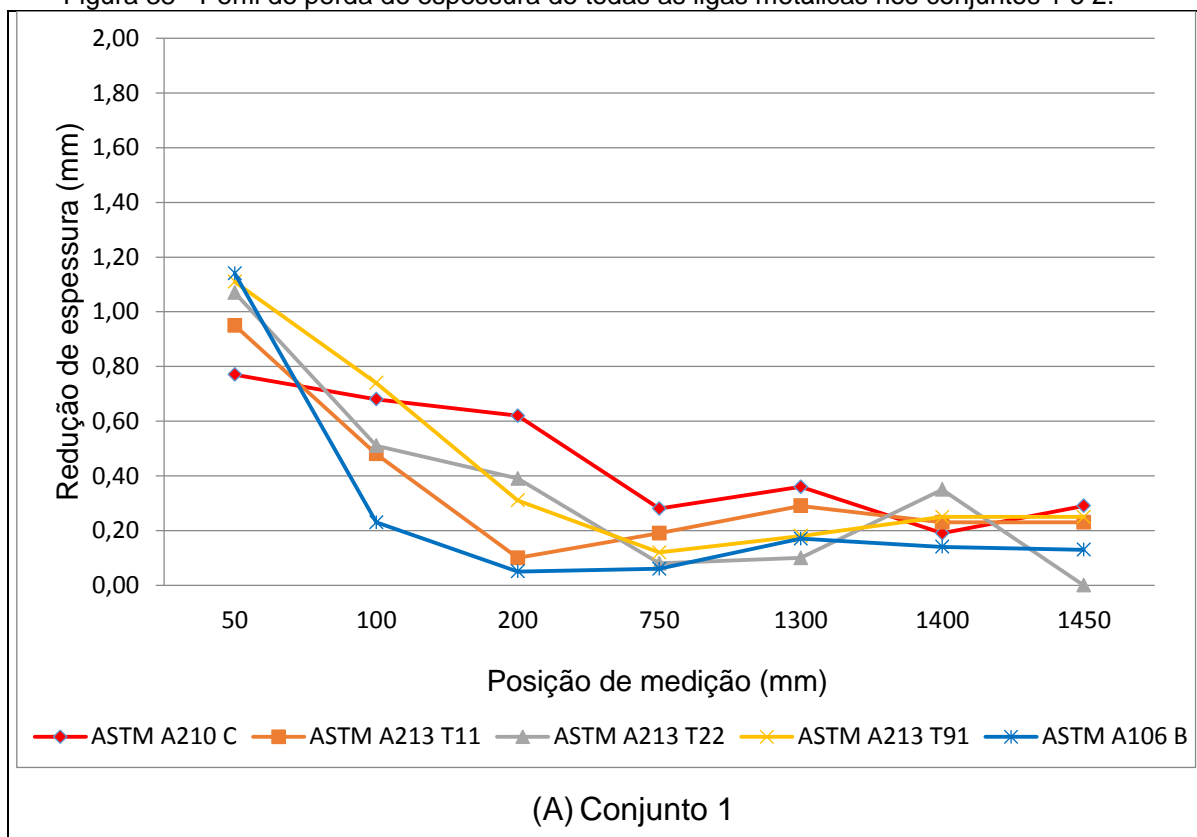
Fonte: Autor, 2015.

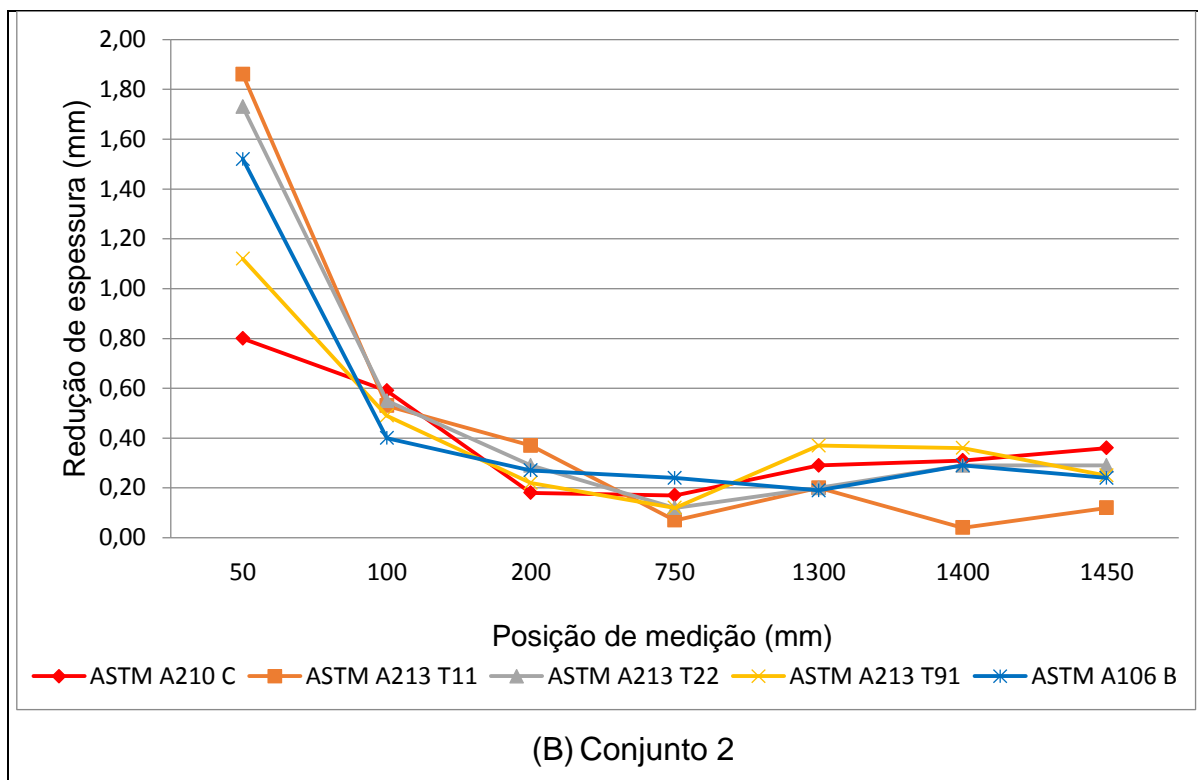
Na Figura 37 observa-se o melhor resultado da liga metálica ASTM A210 C, nos conjuntos 1 e 2, maior resistência à abrasão, em comparação com as demais ligas metálicas, nas condições ambientais mais severas, posição 50 mm próxima a parede côncava do economizador I, obteve um percentual de redução de espessura de 67,54% da espessura erodida da liga metálica ASTM A106 B no C1, e no C2 atingiu 43,01% da erosão ocorrida na liga metálica ASTM A213 T11.

Ao analisar a Figura 37 se observa o perfil de desgaste de cada liga metálica no C1, e nesta condição, a liga que sofreu maior desgaste erosivo foi ASTM 106 B. Ainda na Figura 37 observa-se o perfil de desgaste no C2 onde a liga que sofreu maior desgaste erosivo foi ASTM A213 T11.

A Figura 38 (A) indica um comportamento com menor intensidade da liga metálica ASTM 210 C, a redução de espessura ao longo do CP é mais uniforme, sendo a liga metálica ASTM A106 obteve um comportamento mais agressivo próximo a posição de 50 mm.

Figura 38 - Perfil de perda de espessura de todas as ligas metálicas nos conjuntos 1 e 2.





Fonte: Autor, 2015.

A Figura 38 (B) também indica um comportamento menos intenso da liga metálica ASTM 210 C, Sendo a liga metálica ASTM A213 T11 mais afetada pelo efeito erosivo próximo a posição de 50 mm.

5.4 Resultados Medições de Dureza ALCP

A Tabela IX representa as medições de dureza dos CP conjuntos 1 e 2 do ALCP.

Tabela VIII - Medições de dureza ALCP.

Medições de Dureza (HB)		
	Ligas Metálicas	Média
Conjunto 1	ASTM A210 C	161
	ASTM A213 T11	109
	ASTM A213 T22	115
	ASTM A213 T91	174
	ASTM A106 B	126
Conjunto 2	ASTM A210 C	160
	ASTM A213 T11	108
	ASTM A213 T22	110
	ASTM A213 T91	171
	ASTM A106 B	118

Fonte: Autor, 2014.

Ao analisarmos a Tabela IX percebe-se que a dureza maior ocorreu nas Ligas ASTM A210 C e ASTM T91 e a menor para a liga ASTM A 213 T11. Deve-se informar que este comportamento corresponde às características mecânicas das ligas metálicas, sendo, portanto, considerado um importante parâmetro de resistência a erosão, porém a medida de dureza não deve ser utilizada como único critério de seleção de materiais para aplicações em desgaste erosivo, ou seja, o mecanismo de desgaste erosivo está diretamente associado ao ângulo de incidência do erodente e às propriedades mecânicas dos materiais envolvidos⁵⁸.

5.5 Resultado do ensaio de rugosidade ALTB

Os resultados apresentados na Tabela IX.

Tabela IX - Resultado do ensaio de rugosidade, μm .

Rugosidade - Ra		
Material	Amostra 1	Amostra 2
<i>ASTM A213 T91</i>	0,0760	0,0640
<i>ASTM A213 T22</i>	0,1500	0,1370
<i>ASTM A213 T11</i>	0,0590	0,0530
<i>ASTM A106 B</i>	0,0470	0,0590

Fonte: Autor, 2014.

Analisando a Tabela IX, percebe-se que todas as superfícies dos corpos de prova estão abaixo de 0,2 μm . Na norma ASME B46.1⁵³, Ra é a média de um conjunto de medidas individuais de picos e vales superfícies.

5.6 Digitalização 3D ALCP e ALTB

5.6.1 Digitalização ALCP

Nesta etapa utilizamos o equipamento de digitalização Handy Scan 3D, modelo UNISCAN, que captura as imagens que foram geradas através do *software* VXelements, as imagens foram salvas com extensão STL.

As análises foram realizadas no *software* 3DReshaper, fabricante Hexagon Metrology, versão 9.1.14.17218, ID E94704622F3A0914523AC7216AE53961230DACD4D955, acesso 08/08/2015, que permitem fazer a comparação entre as superfícies dos CP novos e CP

erodido utilizando as malhas obtidas durante a digitalização, gerando imagens colorimétricas que permite visualizar o desgastes nas superfície dos tubos, conforme Figura 39 (A, B, C, D, E).

Ao analisar os resultados de espessura e pesagem notou-se um maior desgaste no C2, onde a condição ambiental foi mais severa, portanto, optou-se por analisar de forma complementar o C2.

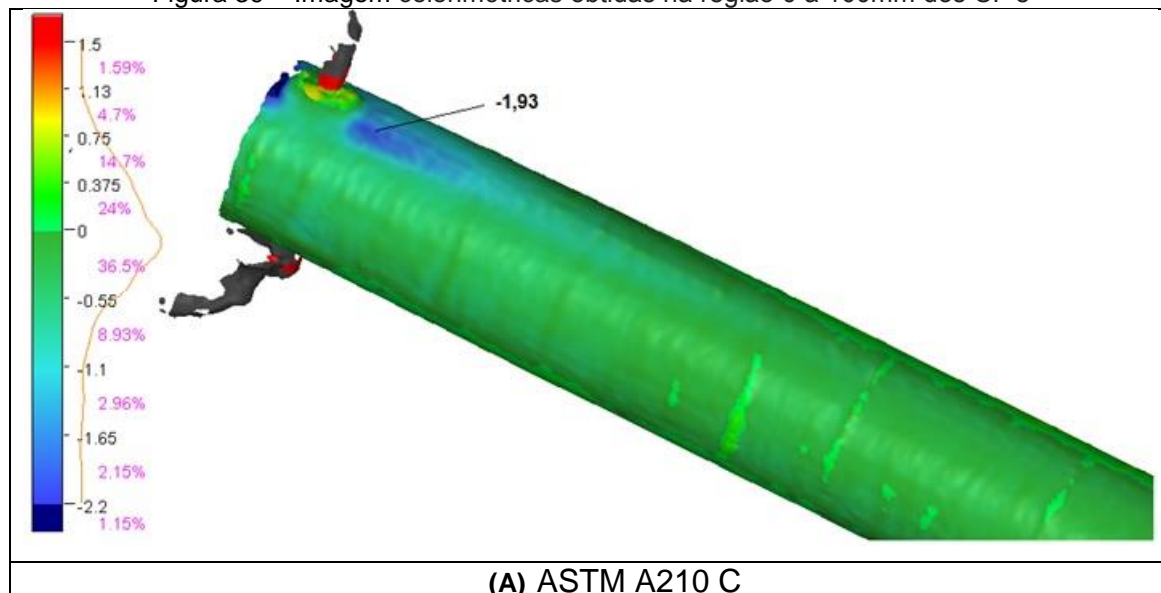
A Tabela X informa os resultados obtidos como o *software* 3DReshaper e os desvios padrões demonstram que os valores são próximos às variações obtidas nas medições de espessura, tornando o resultado válido qualitativamente até a posição de 100 mm, de um total de 1500 mm.

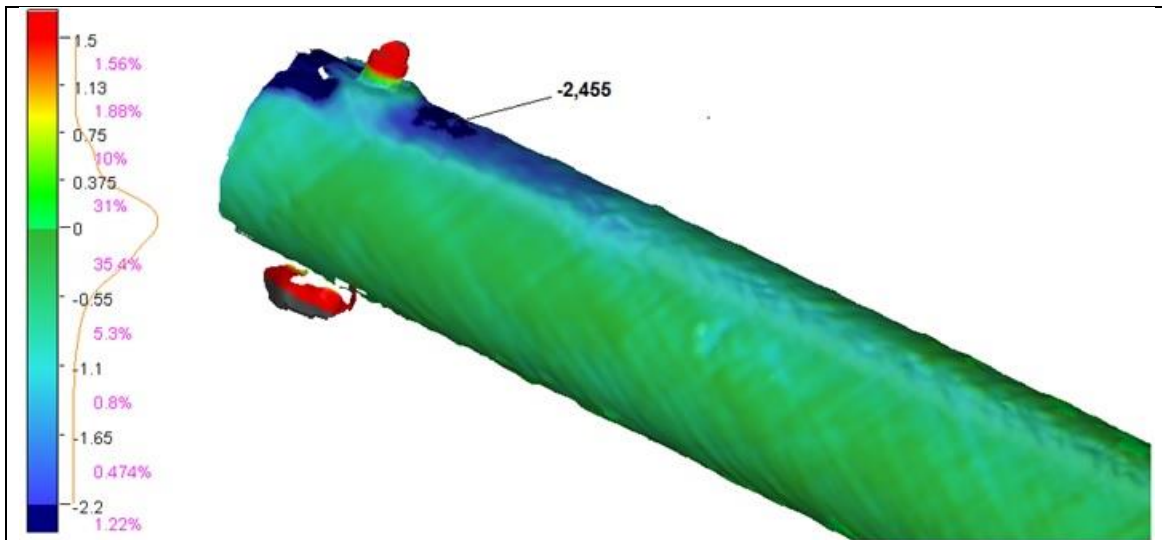
Tabela X- Dados dos resultados obtidos até da posição 0 a 1500 mm.

	Material	Medido, mm	Diâmetro calculado, mm	Desvio Padrão
Conjunto 2	ASTM A210 C	42,10	42,13	0,455
	ASTM A213 T11	38,20	39,40	0,369
	ASTM A213 T22	38,00	40,39	0,455
	ASTM A213 T91	44,60	46,53	0,395
	ASTM A106 B	38,10	39,45	0,465

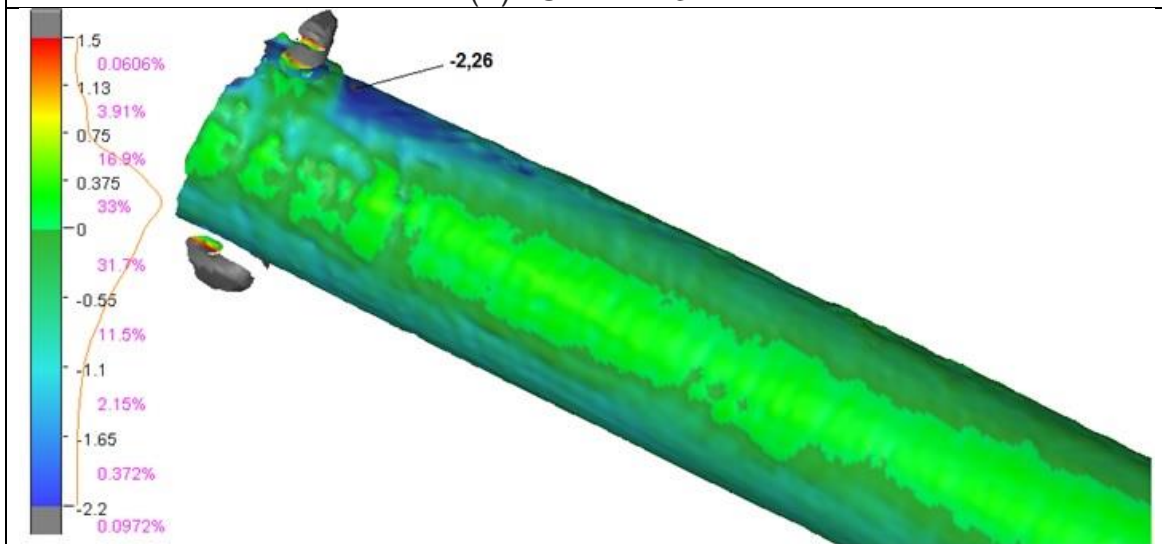
Fonte: Autor, 2014.

Figura 39 – Imagem colorimétricas obtidas na região 0 a 100mm dos CP's

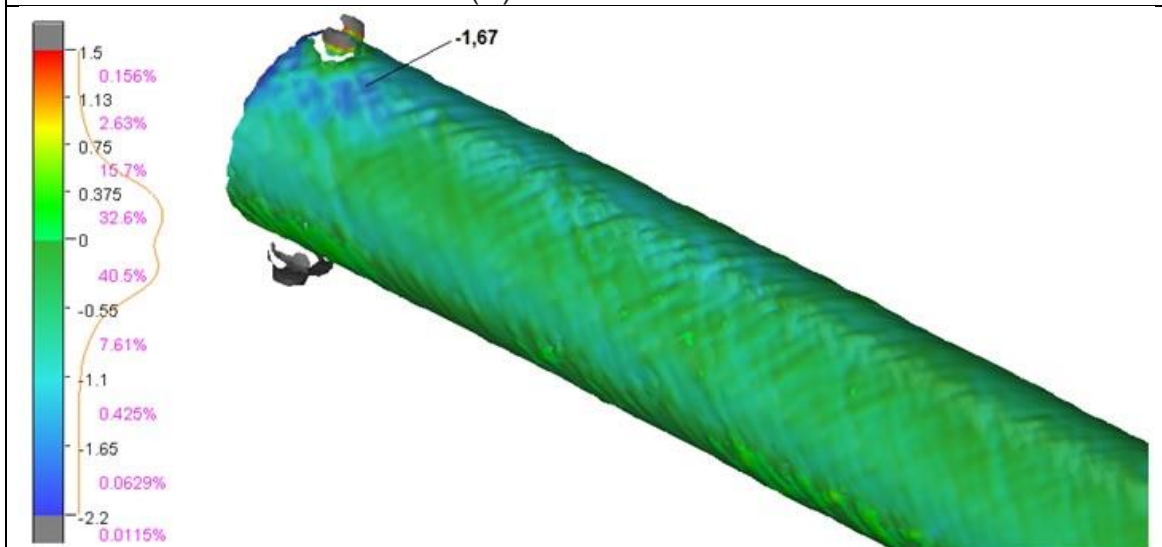




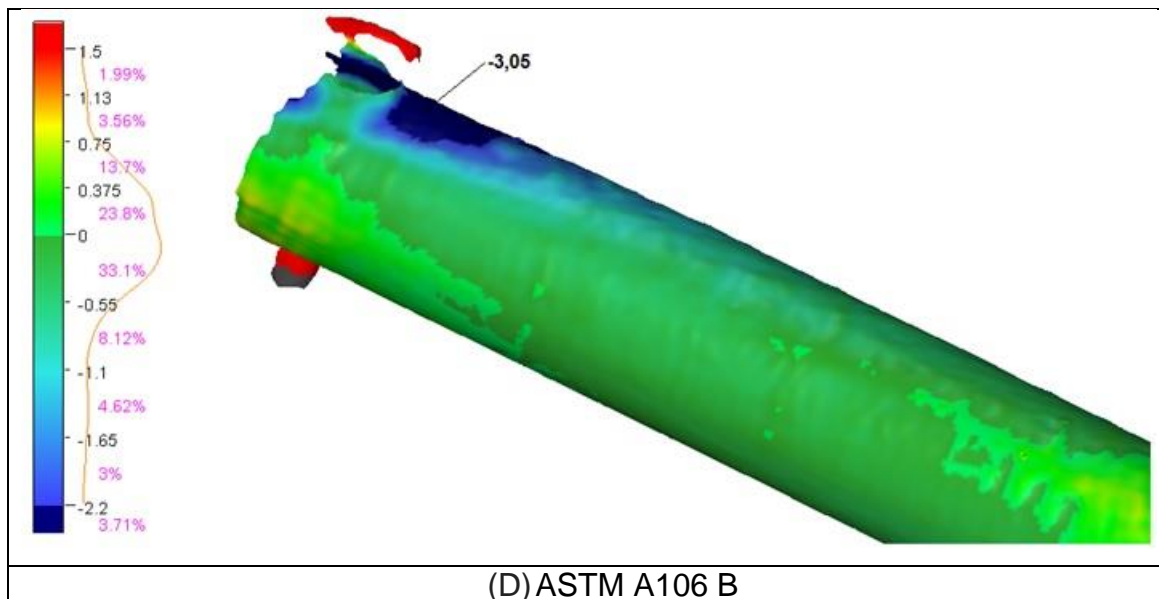
(B) ASTM A213 T11



(C) ASTM A213 T22



(C) ASTM 213 T91 C



Fonte: Autor, 2014.

As Figuras 39 (A, D) mostram uma erosão menos intensa nas ligas metálicas ASTM A210 C e ASTM 213 T91 C, sendo que os valores máximos de erosão são 1,93 mm e 1,67 mm, respectivamente.

Já as Figuras 39 (B, C, E) ilustram os resultados de erosão das ligas metálicas ASTM A213 T11, ASTM A213 T22 e ASTM A106 B mais afetada pelo efeito erosivo até posição de 50 mm, obtendo valores máximos de erosão de 2,45 mm, 2,26 mm e 3,05 mm, respectivamente.

5.6.2 Digitalização ALTB

Em relação ao processo de digitalização ALTB notou-se um maior desgaste no teste de erosão de 8 minutos onde a liga mais erodida foi a ASTM A 106B e a menos foi a ASTM A 210C, portanto, nesta etapa optou-se por analisar de forma mais específica estas duas ligas com o propósito de visualizar a menor e maior erosão obtida no teste.

As análises foram realizadas no *software* 3DReshaper, fabricante Hexagon Metrology, versão 9.1.14.17218, ID E94704622F3A0914523AC7216AE53961230DACD4D955, acesso 09/08/2015, permite fazer a comparação entre as superfícies dos CP's novos e CP's erodidos utilizando as malhas obtidas durante a digitalização e gerando assim imagens colorimétricas que permitem visualizar os desgastes nas superfícies dos tubos, conforme Figura 40.

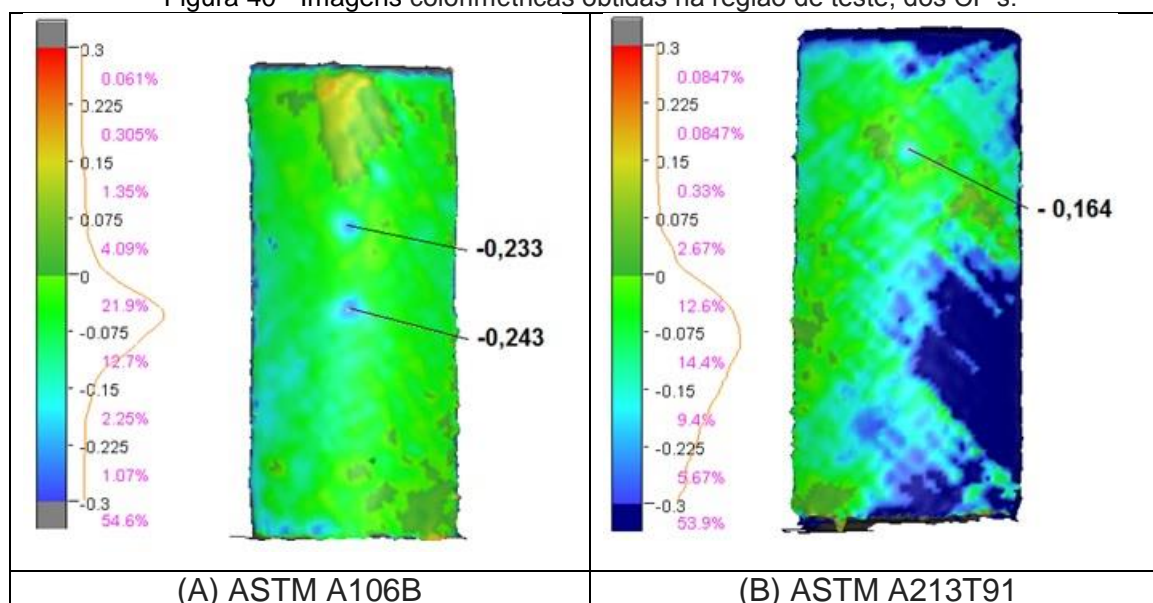
A Tabela XI informa os resultados obtidos na análise com o *software* 3DReshaper, onde os desvios padrões demonstram que os valores são próximos dos desgastes obtidos, tornando o resultado válido qualitativamente.

Tabela XI - Dados dos resultados obtidos, CP's ASTM A106B e ASTM A213T91.

Material	Medido, mm	Diâmetro calculado, mm	Desvio Padrão
ASTMA213 T91	44,60	43,10	0,12
ASTMA106 B	38,10	37,90	0,10

Fonte: Autor, 2014.

Figura 40 - Imagens colorimétricas obtidas na região de teste, dos CP's.



A Figura 40 (A) mostra o CP da liga metálica ASTM A106B onde foi realizado dois testes abrasivos sendo o primeiro atingindo abrasão de 0,233mm de profundidade e o segundo com abrasão de 0,243mm de profundidade. A Figura 40 (B) apresenta o CP da liga metálica ASTM A213T91 onde também foram realizados dois testes de abrasão, no entanto, somente foi possível visualizar o primeiro teste de erosão com o resultado final de 0,164 mm de profundidade. A Figura 25 mostra a imagem fotográfica do comportamento descrito.

6 Conclusões

Conforme as imagens de simulação os equipamentos estão expostos a uma velocidade superior à recomendada, ocorrendo o mecanismo de erosão. Os resultados do ALCP indicam que não ocorre o mecanismo de corrosão de forma predominante.

O Economizador I é o equipamento mais afetado, dentre os equipamentos que estão sob pressão, porque no modelo coincide as maiores velocidades durante o trajeto dos gases de exaustão, e conseqüentemente, lá ocorre a maior taxa de desgaste. Através da simulação do modelo foi possível validar as regiões mais erodidas no interior dos dutos, pois as simulações foram às mesmas já identificadas em relatórios de inspeções da caldeira.

Na ALCP ao analisar a variável espessura, a liga metálica que obteve a menor redução de espessura foi ASTM A210 C, nos conjuntos 1 e 2, nas condições ambientais mais severa dentro da Caldeira 4, considerando até o ponto distante 100 mm da extremidade do tubo, próxima a parede côncava do Economizador I, na direção do precipitador eletrostático. Nas condições ambientais mais severas, posição 50 mm, obteve um percentual de redução de espessura de 67,54% da espessura erodida da liga metálica ASTM A106 B no conjunto 1, e no conjunto 2 atingiu 43,01% da erosão ocorrida na liga metálica ASTM A213 T11, obtendo a melhor performance. Sendo a liga metálica dentre as estudadas a ser preferencialmente aplicada nas condições de testes.

Ao analisar a variável perda de peso, mostra um desempenho superior à resistência à erosão, das ligas metálicas ASTM A210 C e ASTM A213 T11, a variação de peso nos conjuntos 1 e 2, foram as menores. Sendo que as ligas metálicas nos conjuntos 1 e 2, ASTM A210 C e ASTM A213 T11, obtiveram um percentual de 40% e 16,6%, menos perda de peso do que a liga metálica de pior resultado, ASTM A213T91, respectivamente. Porém a liga metálica ASTM A213 T11, não obteve os melhores resultados para as análises de espessura.

No teste ALTB a liga metálica que obteve a menor redução de peso foi ASTM A213 T91. O comportamento erosivo para altas concentrações de material erodente se mostra pouco relevante o tipo de liga metálica aplicada, ou seja, dependendo da concentração de material erodente a liga metálica se torna pouco relevante.

O percentual de sílica e alumina é determinante para a taxa de erosão encontrada, observou-se que a variável composição mineralógica é de extrema relevância para definição de velocidades limites, a cinza volante resultante do processo de combustão de carvão mineral da região de Candiota/RS possuem altos percentuais de óxidos de sílica e óxidos de alumina.

O processo de digitalização 3D através do scanner e posterior análise de superfície se mostrou eficaz para visualização qualitativa dos resultados, facilitando a compreensão do mecanismo de erosão.

7 Sugestões de trabalhos futuros:

- Detalhamento de possíveis dispositivos de equalização na concentração das cinzas volantes no interior do Economizador 1;
- Teste em condições de processo com revestimentos antiabrasivos de cobertura nos tubos;
- Comparação em testes de bancada com outras cinzas volantes, provenientes de outras caldeiras;
- Aperfeiçoamento da bancada de teste, com possibilidade de ajuste de temperatura, erosão em atmosfera inerte;
- Aperfeiçoamento da modelagem 3D e simulação CFD de possíveis soluções de equalização de fluxo;
- Determinação da contribuição da corrosão para o mecanismo erosão-corrosão.

8 Referências

- [1] Das, S.K., Godiwala, K.M., Mehrotra, S.P., Dey, P.K., Dey, A mathematical model to characterize effect of sílica content in the boiler fly ash on erosion behaviour of boiler grade steel, *Journal Of Materials Processing Technology*, p.239–247, 2008;
- [2] ASTM SA213, Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes, 2004;
- [3] ASTM SA210, Standard Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes, 2002;
- [4] ASTM SA106, Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, 2002;
- [5] ASTM G76-95, “Standart Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets”, 1995;
- [6] Lora, E. E. S., Nascimento M. A. R. do, *Geração Termelétrica*, Volume 1, Interciência, 2004;
- [7] Bazzo, E., *Geração de vapor*, 2º edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 1995;
- [8] Braga, R. M., *Medição da Camada de Óxidos em Tubos de Superaquecedores de Caldeiras Aquatubulares por Ultrassom*, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2009;
- [9] ELT CGTEE, *Publicação Restrita*, acervo interno, 2013;
- [10] Singer J. G., *Combustion Fossil Power*, Quarta Edição, Combustion Engineering, INC., pag 5-10, 1991;
- [11] ELT CGTEE, *Publicação Restrita*, acervo interno, 1988;
- [12] ASME Secção I, *Boiler e Pressure Code, Rules for Construction of Power Boilers*, Edição 2007;

- [13] ASME Secção II, Materials, Part A, Ferrous Material Specification, Edição 2003;
- [14] Silva, F. J., Erosão Corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma, tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2008;
- [15] ASTM G76-95, “Standart Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets”, 1995;
- [16] Zum Gahr, K. H., “Microstructure and wear of materials”, Elsevier, 599 p, 1987;
- [17] Wright I. G., Sethi V.K., Markworth A.J., A generalized description of the simultaneous processes of scale growth by high temperature oxidation and removal by erosive impact, Wear, Elsevier, USA, p. 230-237, 1995;
- [18] George Y. L., High Temperature Corrosion And Materials Applications, chapter 8, p235-248, ASM International, p. 461, 2007;
- [19] Huttunen-Saarivirta, E., Antonov, M. , Veinthal, R., Tuiremo, J. , Mäkelä, K., Siitonen, P., Influence of particle impact conditions and temperature on erosion–oxidation of steels at elevated temperatures, Wear, Elsevier, USA, p. 159– 175, 2011;
- [20] UNS, UNIFIED NUMBERING SYSTEM, <http://www.matweb.com/search/SearchUNS.aspx>, 28/06/2015;
- [21] Levy A.V., Erosion-Corrosion of Tubing Steels in Combustion Boiler Environments, Paper No. 236, Corrosion 93, NACE, 1993;
- [22] Edington, J.W., Wright, L.G., Study of particle erosion damage in Haynes Stellite 6B. II: Transmission electron microscopy of eroded surfaces, Wear, Elsevier, USA, p. 131-144, 1978;
- [23] ASTM G119, Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion, 2004;

- [24] Gemelli, E., Corrosão de Materiais Metálicos e Sua Caracterização, 1ª Edição, RJ, LTC, 2001;
- [25] Finnie, I., Some reflections on the past and future of erosion, *Wear*, Elsevier, p. 186–187, 1995;
- [26] E. Raask, Tube erosion by ash impaction, *Wear – Elsevier Sequoia S. A.*, Lausanne, Central Electricity Research Laboratories, Leatherhead, Surrey (Gt. Britain), 1969;
- [27] Costa, R. C., Desenvolvimento de novos revestimentos por abrasão térmica a arco para proteção contra desgaste erosivo em trocadores de calor ar/gases, tese apresentada para obtenção de Título de mestre em engenharia, Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, UFRGS, RS, 2012;
- [28] Das, S.K., Godiwala, K.M., Mehrotra, S.P., Dey, P.K., Analytical model for erosion behaviour of impacted fly-ash particles on coal-fired boiler components, *Journal Sadhana*, volume 31, Índia, pp.583–595, 2006;
- [29] Shida, Y., Fujikawa, H., Particle Erosion Behaviour of Boiler Tube Materials at Elevated Temperature, *Wear*, Vol 103, p. 281-296, 1985;
- [30] Bortoluzzi R. L., Ferreira, C. C., Simulação da ação da velocidade dos gases de exaustão nos dutos de condução do economizador em caldeira de grande porte. In: CIBIM2013, v. 1, LA PLATA. Actas Del - XI Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, 2013;
- [31] Mukhopadhyay N.K. al., “Remaining life estimation of a service exposed economiser tube”, *Eng Fail Anal*, 6, pp. 233–243, 1999;
- [32] Dooley, R.B., Chang, P.S.: *Power Plant Chemistry*, 2000;
- [33] *Revista POWER*, Steam generation – p. 47 à 52, February, 1992;
- [34] Idelchick, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance", Hemisphere, Washington, 1986;

- [35] Indrusiak, M.L.S., Moller, S.V., Escoamento Turbulento na Saída de um Duto Curvo de Seção Retangular Divergente, 1999;
- [36] Raask, E, Mineral Impurities in Coal Combustion, Behavior: Problems, and Remedial Measures, ed. second. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1985;
- [37] Kejelin, N. Z., Comeli, F. W., Estudo da resistência ao desgaste erosivo e corrosivo de diferentes materiais depositados por aspensão térmica a arco: Uma aplicação em aquecedores tubulares do CTJL, VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, VII CITENEL, Rio de Janeiro/RJ, agosto, 2013;
- [38] Santos, N. O. d., Termodinâmica Aplicada às Termelétricas, teoria e prática, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2000;
- [39] Silva, O. J. d., Caracterização Tecnológica de Carvões para Coqueria, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008;
- [40] Pacheco, E. T., Estudo do Beneficiamento a Seco do Carvão da Mina de Candiota-RS, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, UFRGS, 2008;
- [41] Ulhôa, M, B., Origem e Formação de Carvão. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto Forno, São Paulo, ABM, p.10-15, 2003;
- [42] Lunkes, K. M., O carvão das camadas superiores e inferiores da Jazida da Candiota, RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnologica visando seu potencial na geração de energia elétrica, Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010;
- [43] Publicação restrita da CGTEE, Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, 2003;

- [44] Steam its generation and use, the Babcock & Wilcox Company, edição 41, página 20-3;
- [45] ASTM G76-95, "Standart Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets";
- [46] Price, P.M., Clark, J.H., D.J. Macquarrie, Dalton Trans., 101, 2000;
- [47] Cullity, B.D. Elements of X-Ray Diffraction, 2nd Ed.. Addison-Wesley, Reading, MA, 1978;
- [48] Jenkins, R., and Snyder, R. Introduction to X-ray Powder Diffractometry, John Wiley & Sons, New York, NY, 1996;
- [49] Holkar, R., Ramdas, B., Kunal, E., Haridas, B., Cfd Analysis of Gas Flow Behaviour in Economizer, Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 11, PP 31-39, 2014;
- [50] Patel, R.S., Kumbhare, S., Thakur, K., CFD Analysis of Economiser For Reducing Velocity Peaks Near U Bends of Economiser Tube Using ANSYS FLUENT14.5, INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC PROGRESS AND RESEARCH (IJSPR), Volume - 03, 2014;
- [51] Deendayal, Dr. G. V. Parishwad, P. R. Dhamangaonkar, Dr. S. R. Kajale, Dr. M. R. Nandgaonkar and Dr. S. N. Sapali "Effect of Arresters on Erosion in Economizer Zone and its Analysis" AMAE Int. J. on Production and Industrial Engineering, Vol. 01, No. 01, 2010;
- [52] Sobachkin, A., Dumnov, G., Sobachkin, A., Engineering Manager Numerical Basis of CAD-Embedded CFD, White Paper SolidWorks, 2014;
- [53] ASME B46.1 standard, surface texture, 2009;
- [54] Warren, B.E. X-Ray Diffraction, Dover, Mineola, NY, 1990;
- [55] Flores, W. H., Grupo Nanoestruturados - Lab. Raios-X, Campus Bagé, Unipampa, 2015;

[56] Brasileiro, M. I., síntese de mulita por microondas utilizando composições contendo resíduo de caulim, Tese de Doutorado, Universidade Federal De Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Programa De Doutorado em Engenharia de Processos, 2010;

[57] Fontes, J. A., Bortoluzzi, R.L., Ferreira, C. C., Galio, A.F., Mendes, D.R., Pereira, L.B., Digitalização a laser de ligas de aço em formato tubular para análise da erosão, XXVI CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2014, Alegrete, RS, 8 a 10 de outubro de 2014;

[58] Kejelin, N. Z., Comeli, F. W., Estudo da resistência ao desgaste erosivo e corrosivo de diferentes materiais depositados por aspersão térmica a arco: Uma aplicação em aquecedores tubulares do CTJL, VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013;

[59] Marques, S. G. P., Caracterização e Purificação de Quartzos para a Indústria Fotovoltaica, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, UFRJ, 2013;