

**PROGRAMA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO**  
**DA**  
**CGTEE**

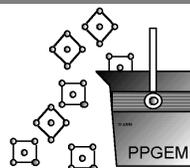
Ciclo 2000 / 2001



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL-UFRGS**



**FUNDAÇÃO LUIS ENGLERT**



**PPGEM**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM**  
**ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE**  
**MATERIAIS**

**PESQUISA APLICADA**

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES COM ELEVADA**  
**RESISTÊNCIA AO DESGASTE: SELEÇÃO DE MATERIAIS E**  
**DESENVOLVIMENTO DE NOVOS REVESTIMENTOS APLICADOS**  
**POR ASPERSÃO TÉRMICA**

**COORDENADORES:**

UFRGS  
CGTEE

PROF. DR. CARLOS PÉREZ BERGMANN - UFRGS  
ENG. LUÍS ANTÔNIO MANSUR

**EQUIPE EXECUTORA:**

PROF. DR. CARLOS PÉREZ BERGMANN  
ENG. MECÂNICO, MSC., JULIANE VICENZI  
ENG. MECÂNICO, MSC., DANIELA LUPINACCI VILLANOVA  
ENG. MECÂNICO, MSC., CAIO MARCELO MARQUES  
ENG. DE MATERIAIS, MSC., MÁRCIO DIAS LIMA  
ENG. DE MATERIAIS ANTÔNIO TAKIMI

---

## **Identificação do projeto – Pesquisa Aplicada**

### **A. Título do projeto**

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES COM ELEVADA RESISTÊNCIA AO DESGASTE: SELEÇÃO DE MATERIAIS E DESENVOLVIMENTO DE NOVOS REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**

### **B. Coordenadores do projeto**

CGTEE: Eng<sup>o</sup> Luís Antônio Mansur

FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

### **C. Entidade Executora**

Fundação Luiz Englert

Av. Osvaldo Aranha, 99 – sala 705c

Centro – Porto Alegre – RS CEP: 90035 – 190

### **D. Custo Total**

R\$114.000,00 (Cento e quatorze mil reais)

### **E. Palavras- Chaves**

- Engenharia de Superfícies
- Resistência ao desgaste
- Aspersão térmica

### **F. Equipe de Pesquisadores**

Eng. Mecânico, Juliane Vicenzi, M. Sc.

Eng. Mecânico, Daniela L. Villanova, M. Sc.

Eng. Mecânico, Caio M. Marques, M. Sc.

Eng. Materiais, Márcio Dias Lima, M. Sc.

Eng. Materiais, Antônio Takimi.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS</b> .....	<b>10</b>
2.1. ECONOMIZADOR .....	10
2.2. EJETORES.....	15
2.3 PÁS E ROTOR DOS VENTILADORES.....	16
2.4. MOINHO .....	16
2.5. CLASSIFICADOR.....	17
2.6. DUTOS DE CONDUÇÃO DO AR E DE CARVÃO .....	17
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>18</b>
3.1. TESTE DE DESGASTE EM LABORATÓRIO .....	18
3.1.1. <i>Preparação das amostras</i> .....	18
3.1.2. <i>Técnica de deposição</i> .....	18
3.1.3 <i>Preparação do material erosivo</i> .....	20
3.1.4. <i>Equipamento de desgaste</i> .....	20
3.1.3. <i>Teste de desgaste</i> .....	22
3.2. TESTE DE DESGASTE NA USINA .....	22
3.2.1. <i>Preparação das amostras</i> .....	22
3.2.2. <i>Teste de desgaste</i> .....	23
3.3. AVALIAÇÃO DO DESGASTE .....	23
3.3.1 <i>Amostras de laboratório</i> .....	23
3.3.1 <i>Amostras do teste na Usina</i> .....	24
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>26</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EROSIVOS .....	26
4.1.1 <i>Cinza de carvão</i> .....	26
4.1.2 <i>Carvão pulverizado</i> .....	29

4.2. TESTE EM LABORATÓRIO .....	31
4.2.1 Economizador.....	31
4.2.2 Ejetor e Classificador.....	37
4.2.3 Pás e rotor dos ventiladores.....	38
4.3. TESTE NA USINA.....	39
4.4 SOLUÇÕES ALTERNATIVAS.....	41
4.4.1. Interior do moinho.....	41
4.4.2. Interior dos dutos.....	41
4.3 CONFRONTO COM OS RESULTADOS ESPERADOS.....	42
<b>5. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....</b>	<b>43</b>
<b>6. ORÇAMENTO PREVISTO E EXECUTADO .....</b>	<b>44</b>
<b>7. TECNOLOGIA DE DIFUSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>

## RESUMO

A Usina Termoeletrica Presidente Medici e responsavel pela geracao de energia eletrica da regio sul do Estado. Esta energia e obtida com a queima do carvao mineral encontrado na regio. Operando em suas condicoes atuais, esta usina enfrenta varios problemas de desgaste erosivo em componentes/estruturas sujeitos tanto a acao do proprio carvao quanto da cinza gerada apos a sua queima. Este desgaste reduz a vida util dos componentes e aumenta o numero de paradas para manutencao, ocasionando um maior custo operacional.

Atraves das tecnicas de engenharia de superficies e possivel recobrir materiais menos nobres com materiais mais resistentes, por exemplo, ao desgaste erosivo e com isso minimizar os problemas gerados durante a exposicao destes componentes a materiais erosivos. Uma das tecnicas e a Aspersao Termica, que permite a deposicao de varios tipos de materiais e, portanto, possibilita a escolha adequada para cada caso.

Por parte da coordenacao da Usina, foram definidos os componentes e estruturas mais significativos para estudo neste projeto, a saber: tubos dos economizadores, ejetores, pas e rotor dos ventiladores, interior do moinho, classificadores e dutos de conducao do ar e carvao. Apos a determinacao destes componentes, seguiu-se um estudo que fornecesse embasamento para as escolhas dos revestimentos mais adequados a cada caso, bem como das tecnicas de aspersao termica mais indicadas.

Seguiu-se a caracterizacao dos materiais responsaveis pelo desgaste erosivo, a saber, o carvao mineral e a cinza de carvao volante. Estes materiais foram caracterizados quanto a analise granulometrica, composicao mineralogica por difracao de raios-X e microestrutura por microscopia eletronica de varredura.

Para os testes de desgaste laboratoriais, foi desenvolvido um equipamento para o ensaio, segundo a norma ASTM G-76. Este equipamento permite ensaios de desgaste erosivo tanto a quente quanto a frio, alem da variacao do material erosivo bem como do angulo de ataque.

Foi utilizado um ao SAE 1020 como substrato, e como revestimentos protetores foram estudadas as seguintes ligas: 88HV, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr, WC-12Co e WC-CrC-Ni. Para a obtencao de dados comparativos, os ensaios de desgaste tambem foram realizados no ao sem revestimento. Em testes laboratoriais preliminares verificou-se que a liga 88HV apresentou maior desgaste que o ao; portanto, esta liga foi eliminada nos ensaios laboratoriais posteriores.

De acordo com os resultados obtidos, foram sugeridos os seguintes materiais para cada caso:

- Tubos dos economizadores: liga WC-12Co (HVOF);
- Ejetores: liga WC-12Co (HVOF);
- Pás e rotores dos ventiladores: WC-12Co (HVOF) ou liga FeCrNiMoB (arco elétrico);
- Interior do moinho: Placas cerâmicas de alumina;
- Classificador: liga WC-12Co (HVOF);
- Dutos de condução do ar e carvão: cimento refratário de carbetto de silício

# 1. INTRODUÇÃO

A Usina Termoelétrica Presidente Médici utiliza o carvão mineral de jazidas carboníferas da região sul do Estado na geração de energia elétrica. A queima do carvão mineral gera um alto teor de cinzas, responsáveis por problemas de desgaste intensos e localizados.

O desgaste erosivo a altas temperaturas é um sério problema na indústria de geração de eletricidade pela queima do carvão, principalmente quando este carvão é rico em constituintes de elevada dureza. Geralmente, é aceito que a erosão é principalmente afetada por parâmetros como velocidade de impacto, ângulo de impacto, concentração de particulados (frequência de impacto), tamanho das partículas, forma e propriedades das partículas e temperatura do material que está sendo erodido.

Um dos mais intrigantes aspectos da erosão é a influência do formato das partículas, que foi estudado devido ao grande efeito que esta característica possui na taxa de erosão. Foi observado por muitos pesquisadores que partículas angulares produzem uma taxa de erosão significativamente maior do que a produzida por partículas esféricas do mesmo tamanho. Partículas de cinza volante podem ser classificadas em dois grandes grupos: angular e esféricas. Em geral, pequenas partículas de cinza volante têm um formato esférico.

Também foi descoberto, empiricamente, que a erosão pode ser descrita por uma lei de potências da velocidade de impacto. O expoente de velocidade depende das características físicas do material envolvido e condições experimentais. Os valores do expoente de velocidade para materiais dúcteis variam de 2,3 a 2,7; a faixa de potências para materiais frágeis é de 2 a 4. Isto é, a taxa de erosão é fortemente dependente da velocidade de impacto.

O efeito do ângulo de impacto é razoavelmente bem conhecido para materiais tanto frágeis quanto dúcteis. Em geral, a taxa de erosão para materiais dúcteis cresce rapidamente de zero a um valor máximo quando o ângulo de impacto varia de 0° para um valor em torno de 15° e 30°. Então, este diminui para  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  do valor máximo a 90°.

É importante também estabelecer a influência do tamanho de partículas na taxa de erosão de materiais dúcteis, já que a cinza volante produzida na combustão de carvão tem uma ampla distribuição de tamanho de partículas. Existem duas características interessantes em conjunto com o tamanho das partículas: tamanho limiar e nível de saturação. A erosão aumenta linearmente até um certo ponto

quando a concentração de particulados aumenta, então torna a diminuir devido às interações partícula-partícula. Em outras palavras, a interferência causada em uma partícula incidente por uma partícula refletida não é um fator importante na erosão ao menos que a concentração de partículas seja grande suficiente.

Além disso, é bem conhecido que a taxa de erosão é significativamente afetada pela temperatura da superfície. Um aumento da temperatura pode aumentar ou diminuir a taxa de erosão dependendo do material envolvido. Em geral, a taxa de erosão aumenta com a temperatura é diferente dependendo do tipo de material.

O desgaste erosivo é encontrado em componentes como os tubos dos trocadores de calor dos economizadores. Estes tubos não deveriam apresentar falhas, pois contêm vapor sob alta pressão e, além disso, são responsáveis pela troca de calor aumentando a eficiência térmica da caldeira.

Outro problema, por exemplo, encontrado na indústria de geração de eletricidade é o desgaste, também erosivo, dos ejetores responsáveis pela mistura do ar primário com o carvão pulverizado. Este desgaste contínuo leva a reparos constantes neste equipamento e a possível perda de eficiência do mesmo.

A Engenharia de Superfícies vem desenvolvendo, nos últimos anos, técnicas de proteção de materiais contra solicitações oriundas das condições de serviço que levam a diminuição da vida útil dos materiais. Técnicas de aspersão térmica como HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), Plasma e Oxi-gás possibilitam o recobrimento de partes/componentes de estruturas e máquinas com materiais mais resistentes a ataques por corrosão e/ou desgaste. Os resultados obtidos permitem a recuperação total dessas estruturas, dando-lhes sobrevidas condizentes com as expectativas de vida originais, de projeto.

A técnica de aspersão térmica consiste basicamente no seguinte: um material (metais, cerâmicas, polímeros ou compósitos) sob a forma de *spray* (pulverização de pequenas gotas) é depositado sobre uma superfície previamente preparada. Este material, que inicialmente pode se encontrar na forma de pó, fio ou vareta, é alimentado em uma pistola de aspersão que possui uma fonte de calor, cuja origem pode ser plasma, combustão de gases ou arco elétrico (dependendo do tipo de equipamento). A fonte de calor tem a função de fundir o material a ser depositado. Os gases do plasma, ar comprimido, os gases de combustão, devido as suas altas temperaturas, se expandem violentamente acelerando as partículas do material fundido e/ou semi-fundido contra a superfície do substrato. Ao atingirem a superfície do substrato em um estado altamente energético, as partículas incidentes se arrefecem e aderem a esta superfície formando o revestimento.

Pode-se dizer que o campo de aplicação desta técnica se encontra em três grandes categorias:

- 1) Na melhoria da performance de partes e componentes de máquinas pela união das propriedades do material base e do revestimento para obter uma combinação de características que não são possíveis com materiais homogêneos.
- 2) No uso ótimo de elementos ou compostos que são caros, raros ou difíceis de se obter.
- 3) Na inovação de produtos técnicos através da introdução de novos materiais, como por exemplo: metais ou ligas, ou ligas com grãos cerâmicos dispersos cujo tamanho de partícula e quantidade podem variar facilmente; pós-cerâmicos misturados, incorporando grãos cerâmicos com fibras para reforçar a resistência dos revestimentos, e cerâmicas combinadas com plásticos para obter revestimentos de alta porosidade.

Este projeto tem como principal objetivo desenvolver novas soluções, através da Engenharia de Superfícies, para a otimização de partes de equipamentos sujeitas a solicitações de desgaste, visando o aumento de vida útil e uma melhor performance desses equipamentos em serviço. Ao ser atingida esta meta, será melhorada a qualidade da manutenção e do gerenciamento das manutenções realizadas na planta da Usina Termoelétrica Presidente Médici, bem como terão seus custos de manutenção e operação minimizados e maximizados os indicadores de disponibilidade operacional da Usina.

Com o desenvolvimento deste estudo espera-se obter os seguintes resultados:

- aumento da vida útil e disponibilidade operacional dos equipamentos e seus componentes auxiliares instalados na planta desta Usina;
- diminuição do número de paradas para manutenção e do tempo destas;
- melhor desempenho dos equipamentos;
- redução dos custos de operação;
- desenvolvimento de novas técnicas que visem maximizar a disponibilidade operacional das unidades de geração, seus equipamentos principais e auxiliares;
- expectativa de redução dos custos de manutenção estimada, incluindo materiais e mão-de-obra (atualmente, este custo é estimado em R\$ 100.000,00/ano).

## 2. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS

A coordenação do projeto por parte da Usina Termoeétrica Presidente Médici, localizada em Candiota – RS, definiu os principais pontos nos quais desenvolveu-se este estudo, e que poderiam ser solucionados através das técnicas de Engenharia de Superfícies, a saber:

- i) Tubos dos economizadores;
- ii) Ejetores;
- iii) Interior do moinho;
- iv) Pás e rotor dos ventiladores
- v) Classificador;
- vi) Dutos de condução do ar e carvão.

### 2.1. Economizador

Economizadores são trocadores de calor determinados a elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira, mediante o aproveitamento de parte da energia residual, ainda disponível dos gases de combustão (BAZZO, 1992).

No caso dos economizadores da Usina Termelétrica Presidente Médici, os gases de combustão, juntamente com a cinza gerada na queima do carvão, saem de dois dutos do topo da caldeira unidos antes do contato com os tubos dos trocadores de calor, conforme as Figuras 2.1 e 2.2. A Figura 2.3 apresenta em detalhe os tubos dos trocadores de calor.



Figura 2.1. Vista frontal do economizador (Maquete da sala de Visitação – CGTEE Candiota).



Figura 2.2. Vista lateral do economizador (Maquete da sala de Visitação – CGTEE Candiota).



Figura 2.3. Vista lateral do economizador, em corte, mostrando em detalhe os tubos do trocador de calor (Maquete da sala de Visitação – CGTEE Candiota).

A presença do economizador é vantajosa, uma vez que aumenta o rendimento térmico da unidade geradora de vapor. Portanto, a integridade dos tubos dos trocadores de calor deve ser mantida para que sempre se obtenha a máxima eficiência do equipamento. Além disso, um rompimento dos tubos ocasionado pelo desgaste, pode gerar perda de água com uma conseqüente parada da unidade. Esta  gua escorre em direa ao precipitador e se mistura às cinzas, formando uma espécie de cimento (INDRUSIAK, 1997).

A queima do carvão produz dois tipos de cinza: uma pesada, que se precipita na tremonha sendo armazenada em aterro; e uma leve que é arrastada junto aos

gases de combustão passando pelos economizadores, seguindo até o precipitador eletrostático.

A cinza leve, ao passar pelos tubos dos trocadores de calor do economizador, pode ocasionar erosão nestes devido a sua alta erosividade. Em um estudo anterior foi verificado que o escoamento das cinzas juntamente com os gases de combustão chega com velocidades e concentrações de cinzas distribuídas irregularmente sobre o economizador, portanto, a erosão também não é uniforme. Para demonstrar a erosão nos tubos, foram traçadas isolinhas de erosão da primeira camada de tubos do Economizador 1, conforme a Figura 2.4 (INDRUSIAK, 1997).

Em conclusão ao estudo feito por Indrusiak (1997) foram propostas alterações geométricas simples visando melhorar a distribuição do escoamento das cinzas e dos gases de combustão, assim como da erosão sobre os tubos. Foi desenvolvido um dispositivo que utiliza a técnica de controle da camada limite por meio da injeção de fluido com mais energia na região de separação da camada limite, desviado de uma região anterior do escoamento. Procurou-se melhorar, com isso, a distribuição de velocidades, reduzindo-se a zona de formação de grandes vórtices.

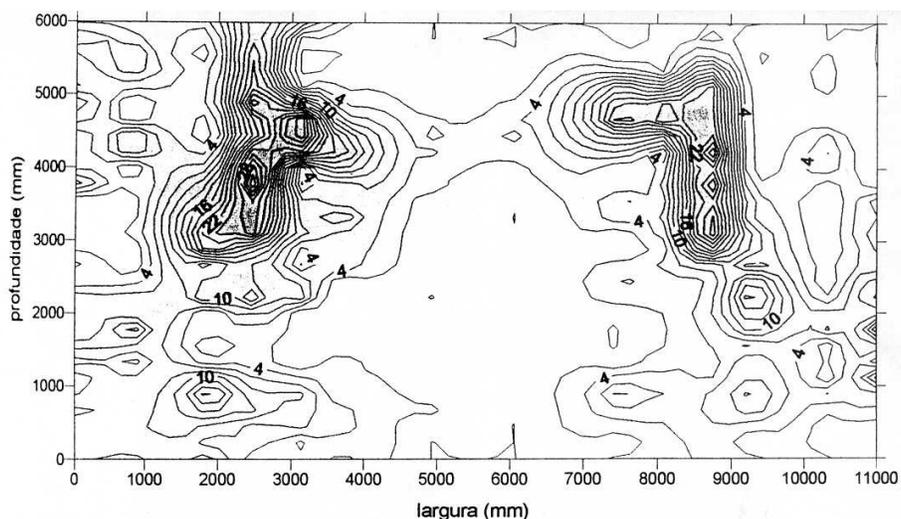


Figura 2.4: Isolinhas de erosão nos tubos da primeira camada do Economizador 1 (INDRUSIAK, 1997).

Em estudos anteriores verificou-se uma maior erosão nos dois tubos mais próximos a parede externa do Economizador 1, - a qual apresenta maior curvatura na saída da caldeira -, chegando a comprometer a integridade dos mesmos. Para solucionar este problema, foi construída uma parede “falsa”, visando concentrar o maior fluxo das cinzas próximas à parede externa, com isso seria minimizada a erosão no restante dos tubos. Além disso, os primeiros três tubos do primeiro banco

de tubos do Economizador 1 foram cobertos com uma chapa de aço, buscando-se uma proteção alternativa para a erosão destes.

Em visita técnica a Usina Presidente Médici pode-se comprovar a presença da parede “falsa” e das chapas dobradas utilizadas na proteção dos tubos. Com isso, observou-se uma modificação nas isolinhas de erosão propostas inicialmente por Indrusiak, 1997. Esta modificação pode ser devida à inserção da parede “falsa” dentro do Economizador 1, ou ainda devido a uma redução na operação da caldeira (neste período a caldeira operou em apenas 70% de sua capacidade). Durante a observação do primeiro banco de tubos do Economizador 1, notou-se que a erosão ocorreu próximo a parede “falsa” sobre as chapas que recobriam os mesmos, conforme a Figura 2.5. A Figura 2.6 apresenta em detalhe a região de erosão.



Figura 2.5: Erosão sobre as chapas dos dutos do trocador de calor no Economizador 1 (CGTEE – Candiota).



Figura 2.6: Detalhe da erosão nas chapas próximas à parede falsa (CGTEE – Candiota).

Observou-se também que na região central do Economizador 1 as chapas e os tubos estão sofrendo apenas corrosão. Esta corrosão deve-se, provavelmente, às altas temperaturas atingidas durante o processo, conforme ilustrado na Figura 2.7. As regiões de corrosão e erosão apresentaram um limite bem definido, segundo a Figura 2.8.



Figura 2.7: Detalhe da corrosão nos tubos centrais do Economizador 1 (CGTEE – Candiota).

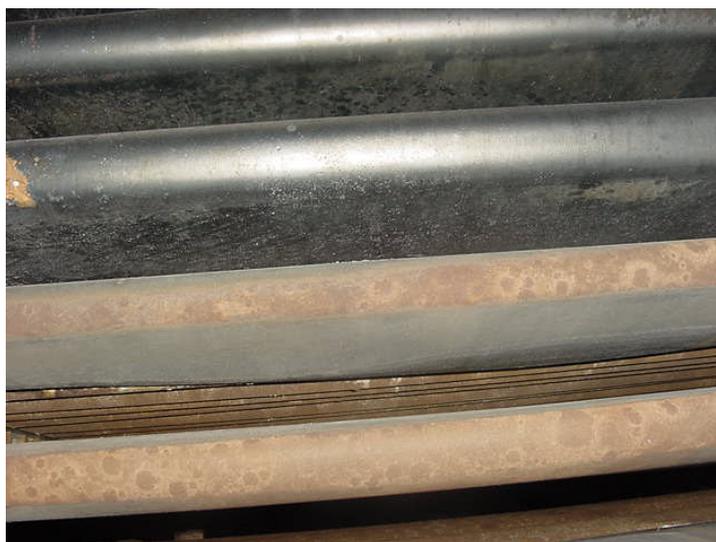


Figura 2.8: Limite entre a região da corrosão e região da erosão nos tubos centrais do Economizador 1 (CGTEE – Candiota).

Portanto, pode-se inferir que o desgaste erosivo ocorre pela ação das cinzas de carvão, em temperaturas elevadas (em torno de 300 °C) e em múltiplos ângulos.

## 2.2. Ejetores

Nos ejtores ocorre a mistura entre o ar primário, previamente aquecido, e o carvão pulverizado, proveniente dos silos de armazenagem. Esta mistura através de tubulações apropriadas é levada até a caldeira, onde ocorrerá a queima, e posterior geração de energia. Os ejtores são mostrados na Figura 2.9, em vista frontal na maquete, e na Figura 2.10, durante a operação na Usina.



Figura 2.9: Vista frontal dos ejtores (Maquete da sala de Visitaçã – CGTEE Candiota).



Figura 2.10: Ejtores durante a operação na Usina (CGTEE – Candiota).

Devido à alta abrasividade do carvão, associada a sua velocidade, tanto as tubulações, quanto os ejtores estão sujeitos a um desgaste bastante acentuado, chegando a romper a parede do ejtor e/ou dos dutos, principalmente em regiões

com ângulos agudos. Alguns ejetores, para continuarem em operação apresentam reparos, como mostrado em detalhe na Figura 2.11.

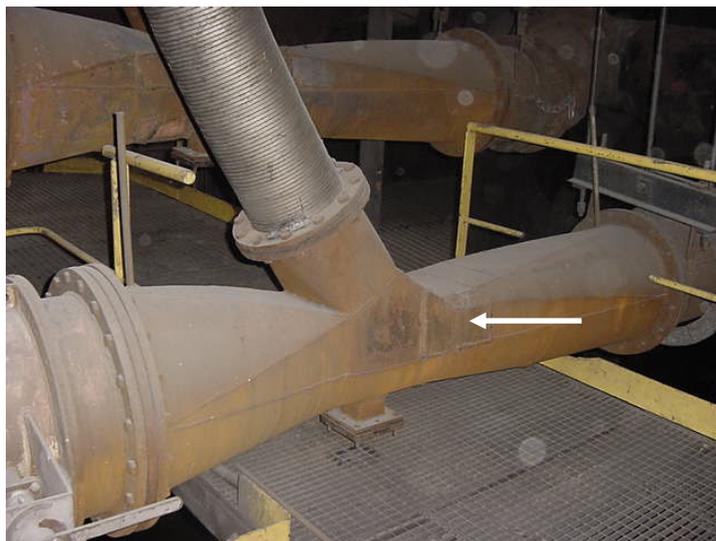


Figura 2.11: Detalhe do ejetor, a seta indica um reparo feito na parede externa do ejetor (CGTEE – Candiota).

Pode-se inferir então, que o desgaste erosivo ocorre, neste caso, pela ação do carvão pulverizado, em temperaturas em torno de 80°C e em baixos ângulos de ataque.

## 2.3 Pás e rotor dos ventiladores

Os ventiladores são responsáveis pela circulação forçada do ar, com a função de retorno do carvão grosseiro dos ciclones ao moinho, arrastando partículas deste. Em geral, o carvão contém grandes quantidades em volume de partículas extremamente abrasivas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ ). Estas partículas são as responsáveis pela erosão de componentes tais como as pás e o rotor dos ventiladores. O desgaste erosivo ocorre nestes componentes em baixa temperatura e em múltiplos ângulos.

## 2.4. Moinho

A moagem descontínua em moinhos de bolas é um processo de redução granulométrica. Os moinhos de bolas são equipamentos constituídos por um cilindro oco, de metal, com um eixo na posição horizontal sobre o qual é imposto um

movimento de rotação. No seu interior rodam os corpos moedores em conjunto com os materiais a serem moídos. A ação de moagem ocorre por choque, esmagamento, corte e atrito dos materiais que se encontram misturados com estes corpos moedores (Ribeiro, 2001).

Em uma usina termoelétrica, o moinho de bolas é responsável pela cominuição do carvão mineral utilizado na geração de eletricidade. Durante esta operação, os choques e o atrito entre as bolas, a parede e a matéria-prima, ocasionam o desgaste erosivo da parte interna do moinho bem como dos corpos moedores. Este desgaste ocorre em baixa temperatura e em ângulos de ataque de 30° e 60°.

## **2.5. Classificador**

Os classificadores do tipo ciclones atuam como separadores granulométricos, que pelo princípio de gravimetria separam as partículas grossas e finas do carvão. A fração mais fina, o carvão pulverizado, segue para os silos de armazenamento, enquanto que a fração mais grosseira retorna para o moinho através de uma ventilação forçada.

O sistema de peneiramento dos ciclones é composto de aletas que sofrem a ação do carvão, gerando nas mesmas um desgaste erosivo.

O desgaste erosivo ocorre, portanto, pela ação do carvão pulverizado, em baixas temperaturas e em baixos ângulos de ataque.

## **2.6. Dutos de condução do ar e de carvão**

Responsáveis pela condução da mistura ar primário-carvão, os dutos estão sujeitos ao desgaste erosivo pela ação do carvão pulverizado, que circula a uma velocidade de 30m/s e a uma temperatura em torno de 80°C. Portanto, o desgaste ocorre em função da ação do carvão pulverizado, em baixa temperatura e em baixo ângulo de ataque, como 30°.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Teste de Desgaste em Laboratório

##### 3.1.1. Preparação das amostras

As amostras para testes de desgaste, confeccionadas em aço SAE 1020, apresentaram a geometria indicada na Figura 3.1. Para que não fosse necessária uma taxa de aquecimento tão elevada, as amostras foram confeccionadas com uma concavidade, indicada na mesma figura, reduzindo, de maneira efetiva, o volume do material a ser aquecido.

Após a conformação das amostras, estas foram submetidas a um jateamento abrasivo com granalhas de aço, preparação inicial para a etapa de recobrimento pela técnica de aspensão térmica.

A seguir, as amostras foram revestidas com as seguintes ligas: 88HV,  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ , WC-12Co e WC-CrC-Ni, com os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 3.1. Além das amostras revestidas, foram utilizados como padrão corpos-de-prova de aço SAE 1020, com a mesma configuração indicada na Figura 3.1.

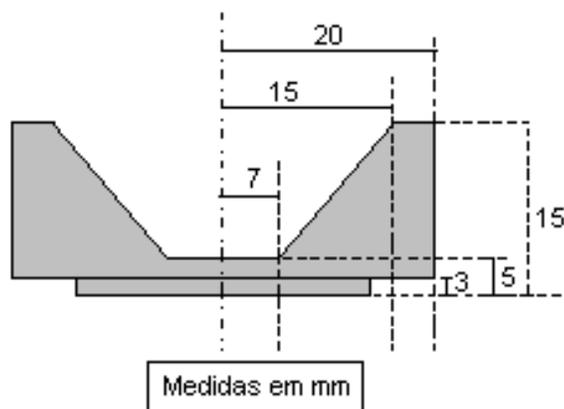


Figura 3.1. Vista em corte da amostra atual utilizada nos testes de desgaste. O calor (chama do maçarico) incide na parte côncava.

##### 3.1.2. Técnica de deposição

A técnica de aspensão térmica utilizada neste trabalho para a deposição dos revestimentos foi o HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel Flame*), Figura 3.2. Este equipamento é responsável por gerar altíssimas velocidades de impacto às partículas (entre 650-1000 m/s). Em geral, os revestimentos produzidos por este tipo

de equipamento possuem baixa porosidade (entre 0,1 e 5%) e grande força de adesão (vários revestimentos superam facilmente 10.000 psi). Este equipamento é baseado na queima da mistura O<sub>2</sub>-combustível dentro de uma câmara de combustão a altas pressões. Os gases são acelerados por *nozzles* especiais a velocidades de até 3000 m/s. O material na forma de pó pode ser injetado axialmente (como no *Jet-Kote* ou *Metco Diamond Jet*) ou radialmente (*Tafa JP-5000*). O tempo de residência na chama é muito pequeno (poucos milissegundos), o que faz com que os revestimentos possuam baixa quantidade de óxidos. A desvantagem deste tipo de equipamento é a relativa baixa temperatura da chama, o que impossibilita o uso de muitos óxidos cerâmicos, e o grande consumo de gases.

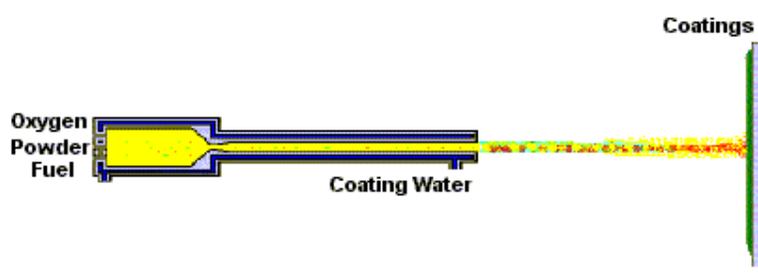


Figura 3.2. Diagrama esquemático do funcionamento da técnica de aspersão térmica por HVOF

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros de aspersão empregados na deposição das ligas protetoras.

Tabela 3.1 – Parâmetros de aspersão de acordo com o material do revestimento.

Parâmetros	WC-12Co	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> -NiCr	WC-CrC-Ni
Composição química	88%WC e 12%Co	75%Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> , 20%Ni e 5%Cr	73% WC, 20%CrC e 7%Ni
Fluxo de Oxigênio (l/min)	873	944	873
Vazão de Querosene (l/min)	0,35	0,38	0,35
Distância de aspersão (mm)	350	350	350
Taxa de alimentação (rpm)	3,0	2,5	3,0

Após a deposição foi necessário estabelecer uma superfície uniforme a ser desgastada de forma similar em todas as amostras, retirando rugosidades superficiais e/ou lamelas do material que não ficaram bem aderidas. Para isto, as duas superfícies paralelas das amostras foram lixadas (seqüência de lixas: 180, 220, 320, 600), as amostras foram limpas no ultrassom em imersão em álcool e secas em

estufa. Esta metodologia também foi adotada na preparação das amostras padrão (aço SAE 1020).

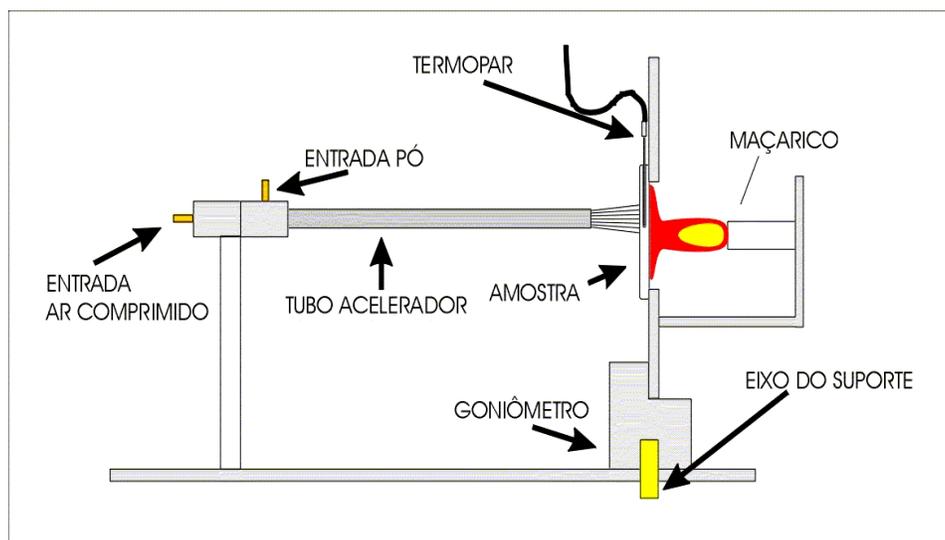
### 3.1.3 Preparação do material erosivo

As cinzas utilizadas como erosivo no ensaio de desgaste foram preparadas na seguinte seqüência, visando a padronização do ensaio:

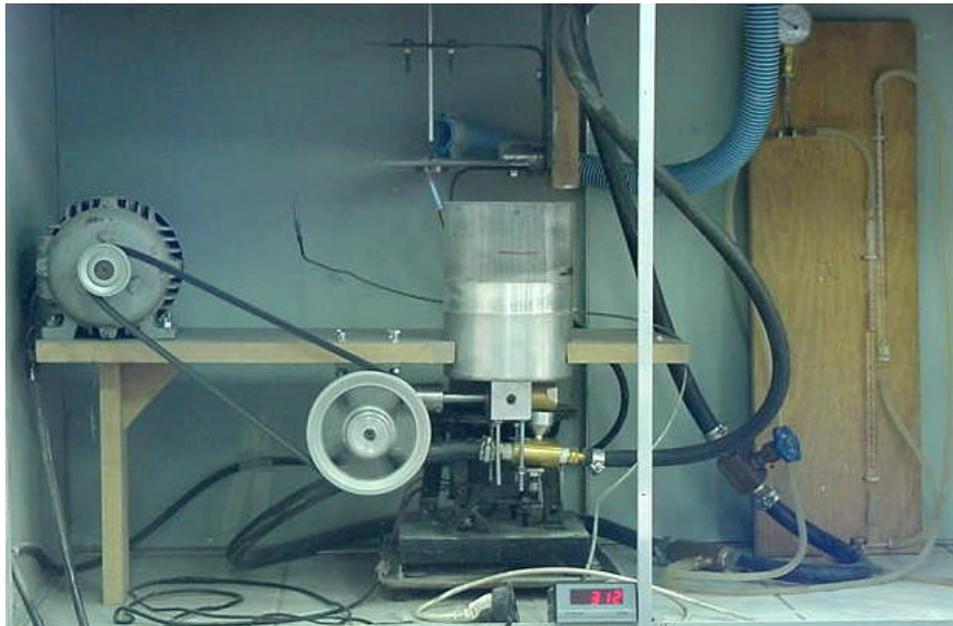
- i) secagem em estufa a 150°C;
- ii) peneiramento em mesh 24;
- iii) manutenção em estufa da quantidade empregada em cada ensaio;
- iv) cálculo do fluxo de cinza em função do tempo de ensaio.

### 3.1.4. Equipamento de desgaste

Os ensaios de erosão realizados em laboratório visaram reproduzir as condições que ocorrem na prática nos componentes sujeitos ao desgaste em uma usina termoeletrica. Para simular essas condições, desenvolveu-se um aparato experimental, como é mostrado na Figura 3.3.



(a)



(b)

Figura 3.3. Equipamento de desgaste desenvolvido para os ensaios em laboratório: (a) Diagrama esquemático e (b) Fotografia durante a operação.

O dispositivo foi desenvolvido baseado na norma ASTM G-67. O tubo acelerador é a principal parte do dispositivo, onde as partículas erosivas são aceleradas e se distribuem ao longo da seção. Antes do fluxo de ar chegar ao tubo acelerador passa por um estrangulamento do tipo “de Laval” visando eliminar variações na velocidade das partículas erosivas devido a flutuações na pressão da linha de ar comprimido. A velocidade foi controlada através de uma válvula conectada a uma coluna d’água, para obter-se um ajuste fino.

As diferentes temperaturas na amostra foram obtidas através da chama de um maçarico a gás colocado próximo a parte posterior desta. Esta chama permitiu atingir temperaturas de até 400°C e o controle foi efetuado através de um termopar inserido na amostra.

O goniômetro acoplado ao suporte da amostra permitiu variar os ângulos de ataque até 180°.

O material erosivo foi armazenado em um reservatório, por sua vez acoplado a uma mesa vibratória, facilitando o fluxo de pó na entrada do Venturi. Garantiu-se, portanto, um fluxo constante de partículas.

### 3.1.3. Teste de desgaste

Os parâmetros do ensaio de desgaste foram ajustados conforme as condições de desgaste de cada componente em operação. A partir disto, estes parâmetros foram mantidos constantes durante os experimentos, conforme consta na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros do ensaio de desgaste utilizado para cada componente.

Parâmetros do teste de desgaste	Componentes / Estruturas			
	Tubos do economizador	Ejetor	Pás e rotor dos ventiladores	Classificador
Fluxo de partículas (g/min)	6,5	6,5	6,5	6,5
Velocidade das partículas (m/s)	30	30	30	30
Temperatura média (°C)	310	80	80	60
Tempo (h)	10	10	10	10
Ângulo de ataque (°)	30, 90	30	30, 60,90	30
Material erosivo	cinzas	cinzas*	cinzas*	cinzas*

\* Apesar do material erosivo na Usina ser o carvão, utilizou-se as cinzas como erosivo pois estas apresentam maior agressividade.

## 3.2. Teste de Desgaste na Usina

Simultaneamente aos testes em laboratório, propôs-se a realização de testes de desgaste erosivo na Usina. Estes testes foram efetuados dentro do economizador, uma vez que este mostrou ser o componente submetido às piores condições de desgaste: devido ao material erosivo, as cinzas e as altas temperaturas impostas neste ambiente (~300°C).

### 3.2.1. Preparação das amostras

As amostras utilizadas para este teste foram anéis do próprio tubo revestidos com as ligas 88HV, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr, WC-12Co e WC-CrC-Ni, fixos em um sistema como ilustra a Figura 3.4. Para efeito comparativo, também foi analisado o aço sem revestimento.

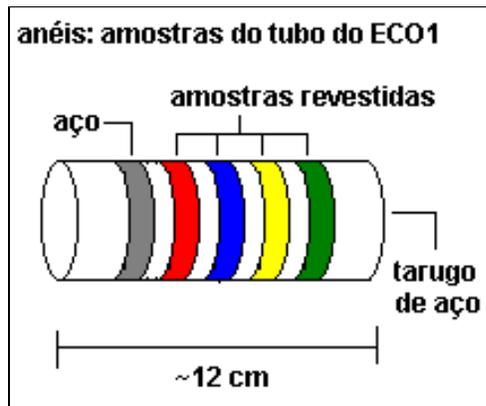


Figura 3.4: Desenho esquemático do aparato com as amostras para testes na Usina dentro do economizador.

### **3.2.2. Teste de desgaste**

Durante uma parada para manutenção, o sistema apresentado na Figura 3.4 foi fixado através de soldagem dentro do Economizador 4. Os anéis foram submetidos ao desgaste sob as mesmas condições de temperatura e fluxo de cinza que os tubos dos trocadores de calor. O sistema de anéis foi inserido no local de maior desgaste anteriormente verificado, submetidos, portanto, às condições mais severas dentro do economizador. O ensaio teve início quando a caldeira entrou em operação. O sistema foi retirado do economizador após um período de 28 dias, quando nova parada para manutenção foi necessária.

## **3.3. Avaliação do desgaste**

### **3.3.1 Amostras de laboratório**

O desgaste das amostras foi avaliado através da perda de espessura na região desgastada em relação à região não desgastada. Para quantificar a perda de material dos revestimentos estudados, utilizou-se um relógio comparador milesimal Mitutoyo, com um erro aproximado de 0,001mm. Os corpos-de-prova foram colocados em uma superfície plana e com o relógio comparador quantizou-se a perda de material. Desta forma, pode-se comparar a performance dos revestimentos utilizados, bem como o padrão (aço SAE 1020), em função da avaliação da profundidade do desgaste.

A Figura 3.5 mostra um diagrama esquemático do deslocamento de um relógio comparador sobre uma superfície plana desgastada, indicando o procedimento adotado na avaliação do desgaste.

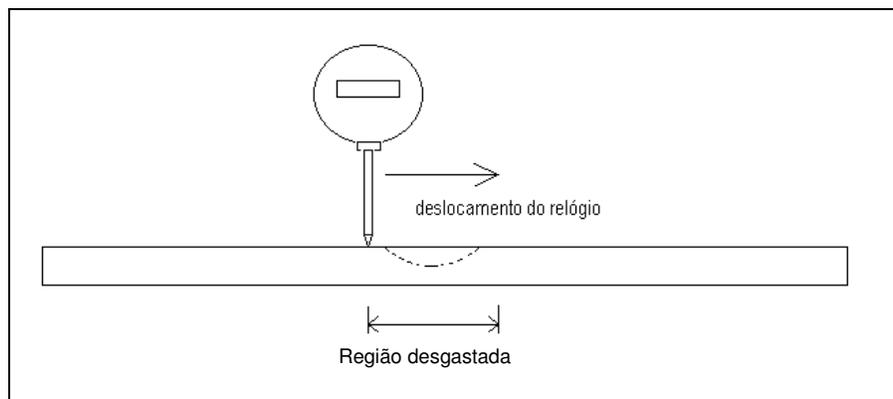


Figura 3.5. Diagrama esquemático do deslocamento do relógio comparador sobre uma superfície plana desgastada.

### **3.3.1 Amostras do teste na Usina**

Os anéis foram avaliados segundo a perda de espessura através da variação do diâmetro externo. Para tanto, foi utilizada a técnica de medição óptica linear pelo método de silhueta, sendo a mais indicada devido a sua resolução (0,005 mm).

A Figura 3.6 apresenta o microscópio óptico utilizado no método de silhueta.

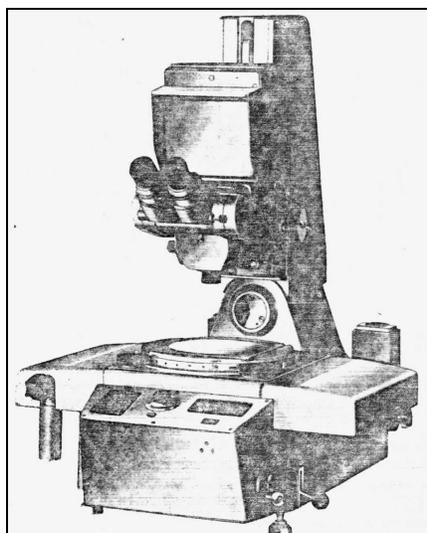


Figura 3.6. Microscópio de medição óptica Zeiss (Santos e Irigoyen, 1995).

Por este processo mede-se na silhueta (projeção) da peça e não na própria peça. O sistema ótico do microscópio projeta a peça na objetiva, na qual existe gravado um conjunto de traços (retículo ou reticulado) que se constituem nas ferramentas de apalpação ótica.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterização dos materiais erosivos

#### 4.1.1 Cinza de carvão

A cinza de carvão foi caracterizada segundo a análise granulométrica, difração de raios-X, fluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

**Análise granulométrica.** É necessário fazer uma análise da distribuição granulométrica da cinza de carvão, uma vez que o tamanho de partículas pode interferir nos mecanismos de desgaste erosivo quando estas incidem sobre os tubos dos trocadores de calor do economizador. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 4.1: Análise granulométrica por difração a *laser*.

Amostra	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)
Cinza de carvão	3,40	27,2	48,7

Obs: D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> e D<sub>90</sub> são porcentagens (10, 50 e 90%) nas quais as partículas encontram-se abaixo do diâmetro especificado.

O diâmetro médio das partículas da cinza de carvão analisada é aproximadamente 27,2 μm. A distribuição apresentada é muito próxima de uma distribuição normal Gaussiana.

**Análise química.** A análise química foi enviada pelo coordenador do projeto da Usina Termoelétrica Presidente Médici. Os resultados encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Análise química da cinza de carvão.

Elementos	%
SiO <sub>2</sub>	69,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,55
CaO	1,47
MgO	0,45
Na <sub>2</sub> O	0,47
K <sub>2</sub> O	1,22
SO <sub>3</sub>	0,5
TiO <sub>2</sub>	0,5

Através da análise química da cinza de carvão verifica-se que esta é composta em sua maioria de  $\text{SiO}_2$  (69,15%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (19,39%) e outros óxidos fundentes como o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (mais significativos). O desgaste que a cinza de carvão pode causar está relacionado com elementos erosivos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , compostos de maior dureza, como cita Bu-Qian Wang e Kevin Luer (1998).

**Análise mineralógica.** Revela os minerais que compõem a cinza de carvão. Conhecendo-se as fases presentes pode-se inferir o grau de agressividade em função da dureza de cada mineral. A Figura 4.1 apresenta o difratograma da cinza de carvão. Observa-se que a cinza de carvão é composta pelos minerais: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) e silimanita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ); pela forma do difratograma pode-se inferir que esta apresenta um pouco de fase amorfa. A dureza dos minerais constituintes da cinza de carvão influencia no desgaste erosivo destas partículas em um material alvo; a Tabela 4.3 apresenta a dureza dos minerais que compõem esta cinza.

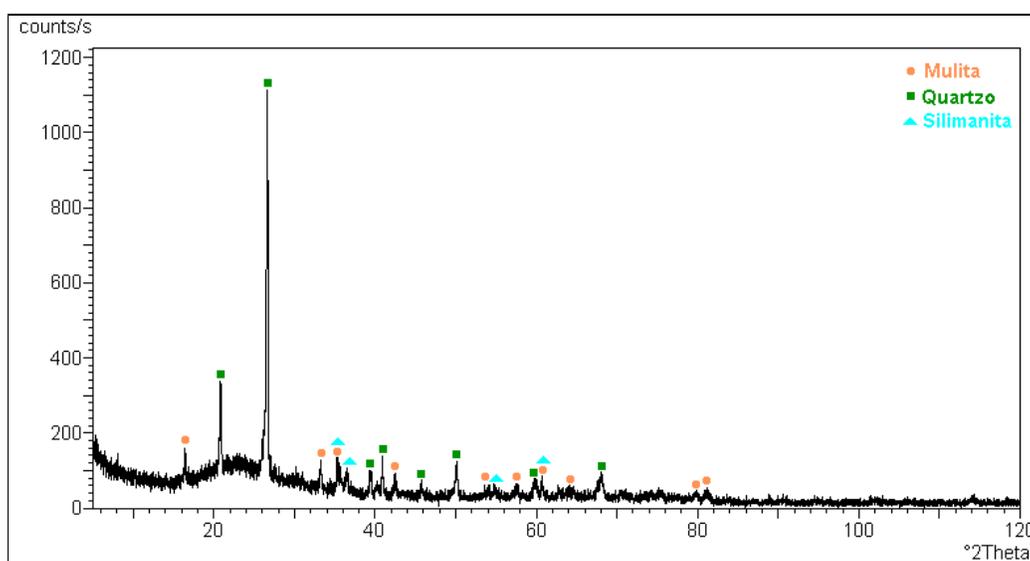


Figura 4.1: Difratograma da cinza de carvão.

Tabela 4.3: Dureza dos minerais da cinza de carvão (Bu-Qian Wang e Kevin Luer, 1998).

Elementos	Dureza (Moh's)
Mulita	7,5
Quartzo	6,5 - 7,0
Silimanita	6,0 - 7,5

Pela análise da dureza dos minerais presentes na cinza de carvão, pode-se inferir que, provavelmente, o componente mais erosivo seja a mulita, seguida da silimanita e por fim o quartzo. Ressalta-se que em temperaturas elevadas a presença de fase amorfa diminui a erosividade da cinza pela possível diminuição da dureza de seus constituintes (Bu-Qian Wang e Kevin Luer, 1998).

**Análise microscópica.** A análise microscópica da cinza de carvão visa determinar a morfologia de suas partículas, forma e distribuição de tamanhos. A Figura 4.2 apresenta a micrografia da cinza de carvão.

Através da análise da Figura 4.2, observa-se que a cinza de carvão apresenta partículas na forma arredondada e aglomerados destas. Observa-se também uma distribuição de tamanhos bastante variada e, como visto pela análise granulométrica, o tamanho médio das partículas é de 47,01 $\mu\text{m}$ . Segundo um estudo de Suckling e Allen (1997), o tamanho de partículas do material erosivo é de grande importância, uma vez que resultados práticos mostraram que pequenos tamanhos de partículas resultam em um maior desgaste em aços utilizados em caldeiras que grandes tamanhos de partículas. Neste estudo, tamanhos de partículas pequenas referem-se ao intervalo de 63 - 106 $\mu\text{m}$ .

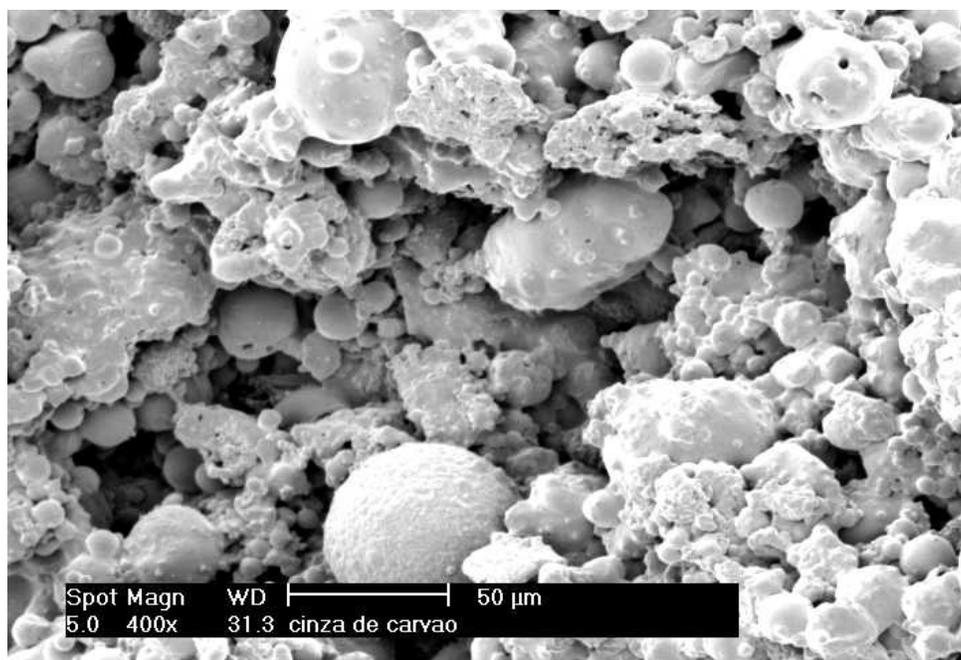


Figura 4.2: Micrografia da cinza de carvão, em um aumento de 400 vezes.

Segundo a Literatura, a ordem de grandeza do desgaste erosivo é função também de algumas características do abrasivo empregado. Desta forma, partículas

graúdas, com constituintes mineralógicos de alta dureza e formas angulares, promovem um elevado desgaste erosivo (Wang e Verstak, 1999). Com base nas características das cinzas utilizadas neste trabalho (tamanho de partículas médio de 27  $\mu\text{m}$ , fases constituintes quartzo, mulita e silimanita e forma mais arredondada do que angular), era de se esperar um baixo desgaste erosivo, tendo em vista principalmente sua morfologia e composição mineralogia, comparando com trabalho de Wang e Verstak, 1999.

#### **4.1.2 Carvão pulverizado**

O carvão pulverizado foi caracterizado segundo a análise granulométrica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

**Análise granulométrica.** A distribuição granulométrica do carvão pulverizado torna-se importante, uma vez que pode interferir nos mecanismos de desgaste quando suas partículas são aceleradas pelo ar aquecido no interior do ejetor e demais componentes. A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 4.4: Análise granulométrica por difração a *laser*.

<b>Amostra</b>	<b>D<sub>10</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>50</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>90</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Carvão pulverizado	1,5	13,7	60,9

Obs: D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> e D<sub>90</sub> são porcentagens (10, 50 e 90%) nas quais as partículas encontram-se abaixo do diâmetro especificado.

O diâmetro médio das partículas do carvão pulverizado analisado é aproximadamente 24  $\mu\text{m}$ .

**Análise mineralógica.** Revela os minerais que compõem o carvão pulverizado. Mais uma vez, conhecendo-se as fases presentes pode-se inferir o grau de agressividade em função da dureza de cada mineral no desgaste do ejetor. A Figura 4.3 apresenta o difratograma do carvão pulverizado. Observa-se que este é composto pelos minerais: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ ). A dureza dos minerais constituintes do carvão pulverizado influencia no desgaste erosivo destas partículas em um material alvo, a Tabela 5.5 apresenta a dureza de dos minerais que compõem este material.

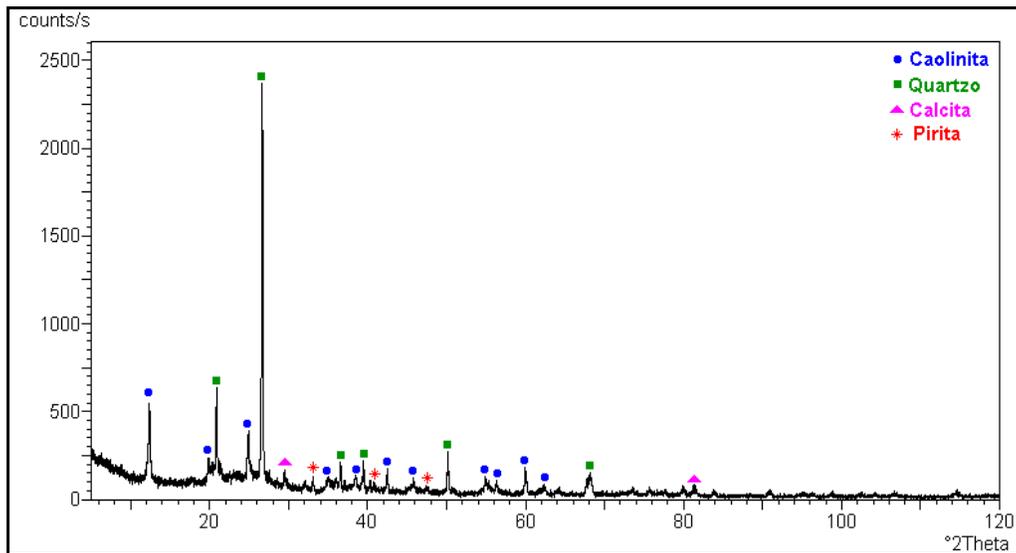


Figura 4.3: Difratoograma do carvão pulverizado.

Tabela 4.5: Dureza dos minerais da cinza de carvão (Bu-Qian Wang e Kevin Luer, 1998).

Elementos	Dureza (Moh's)
Caolinita	2,0 – 2,5
Quartzo	6,5 - 7,0
Calcita	3,0
Pirita	6,0 – 6,5

Pela análise da dureza dos minerais presentes no carvão, pode-se inferir que provavelmente o componente mais erosivo seja o quartzo, seguido da pirita. Os outros componentes, caolinita e calcita, provavelmente não sejam os responsáveis pelo desgaste erosivo do carvão na Usina.

**Análise microscópica.** A análise microscópica do carvão visa determinar a morfologia de suas partículas: forma e distribuição de tamanhos. A Figura 4.4 apresenta a micrografia do carvão pulverizado.

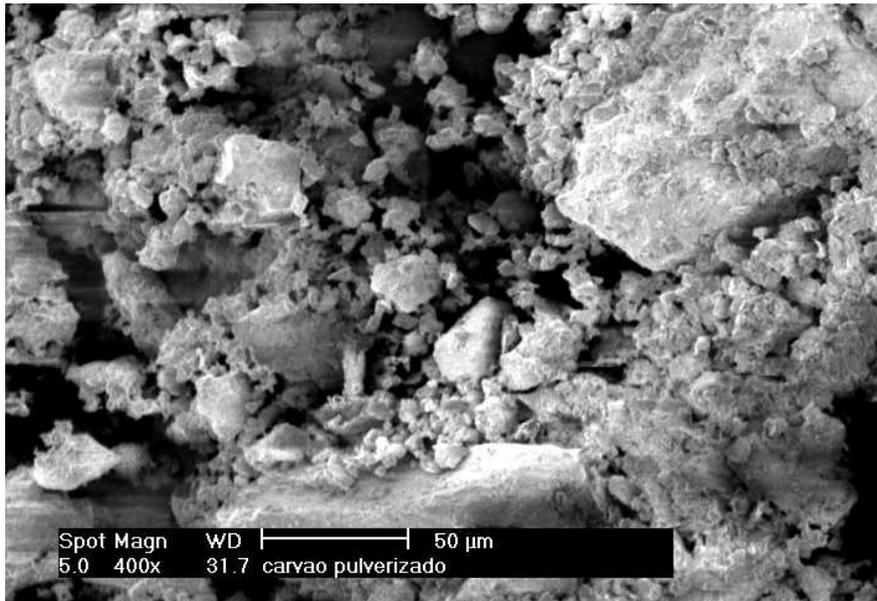


Figura 4.4: Micrografia do carvão pulverizado, em um aumento de 400 vezes.

Através da análise da Figura 4.4, observa-se que as partículas do carvão são irregulares quanto sua forma e distribuição de tamanhos. Em estudos feitos sobre erosão verifica-se que partículas de forma irregular e elevada dureza são mais erosivas do que partículas arredondadas.

Os resultados da caracterização da cinza e do carvão mostraram que a primeira é mais agressiva. Desta forma, optou-se pelo uso da cinza como material erosivo nos ensaios laboratoriais de desgaste. Com isso, o tempo de ensaio relativo aos componentes que sofrem desgaste pelo carvão é reduzido.

## 4.2. Teste em laboratório

### 4.2.1 Economizador

De acordo com a Tabela 3.2, os parâmetros utilizados no ensaio de desgaste para os tubos do economizador foram: tempo 10h, temperatura 310°C, material erosivo cinza de carvão, ângulos de ataque 30 e 90°, velocidade 30m/s e fluxo de partículas 6,5 g/min.

A Figura 4.5 apresenta as amostras de aço SAE 1020 antes e após o desgaste erosivo em ângulos de 90° e 30°. Através da análise visual, pode-se observar que para o ângulo de incidência de 30° a perda de material devido ao desgaste erosivo é superior à perda de material para o ângulo de 90°. Isto pode ser explicado através do tipo de mecanismo responsável pelo arrancamento de

partículas. Quando as partículas erosivas incidem em um ângulo de  $90^\circ$  (alto ângulo) tendem, durante o choque, a trocar sua energia cinética em deformação elástica, e se for suficientemente alta e/ou o material apresentar baixa resistência ao escoamento, em deformação plástica. Se ainda assim restar energia à partícula, pode haver o desprendimento de partículas do material erodido. Em contrapartida, quando as partículas incidem em ângulos mais baixos, próximos a  $30^\circ$ , há um maior arrancamento de material. Isto ocorre, pois apenas parte da energia da partícula erosiva se transforma em deformação elástica, e/ou plástica; enquanto o outro componente da energia é responsável, associado à microestrutura do material alvo, pelo arrancamento de suas partículas. Este arrancamento ocorre em regiões mais susceptíveis, como o contorno de grão.



Figura 4.5. Amostras de aço (a) antes do desgaste, (b) após o desgaste em  $90^\circ$ , (c) após o desgaste em  $30^\circ$ .

A Figura 4.6 apresenta as amostras de  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$  antes e após o desgaste erosivo em ângulos de  $90^\circ$  e  $30^\circ$ . Através da análise visual, não é possível chegar a um resultado conclusivo quanto ao pior ângulo de desgaste.



Figura 4.6. Amostras de  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$  (a) antes do desgaste, (b) após o desgaste em  $90^\circ$ , (c) após o desgaste em  $30^\circ$ .

A Figura 4.7 apresenta as amostras de WC-CrC-Ni antes e após o desgaste erosivo em ângulos de 90° e 30°. Através da análise visual, não é possível determinar para qual ângulo de ataque ocorreu o maior desgaste erosivo.



Figura 4.7. Amostras de WC-CrC-Ni (a) antes do desgaste, (b) após o desgaste em 90°, (c) após o desgaste em 30°.

A Figura 4.8 apresenta as amostras de WC-12Co antes e após o desgaste erosivo em ângulos de 90° e 30°. Também neste caso não é possível chegar a um resultado conclusivo quanto ao pior ângulo de desgaste, através da análise visual.



Figura 4.8. Amostras de WC-12Co (a) antes do desgaste, (b) após o desgaste em 90°, (c) após o desgaste em 30°.

A análise quantitativa das amostras de aço,  $Cr_2C_3$ -NiCr, WC-12Co e WC-CrC-Ni após o desgaste em ângulos de 30° e 90° permitiu avaliar de forma mais precisa o desgaste erosivo, com o auxílio de um relógio comparador. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da análise quantitativa.

Tabela 4.6. Perda de espessura após o ensaio de desgaste nas amostras nas condições dos tubos do economizador em ângulos de 30 e 90°.

<b>Material</b>	<b>Perda de espessura (µm)</b>	
	<b>30°</b>	<b>90°</b>
<b>Aço SAE 1020</b>	48,90	27,00
<b>Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr</b>	7,60	3,00
<b>WC-CrC-Ni</b>	3,62	2,00
<b>WC-12Co</b>	0,88	1,50

Através da análise dos resultados quantitativos, apresentados na Tabela 4.6, observou-se que para o aço, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr e WC-CrC-Ni o maior desgaste ocorre em ângulos de 30°. Isto está de acordo com a literatura, uma vez que materiais dúcteis tendem a mostrar um maior desgaste em baixos ângulos de ataque, como é o caso do aço. Para um material compósito, quanto maior a quantidade de matriz dúctil, mais seu comportamento em relação ao desgaste erosivo se aproxima do comportamento de materiais dúcteis, isto é verificado para as amostras de Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr e WC-CrC-Ni.

Em contrapartida, no caso do WC-12Co, a quantidade de matriz dúctil não é suficiente para que o comportamento do compósito se assemelhe ao de um material dúctil. Desta forma, seu desgaste se dá como o de um material frágil, ou seja, um maior desgaste é verificado em ângulos de ataque de 90°.

A partir dos valores de desgaste erosivo obtidos para o aço e demais revestimentos protetores, pode-se afirmar que o WC-12Co apresentou o melhor resultado de resistência ao desgaste erosivo, nas condições anteriormente citadas. Comparando o aço e o WC-12Co, observou-se que o último apresentou uma perda de espessura cerca de 7 (sete) vezes menor do que o primeiro. Já o Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr apresentou uma perda de espessura cerca de 4 (quatro) vezes menor do que o aço, enquanto que a perda de espessura do WC-CrC-Ni é cerca de 6 (seis) vezes menor do que o aço. Assim, em ordem crescente de resistência ao desgaste erosivo, dentre estes revestimentos sugeridos, nas condições do teste descrito, tem-se: aço SAE 1020, Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr, WC-CrC-Ni e WC-12Co.

Com o intuito de pesquisar os mecanismos responsáveis pelo desgaste erosivo de diferentes materiais em ângulos de ataque de 90° e em temperaturas próximas a 300°C, realizaram-se análises microestruturais através de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

A Figura 4.9 apresenta a microestrutura, da seção transversal, do aço, bem como dos três revestimentos testados, antes e após o desgaste erosivo a quente. O

desgaste erosivo causa um dano no material que depende principalmente da tensão de escoamento deste.

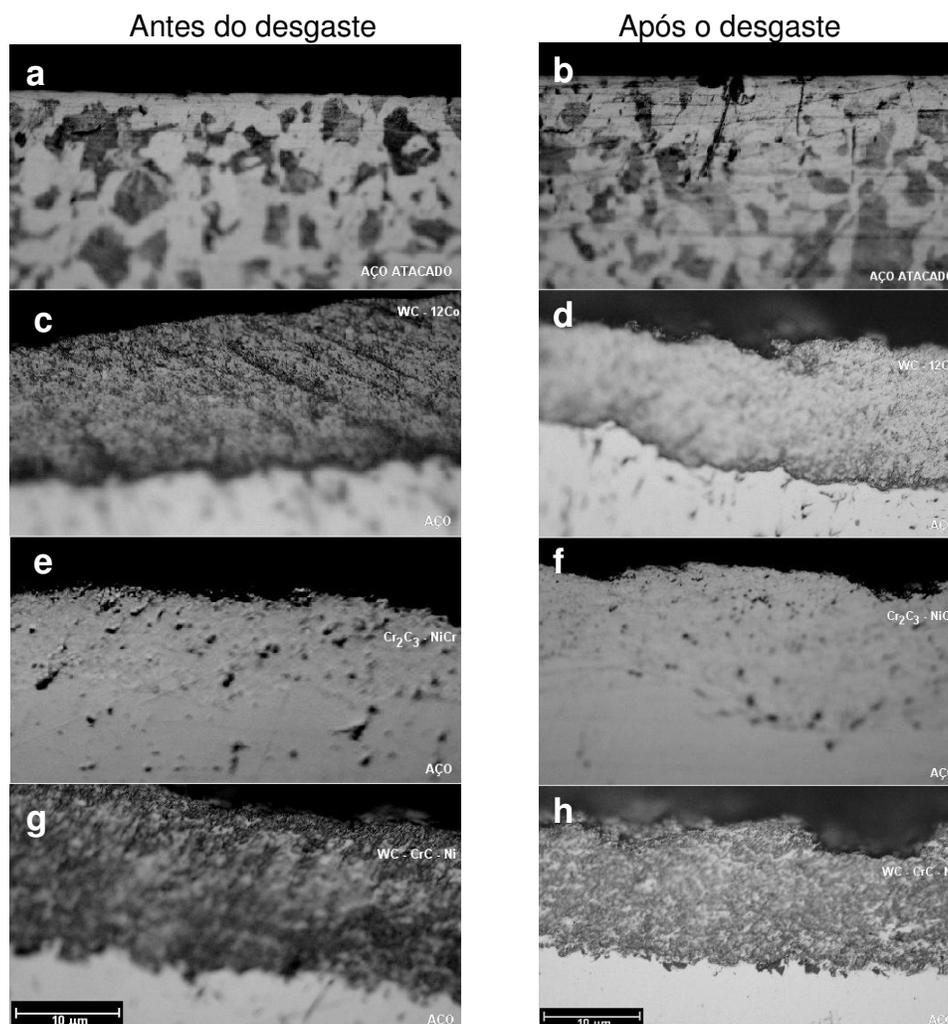


Figura 4.9: Microestruturas da seção transversal antes e após o desgaste das amostras (a,b) aço SAE 1020, (c,d) WC-12Co, (e,f) Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr, (g,h) WC-CrC-Ni. (Microscopia ótica, aumento 500x).

Assim, avaliando-se os resultados da perda de espessura dos materiais testados a 90° (Tabela 4.6), e a microestrutura da seção transversal das regiões desgastada e não desgastada (Figura 4.9), pode-se estimar os mecanismos responsáveis pelo desgaste erosivo. No aço, este mecanismo pode ser explicado pelo balanço energético para materiais dúcteis (Figura 4.10): na colisão de uma partícula erosiva esférica em ângulos próximos a normal, entre 1 a 10% da energia cinética inicial é restituída à partícula por forças elásticas, sem contribuir para a erosão, e cerca de 90% de energia é gasta no trabalho plástico; desta, até 10% é armazenada no metal em discordâncias e outras imperfeições cristalinas e, aproximadamente 80% é degradada em calor (Levy e Chick, 1986). Portanto, para o aço estudado, pode-se observar que a energia cinética foi suficientemente alta e/ou

o material apresentou baixa resistência ao escoamento, para deformar plasticamente. Isso para as primeiras partículas que atingem a superfície. Para as subseqüentes, a superfície já estará menos dúctil, em um processo crescente de encruamento e fragilização, até o arrancamento de parte da superfície. A nova superfície sofre o mesmo processo de encruamento, desprende-se, e assim ciclicamente. A análise da vista superior das microestruturas do aço (Figura 11 a e b) sugere que após o desgaste a superfície tornou-se mais irregular.

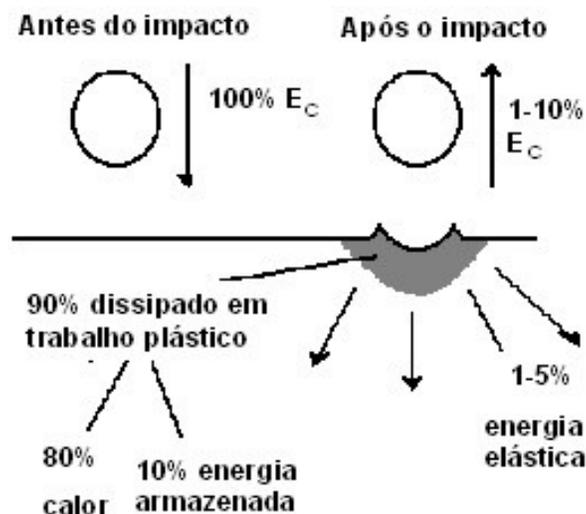


Figura 4.10: Balanço da energia no impacto normal de partículas erosivas.

Já nos revestimentos, o mecanismo de erosão em temperaturas próximas a 300°C e ângulos de ataque de 90° não está bem definido, pois as características microestruturais como porosidade, tamanho de grão, aderência ao substrato e ausência de trincas, influenciam o desempenho quando solicitados por desgaste (Raask, 1988 e Levy e Wang, 1988). Analisando-se a microestrutura dos revestimentos (Figura 4.9), pode-se fazer algumas considerações. A primeira diz respeito à porosidade e presença de trincas, características de um revestimento aspergido termicamente. A porosidade atua no sentido de reduzir a resistência mecânica, e também o módulo de elasticidade. Quando o módulo de elasticidade é menor, pode-se esperar que maior parte da energia das partículas incidentes à superfície seja consumida na deformação elástica do material, para após entrar no regime plástico. Porém, a menor resistência mecânica diminui a quantidade de energia necessária ao encruamento e arrancamento de partes da superfície. Uma segunda consideração recorreria à comparação mais ampla de propriedades dos diferentes revestimentos

Por outro lado, através da microestrutura típica observada nos revestimentos, pequenas crateras e estrias (Figura 4.9 d, f, g), pode-se inferir que houve provavelmente um arrancamento de partículas pelo mecanismo de materiais frágeis, e só não foi acentuado, pois a cinza utilizada não é altamente erosiva. E, analisando-se a topografia do WC-12Co após a erosão (Figura 4.11c), verifica-se uma morfologia superficial pequena e fina, se comparada com morfologias típicas de desgaste erosivo mais acentuado (Wang e Verstak, 1999).

Assim, ambas as considerações e verificações sugerem uma resistência ao desgaste dependendo muito fortemente do comportamento elástico e plástico dos materiais, conjugados com a resistência mecânica dos mesmos. Esta é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas que varia conforme sua microestrutura e pela presença de defeitos, como poros e trincas, típicos de revestimentos aspergidos termicamente, o que, entretanto, varia de revestimento para revestimento.

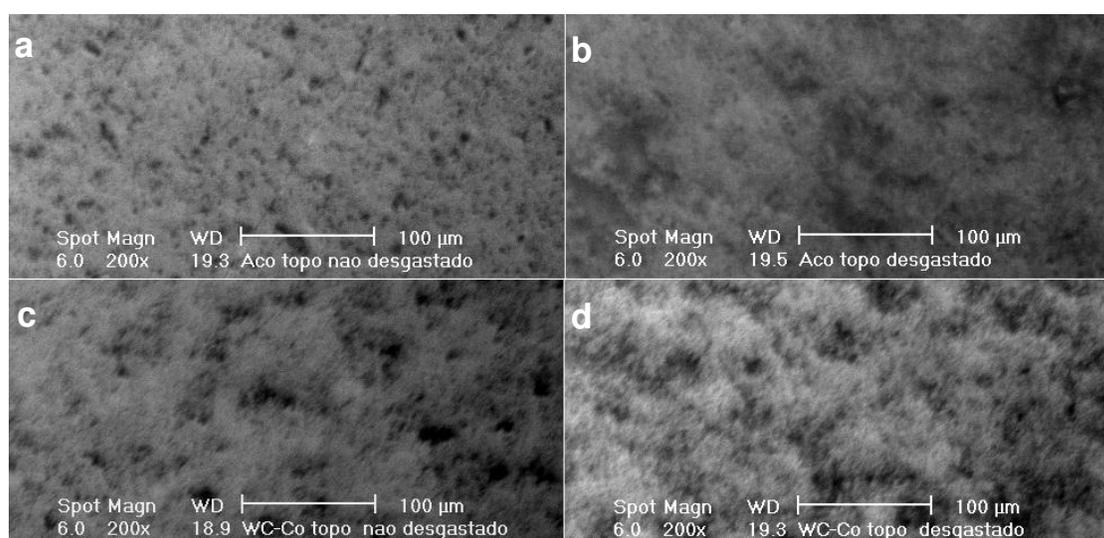


Figura 4.11: Microestruturas da vista superior antes e após o desgaste, respectivamente, das amostras (a, b) aço SAE 1020 e (c, d) WC-12Co.

#### 4.2.2 Ejetor e Classificador

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de perda de espessura para as amostras nas quais foi simulado o ambiente do ejeter e do classificador em temperatura média de 80°C e ângulo de ataque de 30°. A velocidade e o fluxo das partículas foram, respectivamente, 30m/s e 6,5g/min.

Tabela 4.7. Perda de espessura após o ensaio de desgaste para o ejetor e o classificador em ângulos de 30°.

Material	Perda de espessura ( $\mu\text{m}$ )	
	30°	
<b>Aço SAE 1020</b>	44,50	
<b>Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr</b>	6,61	
<b>WC-CrC-Ni</b>	3,19	
<b>WC-12Co</b>	0,75	

Sabe-se da Literatura que os materiais tendem a ser mais resistentes ao desgaste erosivo em baixas temperaturas. Assim, analisando-se os resultados obtidos de perda de espessura do aço, bem como dos revestimentos, em temperatura de aproximadamente 80°C (Tabela 4.7), constatou-se a coerência nestes, comparados aos resultados em temperaturas elevadas (Tabela 4.6).

Também nestes casos, o material mais resistente ao desgaste foi a liga WC-12Co, enquanto que o aço sem revestimento apresentou o maior desgaste erosivo. Os mecanismos de desgaste erosivo envolvidos neste caso são, provavelmente, os mesmos descritos e discutidos no item 4.2.1.

#### 4.2.3 Pás e rotor dos ventiladores

A Tabela 4.8 apresenta os resultados de perda de espessura para as amostras nas quais foi simulado o ambiente das pás e do rotor dos ventiladores em temperatura média de 80°C e múltiplos ângulos de ataque (30, 60 e 90°). A velocidade e o fluxo das partículas foram, respectivamente, 30m/s e 6,5g/min.

Tabela 4.8. Perda de espessura após o ensaio de desgaste para as pás e o rotor dos ventiladores em ângulos de 30, 60 e 90°.

Material	Perda de espessura ( $\mu\text{m}$ )		
	30°	60°	90°
<b>Aço SAE 1020</b>	44,50	17,39	24,84
<b>Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr</b>	6,61	1,70	2,61
<b>WC-CrC-Ni</b>	3,19	1,34	1,78
<b>WC-12Co</b>	0,75	1,10	1,26

Através da Tabela 4.8, pode-se verificar que o aço apresentou, mais uma vez, o maior desgaste erosivo para estas condições de teste. O material mais resistente

foi a liga WC-12Co, para qualquer ângulo de ataque. Observou-se que o ângulo de ataque mais agressivo para o aço e as ligas  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$  e WC-CrC-Ni foi o de  $30^\circ$ , enquanto que para o WC-12Co foi o ângulo de  $90^\circ$ . O ângulo de ataque de  $60^\circ$  apresentou resultados de perda de espessura intermediários para qualquer material testado.

Novamente, constatou-se que a temperatura de  $80^\circ\text{C}$  não é tão agressiva quanto a temperatura média de  $300^\circ\text{C}$ .

Portanto para as aplicações estudadas nos testes laboratoriais, verificou-se que a liga WC-12Co é a mais resistente ao desgaste erosivo, tanto para as aplicações em altas como em baixas temperaturas. Em contrapartida, o aço mostrou ser o pior material para estas condições de erosão.

### **4.3. Teste na Usina**

A pior condição nos ensaios laboratoriais foi verificada para altas temperaturas ( $310^\circ\text{C}$ ). Assim, os testes na Usina foram conduzidos dentro do Economizador 4, pois este representa o ambiente mais agressivo em relação à erosão.

Através da avaliação visual dos anéis inseridos no interior do economizador, pode-se verificar que os resultados obtidos estavam de acordo com os resultados dos testes laboratoriais.

Em testes laboratoriais preliminares, observou-se que o revestimento 88HV (NiCrBSiFeW) apresentou maior desgaste erosivo que o aço, tendo sido descartado em testes posteriores. Isso foi novamente comprovado no teste industrial, pois visualmente este teve o maior desgaste.

Em ordem crescente de resistência ao desgaste erosivo, dentre estes revestimentos sugeridos no teste industrial, tem-se: 88HV (NiCrBSiFeW), aço SAE 1020,  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ , WC-CrC-Ni e WC-12Co. A Figura 4.12 apresenta os anéis retirados do economizador após 28 dias de exposição ao desgaste da cinza.



Figura 4.12. Anéis retirados do Economizador 4 após 28 dias de exposição ao desgaste da cinza.

A Tabela 4.9 apresenta os valores de perda de espessura dos anéis inseridos no Economizador 4 submetidos ao desgaste erosivo por um período de 28 dias, avaliados segundo o método ótico de silhueta.

Tabela 4.9. Perda de espessura dos anéis inseridos no Economizador 4.

Material	Perda de espessura ( $\mu\text{m}$ )
Aço SAE 1020	8
$\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$	0,0
88HV (NiCrBSiFeW)	15
WC-12Co	0,0
WC-CrC-Ni	0,0

Como a perda de espessura foi muito reduzida, a leitura desta não foi possível, apesar do equipamento apresentar uma resolução de  $5\mu\text{m}$  para os materiais mais resistentes ao desgaste ( $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ , WC-CrC-Ni e WC-12Co).

Apesar de não ter sido possível fazer uma análise quantitativa de todos os materiais testados, a análise visual permitiu classificar os materiais na mesma ordem crescente de resistência ao desgaste erosivo verificada nos testes laboratoriais: 88HV (NiCrBSiFeW), aço SAE 1020,  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ , WC-CrC-Ni e WC-12Co.

## **4.4 Soluções alternativas**

### **4.4.1. Interior do moinho**

Após uma avaliação das condições operacionais encontradas em um moinho de bolas, verificou-se a presença de um alto grau de impacto dos corpos moedores sobre o material e, conseqüentemente, sobre as paredes do moinho. Como os revestimentos obtidos pelo processo de aspersão térmica não apresentam uma boa resistência a impactos, descartou-se seu uso para proteção do interior do moinho. Em função disto, sugere-se o uso de placas cerâmicas como revestimentos, já empregadas com sucesso na indústria cerâmica. Estas placas podem ser encontradas no mercado nacional ou importadas e são fabricadas de alumina finamente moída e sinterizada.

Em geral, estas placas, quando comparadas a outros materiais, apresentam alta resistência ao desgaste. Sabe-se do histórico de desempenho deste material aplicado em moinhos utilizados na moagem de carvão mineral, que em dois anos de serviço, para uma espessura inicial de 19mm, a perda de espessura foi de aproximadamente 3mm (moagem total= 9,97 milhões de toneladas). Podem ser empregadas até a temperatura de 1400°C e na presença de ácidos (exceto HF), álcalis e hidrocarbonetos.

### **4.4.2. Interior dos dutos**

Após uma avaliação das condições operacionais encontradas nos dutos que conduzem o carvão pulverizado, constatou-se que a aplicação de revestimentos por aspersão térmica não é técnica e economicamente viável. Tecnicamente, pois para este caso o revestimento mais adequado seria o WC-12Co aplicado por HVOF, e a aspersão em grandes extensões de dutos apresenta dificuldades operacionais. Economicamente, a grande extensão de dutos a serem protegidos na Usina torna este processo inviável, devido ao alto custo material e operacional.

Em função disto, sugere-se o uso de cimentos refratários sendo os mais indicados devido a alta resistência ao desgaste (baixa porosidade) e podendo ser empregados em temperaturas de até 1650°C, conforme sua composição.

Um dos cimentos refratários mais indicados para esta aplicação é o Cast Refrax da Unifrax. Este cimento é produzido com grãos de carbeto de silício, um dos materiais mais duros e resistentes à abrasão produzidos sinteticamente, em uma

matriz de nitreto de silício. Isto produz um sistema de ligação extremamente forte, que resulta em um produto com propriedades físicas e químicas as quais resistem a uma variedade de condições extremas de desgaste. Além disso, tem excelente condutividade térmica, alta resistência à ácidos (exceto HF); resiste ainda ao molhamento por metais não ferrosos. Podem ser produzidos em uma larga variedade de formas, incluindo configurações complexas grandes.

Por exemplo, um queimador de carvão feito de aço duro ao Ni tem que ser substituído após apenas um ano, enquanto que produtos de Cast Refrax não apresentam desgaste apreciável após três anos de serviço.

### **4.3 Confronto com os resultados esperados**

A partir da análise dos resultados obtidos em laboratório e em testes na Usina pode-se inferir que o uso da Engenharia de Superfícies aumenta a vida útil dos equipamentos, bem como a disponibilidade operacional dos mesmos.

Apenas em dois pontos descritos como problemas na Usina não sugere-se o uso da aspersão térmica como a técnica de recobrimento de tais superfícies, visto que ou as solicitações não são adequadas para o emprego da técnica, ou envolveria altos custos sem o retorno esperado.

Desta forma, confrontando-se os resultados esperados com os resultados obtidos, pode-se observar que não ocorrem discrepâncias. Isto significa que, o correto recobrimento das superfícies que apresentam desgaste erosivo ocasionará :

- aumento da vida útil e disponibilidade operacional dos equipamentos e seus componentes auxiliares instalados na planta desta Usina;
- diminuição do número de paradas para manutenção e do tempo destas;
- melhor desempenho dos equipamentos;
- redução dos custos de operação;
- expectativa de redução dos custos de manutenção estimada, incluindo materiais e mão-de-obra.

## 5. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

A Tabela 5.1 apresenta o cronograma de atividades previsto para a execução do projeto.

Tabela 5.1. Cronograma de atividades previsto.

ETAPAS	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>ATIVIDADES DA PESQUISA</b>												
1. Identificação de partes e componentes submetidos a erosão	█	█	█	█								
2. Avaliação das solicitações		█	█	█	█	█						
3. Definição da alternativa de proteção das superfícies			█	█	█	█	█					
4. Aplicação/proteção			█	█	█	█	█	█	█	█		
5. Acompanhamento do desempenho em serviço						█	█	█	█	█	█	█
<b>ATIVIDADE DE TRANSFERÊNCIA TECNOLÓGICA</b>												
Avaliação das solicitações		█	█	█	█	█						
Definição da alternativa de proteção das superfícies			█	█	█	█	█	█	█	█		
Aplicação/proteção						█	█	█	█	█	█	█

Como mostra o cronograma de atividades (Tabela 5.1), as etapas previstas foram executadas. A etapa 5 teve seu período previsto prolongado, pois a avaliação do desgaste em ensaios laboratoriais exigiu tempo maior que o esperado para obtenção de resultados significativos. Além disso, como o equipamento para o ensaio de desgaste foi desenvolvido em laboratório, seu ajuste necessitou também de maior tempo que o previsto (Etapa 4).

## 6. ORÇAMENTO PREVISTO E EXECUTADO

A Tabela 6.1 apresenta o orçamento previsto e executado durante o desenvolvimento do projeto.

Tabela 6.1. Orçamento previsto e executado.

Tipo de Custo		Orçamento	
		Previsto	Executado
Despesas	Material	33.600,00	33.600,00
	Serviços Terceiros	7.200,00	7.200,00
	Pessoal	73.200,00	73.200,00
	Total	114.000,00	114.000,00

As previsões orçamentárias foram confirmadas, não havendo discrepâncias a considerar, conforme consta na Tabela 6.1.

## 7. TECNOLOGIA DE DIFUSÃO DOS RESULTADOS

A transferência dos conhecimentos foi dada através de relatórios parciais e um final, incluindo todos os dados e processos obtidos durante as etapas de pesquisa aplicada.

Foram realizados dois seminários, na CGTEE e um seminário na FIERGS, com exposições sobre os temas estudados no projeto.

Elaborou-se um artigo intitulado “**Avaliação do desgaste erosivo a quente (~300 °C) por cinzas de carvão mineral em revestimentos obtidos por aspersão térmica**” que será enviado a ANEEL para publicação e foi apresentado no XV CBECIMAT, realizado em Natal – RN em novembro de 2002.

Foi apresentado também o trabalho “**Desenvolvimento de superfícies com elevada resistência ao desgaste erosivo através da aspersão térmica hipersônica**” no XIV Salão de Iniciação Científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em dezembro de 2002.

Além disso, devido à relevância do tema “desgaste erosivo”, estão em desenvolvimento duas teses de doutorado nesta área.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZO, Edson, "Geração de Vapor", Editora da UFSC, 1992

BU-QIAN, W. e LUER, K. – "The relative erosivity of limestone, dolomite and coal samples from an operating boiler", *Wear* 215 (1998), p. 180-190.

INDRUSIAK, Maria Luiza Sperb, "Escoamento turbulento na saída de um duto curvo de seção retangular", Tese de Mestrado, UFRGS, 1997.

LEVI, A. V. e CHIK, P. – "The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel", *Wear* 89 (2) (1986), p. 151-162.

LEVY, A. V. e WANG, B. Q. – "Erosion of hard material coating systems", *Wear*, 121 (1988), p. 325-346.

RAASK, E. – "Erosion wear in coal utilisation", Hemisphere, Springer Verlag, New York, 1988.

RIBEIRO, M. J. P.M e ABRANTES, J. C. C. – "Moagem em Moinhos de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo", *Cerâmica Industrial*, 6 (2) Março/Abril, 2001.

SANTOS, M.J. e IRIGOYEN, E. R. C. – "Metrologia dimensional, teoria e prática", Editora da Universidade (UFRGS), 1995; 52 – 65.

SUCKLING, M. e ALLEN, C. – "Critical variables in high temperature erosive wear", *Wear* 203-204 (1997), p. 528-536.

WANG, B. e VERSTAK, A – "Elevated temperature erosion of HVOF Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/TiC-NiCrMo cermet coating", *Wear*, 233 – 235, (1999), 342 – 351.