



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Ciência e Tecnologia**

**Faculdade de Engenharia**

**Pamella Kessler de Campos**

**Desenvolvimento de revestimento para tubulação de caldeiras  
de centrais termelétricas que operam a carvão mineral**

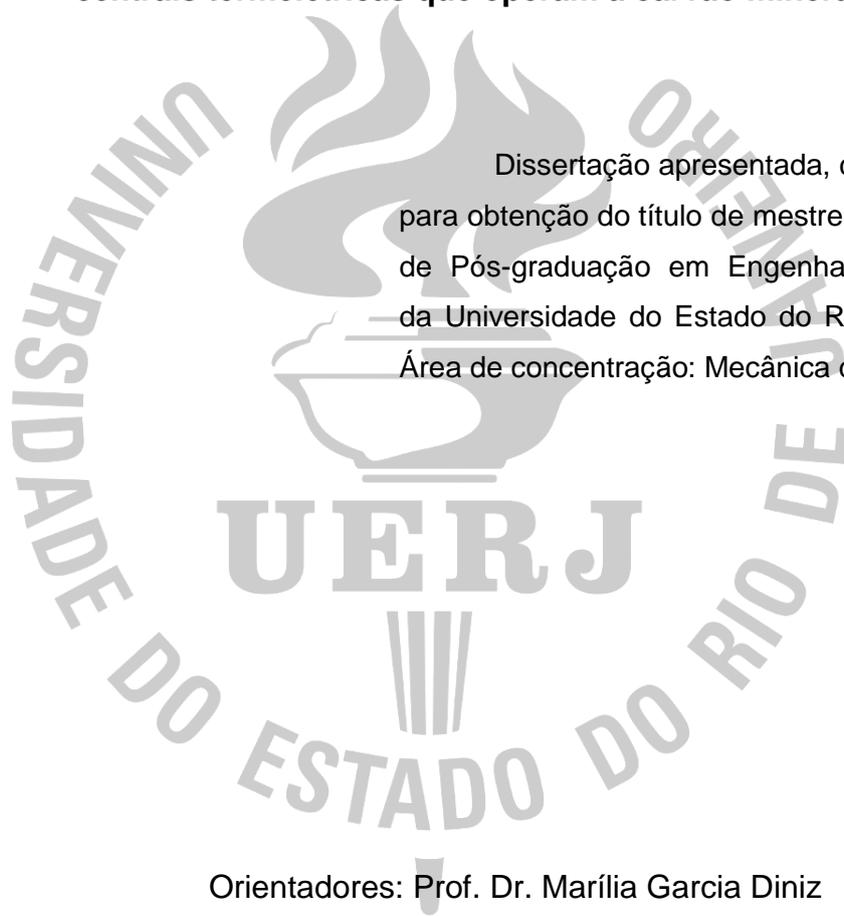
**Rio de Janeiro**

**2017**

Pamella Kessler de Campos

**Desenvolvimento de revestimento para tubulação de caldeiras de centrais termelétricas que operam a carvão mineral**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos sólidos.



Orientadores: Prof. Dr. Marília Garcia Diniz  
Dr. Bruno Reis Cardoso

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M764 Campos, Pamella Kessler de.

Desenvolvimento de revestimento para tubulação de caldeiras de centrais termelétricas que operam a carvão mineral / Pamella Kessler de Campos. – 2017.73f.

Orientadores: Marília Garcia Diniz e Bruno Reis Cardoso  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica. 2. Processo de revestimento  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. VI. Título.

CDU 620.197:004.932

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

Pamella Kessler de Campos

**Desenvolvimento de revestimento para tubulação de caldeiras de centrais termelétricas que operam a carvão mineral**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos sólidos.

Aprovado em 21 de agosto de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dra. Marília Garcia Diniz (Orientadora)  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

---

Dr. Bruno Reis Cardoso (Co-Orientador)  
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

---

Prof. Dra. Silvana de Abreu Martins  
Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO

---

Dra. Heloísa Cunha Furtado  
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

---

Prof. Dra. Márcia Christina Amorim Moreira Leite  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Rio de Janeiro

2017

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo, agradeço à Deus, por sempre me dar força emocional e física, capacitação e sabedoria para trilhar o meu caminho e conseguir realizar o meu sonho de obter meu título de mestre em engenharia mecânica.

Agradeço aos meus pais, Cátia e Vanderley, por mais uma vez incentivar e apoiar a minha decisão. Agradeço por toda dedicação a mim dispensada para que esse momento se tornasse realidade.

Agradeço a minha irmãzinha Paloma que muitas vezes me ajudou com meus trabalhos e resolveu todos os problemas digitais que apareceram em meu caminho ao longo desses anos.

Agradeço ao meu namorado Igor por estar em meu lado e compreender, com muita sabedoria e paciência, meu estresse, irritação e tensão característicos de um desafio como este.

Agradeço aos amigos que estiveram ao meu lado e tornaram essa caminhada mais leve.

Agradeço ao Centro de Pesquisa de Energia Elétrica e em especial ao Maurício Barreto Lisboa, chefe do Departamento de Laboratórios do Fundão, pela bolsa concedida e pelos recursos disponibilizados que viabilizaram a execução desta pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas do CEPEL que indiretamente ou diretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho e, em especial, agradeço às equipes de metalografia (Roberta, Joselio, Tamirys e Lucas), corrosão (Cristina, Alberto, Sá e Elber), mecânica (Carlos Frederico e Antônio Carlos) e química (Luís Alberto) por toda a contribuição profissional e pela boa convivência.

Agradeço por último, aos meus orientadores Marília Garcia Diniz (UERJ) e Bruno Reis Cardoso (CEPEL), não pelo fato de ser menos importante, mas sim para ressaltar a brilhante maestria cuja qual me orientaram durante todo o desenvolvimento do trabalho com muita atenção e dedicação.

## RESUMO

CAMPOS, Pamella Kessler de. **Desenvolvimento de revestimento para tubulação de caldeiras de centrais termelétricas que operam a carvão mineral.** 2017. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

A geração é o segmento da indústria de eletricidade responsável por produzir energia elétrica e inseri-la nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição) para que chegue aos consumidores. Da parcela de geração termelétrica, aproximadamente 9% da geração de energia provém de centrais térmicas que utilizam carvão mineral como combustível. O carvão brasileiro possui um alto conteúdo de impurezas e um baixo poder calorífico. Os tubos das paredes d'água das caldeiras nos quais circula a água que se transformará no vapor que movimentará a turbina, estão sujeitos a alta temperatura e ambiente agressivo da erosão causada pelos fluxos de gases e particulados resultantes da queima incompleta do carvão. As partes metálicas do interior da caldeira e, em especial, os tubos da parede d'água, sofrem desgaste acentuado em função da composição das cinzas do carvão mineral, partículas ricas em sílica, alumina e óxido de ferro. O processo de ataque às superfícies metálicas, potencialmente, é capaz de reduzir a espessura dos tubos e, por consequência, aumentar a frequência de ocorrência de perfurações, causando a indisponibilidade da unidade. O objetivo do presente trabalho foi elaborar um revestimento composto com resina cerâmica e tecido de fibras de carbono com a finalidade de proteger e retardar o processo de desgaste das superfícies metálicas das caldeiras movidas à carvão mineral. Para a caracterização e validação do revestimento foram realizados testes de desgaste por abrasão, desgaste por jateamento abrasivo, testes de adesão, ensaios de tração, um modelo de transferência de calor / eficiência térmica análise de custos e simulação térmica na temperatura crítica de operação das caldeiras. Os testes de adesão atenderam à norma ASTM D4541 e os revestimentos foram considerados bem sucedidos no aspecto adesão ao substrato. Nos resultados obtidos nos ensaios de abrasão por fricção contínua e por jateamento abrasivo, os esquemas de revestimento não demonstraram entre si diferença significativa quanto

prolongamento do tempo de proteção do substrato. Desta maneira, indica-se o uso do primeiro esquema de revestimento. O uso do revestimento implica em uma redução da troca térmica da parede do tubo de 8% e um aumento de despesas relacionadas ao combustível de aproximadamente 3,3%. No teste simulação térmica foi constatado que o revestimento degradou-se após poucas horas de exposição à alta temperatura (550 °C). Então, apesar da redução de eficiência de troca térmica e o custo terem sido considerados relativamente elevados, este resultado deletério sobre os materiais obtido na simulação térmica na temperatura de operação das caldeiras aparentemente foi o que desqualificou o revestimento proposto para uso na situação especificada.

Palavras-chave: caldeira, revestimento, fibra de carbono, resina cerâmica.

## ABSTRACT

CAMPOS, Pamella Kessler de. **Boiler tubes coating development for thermoelectric power plants whose operate using coal as fuel.** 2017. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Generation is the segment of the electricity industry responsible for producing electricity and injecting it into the transmission (distribution and distribution) systems to reach consumers. Of the thermoelectric generation, approximately 9% of the generation of energy comes from thermal power plants that use coal as fuel. Brazilian coal has a high content of impurities and a low calorific value. The "water wall" pipes of the boilers, in which the water circulates, will become the steam that will drive the turbine are subject to high temperature and aggressive environment of the erosion caused by the gas and particulate fluxes resulting from the incomplete burning of the coal. The metal parts of the interior of the boiler, and especially the pipes of the water wall, suffer from marked wear due to the ash composition of the coal, particles rich in silica, alumina and iron oxide. The process of attacking the metal surfaces, potentially, is able to reduce the thickness of the pipes and, consequently, increase the frequency of occurrence of perforations causing unit unavailability. The objective of the present study was to elaborate a composite coating with ceramic resin and carbon fiber fabric in order to protect and delay the wear process of the metallic surfaces of coal fired boilers. For the characterization and validation of the coating, tests of abrasion wear, abrasive blasting wear, adhesion tests, tensile tests, thermal efficiency evaluation, cost analysis and thermal simulation on the critical temperature of the boilers were performed. The adhesion tests met ASTM D4541 and coatings were considered to be successful in the adhesion to substrate aspect. In the results obtained in the continuous friction and abrasive blast abrasion tests, the coating schemes did not demonstrate significant difference between them in terms of prolongation of the substrate protection time. In this manner, the use of the first coating scheme is indicated. The use of the coating implies a reduction of 8% tube wall exchange and an increase in fuel-related expenses of approximately 3.3%. In the thermal simulation test it was found that the

coating degraded after a few hours exposure to high temperature (550°C). Therefore, despite the reduction of thermal exchange efficiency and cost were considered relatively high, this deleterious result on the materials obtained in the thermal simulation at the boilers operating temperature apparently disqualified the proposed coating for use in the specified situation.

Key words: boiler, coating, carbon fiber, ceramic resin.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Georreferência de usinas geradoras de energia no Brasil _____	3
Figura 2: Empreendimentos geradores de energia elétrica no Brasil em operação __	4
Figura 3: Esquema de produção de energia de uma usina termelétrica _____	5
Figura 4: Matriz de geração de energia térmica do Brasil _____	6
Figura 5: Consumo brasileiro e origem do carvão mineral utilizado para fins energéticos. _____	11
Figura 6: Esquema simplificado do funcionamento da caldeira de geração de vapor por queima de carvão_____	15
Figura 7: Principais elementos da caldeira que estão vulneráveis ao tripé erosão-corrosão-alta temperatura _____	19
Figura 8: Método de proteção por soldagem _____	22
Figura 9: Processo de aspensão térmica. _____	23
Figura 10: Adesivo cerâmico 3713C da ThreeBond_____	27
Figura 11: Tecido de fibra de carbono _____	28
Figura 12: Esquemas propostos para ensaios _____	30
Figura 13: Ensaio de aderência _____	30
Figura 14: Análise dos resultados do ensaio de aderência _____	31
Figura 15: Amostras do ensaio de abrasão _____	32
Figura 16: Table abraser _____	32
Figura 17: Modelo dos corpos de prova de tração _____	34
Figura 18: Corpos de prova de tração com revestimento_____	35
Figura 19: Ensaio de tração do aço revestido _____	36
Figura 20: Ensaio de tração do Corpo de prova do material do revestimento. _____	37
Figura 21: Corpo de prova de condutividade térmica. _____	38
Figura 22: Distribuição de temperaturas em uma parede cilíndrica composta _____	40
Figura 23: Teste de simulação térmica _____	42
Figura 24: Teste de aderência para o sistema substrato <i>versus</i> resina _____	43

Figura 25: Diagrama do aspecto da falha nos esquemas do revestimento proposto no presente estudo	44
Figura 26: Aspecto obtido do ensaio de aderência para o esquema de revestimento com uma camada de tecido de fibra de carbono	45
Figura 27: Aspecto obtido do ensaio de aderência para o esquema de revestimento com duas camadas de tecido de fibra de carbono	45
Figura 28: Perda de massa <i>versus</i> número de ciclos	48
Figura 29: Esquemas de revestimento após 23 mil ciclos	49
Figura 30: Amostras jateadas	50
Figura 31: Aspectos obtidos para os pontos jateados em tubulação revestida com carboneto de tungstênio	50
Figura 32: Teste de tração em sistema substrato aço / revestimento	52
Figura 33: Ensaio de tração feito apenas no revestimento.	53
Figura 34: Aspecto característico do critério de falha dos revestimentos propostos	54
Figura 35: Força x Deformação na tração do revestimento com uma camada	54
Figura 36: Força x Deformação na tração do revestimento com duas camadas	55
Figura 37: Secção cilíndrica analisada	56
Figura 38: Análise da tendência do custo de aplicação do revestimento conforme a variação da área revestida	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 39: Aspectos obtidos para 100, 200, 300, 400 e 500h em forno a 550 °C para ambos os esquemas de revestimento	66
Figura 40: Análise termogravimétrica do tecido de fibra de carbono em atmosfera de nitrogênio	67
Figura 41: Análise termogravimétrica do tecido de fibra de carbono em atmosfera de ar sintético	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil	6
Tabela 2: Distribuição dos principais recursos carboníferos brasileiros	8
Tabela 3: Propriedades químicas dos carvões de cada jazida	9
Tabela 4: Classificação das tecnologias: Temperatura <i>versus</i> Pressão <i>versus</i> Eficiência	11
Tabela 5: Composição química do substrato usado para a confecção de corpos de prova revestidos.	26
Tabela 6: Propriedades da fibra de carbono	28
Tabela 7: Resultados do ensaio de abrasão	47
Tabela 8: Perda de massa (g). Ensaio de abrasão	48
Tabela 9: Valores típicos dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural e forçada e na condensação / vaporização	40
Tabela 10: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo não isolado	57
Tabela 11: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo parcialmente isolado	58
Tabela 12: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor médio – Tubo não isolado	59
Tabela 13: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo parcialmente isolado	59
Tabela 14: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor máximo – Tubo não isolado	60
Tabela 15: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo parcialmente isolado	60

## LISTA DE SIGLAS

A	Área
Cp	Capacidade calorífica volumétrica do material
D	Diâmetro
e	Espessura
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
k	Condutividade térmica
L	Comprimento longitudinal
$\eta$	Eficiência
p	Pressão
qr	Taxa de transferência de calor na direção radial
r	Raio
R	Resistência térmica
T	Temperatura
U	Coefficiente global de transferência de calor
$\alpha$	Difusividade térmica
$\rho$	Densidade
$\sigma$	Tensão

## ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Hidrelétrica <i>versus</i> Termelétrica	3
2.2. Geração de energia termelétrica	4
2.3. Carvão mineral	7
2.3.1. Classificação do carvão	7
2.3.2. Reservas de carvão nacional	7
2.3.3. Estrutura da cadeia do carvão mineral	9
2.3.4. O uso do carvão no setor energético nacional	10
2.3.5. Tecnologia de geração de energia	11
2.4. Componentes básicos de uma usina termelétrica a carvão	13
2.4.1. Caldeiras aquatubulares	14
2.4.2. Turbinas	15
2.4.3. Gerador	16
2.4.4. Condensador	16
2.4.5. Bombas de água e economizadores	16
2.5. Mecanismo de falha em caldeira a carvão	17
2.5.1. Corrosão por partículas de carvão ( <i>Ash corrosion</i> )	17
2.5.2. Mecanismos de proteção contra falha em tubulações de caldeira a carvão	19
2.5.3. Revestimentos	20
3. Materiais e métodos	26
3.1. Materiais	26
3.1.1. Adesivo cerâmico	27
3.1.2. Tecido de fibra de carbono	27

3.2. Métodos de avaliação	28
3.2.1. Ensaio de adesão	28
3.2.2. Ensaio de abrasão	31
3.2.3. Ensaio de jateamento abrasivo	33
3.2.4. Ensaio de tração	33
3.2.5. Avaliação da condutividade térmica do revestimento	37
3.2.6. Teste de simulação térmica	41
3.2.7. Análise termogravimétrica	42
4. Resultados e discussão	43
4.1. Ensaio de adesão	43
4.2. Ensaio de abrasão por fricção e por jateamento	45
4.3. Ensaio de tração	51
4.4. Avaliação da condutividade térmica do revestimento	56
4.5. Balanço da viabilidade econômica da aplicação do revestimento	61
4.6. Teste de simulação térmica	64
4.7. Análise termogravimétrica	67
5. Conclusão	70
6. Sugestões para trabalhos futuros	71
Referências	72

## 1. Introdução

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, no setor elétrico brasileiro, a geração de energia elétrica é predominantemente proveniente da geração hidráulica, aproximadamente 61% do total nacional de produção. Porém, cerca de 28% da capacidade instalada provém da geração termelétrica, o que faz com que o sistema termelétrico tenha significância para o operador nacional [1].

Da parcela de geração termelétrica no Brasil, aproximadamente 9% da geração de energia provém de centrais térmicas que utilizam carvão mineral como combustível. Trata-se de 22 (vinte e duas) plantas com uma capacidade instalada de cerca de 3.600MW [2].

O ambiente em que foram formados os carvões brasileiros determinou suas características e possíveis aplicações nos dias de hoje e resultou em um mineral com alto teor de cinzas, isto é, sílica, alumina, ferro e enxofre. Tais características conferem ao carvão brasileiro um conteúdo elevado de impurezas e um baixo poder calorífico.

As usinas termelétricas brasileiras que empregam o carvão mineral como fonte térmica utilizam a tecnologia de combustão pulverizada. O carvão é processado até uma granulometria adequada e injetado por meio de queimadores na caldeira. O baixo poder calorífico dos carvões brasileiros requerem um volume de carvão elevado para a obtenção das condições adequadas de temperatura na caldeira. O calor liberado na queima do carvão é transferido à água que circula nos tubos que envolvem a fornalha da caldeira, transformando-a em vapor superaquecido. Os tubos que formam o que se denomina "parede d'água" nos quais circula a água que se transformará no vapor que movimentará a turbina, estão sujeitos a alta temperatura e um ambiente agressivo quanto a erosão causada pelos fluxos de gases e particulados resultantes da queima incompleta do carvão. Do ponto de vista de materiais, considerando-se o alto percentual de cinzas presentes no carvão brasileiro, as partes metálicas do interior da caldeira e, em especial, esses tubos, sofrem desgaste acentuado em função da composição e da quantidade das cinzas.

O processo de ataque às superfícies metálicas, potencialmente, é capaz de reduzir a espessura dos tubos e, por consequência, aumentar a frequência de

ocorrência de perfurações reduzindo a eficiência energética e causando a indisponibilidade da unidade. O procedimento de reparo dos tubos internos das caldeiras é trabalhoso e acarreta longos tempos de paralisação em função da necessidade de resfriamento da unidade.

A indisponibilidade da caldeira acarreta perdas substanciais às geradoras por lucros cessantes e na impossibilidade de modificar o projeto da caldeira (queima do carvão, fluxo de gases, posicionamento dos queimadores, etc.), uma forma de minimizar as ocorrências causadas pelo desgaste dos tubos é a investigação detalhada do desgaste nas paredes das tubulações causado pelo impacto de partículas presentes nas cinzas do carvão mineral queimado e a pesquisa de revestimentos metálicos ou compósitos nas regiões críticas da caldeira. Atualmente, o uso de revestimentos com a finalidade de retardar o processo de ataque às superfícies metálicas tem sido muito difundido, e as principais tecnologias de revestimentos possuem os princípios de utilização de revestimentos bimetálicos revestimento por difusão de alumínio, nitretação, cromagem (revestimento com cromo), boretação, pré-oxidação da superfície, processo de revestimento por soldagem, aspersão térmica e métodos de pintura.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar um revestimento feito de material composto por um adesivo cerâmico refratário inorgânico e uma trama de fibra de carbono que será aplicado em tubulações de aço submetidas ao impacto de partículas de cinzas de carvão mineral brasileiro em caldeiras de centrais termelétricas que o utilizam como combustível, propondo um revestimento de boa resistência e fácil aplicação. Foram utilizadas técnicas de caracterização mecânica e física (ensaios de tração, adesão, jateamento abrasivo, abrasão, condutividade térmica). Adicionalmente, foram realizados modelos de eficiência térmica e estudo de viabilidade econômica da aplicação/ uso do revestimento nesses tubos. Finalmente, foram feitos testes de simulação térmica em serviço.

## 2. Revisão Bibliográfica

A geração é o segmento da indústria de eletricidade responsável por produzir energia elétrica e injetá-la nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição) para que chegue aos consumidores [1].

Atualmente, o Brasil possui um total de 4.520 empreendimentos em operação, que contribuem para uma capacidade de geração de energia total de 143.133.470 kW de potência instalada [3]. A Figura 1 mostra a distribuição das unidades geradoras de energia elétrica em operação no Brasil e deixa claro a maior concentração das mesmas nas regiões centro-oeste, sudeste e sul [4].



Figura 1: Georreferência de usinas geradoras de energia no Brasil [3].

### 2.1. Hidrelétrica *versus* Termelétrica

A geração de energia no setor elétrico brasileiro é predominantemente proveniente da utilização da hidráulica (dos rios), aproximadamente 62% do total nacional produzido. Porém cerca de aproximadamente 28% da capacidade instalada

provém da geração termelétrica, que obtém a energia pela combustão de combustíveis fósseis, biomassa ou pela energia térmica liberada em reações nucleares [1]. Desta maneira, tem-se os carros fortes da produção nacional de energia. A Figura 2 mostra a distribuição quantitativa brasileira do tipo original de energia que será transformada em energia elétrica, isto é, se hidráulica, pela “queima” de combustíveis fósseis, eólica, solar ou nuclear. A segunda maior parcela tem origem na combustão de combustíveis fósseis, isto é, essencialmente carvão mineral, óleo ou gás.

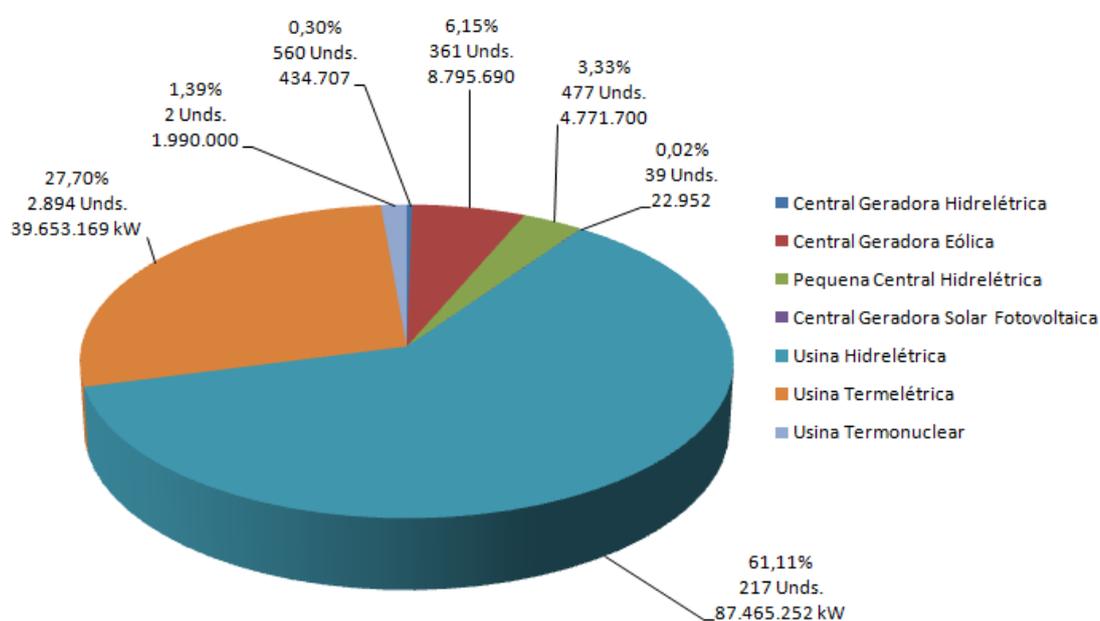


Figura 2: Empreendimentos geradores de energia elétrica no Brasil em operação [1].

## 2.2. Geração de energia termelétrica

Uma usina termelétrica é uma instalação industrial cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de um processo de “queima” de combustíveis fósseis, como carvão, óleo ou gás, transformando a água em vapor, com o calor gerado na caldeira. O vapor gerado possui alta pressão e, é utilizado para girar uma turbina, que por sua vez, aciona o gerador elétrico. Ou seja, a potência mecânica obtida pela passagem do vapor através da turbina - fazendo com que esta gire - e no gerador - que também gira acoplado mecanicamente à turbina - é que transforma a potência

mecânica em potência elétrica. A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para adequada condução, através de linhas de transmissão, até os centros de consumo [5]. Ao chegar aos centros de consumo, essa energia passa por uma central abaixadora de tensão e somente assim é fornecida aos consumidores finais. A Figura 3 mostra esquematicamente o princípio de funcionamento de uma usina termelétrica.

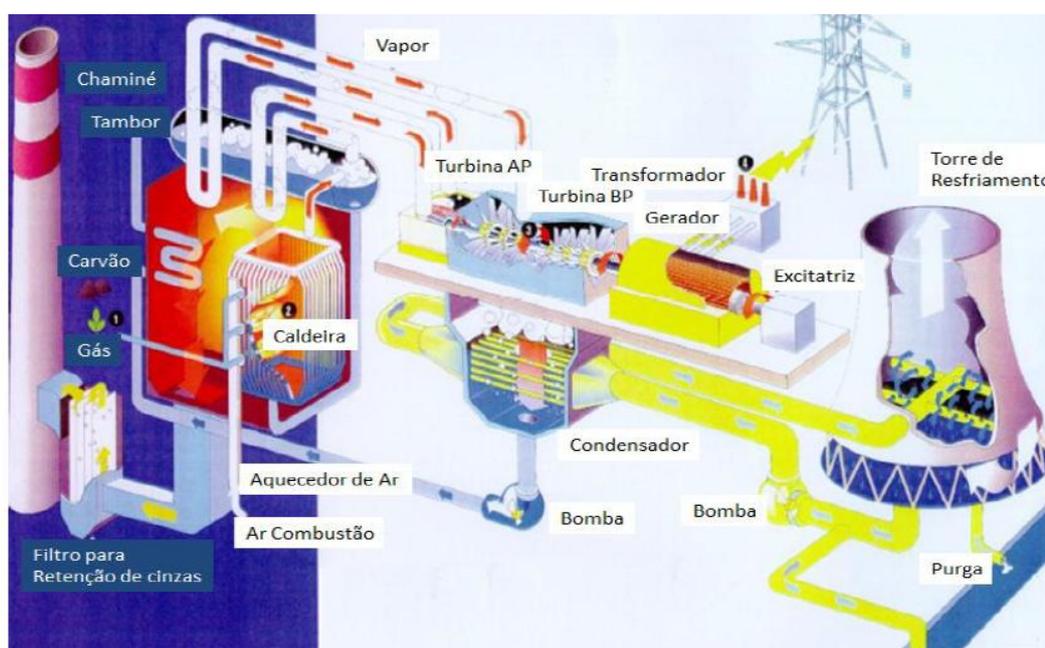


Figura 3: Esquema de produção de energia de uma usina termelétrica [6].

Dos 4.520 empreendimentos de geração de energia em operação no Brasil, 2.894 unidades são termelétricas e somam um total nacional de 39.653.169 kW de potência produzida [2]. Desta parcela, cerca de 22 unidades produzem energia por meio de carvão mineral, o que corresponde a aproximadamente 9% do total de energia produzida – 3.612.155 kW [2]. A Tabela 1 apresenta as principais centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil. A Figura 4 apresenta um gráfico esquemático da distribuição quantitativa entre as matrizes (ou origens) energéticas das termelétricas brasileiras.

Tabela 1: Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil [7][8].

Usina	Unidade	Estações	Potência nominal (MW)	Localização
Jorge Lacerda	Unidade A	4	232	Capivari de baixo (SC)
	Unidade B	2	262	Capivari de baixo (SC)
	Unidade C	1	363	Capivari de baixo (SC)
Charqueadas	Unidade 1	4	72	Charqueadas (RS)
Presidente Médice	Conjunto A	2	126	Candiota (RS)
	Conjunto B	2	320	Candiota (RS)
	Conjunto C	1	350	Candiota (RS)
São Jerônimo	Unidade 1	1	20	São Jerônimo (RS)
Figueira	Unidade 1	2	20	Figueira (PR)
Porto Itaqui	1 unidade	1	360	São Luis (MA)
Pecém	Porto do Pecém I	2	720	São Gonçalo do Amarante (CE)
	Porto do Pecém III	1	365	São Gonçalo do Amarante (CE)
	Total	22	3.210	

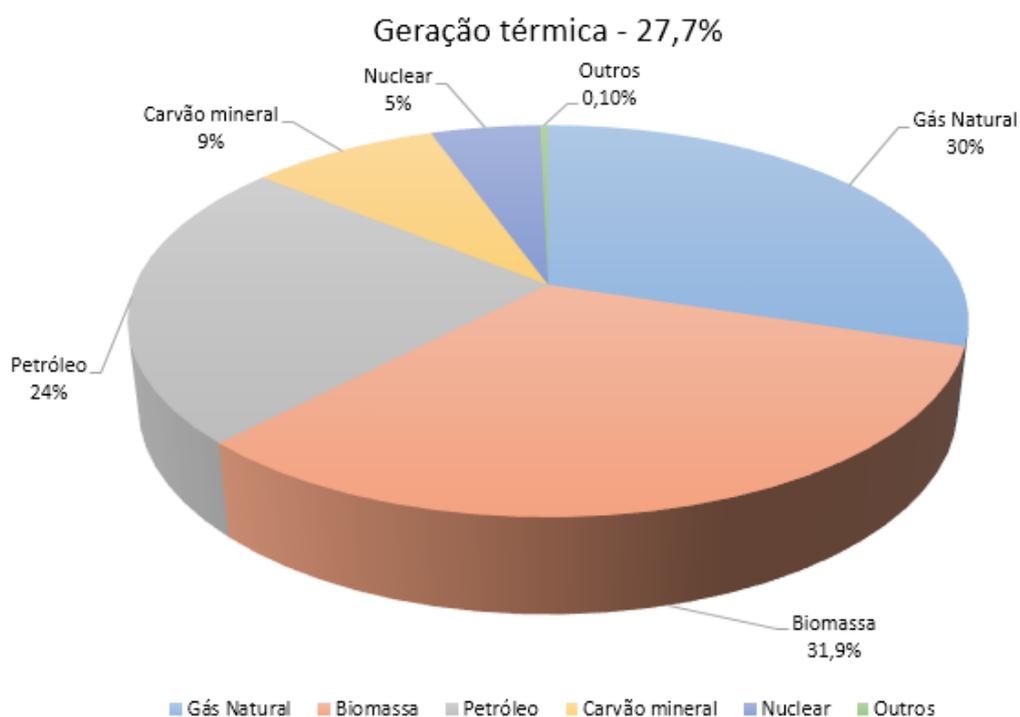


Figura 4: Matriz de geração de energia térmica do Brasil. Nota-se uma parcela significativa de consumo do carvão mineral na distribuição [2].

## **2.3. Carvão mineral**

O carvão fóssil é a rocha sedimentar combustível que se origina da decomposição de vegetais e restos de vegetais terrestres (troncos, galhos, sementes, pólen) cuja deposição sofreu, ao longo de milhões de anos, processos de compactação e transformações devidas a aumentos de pressão e temperatura, concentrando carbono e hidrogênio (processo dito carbonificação). O carbono, em função do seu elevado teor, é o principal elemento químico no carvão [7].

### **2.3.1. Classificação do carvão**

A classificação de um carvão está estreitamente ligada ao seu grau de carbonificação. A turfa, de baixo conteúdo carbonífero, constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 55% a 60%; o linhito apresenta um teor que varia de 61% a 78%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém cerca de 79% a 90% de carbono, e o mais puro dos carvões, o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90% [5].

### **2.3.2. Reservas de carvão nacional**

Os recursos carboníferos do Brasil são da ordem de 32 bilhões de toneladas e estão concentrados em sua grande maioria no sul do país. As jazidas estão distribuídas da seguinte maneira: 89,6% no Estado do Rio Grande do Sul, 10,1%, em Santa Catarina e 0,3% no Paraná conforme apresentado na Tabela 2 [5].

Tabela 2: Distribuição dos principais recursos carboníferos brasileiros [5].

UF	Jazida de carvão	Recursos (10 t)	%
Paraná	Cambuí	44	
	Sapopema	47	
	Total	91	0,3
Santa Catarina	Barro Branco	1.245	
	Bonito	1.656	
	Pré-bonito	414	
	Total	3.315	10,1
Rio Grande do Sul	Candiota	12.575	
	Leão	2.339	
	Charqueadas	2.993	
	Iruí/Capané	2.968	
	Morungava	3.328	
	Santa terezinha/Torres	5.168	
	Total	29.371	89,6
Total		32.777	100

O carvão nacional é classificado como um carvão de baixa qualidade por apresentar, como características básicas, elevado teor de inertes (cinzas) e enxofre, devido ao ambiente em que foram formados e que define suas características e possíveis aplicações. As cinzas e o enxofre roubam energia no processo de combustão do carvão e geram resíduos no referido processo.

A principal e maior jazida brasileira é a de Candiota (Rio Grande do Sul) e ela representa 38,7% do total nacional de produção de carvão mineral. Apesar da grande significância nacional, o carvão bruto desta jazida possui alto teor de cinzas e de enxofre, causa do baixo rendimento do combustível (30 a 52%).

A jazida de Santa Terezinha (Rio Grande do Sul) representa aproximadamente 16% das reservas do país. Trata-se de um carvão de melhor qualidade (rendimento em torno de 60%) com propriedades coqueificantes, que o fazem ser utilizado essencialmente na siderurgia e em fundições [5].

As jazidas de Charqueadas, Capané e Iruí (Rio Grande do Sul) possuem um carvão com baixo rendimento (35% - 40% as duas últimas, respectivamente).

A Tabela 3 apresenta as características dos carvões das referidas minas da Tabela 2. Nota-se que o carvão mineral brasileiro com maior poder calorífico também é o que possui o maior teor de enxofre, além de um teor de cinzas relevante (sub-betuminoso de Sapopema, Paraná) [5].

Tabela 3: Propriedades químicas dos carvões de cada jazida [5].

	Jazida	Poder calorífico (kcal/Kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	Cambuí (sub-betuminoso)	4.850	30	45	6
	Sapopema (sub-betuminoso)	4.900	30,5	43	7,8
Santa Catarina	Barro Branco (linhito)	2.700	21,4	62,1	4,3
	Bonito (linhito)	2.800	26,5	58,3	4,7
Rio Grande do Sul	Candiota (linhito)	3.200	23,3	52,5	1,6
	Leão (linhito)	2.950	24,1	55,6	1,3
	Charqueadas (linhito)	2.950	24,3	54	1,3
	Iruí (linhito)	3.200	23,1	52	2,5
	Capané (linhito)	3.100	29,5	52	0,8
	Morungava/Chico Lomã (sub-betuminoso)	3.700-4.500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6-2,0
	Santa Terezinha (sub-betuminoso)	3.800-4.300	28,0-30,0	41,0-49,5	0,5-1,9

### 2.3.3. Estrutura da cadeia do carvão mineral

Os processos produtivos do carvão mineral estão segmentados em três operações: Mineração, Beneficiamento e Transporte.

O carvão mineral pode ser extraído da natureza de duas maneiras: por meio da mineração a céu aberto ou de superfície e por meio da extração via lavra subterrânea. A escolha do método de extração mais adequado leva em consideração a geologia do depósito natural do mineral e a viabilidade econômica da extração.

Quando a camada de recobrimento é relativamente estreita, a extração dos depósitos minerais é feita a céu aberto, pois os mesmos se encontram mais próximos à superfície, e apresentam um custo de extração mais competitivo.

Quando o mineral ocorre em camadas profundas, aproximadamente 50 m, o método de mineração por lavra subterrânea é utilizado.

A etapa seguinte é o beneficiamento, onde o mineral passa por processos que visam a redução de matéria inorgânica (rocha estéril) e impurezas existente no carvão com a finalidade de melhorar sua qualidade, pois imediatamente após a extração o carvão mineral apresenta diversos materiais agregados, como: argilas, piritas, calcários e óxidos (silício). Nem todo este material agregado poderá ser

eliminado e alguma parcela constará como um contaminante deletério para a futura utilização do carvão na sua combustão [7].

Após a etapa de beneficiamento, o carvão é transportado até as usinas termelétricas para utilização como fonte de energia.

#### **2.3.4. O uso do carvão no setor energético nacional**

O consumo de carvão mineral nacional se distribui pelos seguintes setores: elétrico (81,1%), papel e celulose (4,9%), petroquímicos (3,3%), alimentos (2,9%), cerâmico (2,6%), metalurgia e cimento (1,3%) e outros (2,7%) [5].

O elevado conteúdo de inertes do carvão nacional inviabiliza seu transporte, em termos econômicos. Desse modo, todas as termelétricas a carvão em operação no Brasil, e mesmo as em construção ou projeto, localizam-se próximas as minas. Devido a isso, as siderúrgicas acharam uma solução no carvão mineral importado.

A utilização do carvão importado para abastecimento de termelétricas no Brasil é recente. O parque atual de usinas termelétricas com operação a carvão importado iniciou-se em 2012 [5].

O carvão importado utilizado nas usinas termelétricas tem origem colombiana, até o momento. O carvão colombiano é considerado de boa qualidade quando comparado ao carvão nacional, ou seja, tem baixos teores de material inerte (cinzas – 1 - 6%), de enxofre (0,35 - 1,0%), de umidade (2 - 7%), e poder calorífico superior a 5.500 kcal/kg (7.000 – 8.000 kcal/Kg).

A Figura 5 esquematiza o impacto do carvão importado frente ao nacional para o uso energético no Brasil.



Figura 5: Consumo brasileiro e origem do carvão mineral utilizado para fins energéticos. Figura adaptada [5].

### 2.3.5. Tecnologia de geração de energia

Atualmente, existem diversas tecnologias de geração de energia utilizando o carvão como fonte energética para o processo. A escolha da tecnologia de geração apropriada considera alguns fatores como: tamanho da unidade, regime de operação, eficiência e legislação ambiental [5].

Quanto a temperatura, pressão e eficiência, as tecnologias de geração de energia são classificadas em ciclos subcríticos, supercríticos e ultra supercríticos, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação das tecnologias: Temperatura *versus* Pressão *versus* Eficiência [6].

Indicadores	Plantas		
	Subcríticas	Supercríticas	Ultra-supercríticas
Pressão (MPa)	15-18	24,5+	26+
Temperatura ( °C)	540-565	540-570	600+
Status	Iniciando para os altos teores de cinza	Iniciando para os altos teores de cinza	Apenas baixos teores de cinza
Eficiência	30-40%	40-46%	48% (futuro 50-55%)

Quanto a combustão do carvão, as tecnologias de geração de energia são a de Carvão Pulverizado (PCC - *Pulverized Coal Combustion System*), Combustão em Leito Fluidizado (FBC – *Fluidized Bed Combustion*) e a Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC – *Integrated Gasification Combined Cycle*).

- Carvão Pulverizado (PCC)

A tecnologia de carvão pulverizado é a mais difundida nas usinas termelétricas em operação, pois ela permite a queima de carvões de baixa qualidade, além de ser utilizada nas usinas de ciclo simples, tanto nas de ciclo subcrítico quanto nas de ciclo supercrítico e ultra supercrítico.

Atualmente as usinas brasileiras usam essa tecnologia em ciclo subcrítico [7]. O carvão é moído em partículas finas (entre 75 e 300  $\mu\text{m}$ ) e injetado, juntamente com ar, numa câmara de combustão onde é queimado, alcançando-se temperaturas da ordem de 1.500°C e eficiência de 30 – 45%, dependendo do tipo de carvão [6] [7].

- Combustão em Leito Fluidizado (FBC)

A combustão em leito fluidizado se dá através de um fluxo contínuo de ar que atravessa um empilhamento de carvão de granulometria específica. Este fluxo cria uma turbulência em uma mistura de material inerte e partículas de carvão, que é denominado leito. Com a velocidade do fluxo, as partículas permanecem em suspensão e em movimento livre, se comportando como um fluido, ou seja, o leito se torna “fluidizado”. Quando o combustível é adicionado ao leito fluidizado pré-aquecido, a mistura constante promove transferência de calor e ocorre a completa combustão do carvão. O calor gerado é recuperado por meio de trocadores de calor e utilizado para gerar vapor para a geração de energia elétrica [7].

O leito fluidizado pode ser à pressão atmosférica (AFBC – *Atmospheric fluidized bed*) ou com pressurização (PFBC – *Pressure Fluidized Bed Combustion*).

No leito a pressão atmosférica, o ar e o combustível, juntamente com um material sólido (calcário para a remoção do enxofre) são injetados para a combustão de combustíveis de baixa qualidade (ricos em cinzas e enxofre). Este sistema possui uma eficiência entre 40 – 44% [7].

A combustão por meio de leito fluidizado com pressurização também é aplicada para a combustão de combustíveis de baixa qualidade. O seu princípio de funcionamento é semelhante ao leito a pressão atmosférica. Para este sistema, a pressão de operação está entre 12 e 16 bar (1,2 MPa – 1,6 MPa) com temperaturas de aproximadamente 1.250°C. Este processo apresenta uma eficiência de aproximadamente 44% e baixo impacto ambiental [7].

- Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC)

A gaseificação integrada com ciclo combinado é uma combinação de duas tecnologias: a gaseificação do carvão, para a produção do combustível *syngas* (gás de síntese), e a tecnologia da turbina a gás em ciclo combinado (GTCC – *Gas Turbine Combined Cycle*) para geração de eletricidade.

Nos sistemas gaseificação integrada com ciclo combinado, o carvão é aquecido em um vaso pressurizado (gaseificador) contendo uma quantidade controlada de oxigênio (ou ar) e vapor de água. O gás produzido é uma mistura de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, que é purificado e queimado em uma turbina a gás para gerar energia elétrica. O gás de combustão que sai da turbina, ainda em alta temperatura, é usado em um gerador de vapor ligado a um turbogerador convencional. Esta tecnologia, assim como a combustão por meio de leito fluidizado, combina turbinas a gás e a vapor (ciclo combinado). A eficiência deste sistema pode chegar a 52% [7].

## **2.4. Componentes básicos de uma usina termelétrica a carvão**

Os componentes básicos de uma usina termelétrica que utiliza carvão mineral como fonte combustível são: caldeira (com superaquecedores e reaquadecadores), turbinas, gerador, condensadores, bomba de água e chaminé.

Existem nove tipos de caldeiras que são classificadas de acordo com o seu mecanismo de geração de vapor, são eles: caldeiras seccionais de ferro fundido, caldeiras de aço, caldeiras de eletrodo, geradores de vapor, caldeiras verticais, caldeiras horizontais, caldeiras aquatubulares, caldeiras de calor residual e caldeiras de leito fluidizado [9].

O entendimento do princípio de funcionamento e dos componentes do sistema de caldeiras aquatubulares será apresentado em destaque abaixo, pois o presente estudo está relacionado especificamente a componentes deste tipo de caldeiras.

#### **2.4.1. Caldeiras aquatubulares**

Caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia [10]. De uma maneira geral, as caldeiras convertem água em vapor superaquecido.

O fluxo de trabalho da caldeira obedece ao ciclo termodinâmico regenerativo de Rankine [11] e será descrito a seguir.

#### **Princípio de funcionamento**

O carvão que é utilizado como combustível em caldeiras de geração de energia é pulverizado até uma granulometria pré-determinada e, na sequência, é misturado com ar quente e injetado na caldeira. Dentro da caldeira, queimadores inflamam o carvão e a mistura de ar para alcançar combustão completa e criar o máximo de calor possível.

O resíduo da combustão de carvão, denominado “cinzas” (*bottom ash*), é coletado no fundo da caldeira. Este resíduo pode ser enviado para um aterro ou pode ser vendido como matéria prima para construção de rodovias (asfalto).

Em caldeiras aquatubulares, a água circula através de tubos de pequeno calibre construídos em bancos e ligados a coletores e a distribuidores, denominada parede d'água. As superfícies externas dos tubos são expostas aos produtos de combustão ou a gases quentes.

O calor intenso transforma a água dentro dos tubos da parede da caldeira em vapor que é direcionado para os superaquecedores [11].

### 2.4.1.1. Superaquecedores

Os superaquecedores tem como função principal aumentar a temperatura do vapor sem aumentar a pressão.

Os superaquecedores são instalados na saída da câmara de combustão da caldeira. Desta maneira, o vapor a partir da câmara de combustão da caldeira é passado através de um subsistema de tubos cujas superfícies externas também estão expostas aos gases de combustão, aquecendo assim o vapor, sem aumentar a pressão. O vapor pode ser aumentado em 200°C alcançando uma temperatura final de 540°C [9]. O vapor superaquecido vai para o coletor que por sua vez está ligado aos serviços do sistema. A Figura 6 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de uma caldeira que utiliza carvão mineral como combustível.

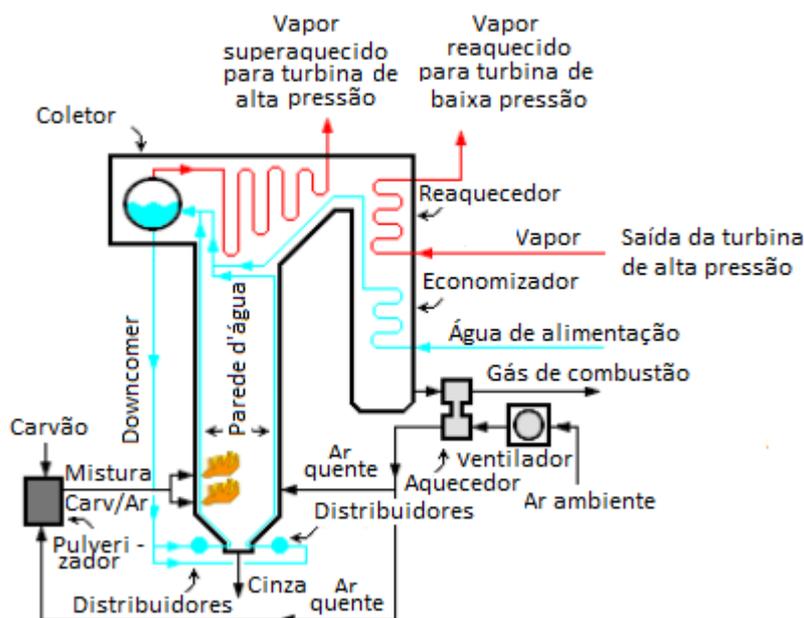


Figura 6: Esquema simplificado do funcionamento da caldeira de geração de vapor por queima de carvão. Figura adaptada [11].

### 2.4.2. Turbinas

O vapor superaquecido é então enviado para as turbinas. Primeiramente, o vapor superaquecido é injetado em uma turbina de alta pressão. O rejeito de vapor

dessa primeira turbina é direcionado para os reaquecedores da caldeira para ser aquecido novamente. O vapor reaquecido é então injetado em uma turbina de média pressão e seu rejeito é injetado em duas turbinas de baixa pressão para obter o máximo de eficiência possível do ciclo.

### **2.4.3. Gerador**

A expansão de vapor em cada turbina gira lâminas que estão acopladas a um único eixo de rotação contínua que por sua vez também é acoplado a um gerador de energia. Conforme o eixo gira, o gerador transforma correntes eletromagnéticas providas de uma série bobinas em energia elétrica.

### **2.4.4. Condensador**

O vapor d'água da saída das turbinas de baixa pressão é injetado em um condensador que tem a finalidade de transformar esse vapor de baixa pressão em água novamente. O condensador é formado por tubos que contém água gelada de um sistema auxiliar de água. Esse sistema auxiliar externo é responsável pela diminuição da temperatura da água da saída do condensador para que ela retorne ao mesmo em temperatura mais baixa e mantenha o ciclo de condensação do vapor de baixa pressão.

### **2.4.5. Bombas de água e economizadores**

A água resultante do processo de condensação é bombeada para os economizadores e posteriormente é injetada nos tubos da parede d'água da caldeira, fechando assim um ciclo.

O economizador é um conjunto de tubos que podem ser instalados no interior da estrutura da caldeira em uma região onde há certo fluxo de gás de exaustão a partir da caldeira, ou pode ser um sistema a parte montado entre a saída de gás de combustão da caldeira e a chaminé. A água proveniente do sistema de condensação circula por esses tubos e absorve determinada quantidade de calor dos gases de combustão.

Este processo aumenta a eficiência da caldeira, além de ter como vantagem a redução do choque térmico da água de alimentação com os gases de combustão na parede d'água da caldeira.

### Chaminé

Os gases quentes de exaustão resultantes da queima de carvão contêm diversas emissões tais como óxidos de nitrogênio, dióxidos de enxofre e partículas das cinzas. Antes de os gases de combustão serem eliminados pela chaminé, eles passam por processos de limpeza para eliminação de agentes agressivos ao meio ambiente [11].

## **2.5. Mecanismo de falha em caldeira a carvão**

A falha em sistemas de tubulação de caldeiras está associada a diversos mecanismos, tais como: ruptura sob tensão (*stress rupture*), corrosão no interior da tubulação (*water side corrosion*), corrosão no exterior da tubulação (*fire side corrosion*), erosão (*erosion*), fadiga (*fatigue*) e falta de controle de qualidade (*lack of quality control*) [11].

### **2.5.1. Corrosão por partículas de carvão (*Ash corrosion*)**

Um dos maiores problemas na maioria das caldeiras em operação com respeito à interrupção forçada da atividade está associado a mecanismos de falha em tubos dos sistemas da caldeira devido à combinação dos processos de erosão e corrosão, que ocorre a temperaturas elevadas, isto é, temperaturas no entorno de 550°C [12]. Desta maneira, o tripé erosão-corrosão-alta temperatura será o foco do presente trabalho.

Tratando-se de caldeiras que utilizam carvão mineral como fonte combustível, o processo de erosão e corrosão associado a altas temperaturas depende das propriedades do combustível queimado e dos parâmetros do processo de combustão. A superfície dos tubos das caldeiras fica exposta à particulados de

carvão, resultantes da combustão incompleta do mesmo pelos queimadores. A aspersão desses particulados na superfície externa dos tubos causa um desgaste abrasivo dos mesmos.

As superfícies dos tubos também ficam expostas a um alto nível de produtos da combustão resultante da queima do combustível, tais como: monóxido de carbono, ácido sulfídrico e sulfetos de ferro.

A taxa de corrosão se intensifica principalmente pela quantidade de enxofre presentes na chama de combustão, processo denominado corrosão por enxofre (*sulfur corrosion*). A falta de oxigênio faz com que a camada de óxidos de ferro seja mais fina, e a presença de sulfeto de ferro tornam essa camada de óxido porosa e mais "permeável", aumentando a taxa de difusão de íons de ferro e conseqüentemente, tem-se uma elevação da velocidade de corrosão. Uma grande concentração de enxofre presente nos produtos de combustão pode acelerar o processo corrosivo – de 2-5 mm de material consumido por ano [12].

Outro processo de corrosão que ocorre no interior da caldeira é denominado corrosão por ataque de cinzas na forma de escória (*oil ash corrosion*). Neste processo de corrosão, a parede externa do tubo fica exposta a partículas praticamente líquidas de cinzas (escória gerada na queima do carvão) em ponto de fusão (*molten slag*) de vanádio e sódio resultantes do processo de combustão [13]. Esses particulados fundidos se depositarão sobre a superfície externa dos tubos.

A reação de corrosão acontecerá devido ao derretimento da superfície externa dos tubos expostas a essas partículas fundidas compostas por sódio-vanádio. Essa mistura promoverá um ambiente agressivo na superfície do tubo contribuindo para a dissolução do mesmo gradativamente e, conseqüentemente, a perda de espessura.

O processo de ataque às superfícies metálicas associado a corrosão, potencialmente, é capaz de reduzir a espessura dos tubos e, por conseqüência, aumentar a frequência de ocorrência de perfurações causando a indisponibilidade da unidade.

Os componentes da caldeira que mais estão expostos a esse tipo de problema são: os tubos internos da caldeira, os tubos da parede d'água, os tubos do sistema de superaquecimento do vapor, os tubos do sistema de reaquecimento do vapor da exaustão da turbina de alta pressão, os tubos do sistema de pré-

aquecimento da água de alimentação, tubos que circundam os queimadores, componentes do sistema de fornecimento de combustível (queimador + carvão) e do sistema de remoção de cinzas.

A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático dos componentes da caldeira que estão suscetíveis ao tripé erosão-corrosão-alta temperatura [12].

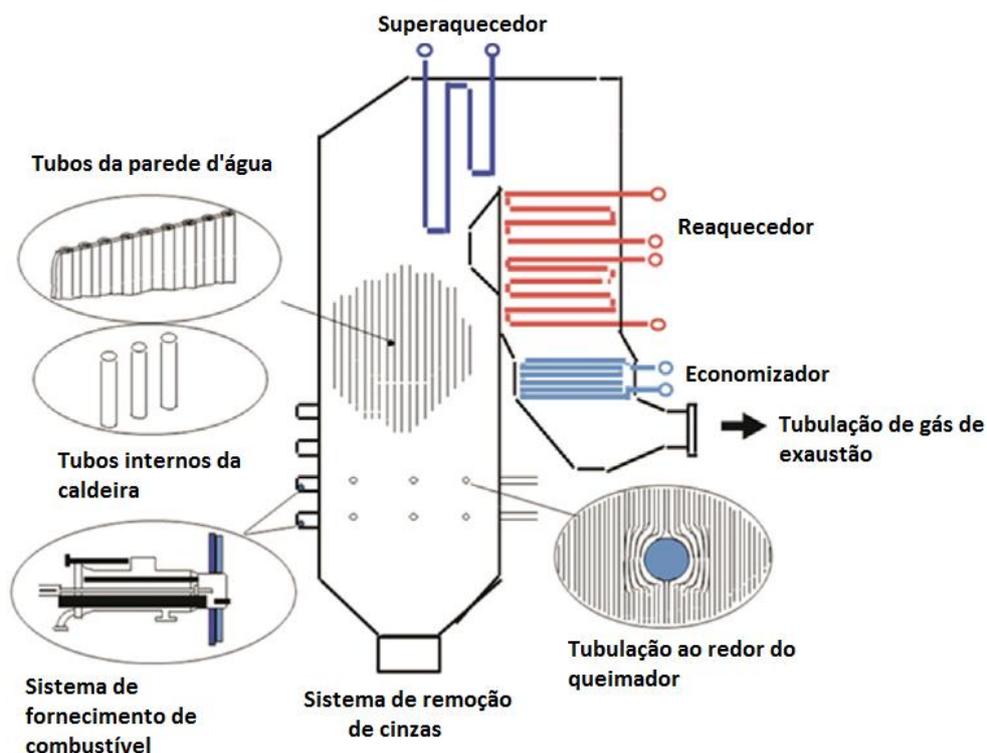


Figura 7: Principais elementos da caldeira que estão vulneráveis ao tripé erosão-corrosão-alta temperatura [12].

### 2.5.2. Mecanismos de proteção contra falha em tubulações de caldeira a carvão

A indisponibilidade da caldeira acarreta perdas substanciais às geradoras por lucros cessantes. Desta maneira, a fim de minimizar as ocorrências causadas pelo desgaste dos tubos e, conseqüentemente, a sua inutilização, alguns ajustes podem ser levados em consideração, tais como: utilizar um carvão com qualidade melhor (menor teor de cinzas), melhorar moagem do carvão na etapa de pulverização, realização de um ajuste apropriado da distribuição de combustível para os queimadores e um melhor controle do fluxo de ar para a mistura (carvão + ar para combustão). Outra possibilidade de minimizar os danos causados pelo desgaste

erosivo-corrosivo proveniente dos particulados de carvão presente no vapor e dos produtos químicos da combustão é o rearranjo no projeto dos componentes internos da caldeira (superaquecedores, reauecedores e etc.) [14].

No entanto, quando não se é possível realizar modificações na estrutura física da caldeira, certos tipos de revestimentos sobre as partes metálicas (para proteção) são usados.

O uso dos revestimentos tem como finalidade limitar o processo erosivo-corrosivo que é favorecido a alta temperatura, e assegurar a durabilidade dos componentes do sistema que não podem sofrer rearranjo estrutural. Sendo assim, o revestimento a ser utilizado deve apresentar boas propriedades mecânicas, dentre as quais pode-se citar: boa aderência entre o revestimento e o substrato a ser protegido, elevada resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo, elevada dureza, não comprometer a troca térmica, entre outras [12].

### **2.5.3. Revestimentos**

A tecnologia de revestimento está em rápido crescimento e é responsável por maior parte do custo total para a proteção de componentes de caldeiras contra a corrosão e erosão. Revestimentos orgânicos e metálicos representam a maior parte dos tipos de revestimentos utilizados até então [13].

Além da boa resistência à corrosão, o revestimento metálico fornece propriedades mecânicas à tubulação, tal como aumento da dureza superficial. Materiais normalmente utilizados como revestimentos para proteger a superfície dos tubos das caldeiras contra o processo de erosão-corrosão associado a altas temperaturas abrangem um grupo de materiais metálicos que apresentam características como resistência à corrosão e a elevada temperatura, tais como os aços ferríticos e austeníticos, ligas de NiCrSiB e NiCr, superligas de níquel, como por exemplo, Inconel 625, ligas intermetálicas do sistema binário FeAl e materiais cerâmicos, tais como  $Al_2O_3$  [12].

Outra possibilidade para revestimento é a utilização de uma matriz de metal com compósitos, isto é, uma matriz reforçada com partículas de cerâmica, como por exemplo, ligas de NiCr reforçadas com  $Cr_3C_2$  e com partículas de TiC. Para a utilização dos revestimentos cerâmicos em ambientes com temperaturas elevadas é

necessário aplicar uma camada intermediária entre o metal da tubulação e a camada cerâmica, tipicamente utiliza-se uma liga 50/50 NiCr [15].

As indústrias de geração de energia utilizam uma série de tecnologias voltadas para a modificação da superfície da tubulação das caldeiras à fim de prevenir a degradação prematura da tubulação do sistema e a parada da unidade.

As principais tecnologias de revestimentos possuem os seguintes princípios: utilização de revestimentos bimetálicos (revestimento realizado com um metal que apresente boa resistência à corrosão), revestimento por difusão de alumínio, nitretação (processo de temperar o aço com nitrogênio), cromagem (revestimento com cromo), boretação (revestimento com boro), pré-oxidação, processo de revestimento por soldagem (*pad welding*), aspensão térmica e métodos de pintura (deposição de múltiplas camadas de revestimentos de matriz inorgânica ou orgânica) [15]. Deve-se realçar que estas tecnologias têm avançado na busca de melhorias da performance dos revestimentos, porém nem sempre evitando aumento de custos.

Em especial para plantas que utilizam o carvão mineral como combustível, o processo de revestimento por soldagem ao arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*) é um método de proteção muito utilizado para lidar com os problemas erosão – corrosão associados à alta temperatura.

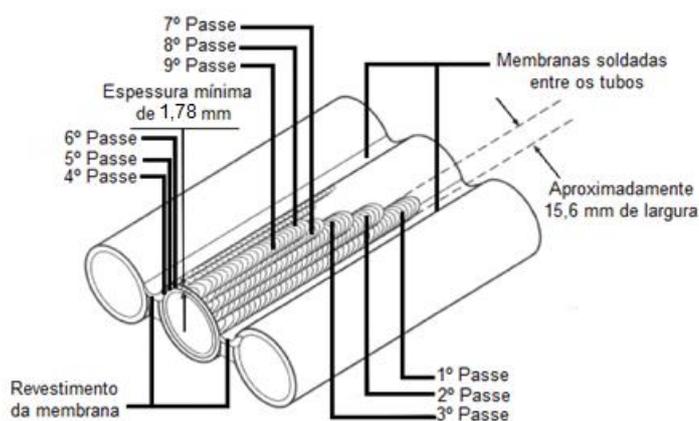
Neste método, o cordão de solda é depositado automaticamente com o auxílio de uma máquina de soldagem por arco elétrico que utiliza atmosfera com proteção gasosa. Esta máquina deposita verticalmente camadas de cordão de solda, iniciando o depósito pelas membranas do sistema e percorrendo todo o comprimento do tubo. O recobrimento se dá através do processo físico de fusão da camada superficial do substrato de aço com o metal de solda. Os parâmetros de operação e de aplicação do metal de proteção são pré-programados de modo que todo o depósito do cordão de solda seja realizado homogeneamente sobre a superfície a ser protegida e minimizando assim as possibilidades de falha, e em conformidade com as normas ASME de construção correspondentes.

O processo de soldagem ao arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa possui como metal de adição padrão a liga Inconel 625 (Ni-22 Cr-9 Mo-3.5Nb), porém outras ligas também são utilizadas como 309 SS (Fe-24 Cr-13Ni) e a liga 622

(Ni-22 Cr-13 Mo-3W) e a espessura mínima atingida é de 1,78 mm [16]. A Figura 8 ilustra a situação para o revestimento obtido por soldagem ao arco elétrico.

Esta tecnologia tem sido utilizada com sucesso como método de proteção em diversos países como Estados Unidos da América, Reino Unido, França, Holanda e Itália, entre outros países, por décadas, por apresentar alta resistência (o que aumenta a vida útil dos tubos) e bom custo-benefício devido à durabilidade do revestimento. Como resultado, o revestimento apresenta boa ductilidade e tenacidade [16].

Lai *et al*, em uma revisão sobre o método de proteção erosiva-corrosiva por soldagem para tubos de caldeiras que operam a carvão mineral, destacou as boas propriedades mecânicas do revestimento com a liga 625 e uma boa razão entre custo-benefício [16].



(a)



(b)

Figura 8: (a) Método de proteção por soldagem. (b) Vista lateral de tubulação da parede d'água com revestimento por soldagem aplicado [16].

Como alternativa ao método de proteção por soldagem, o revestimento por aspersão térmica é um método de proteção que já está sendo utilizado, pois é a técnica que apresenta o melhor custo benefício para revestir tubulações e outros equipamentos susceptíveis a processos de erosão-corrosão [12].

Pode-se citar como vantagens deste procedimento a possibilidade de aplicar os materiais com diferentes composições químicas e em diferentes fases (ligas metálicas, cerâmicos) em diferentes tipos de substratos com diferentes formas geométricas, a possibilidade de poder realizar múltiplas camadas de revestimento e a possibilidade de realizar o procedimento de proteção em peças já finalizadas, além da facilidade em executar reparos em campo [17] [18]. A Figura 9 ilustra o processo de aspersão térmica para a deposição de revestimento.

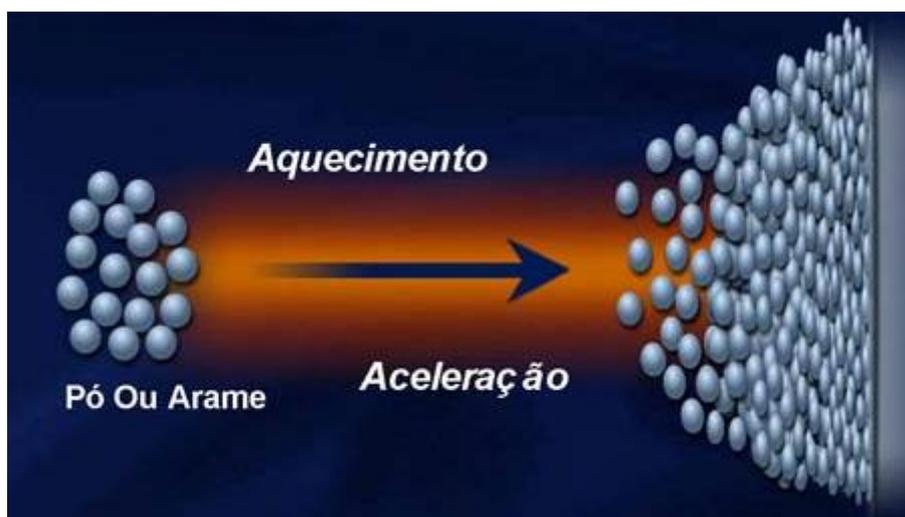


Figura 9: Processo de aspersão térmica [19].

Como uma forma de caracterizar o aumento a resistência à degradação de aços em caldeiras, *Sidhu & Prakash* [18] conduziram um estudo comparativo entre substratos que não foram e substratos que foram revestidos pelo método de aspersão térmica. Os substratos revestidos testados apresentaram camadas de aproximadamente 150 e 200  $\mu\text{m}$  respectivamente. O revestimento utilizado foi o composto Ni-22Cr-10Al-1Y. Os materiais foram inseridos na zona do superaquecedor de uma caldeira a carvão a cerca de 755°C durante 10 ciclos de 100h cada. Ao final do estudo constatou-se que as amostras revestidas apresentaram menor taxa de degradação (aproximadamente 6,38 mm/ano de perda espessura) quando comparadas a amostras do mesmo substrato sem revestimento

(9,16 mm/ano). Este resultado corrobora para a eficiência do uso de revestimentos como solução para o retardo do processo de desgaste das superfícies metálicas das caldeiras expostas ao tripé erosão-corrosão-alta temperatura.

### **2.5.3.1. Revestimentos e a transferência de calor em caldeiras industriais**

A transferência de calor desempenha um papel crucial na eficiência da caldeira. Em plantas termelétricas que utilizam carvão pulverizado, a combustão e a transferência de calor para os tubos que compõe a parede d'água acontecem simultaneamente na fornalha.

A transferência de calor dos produtos da combustão para a geração de vapor envolve vários mecanismos de trocas térmicas: condução, radiação e convecção, e efetivamente irá relacionar o calor gerado pela chama e a parede d'água onde será gerado o vapor.

A chama é primordialmente um jato de combustão a alta temperatura que pode conter algumas partículas sólidas suspensas. Seu jato atinge uma temperatura em torno de 1500 °C – 1600 °C no núcleo.

Como apresentado anteriormente, no interior da caldeira os tubos estão expostos a um ambiente hostil com produtos de combustão que são potencialmente agressivos a superfície dos mesmos e que em alguns casos formam escórias sobre essas superfícies. A formação de escória na parede externa do tubo resulta em um aquecimento não linear (não uniforme) ao longo da tubulação, o que conseqüentemente retarda a transferência de calor e reduz a eficiência térmica da caldeira [20]. A eficiência térmica de uma caldeira nunca é total, ou seja, nunca atinge 100%. Isto se deve ao fato de ser utilizado apenas uma parte do calor fornecido pelo combustível nas trocas térmicas no interior da caldeira, e o restante ser perdido por uma série de fatores. Como a eficiência térmica deve ser afetada o mínimo possível, este é um parâmetro que deve ser levado em consideração e muitos pesquisadores vem desenvolvendo estudos sobre o desempenho de diferentes tipos de caldeiras, desde análise quanto a *design* até quanto a revestimento da tubulação.

Ganan *et al* [21] e Brundaban Patro [22] desenvolveram métodos de análise de eficiência térmica de caldeiras tubulares, com tubos combinados em vários passes.

Taole *et al* [23] elaboraram um estudo quantitativo que avaliou o impacto da qualidade do carvão na eficiência térmica de caldeiras que utilizam o mesmo como combustível e provou que a qualidade do carvão pode influenciar significativamente o desempenho da combustão, ou seja, um carvão de qualidade pode apresentar eficiência de combustão superiores a 75%.

Ainda neste caminho, Lv *et al* [24] desenvolveram um modelo matemático simplificado para o teste da eficiência de caldeira com base na análise da perda de calor devido aos gases de exaustão e devido aos gases não queimados, para caldeiras que operam com carvão mineral. O método apresenta erros inferiores a 5%, e isso mostra que o mesmo é viável e válido para esta aplicação.

### 3. Materiais e métodos

Os materiais e métodos utilizados para elaborar o presente estudo são expostos nos subitens a seguir. No primeiro são descritos informações sobre o material de estudo e no segundo subitem, é apresentada a metodologia usada para a realização do estudo.

#### 3.1. Materiais

Os tubos que compõe a parede d'água das caldeiras são de baixo teor de carbono e elementos de liga. Pode-se tomar como referência as normas ASTM A178 / A178M [25] e a norma DIN 17175-79 [26].

Para a confecção dos corpos de prova do revestimento proposto para análise, para todos os testes realizados, foi usada uma chapa de aço de espessura 8 mm doada pela Acellor Mittal com composição química e espessura semelhantes às dos aços que são utilizados nos tubos da parede d'água das caldeiras brasileiras ( $\approx 0,2\%C$ ). A Tabela 5 apresenta um comparativo da composição química da chapa de aço que foi utilizada como substrato neste trabalho na confecção dos corpos de prova com a composição química do aço comumente utilizado em caldeiras aquatubulares brasileiras, conforme referência DIN 17175-79 [26].

Tabela 5: Composição química do substrato usado para a confecção de corpos de prova revestidos.

Aço	Composição							
	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Si (%)	Mo (%)	Ni (%)
Corpo de prova	0,173	1,1	0,015	0,007	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Caldeira	0,21	1,2	0,04	0,04	-	0,35	-	-

O revestimento proposto nesta pesquisa é uma composição de adesivo cerâmico refratário resistente a altas temperaturas e um tecido de fibra de carbono.

### 3.1.1. Adesivo cerâmico

O adesivo utilizado no presente estudo foi o *Three Bond – 3713C* inorgânico de base aquosa, mono componente, onde a alumina é o elemento que constitui a sua composição principal. Segundo o fabricante, ele possui resistência térmica até aproximadamente 1300 °C, isto é, sem alteração de propriedades. Também segundo o fabricante, ele possui elevada força de adesão em materiais metálicos e alta resistência à ação de produtos químicos, óleos, solventes orgânicos e água [27].

A Figura 10 ilustra o adesivo utilizado neste trabalho que pode ser adquirido comercialmente em embalagens de 500g.



Figura 10: Adesivo cerâmico 3713C da ThreeBond [27].

### 3.1.2. Tecido de fibra de carbono

O tecido de fibra de carbono utilizado como membro integrante do revestimento proposto é o de designação *RC 200T/1270* e comercializado pela empresa Barracuda. Conforme informações do fabricante, este tecido possui 91% de fibra de carbono e 9% de fibra de vidro em sua composição e dispõe sua trama bidirecionalmente [28]. A Figura 11 ilustra a trama de carbono usada neste trabalho.

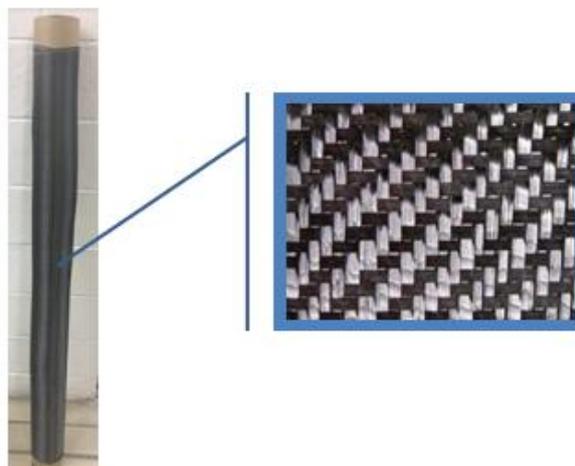


Figura 11: Tecido de fibra de carbono usado neste trabalho com trama bidirecional [28].

A Tabela 6 apresenta as propriedades do tecido de fibra de carbono utilizado, conforme informações do fabricante.

Tabela 6: Propriedades da fibra de carbono [28].

Propriedades da fibra de carbono		
Densidade	1,76	g/cm <sup>3</sup>
Elongação até a ruptura	1,9	%
Módulo de Elasticidade	234	GPa
Resistência à tração	3530	MPa
Tenacidade	4100	MPa

### 3.2. Métodos de avaliação

No presente estudo, ensaios de adesão, abrasão, jateamento, tração, avaliação da condutividade térmica e simulação térmica foram realizados em corpos de prova do revestimento proposto com a finalidade de avaliar a viabilidade do mesmo.

#### 3.2.1. Ensaio de adesão

O ensaio de adesão tem como objetivo avaliar o grau de afinidade entre o revestimento e o substrato a ser protegido.

Os testes de adesão do revestimento foram realizados sobre o conjunto substrato-revestimento e segundo a norma ASTM 4541 [29] que estabelece requisitos técnicos mínimos para o ensaio de aderência (*Pull-Off*). Foi utilizado o equipamento *Positest AT-A: Automatic Adhesion tester* da *Defelsko*.

Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de chapas de aço carbono conforme apresentado no item 4.1, com grau A de oxidação inicial (carepa de laminação intacta, ISO 8501-1 [30]), com dimensões de 100 mm x 150 mm e espessura de 8 mm. A preparação de superfície constou de desengorduramento por meio de solventes orgânicos, seguido de jateamento abrasivo ao metal branco, (designação Sa 2½ conforme ISO 8501-1[30]) que possui a finalidade de eliminar a carepa de laminação, ferrugem e qualquer outro contaminante sobre a superfície além de garantir uma melhor aderência entre o substrato e o revestimento. O abrasivo utilizado foi granalha de aço e o perfil de rugosidade ficou compreendido entre 25-30 µm.

O conjunto resina e tecido de fibra de carbono foram aplicados sobre as amostras da chapa de aço carbono segundo dois esquemas distintos de preparação. No primeiro esquema, inicialmente foi depositada uma camada do adesivo cerâmico com o auxílio de um pincel trincha simples de 2” até que toda a superfície estivesse homogeneamente coberta e, sobre a mesma, foi disposta uma camada de tecido de fibra de carbono bidirecional. A fim de garantir a adesão, foi utilizado um rolo compressor após a colocação do tecido de fibra de carbono. O processo foi finalizado com outra demão do adesivo cerâmico.

No segundo esquema avaliado, todo o procedimento de aplicação do conjunto adesivo cerâmico e tecido de fibra de carbono foi repetido uma segunda vez sobre o sistema, tendo então, duas camadas de tecido de fibra de carbono. A Figura 12 apresenta os dois esquemas propostos para a realização dos ensaios.

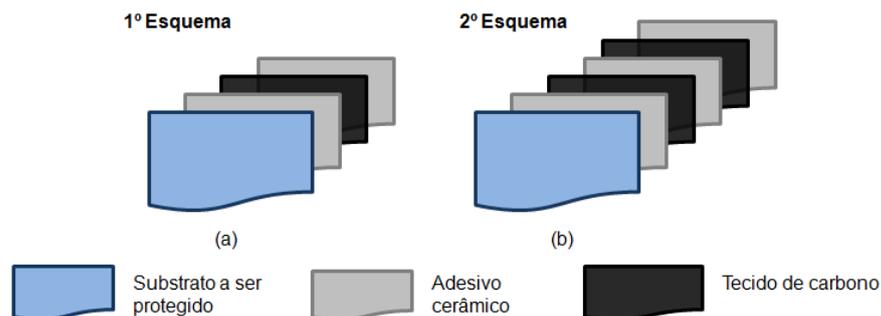


Figura 12: Esquemas propostos para ensaios: a) esquema com uma camada de tecido de fibra de carbono; b) esquema com duas camadas de tecido de fibra de carbono.

Após a montagem dos esquemas, as amostras foram levadas ao forno a uma temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$  e permaneceram nesta condição por 45 minutos a fim de realizar a cura do adesivo cerâmico.

Para cada amostra de cada um dos esquemas, foram colocados dois carretéis sobre a superfície a qual se desejava avaliar a força de adesão do revestimento. Os carretéis foram colados com uma cola pré-determinada pela norma. Após o período de cura do carretel ao substrato (aproximadamente 48h a temperatura ambiente), o equipamento de ensaio foi acoplado no carretel (Figura 13).

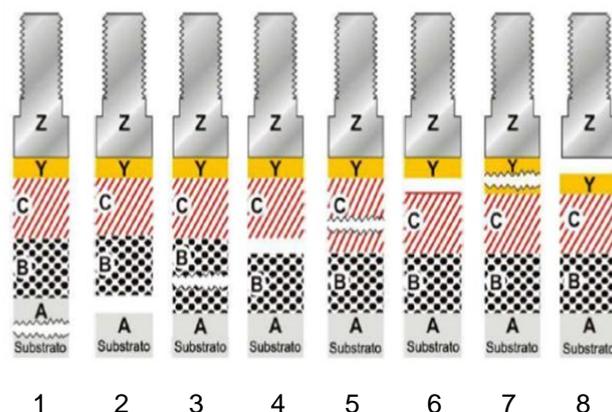
O equipamento de ensaio aplica uma força normal gradativa à superfície até que a mesma falhe ou atinja uma força pré-determinada. No presente estudo, foi analisada a força atingida até a falha.



Figura 13: Ensaio de aderência. Equipamento Positest AT-A: Automatic Adhesion tester da Defelsko.

A natureza da falha é determinada de acordo com a porcentagem de falha dita adesiva ou coesiva e de acordo com as camadas de revestimento dos

esquemas. A Figura 14 apresenta as principais naturezas de falhas que podem ser observadas durante os ensaios.



- 1- A – Falha coesiva do substrato
- 2- A/B – Falha adesiva entre o substrato e a primeira camada do revestimento
- 3- B – Falha coesiva da segunda camada
- 4- B/C – Falha adesiva entre as camadas B e C
- 5- C – Falha coesiva da camada C
- 6- C/Y – Falha adesiva entre a última camada e o adesivo
- 7- Y – Falha coesiva do adesivo
- 8- Y/Z – Falha adesiva entre o adesivo e o carretel (*dolly*)

Figura 14: Análise dos resultados do ensaio de aderência segundo a norma ASTM D 4541 [2929].

As falhas de ruptura são determinadas visualmente e classificadas, segundo a norma, como adesiva (quando há o arrancamento entre duas demãos de revestimento, ou entre a primeira demão de revestimento e o substrato) ou coesiva (quando a ruptura ocorre no interior da camada de revestimento, deixando uma parte da camada na superfície ensaiada, e outra no carretel).

### 3.2.2. Ensaio de abrasão

O ensaio de abrasão foi realizado com o auxílio do equipamento de abrasão *Dual Table abraser* modelo 5155 da marca *Taber Industries* com velocidade de 72 rpm e vácuo de 100%. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D4060 [31].

Foram confeccionadas duas amostras para cada esquema de montagem conforme Figura 15. As amostras tinham as dimensões 10 x 10 cm cada uma. A Figura 16 mostra o equipamento usado para os testes de abrasão.

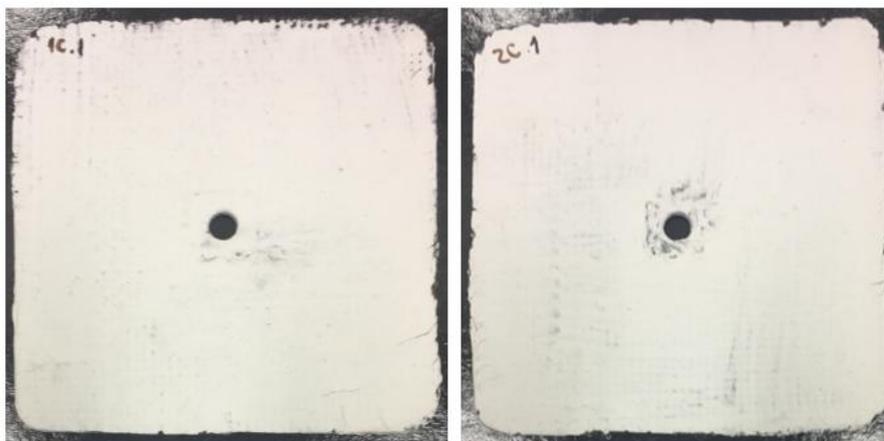


Figura 15: Amostras do ensaio de abrasão. Dimensão 10 x 10 cm.



Figura 16: Table abraser – equipamento de abrasão utilizado neste trabalho.

Nos primeiros 1.500 ciclos, a carga utilizada para acentuar o desgaste abrasivo foi de 250g e as medidas de perda de massa foram tomadas a cada 300 ciclos. A partir de 1.500 ciclos, as medidas de perda de massa foram tomadas a cada 500 ciclos.

De 3.500 ciclos a 4.500 ciclos, devido à pouca resposta do revestimento ao desgaste abrasivo forçado, a carga foi aumentada para 500g e as medidas de perda de massa continuaram a ser registradas a cada 500 ciclos.

Ao completar 5.000 ciclos, novamente a carga do ensaio foi aumentada para 1 Kg a fim de forçar maior resposta do revestimento a um desgaste mais agressivo e assim permaneceu com esta carga até o final do ensaio.

Ao completar 19.000 ciclos, as medidas de perda de massa foram verificadas de 1.000 em 1.000 ciclos. As medidas foram concluídas após 22.000 ciclos, totalizando 12h e 38 minutos de ensaio.

### **3.2.3. Ensaio de jateamento abrasivo**

Para a realização dos testes de jateamento abrasivo sobre as superfícies com os revestimentos propostos, foi utilizada uma instalação composta de um compressor SCHULZ, modelo CSL 10 BR e uma câmara de jateamento marca ESSENCE, modelo Precision 1, segundo a norma ASTM G 76 [32].

O ensaio de jateamento foi conduzido manualmente a temperatura ambiente e sobre a superfície dos corpos de prova foram aspergidos perpendicularmente a uma distância de 1 cm partículas de 125  $\mu\text{m}$  de alumina. Para o ensaio, buscou-se garantir uma velocidade de partícula de 30 m/s e foram utilizados corpos de prova de 10 x 15 cm, com sessão útil de 75  $\text{cm}^2$  (procurou-se utilizar a parte central do corpo de prova).

### **3.2.4. Ensaio de tração**

Os ensaios de tração foram efetuados em máquina de tração EMIC, modelo DL 30kN, com célula de carga de 100 kN, disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos do CEPEL.

Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente e segundo norma ASTM D 3039/D 3039M [33]. Utilizou-se corpos de prova com geometria tipo provete, tais quais apresentado na Figura 17, tanto para a execução de todos os ensaios nos corpos de prova metal-revestimento quanto para ensaios nos corpos de prova apenas do revestimento.

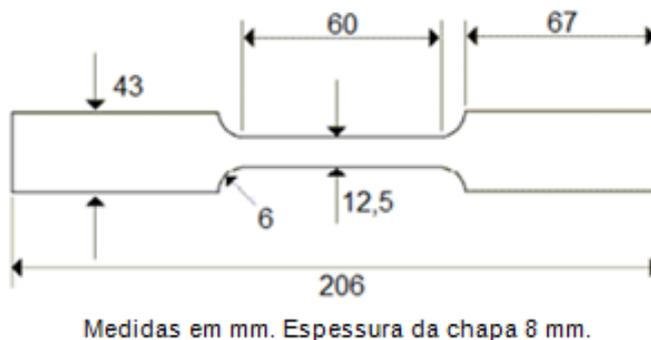


Figura 17: Modelo dos corpos de prova de tração.

Os corpos de prova de tração passaram pelo mesmo procedimento de preparo de superfície que os corpos de prova do ensaio de adesão (item 4.2.1), ou seja, jateamento Sa 2½ até obtenção de rugosidade média de 25-30 µm (procedimento descrito no item 4.2.1). Após a etapa de preparação de superfície, dois corpos de provas foram revestidos seguindo o primeiro esquema de aplicação de revestimento, enquanto outros dois corpos de prova foram revestidos seguindo o segundo esquema de aplicação do revestimento (Figura 12). Os corpos de prova revestidos seguiram a etapa final do procedimento de preparação, isto é, foram introduzidos, durante 45 minutos, em um forno a 150 °C para a cura da resina. A Figura 18 mostra os corpos de prova já revestidos e preparados para tração.



Figura 18: Corpos de prova de tração com revestimento. a) corpos de prova de acordo com o primeiro esquema de revestimento. b) corpos de prova de acordo com o segundo esquema de revestimento.

Os ensaios de tração tiveram os seguintes parâmetros:

- Comprimento útil do corpo de prova: 60 mm;
- Velocidade de tração: 1 mm/min;
- Célula de carga: 100 kN.

As Figuras 19 e 20 mostram o equipamento e a realização dos ensaios de tração.

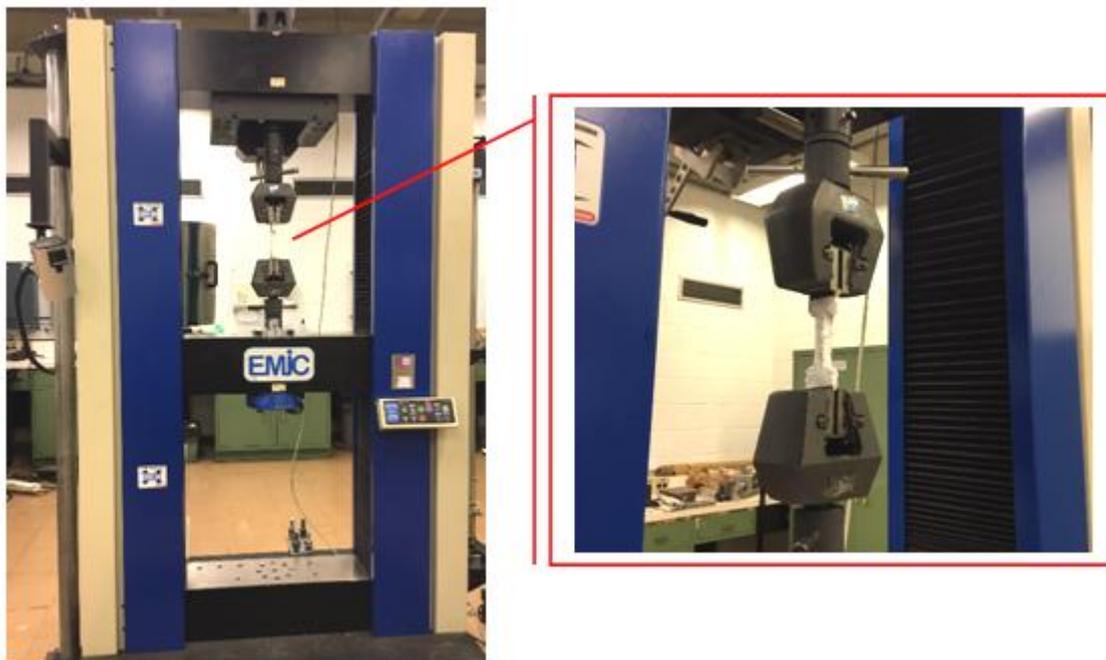


Figura 19: Ensaio de tração do aço revestido.

Com o intuito de avaliar o comportamento mecânico geral apenas do revestimento proposto, foram também realizados ensaios de tração com corpos de prova feitos apenas com os revestimentos propostos (dois esquemas). Estes ensaios de tração também foram realizados na máquina de tração EMIC, modelo DL 30kN. Os corpos de prova seguiram as dimensões descritas na Figura 17. O único parâmetro de ensaio modificado foi a célula de carga, que para o ensaio com o revestimento passou a ser de 50 kN.



Figura 20: Ensaio de tração do Corpo de prova do material do revestimento.

### **3.2.5. Avaliação da condutividade térmica do revestimento**

A eficiência térmica de uma caldeira é fortemente afetada pela condutividade térmica das paredes dos tubos. Portanto, foram tomadas medidas de condutividade térmica do revestimento proposto. Para isso confeccionou-se 4 corpos de prova de formato quadrangular de aproximadamente 12,7mm de largura e altura com espessura entre 1 e 2 mm. A Figura 21 apresenta esquematicamente os modelos dos corpos de prova usados nos ensaios de medida condutividade térmica para o revestimento proposto.

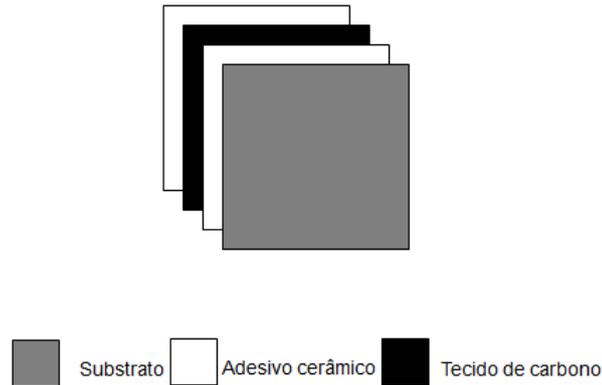


Figura 21: Corpo de prova de condutividade térmica.

Utilizou-se o equipamento Netzsch LFA 447 com tecnologia nanoflash, segundo a norma ASTM E1461 [34]. A leitura fornece o valor da difusividade térmica e que pode ser convertida para condutividade térmica.

A difusividade térmica pode ser expressa como a razão entre a condutividade térmica ( $k$ ) a densidade ( $\rho$ ) e a capacidade calorífica volumétrica do material ( $C_p$ ). Sendo assim,

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (4.2.5.1)$$

o que leva a:

$$k = \alpha \rho C_p. \quad (4.2.5.2)$$

Fez-se análise da condução de calor baseada em condução de calor através de paredes cilíndricas onde há gradiente de temperatura somente na direção radial, o que possibilitou a análise como sistema unidimensional. Assim, considerando a expressão geral do fluxo de calor e a equação de Fourier para condução de calor radial, tem-se [35]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \rightarrow q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (4.2.5.3)$$

onde  $A=2\pi rL$  é a área normal à transferência de calor e  $q_r$  é a taxa de transferência de calor na direção radial,  $r$  é o raio interno,  $L$  é o comprimento longitudinal transversal ao fluxo de calor e  $T$  é a temperatura.

Para uma casca cilíndrica submetida à uma diferença de temperatura entre a superfície interna e a superfície externa de  $T_1 - T_2$ , onde a temperatura da superfície interna é constante e igual a  $T_1$ , enquanto que a temperatura da superfície externa se mantém constante e igual a  $T_2$ , teremos uma transferência de calor por condução no regime permanente.

A distribuição de temperaturas no cilindro utilizando condições de contornos apropriadas, fica:

$$T(r_1) = T_{s,1} \rightarrow T_{s,1} = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad (4.2.5.4)$$

$$T(r_2) = T_{s,2} \rightarrow T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad (4.2.5.5)$$

Resolvendo  $C_1$  e  $C_2$ , tem-se:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln(r/r_2) + T_{s,2} \quad (4.2.5.6)$$

Neste resultado, a resistência térmica ( $R$ ) tem a forma:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (4.2.5.7)$$

Considerando o sistema proposto na Figura 22 e desprezando as resistências de contato, a taxa de transferência de calor por condução ( $q_r$ ) pode ser dada por:

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (4.2.5.8)$$

A taxa de transferência de calor por condução também pode ser expressa em termos do coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ):

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = UA (T_{\infty,1} - T_{\infty,2}) \quad (4.2.5.9)$$

Se o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) for definido em termos da área da superfície interna,  $A_1 = 2\pi r_1 L$ , então:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{k_A} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{k_B} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_1}{k_C} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_4}} \quad (4.2.5.10)$$

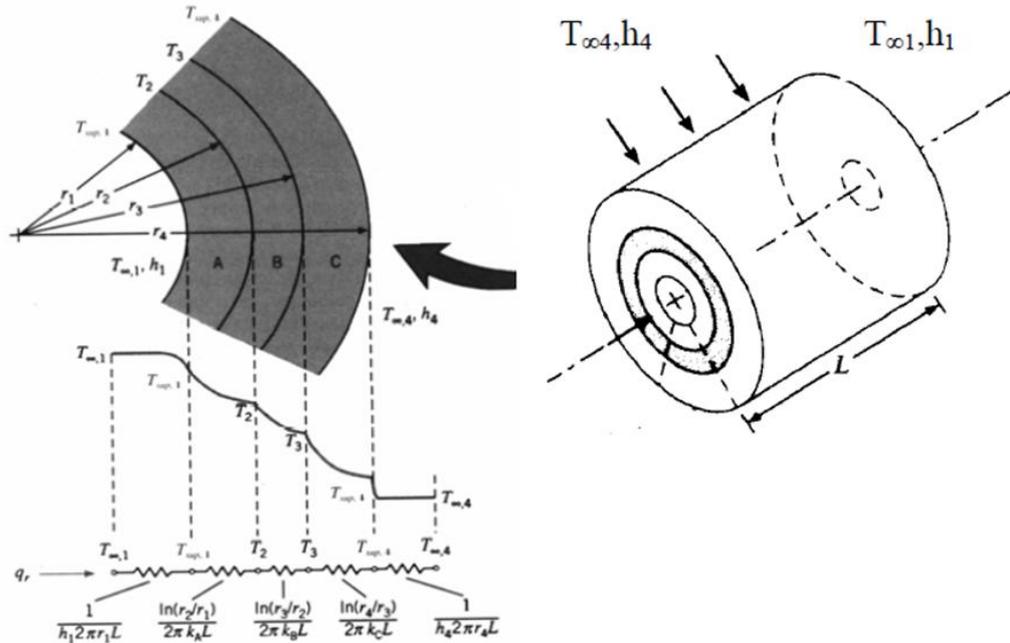


Figura 22: Distribuição de temperaturas em uma parede cilíndrica composta [35].

Conforme dito anteriormente, a área normal a transferência de calor para todos os casos pode ser definida por  $A=2\pi rL$ , variando em função de  $r$  e  $L$ , valores conhecidos. O coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) por sua vez, depende única e exclusivamente coeficiente de condutividade térmica do material ( $k$ ) e do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ). A faixa de valores de  $h$  que foram utilizadas para o desenvolvimento dos cálculos estão na Tabela 7.

Tabela 7: Valores típicos dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural e forçada e na condensação / vaporização [35].

Processo	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)
Convecção natural	
Gases	2 - 25
Líquidos	50 - 1000
Convecção forçada	
Gases	25 - 250
Líquidos	100 - 20.000
Convecção com mudança de fase	
Vaporização e condensação	2500 - 100.000

Desta maneira, foi utilizada a equação do fluxo de calor radial, por condução, para prever o efeito da colocação do revestimento (esquema de uma camada de tecido de fibra de carbono) na troca térmica entre os gases quentes gerados pelo queimador e a água que escoava dentro dos tubos, de maneira bastante simplificada.

### **3.2.6. Teste de simulação térmica**

Com o intuito de se reproduzir a temperatura de processo reinante sobre o revestimento proposto, foi feita uma simulação térmica realizada num forno elétrico Lindberg Blue M modelo STF55346C. Cinco (05) amostras de 3 x 3 cm de área exposta e segundo cada esquema de revestimento foram colocadas no forno a 550<sup>0</sup>C e lá permaneceram por período de tempo entre 100 – 500h. As amostras foram colocadas no forno aos pares (uma de cada esquema). O primeiro par permaneceu a 550<sup>0</sup>C por 100h, o segundo par permaneceu a 550<sup>0</sup>C por 200h, e assim sucessivamente de 100 em 100 horas para os demais pares até que se alcançassem as 500h.

A Figura 23 mostra o forno pertencente ao Laboratório Supercondutividade do CEPTEL e que foi utilizado na simulação térmica.

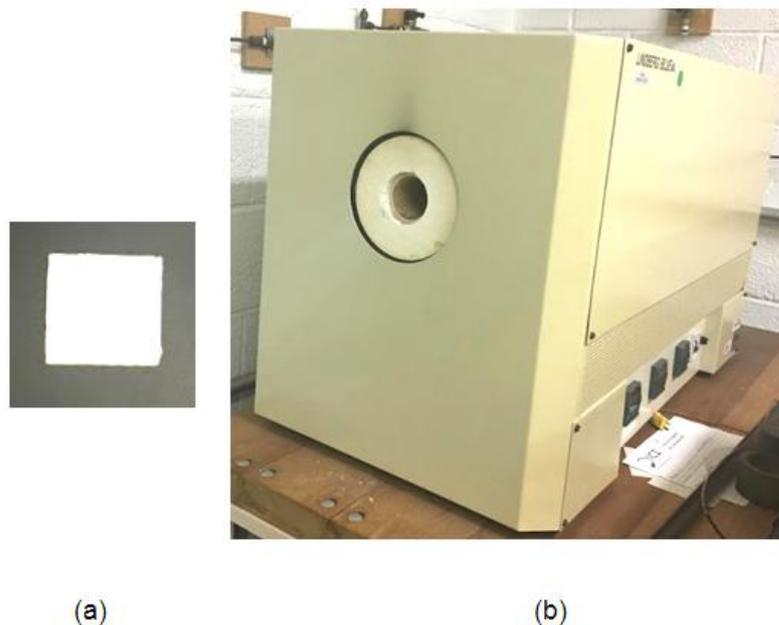


Figura 23: Teste de simulação térmica. a) Modelo da amostra. b) Forno elétrico Lindberg Blue M modelo STF55346C.

### 3.2.7. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica é um processo contínuo que tem como objetivo monitorar a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas.

No presente estudo, foi realizado uma análise termogravimétrica em uma amostra de 15 mg de tecido de fibra de carbono em duas situações: amostra de tecido de fibra de carbono exposta a atmosfera inerte ( $N_2$ ), para avaliar somente a resposta do tecido de fibra de carbono à temperatura e, uma segunda amostra de tecido de fibra de carbono exposta em atmosfera de ar sintético ( $21\% O_2 + 79\% N_2$ ) para avaliar a resposta do tecido de fibra de carbono à temperatura elevada e ao agente oxidante.

As amostras foram aquecidas a uma velocidade de aquecimento de  $10^\circ C/min$  até que a temperatura de  $1000^\circ C$  fosse atingida. O ensaio apresenta como resultado um gráfico de perda de massa *versus* variação de temperatura na atmosfera selecionada.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Ensaio de adesão

O ensaio de aderência no substrato previamente preparado (limpeza com jateamento Sa 2 ½) e revestido apenas com uma camada de adesivo cerâmico obteve como resultado uma força de ligação média de 25 MPa e de natureza coesiva B (Figura 24). Isto significa que o adesivo cerâmico de fato aderiu à superfície do substrato de um modo considerado estável pela norma ASTM 4541 [29]. O resultado marca a interação entre substrato e o revestimento, mostrando que o substrato não fica totalmente exposto estando de acordo com a norma do ensaio e conforme apresentado na Figura 14.

A Figura 24 apresenta os aspectos obtidos para a superfície do aço revestido apenas com a resina adesiva cerâmica e após os testes de adesão. A finalidade destes testes foi verificar o comportamento do sistema aço – resina de um modo individual, sem a influência da fibra de carbono.

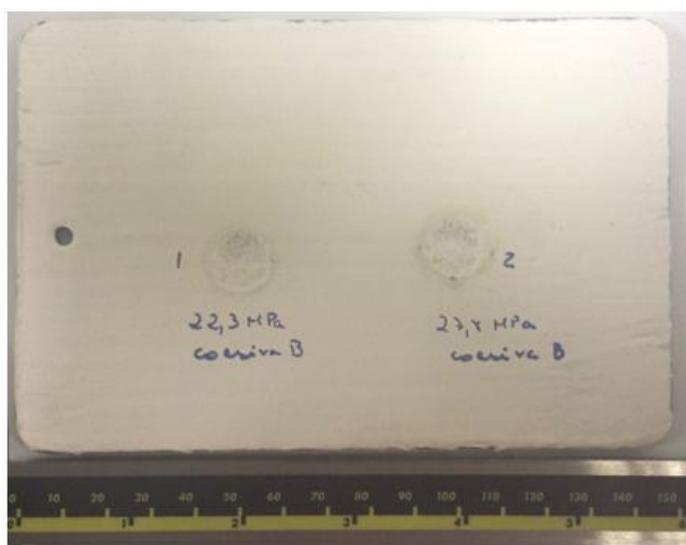


Figura 24: Teste de aderência para o sistema substrato versus resina.

Com o sucesso do sistema individual aço-resina, seguiram-se os testes de adesão sobre os revestimentos esquematizados na Figura 12. O esquema com uma camada de tecido de fibra de carbono apresentou uma força média de aderência de 1,05 MPa e natureza de falha tipo C/D – adesiva da última camada. O esquema com

duas camadas de tecido de fibra de carbono apresentou força média de aderência de 1,22 MPa e natureza de falha tipo E/F – adesiva da última camada. Os resultados foram semelhantes para ambos os esquemas. A tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de aderência para o sistema individual aço-resina e para todos os esquemas de revestimento propostos. A Figura 25 mostra onde os esquemas 1 e 2, respectivamente, falharam na adesão, isto é, sofreram o arrancamento do revestimento. As Figuras 26 e 27 e apresentam os aspectos obtidos para ambos os esquemas testados e as respectivas aparências e classificação de falha conforme descrito a norma ASTM 4541 [29].

Tabela 8: Resultados do ensaio de aderência.

Amostra	Força de adesão (MPa)				Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Natureza da falha
	Carretel 1	Carretel 2	Carretel 3	Carretel 4			
Substrato	22,3	27,8	-	-	25,05	3,9	Coesiva B
Esquema de uma camada de revestimento	1,46	1,19	0,54	1,04	1,06	0,4	Adesiva C/D
Esquema de duas camadas de revestimento	1,57	0,95	1	1,35	1,22	0,3	Adesiva E/F

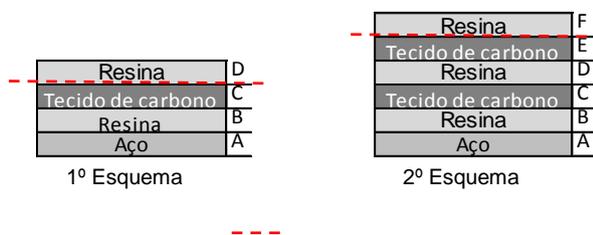


Figura 25: Diagrama do aspecto da falha nos esquemas do revestimento proposto no presente estudo.

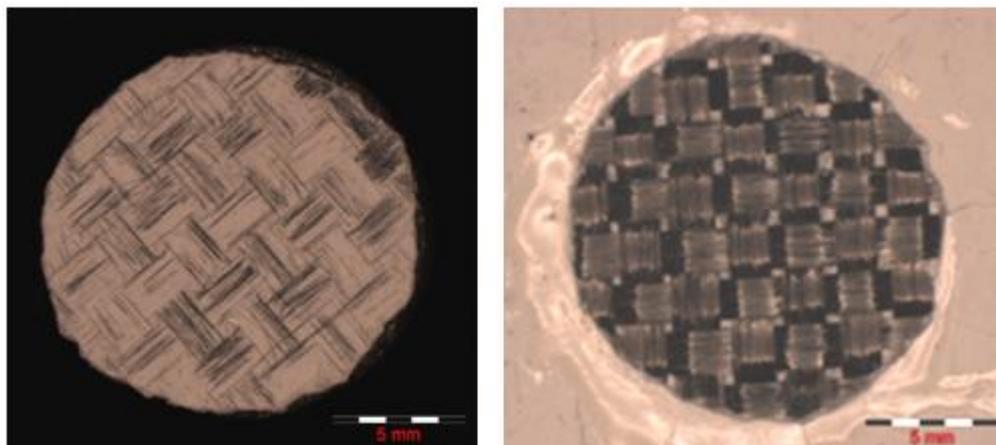


Figura 26: Aspecto obtido do ensaio de aderência para o esquema de revestimento com uma camada de tecido de fibra de carbono. Natureza da falha C/D – Norma ASTM 4541 [30].

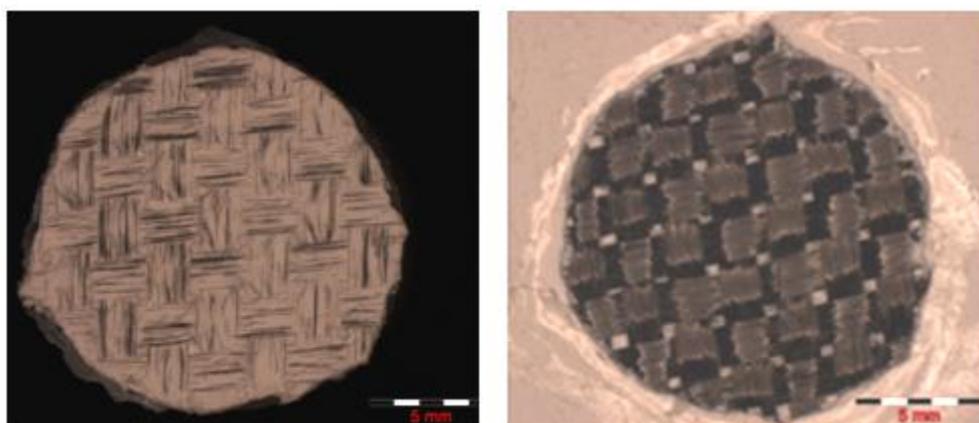


Figura 27: Aspecto obtido do ensaio de aderência para o esquema de revestimento com duas camadas de tecido de fibra de carbono. Natureza da falha E/F – Norma ASTM 4541[30].

De acordo com a norma ASTM D4145 [29], diz-se que o ensaio de adesão foi bem sucedido quando após o término do ensaio, o substrato não fica exposto. Como em ambos os ensaios o substrato permaneceu protegido, conclui-se que o revestimento passou no teste de adesão.

#### 4.2. Ensaio de abrasão por fricção e por jateamento

O ensaio de abrasão por fricção tem como objetivo avaliar a resistência de um material a imposição de um desgaste contínuo forçado por meio de rolos abrasivos que são friccionados sobre a amostra. O ensaio é avaliado de acordo com a perda gradual de massa da amostra após n-ciclos de desgaste pré-determinados [31].

Durante a realização dos ensaios de abrasão todas as amostras passaram por 23 mil ciclos.

Ao completar 11 mil ciclos, os primeiros sinais de desgaste da última camada de resina foram observados para os corpos de prova revestidos com duas camadas de tecido de fibra de carbono (2C).

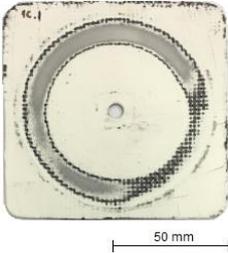
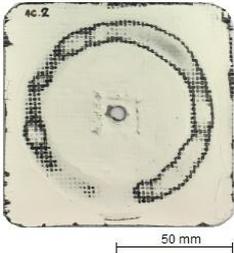
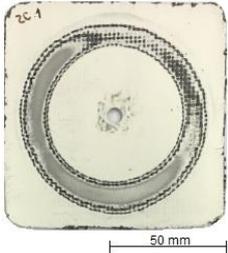
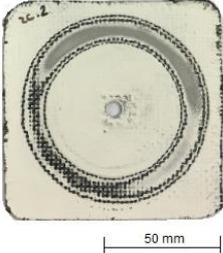
Em 16 mil ciclos completos, os mesmos sinais de desgaste foram observados para os corpos de prova de uma camada de tecido de fibra de carbono (1C).

Em 21 mil ciclos completos, notou-se o aparecimento do substrato dos corpos de prova de uma camada de tecido de fibra de carbono (1C), e ao completar 22 mil ciclos, o mesmo fato foi constatado para os corpos de prova revestidos com duas camadas de tecido de fibra de carbono (2C).

O objetivo deste ensaio é provocar um desgaste de tal maneira que o substrato a ser protegido fique exposto e, assim, é avaliado o tempo (número de ciclos resistidos) para que tal condição seja atendida.

A Tabela 9: Resultados do ensaio de abrasão. Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de abrasão para todas as amostras testadas.

Tabela 9: Resultados do ensaio de abrasão.

Corpo de prova	Espessura média do revestimento	Aspecto (após 23 mil ciclos)
1 camada (nº 1)	607 $\mu\text{m}$	
1 camada (nº 2)	616 $\mu\text{m}$	
2 camadas (nº 1)	906 $\mu\text{m}$	
2 camadas (nº 2)	852 $\mu\text{m}$	

A Figura 28 apresenta a perda de massa de cada amostra versus o número de ciclos para os corpos de prova com uma camada de tecido de fibra de carbono (1C.1 e 1C.2) e os corpos de prova com duas camadas de tecido de fibra de carbono (2C.1 e 2C.2).

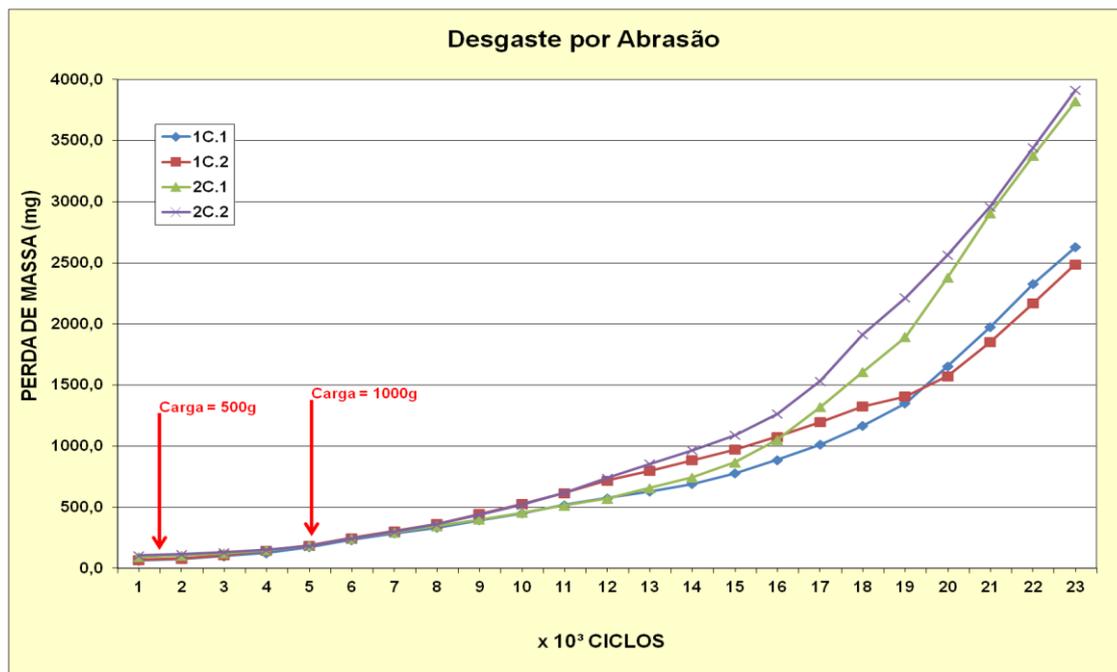


Figura 28: Perda de massa *versus* número de ciclos. Ensaio de abrasão.

Observa-se que as amostras de ambos os esquemas perderam aproximadamente a mesma quantidade de massa até aproximadamente 17.000 ciclos e seguiram a mesma tendência. Após 17.000 e até o final, as amostras com duas camadas perderam a massa extra de que dispunham e os aspectos finais obtidos foram muito semelhantes ao das amostras com apenas uma camada. A Tabela 10 apresenta a perda de massa total para cada amostra para os esquemas ensaiados. A variação na massa inicial entre as amostras do mesmo esquema é devido ao fato da dificuldade no controle do método de aplicação.

Tabela 10: Perda de massa (g). Ensaio de abrasão.  $m_i$  = massa inicial,  $m_f$  = massa final,  $\Delta m$  = variação de massa após 23.000 ciclos.

Corpos de prova testados	$m_i$ (g)	$m_f$ (g)	$\Delta m$ (g)
1C-1	124,94	122,31	2,6306
1C-2	123,05	120,56	2,4886
2C-1	127,18	123,36	3,8206
2C-2	169,26	165,35	3,9125

Os resultados obtidos mostram que aparentemente não há muita influência no que diz a respeito do número de camadas presente no revestimento quanto ao desgaste abrasivo e à proteção do substrato, pois apenas foi preciso mil ciclos a

mais para que o substrato fosse atingido no esquema com duas camadas. A Figura 29 apresenta ambos os esquemas de revestimento após 23 mil ciclos, marcando o término do ensaio. Concluiu-se que o revestimento não apresentava mais quaisquer características protetivas ao substrato após estes 23.000 ciclos.

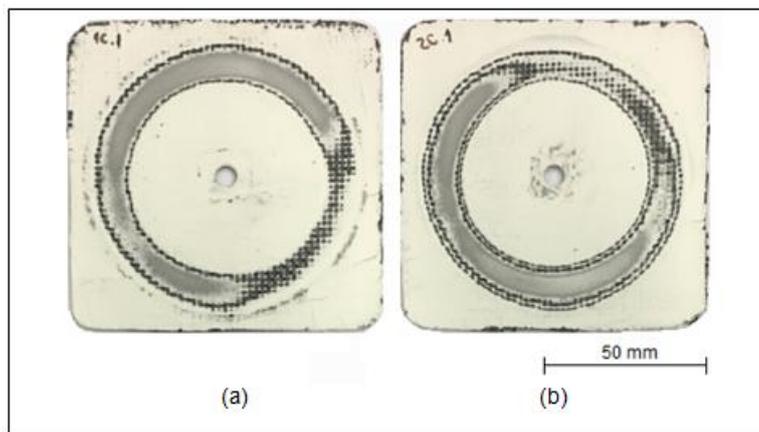


Figura 29: Esquemas de revestimento após 23 mil ciclos. a) Corpo de prova com uma camada de tecido de fibra de carbono. b) Corpo de prova com duas camadas de tecido de fibra de carbono.

Um ensaio de jateamento tem como objetivo avaliar a resistência de um material à imposição de uma erosão contínua por meio da aspensão de partículas sólidas contra a superfície do mesmo. O intuito do ensaio foi simular algumas das condições de operação dentro da caldeira, como a aspensão de partículas contra a superfície do tubo, a fim de prever a resistência do revestimento nesta situação mais próxima à realidade operacional. A Figura 30 apresenta os aspectos obtidos após os testes de jateamento abrasivo conforme descrito no item 4.2.3 de Materiais e Métodos.

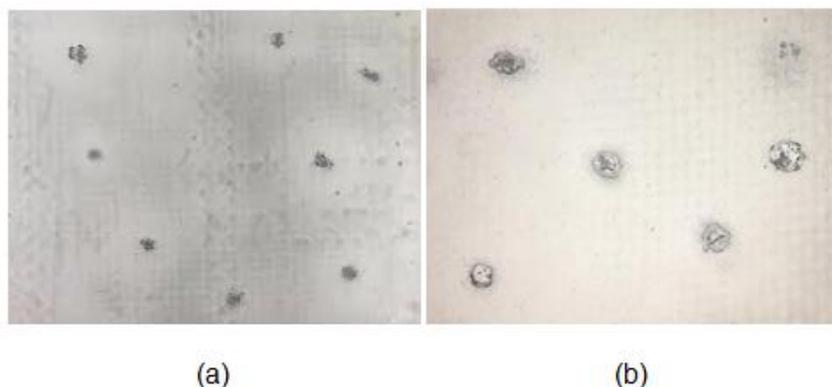


Figura 30: Amostras jateadas. a) Aspecto da amostra jateada para o primeiro esquema proposto de revestimento. b) Aspecto das amostras jateada para o segundo esquema proposto de revestimento.

O tempo médio para o desgaste até a exposição da superfície do substrato para a amostra com uma camada de revestimento foi de 45 segundos. Para a amostra com 2 camadas de revestimento o tempo médio foi de 80 segundos.

Adicionalmente, e apenas para comparação com os resultados dos revestimentos aqui testados, foi jateada uma amostra de tubo revestido com carboneto de tungstênio, um revestimento disponível no mercado. Cabe realçar que apenas sabia-se que o revestimento era de carboneto de tungstênio e depositado sobre uma tubulação de aço utilizada em caldeira de termelétrica, com espessura de 30  $\mu\text{m}$ . Nenhuma outra informação estava disponível sobre este material. O tempo médio para o desgaste do revestimento de carboneto de tungstênio, até a exposição da superfície, foi de 132 segundos. A Figura 31 apresenta a amostra de tubo revestida com carboneto de tungstênio e os pontos testados por jateamento, sob as mesmas condições dos testes feitos sobre os esquemas com uma e com duas camadas testados neste trabalho.



Figura 31: Aspectos obtidos para os pontos jateados em tubulação revestida com carboneto de tungstênio. Amostra cedida pelo CEPTEL.

De acordo com a norma ASTM G76 [32], o revestimento deveria suportar o ataque das partículas durante aproximadamente 10 minutos. Ambos os revestimentos, tanto o proposto quanto o de carboneto de tungstênio, utilizado atualmente como revestimento para proteção, e que foi cedida uma amostra para comparação, não atingiram o tempo mínimo necessário de acordo com a norma. É possível que o ensaio segundo a norma seja muito severo para os materiais em questão devido aos parâmetros de aspensão requisitados.

### **4.3. Ensaio de tração**

Os resultados apresentados e discutidos nesta seção servem como parâmetros para caracterização do comportamento do revestimento proposto sob solicitações de carga de tração, que podem ocorrer durante a operação do tubo.

O ensaio de tração foi realizado uniaxialmente e teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico do conjunto através de um teste robusto, mesmo que este carregamento uniaxial não seja o predominante frente a questões de atrito e abrasão que sobrecarregam um revestimento.

Como mencionado anteriormente (item 4.2.5), os corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios foram do tipo provete, também utilizados por Silva [36] em seu estudo sobre comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados, além de outros autores [36].

Os resultados dos ensaios de tração realizados no sistema aço *versus* revestimento mostraram, para todos os corpos de prova testados, que o revestimento sofreu “descolamento” do mesmo, isto é, descolamento do substrato (Figura 32), neste ensaio buscou-se apenas analisar o comportamento do revestimento à solicitação mecânica quando aplicado no substrato a ser protegido.



Figura 32: Teste de tração em sistema substrato aço / revestimento. Houve um “descolamento” dos revestimentos das superfícies do substrato.

A Figura 33 mostra um dos ensaios de tração realizado em corpo de prova feito apenas do conjunto resina / fibra de carbono, isto é, do revestimento.



Figura 33: Ensaio de tração feito apenas no revestimento.

O critério de falha adotado nesta etapa foi o escorregamento das fibras do conjunto do revestimento em resposta à solicitação mecânica. Desta maneira, este ensaio de tração foi conduzido até que fosse detectado o primeiro deslocamento das fibras que seria identificado através de uma queda brusca na carga do ensaio, quando então era calculada a tensão máxima. A Figura 34 apresenta os aspectos obtidos e para os quais eram aferidas as respectivas cargas.

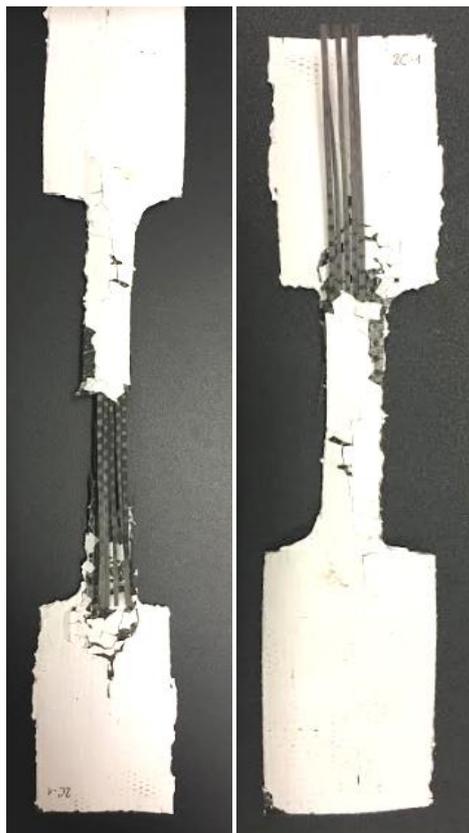


Figura 34: Aspecto característico do critério de falha dos revestimentos propostos. Observa-se o escorregamento entre as tramas do tecido de fibra de carbono que compõe o revestimento.

As Figuras 35 e 36 apresentam as curvas Força (kN) x Deformação (mm) para os corpos de prova dos esquemas de revestimento com uma camada e com duas camadas, respectivamente.

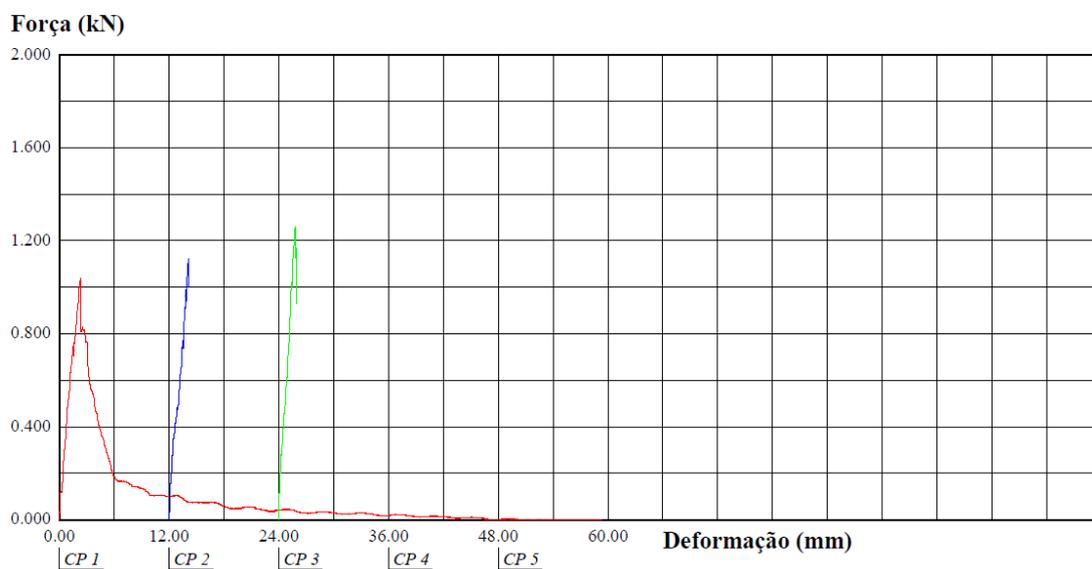


Figura 35: Força x Deformação na tração do revestimento com uma camada.

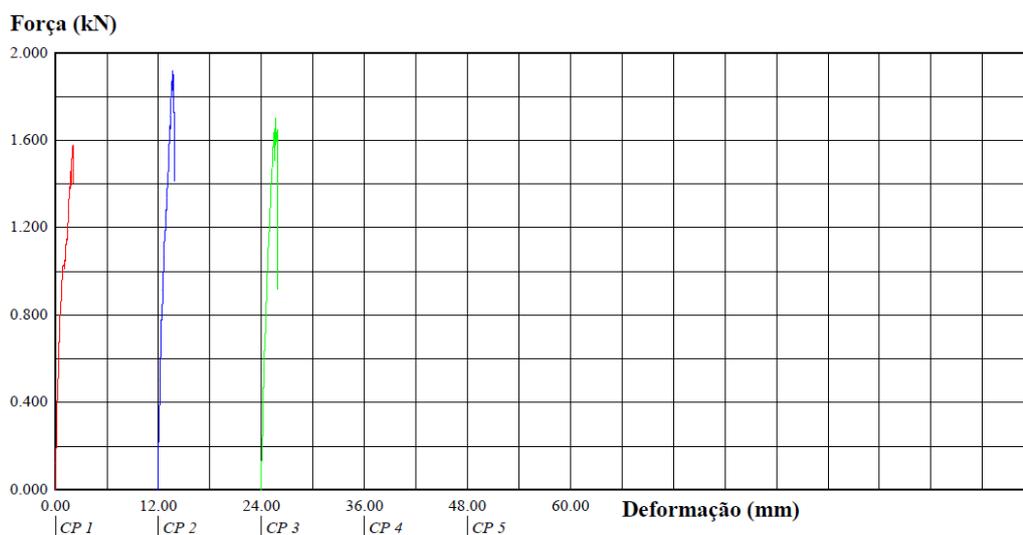


Figura 36: Força x Deformação na tração do revestimento com duas camadas.

A tensão média de resistência para o primeiro esquema de revestimento foi de 71,35 MPa, e para o segundo esquema foi de 70,70 MPa.

A tensão tangencial na parede do tubo se dá devido à pressão interna atuando uniformemente sobre a área, e pode ser descrita como [37]:

$$\sigma_t = \frac{pD}{2e} \quad (5.4.1)$$

Onde  $p$  é a pressão interna de operação do tubo,  $D$  é o diâmetro interno do tubo e  $e$  é a espessura do tubo.

De acordo com a NR-13 [10], para que uma tubulação seja aprovada, ela deve suportar no mínimo uma vez e meia a pressão de operação de trabalho.

Considerando que, no mínimo, o revestimento deve suportar a mesma sollicitação mecânica que a tubulação está sendo requisitada, aplicando-se um fator de segurança, como as tensões resistidas pelo revestimento foram da ordem de 70 MPa, o ideal é que o revestimento opere sob tensões inferiores a 46 MPa para manter a integridade do revestimento, ou seja, para que não ocorra o descolamento do substrato cujo qual ele irá proteger.

#### 4.4. Avaliação da condutividade térmica do revestimento

No ensaio de difusividade térmica para o revestimento proposto, o valor médio da difusividade térmica obtido experimentalmente foi de  $\alpha = 0,48375 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Como apresentado anteriormente, a difusividade térmica pode ser expressa como a razão entre a condutividade térmica ( $k$ ) a densidade ( $\rho$ ) e a capacidade calorífica volumétrica do material ( $C_p$ ).

Para a determinação dos valores de densidade e calor específico do revestimento, foram considerados os valores médios resultantes de ambos os materiais que compõe o revestimento (fibra e adesivo cerâmico). O valor de densidade e de calor específico do revestimento usado foram, respectivamente,  $1,93 \text{ g/cm}^3$  e  $485,08 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ .

Levando em consideração todos os dados acima, o sistema adesivo/ fibra de carbono apresentou  $k = 0,452889 \text{ W/mK}$ .

Os cálculos para a avaliação do efeito da aplicação do revestimento proposto na troca térmica foram realizados de acordo com as seguintes considerações: 1) Um tubo cilíndrico de aço carbono com 45 mm diâmetro interno, espessura igual a 7mm e comprimento de 10m. 2) A introdução do revestimento de uma camada em apenas uma parte da circunferência do cilindro, com 2 m de comprimento e na parte central do tubo, conforme Figura 37.

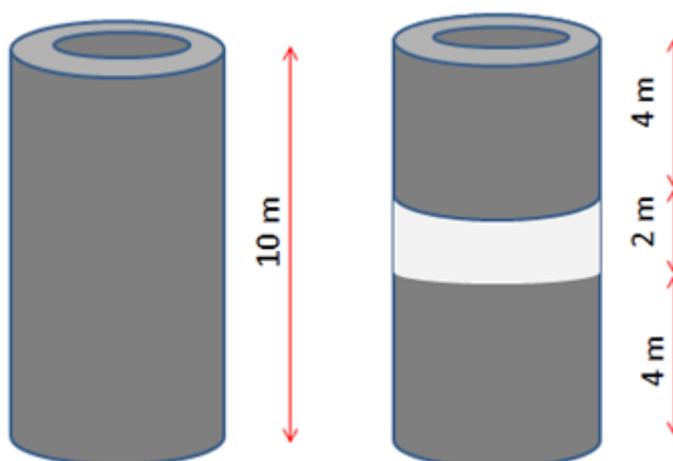


Figura 37: Secção cilíndrica analisada.

Foi tomado como premissa a variação de temperatura constante para ambos os casos. Sendo assim e de acordo com as equações apresentadas para a condução radial, a consideração de transporte de calor em regime permanente e a consideração da troca térmica por convecção ser a mesma que a por condução, tem-se que:

$$\eta = \frac{q_{isolado}}{q_{n\tilde{a}o\ isolatedo}} = \frac{UA\Delta T_{isolado}}{UA\Delta T_{n\tilde{a}o\ isolatedo}} \quad (5.3.11)$$

$$\Delta T_{isolado} = \Delta T_{n\tilde{a}o\ isolatedo} \quad (5.3.12)$$

$$\eta = \frac{q_{isolado}}{q_{n\tilde{a}o\ isolatedo}} = \frac{UA_{isolado}}{UA_{n\tilde{a}o\ isolatedo}} \quad (5.3.13)$$

onde  $\eta$  é a eficiência da taxa de transferência de calor.

Analisando o caso de estudo proposto e com base nas equações apresentadas anteriormente, nas tabelas 10 e 11, tem-se que para a faixa dos coeficientes de transferência de calor, para vaporização da água e para os gases quentes do queimador, em seus valores mínimos:

Tabela 11: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo não isolado.

	Tubo não isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
h1	2500	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
h2	25	W/m <sup>2</sup> °K
l	10	m
U1	32,33726454	W/m <sup>2</sup> K
A tubo	1,413716694	m <sup>2</sup>
Q1/ΔT=UA	45,71573072	W/K

Tabela 12: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos –  
Tubo parcialmente isolado.

	Fração do Tubo isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
Espessura do revestimento	1,5	mm
	0,0015	m
r3	0,0311	m
h1	2500	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
K Revestimento	0,45289	W/m °K
h3	25	W/m <sup>2</sup> °K
l da parte com revestimento	2	m
U isolado	31,3347	W/m <sup>2</sup> K
A isolada	0,2827	m <sup>2</sup>
Qisolado/ $\Delta T=UA$ isolado	8,8596	W
	Fração do Tubo não isolado	
A2 não isolada	1,13097	m <sup>2</sup>
U=U1	32,3372	W/m <sup>2</sup> K
Qnão isolado/ $\Delta T=U1$ (A2 não isolada)	36,5725	W/m <sup>2</sup> °K
Q2/ $\Delta T=Qisolado+Qnão isolado$	45,4322	W/K
Eficiência ( $\eta$ )= Q2/Q1	99,38%	
Redução na troca térmica	0,62%	

Agora, considerando o valor médio do coeficiente de transferência de calor por convecção, nas tabelas 12 e 13 tem-se que:

Tabela 13: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor médio – Tubo não isolado.

	Tubo não isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
h1	48750	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
h2	112,5	W/m <sup>2</sup> °K
l	10	m
U1	145,0128	W/m <sup>2</sup> K
A tubo	1,41371	m <sup>2</sup>
Q1/ΔT=UA	205,0071	W/K

Tabela 14: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos – Tubo parcialmente isolado.

	Fração do Tubo isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
Espessura do revestimento	1,5	mm
	0,0015	m
r3	0,0311	m
h1	48750	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
K Revestimento	0,45289	W/m °K
h3	112,5	W/m <sup>2</sup> °K
l da parte com revestimento	2	m
U isolado	110,7916	W/m <sup>2</sup> K
A isolada	0,28274	m <sup>2</sup>
Qisolado/ΔT=UA isolado	31,3255	W
	Fração do Tubo não isolado	
A2 não isolada	1,1309	m <sup>2</sup>
U=U1	145,0128	W/m <sup>2</sup> K
Qnão isolado/ΔT=U1 (A2 não isolada)	164,0056	W/m <sup>2</sup> °K
Q2/ΔT=Qisolado+Qnão isolado	195,3312	W/K
Eficiência (η)= Q2/Q1	95,36%	
Redução na troca térmica	4,64%	

Para o valor máximo do coeficiente de transferência de calor por convecção, nas tabelas 14 e 15 tem-se que:

Tabela 15: Análise do primeiro caso para coeficientes de transferência de calor máximo –  
Tubo não isolado.

	Tubo não isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
h1	100000	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
h2	250	W/m <sup>2</sup> °K
l	10	m
U1	315,5360	W/m <sup>2</sup> K
A tubo	1,4137	m <sup>2</sup>
Q1/ΔT=UA	446,0785	W/K

Tabela 16: Análise do segundo caso para coeficientes de transferência de calor mínimos –  
Tubo parcialmente isolado.

	Fração do Tubo isolado	Unidade
r1	0,0225	m
r2	0,0296	m
Espessura do revestimento	1,5	mm
	0,0015	m
r3	0,0311	m
h1	100000	W/m <sup>2</sup> °K
K Aço	52	W/m °K
K Revestimento	0,45289	W/m °K
h3	250	W/m <sup>2</sup> °K
l da parte com revestimento	2	m
U isolado	182,5330	W/m <sup>2</sup> K
A isolada	0,2827	m <sup>2</sup>
Qisolado/ΔT=UA isolado	51,6099	W
Fração do Tubo não isolado		
A2 não isolada	1,1309	m <sup>2</sup>
U=U1	315,5360	W/m <sup>2</sup> K
Qnão isolado/ΔT=U1 (A2 não isolada)	356,8628	W/m <sup>2</sup> °K
Q2/ΔT=Qisolado+Qnão isolado	408,4728	W/K
Eficiência (η)= Q2/Q1	91,81%	
Redução na troca térmica	8,19%	

A sensibilidade do resultado dos cálculos em função da variação do coeficiente de transferência de calor por convecção foi baixo, 7,98%.

Na pior das hipóteses haveria uma redução na troca térmica em torno de 8,19%; o valor apresentado é superestimado, pois cálculos que levassem em consideração metade da circunferência do tubo com revestimento implicariam em condições de contorno de maior complexidade e fugiriam do escopo do trabalho, portanto optou-se por considerar o revestimento em toda a circunferência central do tubo em questão ao invés de considerar somente a parte frontal, para assim poder utilizar o método de sistemas radiais simples. Desta maneira, a redução na troca térmica real poderá ser menor.

#### **4.5. Balanço da viabilidade econômica da aplicação do revestimento**

A Análise econômica da aplicação do revestimento foi desenvolvida em 3 etapas:

- 1ª Etapa: Cálculo do custo de aplicação do revestimento;
- 2ª Etapa: Determinação do acréscimo do consumo de combustível;
- 3ª Etapa: Análise técnica.

##### 1º Etapa: Cálculo do custo de aplicação do revestimento

O cálculo do custo de aplicação do revestimento levou em consideração a preparação da superfície mais o revestimento propriamente dito. Assim, o custo em Reais (R\$) de aplicação do revestimento será expresso pela seguinte soma:

$$\text{R\$ Custo revestimento} = \text{R\$ Preparação da superfície /m}^2 + \text{R\$ Resina/m}^2 + \text{R\$ manta de fibra carbono/m}^2.$$

Onde:

Preparação da superfície – Jateamento abrasivo a seco:

$$\text{R\$ Preparação da superfície} = 0,55 \times \text{HH} = 0,55 \times 100,00 = \text{R\$ } 55,00/\text{m}^2.$$

Preparação da superfície – Aplicação do revestimento:

$$\text{R\$ Preparação da superfície} = 0,55 \times \text{HH} = 0,55 \times 100,00 = \text{R\$ } 55,00/\text{m}^2,$$

A constante 0,55 no cálculo sugerido é um fator empírico elaborado no laboratório de corrosão do Cepel, com base em serviços de preparação de corpos de prova usados em projetos anteriores, onde se contabilizou o tempo de preparação de superfície e aplicação dos revestimentos. O HH é o valor do homem-hora, isto é, o custo da mão de obra.

Custo da resina:

$$\text{R\$}_{\text{Resina}} = 155,00/500\text{g}.$$

Gasta-se aproximadamente 734g de resina para revestir 1 m<sup>2</sup> de área. Cada grama da resina custa atualmente aproximadamente R\$ 0,31, então o custo de resina para revestir 1 m<sup>2</sup> de área de superfície é de R\$ 227,54/m<sup>2</sup>.

Custo do tecido de fibra de carbono:

$$\text{R\$}_{\text{tecido de fibra de carbono}} = 226,80/m^2.$$

De acordo com os valores apresentados, teve-se um custo de R\$ 791,81/m<sup>2</sup> para o primeiro esquema de revestimento e R\$ 1.246,22/m<sup>2</sup> para o segundo esquema de revestimento. Levando em consideração que o segundo esquema de revestimento não apresentou significativa diferença no que diz respeito a tempo de proteção em relação ao primeiro esquema (item 5.2), foram então daqui em diante considerados valores apenas para o primeiro esquema de revestimento.

## 2º Determinação do acréscimo do consumo de combustível

$$Q_{\text{parede}} = \phi_{\text{vapor}} (h_{\text{vapor}} - h_{\text{líquido}}),$$

onde  $Q_{\text{parede}}$  é o fluxo de calor na parede do tubo,  $\phi_{\text{vapor}} = 1150$  tonelada/hora é a vazão de vapor e  $h_{\text{vapor}} = 2.700,59$  kJ/Kg e  $h_{\text{líquido}} = 1.462,22$  kJ/Kg é a entalpia da água em seu estado vaporizado e líquido respectivamente.

$$Q_{\text{parede}} = 1150 (2.700,59 - 1.422,22) = 3.589 \times 10^5 \text{ KW}.$$

$$\Delta m_{\text{combustível}} = \frac{0,08 \times Q_{\text{parede}}}{\eta_{\text{cal}} \times PCI} = 2,381 \text{ kg/s},$$

onde  $\Delta m_{\text{combustível}}$  é a variação do volume mássico de combustível,  $\eta_{\text{caldeira}} = 0,9$  é o rendimento da caldeira e  $\text{PCI} = 3.200 \text{ Kcal/Kg}$  é o poder calorífico inferior do carvão. O valor numérico de 0,08 corresponde a pior situação de perda de troca térmica na parede do tubo com a aplicação do revestimento.

$$\Delta m_{\text{combustível máximo}} = \frac{0,08 \times Q_{\text{parede}}}{\eta_{\text{calz}} \times \text{PCI}} = 2,588 \text{ kg/s},$$

onde  $\eta_{\text{caldeira2}} = 0,82$  é o rendimento da caldeira considerando a perda da eficiência.

$$\phi_{\text{carvão}} = \frac{\text{Potência}}{\text{PCI}},$$

onde Potência = 350 MW é a capacidade de produção da usina e  $\eta_{\text{global}} = 0,33$  é o rendimento da termelétrica como um todo [5].

$$\phi_{\text{carvão}} = \frac{\text{Potência}}{\text{PCI}} = \frac{350}{3,20} = 79,163 \text{ Kg/s}.$$

$$\text{O CC} = \frac{\phi_{\text{carvão}}}{\text{PCI}} = 0,898 \text{ Tonelada/MWh}.$$

onde CC é o consumo de carvão.

De acordo com os cálculos apresentados:

$$\text{CC}_{\text{sem revestimento}} = 79,163 \text{ Kg/s}.$$

$$\text{CC}_{\text{com revestimento}} = 79,163 + 2,588 = 81,751 \text{ Kg/s}.$$

Assim, o percentual de aumento de consumo de combustível pode ser determinado:

$$\frac{\Delta m_{\text{combustível máximo}}}{\phi_{\text{carvão}}} = 0,033 = 3,3\%.$$

### 3º Análise técnica

O ambiente a qual o revestimento estará exposto é considerado agressivo. Desta maneira o revestimento proposto terá que passar por uma manutenção preventiva a cada 30-50 dias para manter suas características protetivas, baseado em ensaios realizados em campo.

Tratando-se de centrais termelétricas, sabe-se que manutenções preventivas são realizadas usualmente uma vez a cada ano. Este intervalo de tempo pode variar de acordo com o histórico de operação da unidade ou dos problemas apresentados pela mesma. A utilização do revestimento proposto como alternativa de proteção à tubulação de caldeiras expostas principalmente a erosão devido ao ataque de particulados de carvão mineral poderá ser uma alternativa relativamente cara, pois para o uso do mesmo, as usinas terão que realizar mais paradas / com menor intervalo de tempo (aproximadamente uma vez a cada 30 ou 50 dias), além de gastar mais fundo decorrente ao aumento de combustível.

#### **4.6. Teste de simulação térmica**

O teste de simulação térmica foi um dos últimos ensaios a ser realizado, uma vez que os fabricantes tanto da fibra de carbono como o da resina deram garantia do funcionamento e resistência de seus produtos a altas temperaturas, muito superiores a temperatura máxima de operação da caldeira. O objetivo da simulação foi avaliar o comportamento do revestimento proposto quando submetido à alta temperatura, isto é, a temperatura máxima de projeto.

Embora após o ensaio de abrasão por fricção e abrasão por jateamento o estudo estivesse sendo conduzido de modo a avaliar o revestimento de uma camada apenas devido à pouca diferença entre a proposta com mais camadas de proteção, o teste de simulação térmica analisou amostras dos dois esquemas para verificar se neste quesito haveria alguma diferença significativa devido ao número de camadas. A Figura 39 apresenta os aspectos obtidos das amostras após teste de simulação térmica.

Pôde-se observar que já nas primeiras 100h o revestimento apresentou trincas na sua camada de resina e o tecido de fibra de carbono tornou-se cinzas. Este mesmo comportamento foi apresentado pelas demais amostras.

Uma possível causa para a formação de trincas na resina pode ser o fato de o tecido de fibra de carbono não ter resistido à alta temperatura (550°C) e entrado em um processo de combustão liberando gases, que ao ficarem presos, exerceram uma pressão sobre a mesma procurando um caminho de saída. Este resultado foi inesperado, pois os materiais supostamente deveriam suportar temperaturas bem mais elevadas. Este resultado inviabilizou o uso do revestimento para temperaturas próximas a de trabalho em caldeiras, porém não impossibilita para uso a temperatura ambiente, como por exemplo, utilização para revestir estruturas metálicas que entrarão em contato com o concreto a fim de evitar problemas estruturais (corrosão).

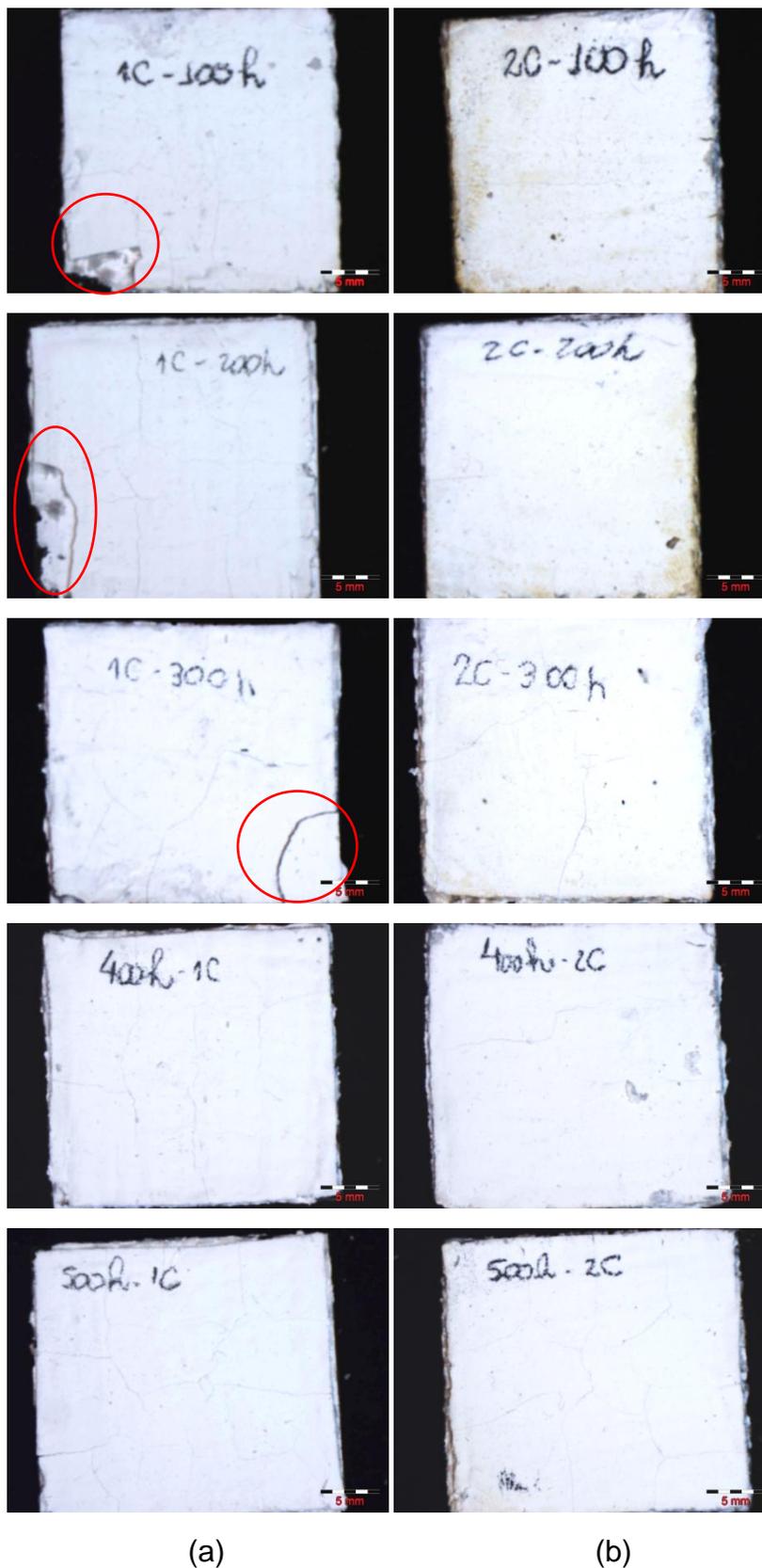


Figura 38: Aspectos obtidos para 100, 200, 300, 400 e 500h em forno a 550 °C para ambos os esquemas de revestimento. a) Coluna de amostras com uma camada de revestimento (1C). b) Coluna de amostras com duas camadas de revestimento (2C). Aumento de 2x vezes.

#### 4.7. Análise termogravimétrica

Como mencionado anteriormente (item 3.2.7) a análise termogravimétrica foi realizada em duas atmosferas: inerte ( $N_2$ ) e de ar sintético, e teve como objetivo entender o comportamento do tecido de fibra de carbono apresentado no teste de simulação térmica (item 4.6).

As Figuras 40 e 41 apresentam o resultado da análise termogravimétrica para amostras submetidas às atmosferas citadas. No eixo das abscissas têm-se os registros de temperatura e no eixo das ordenadas tem-se o percentual de massa perdido.

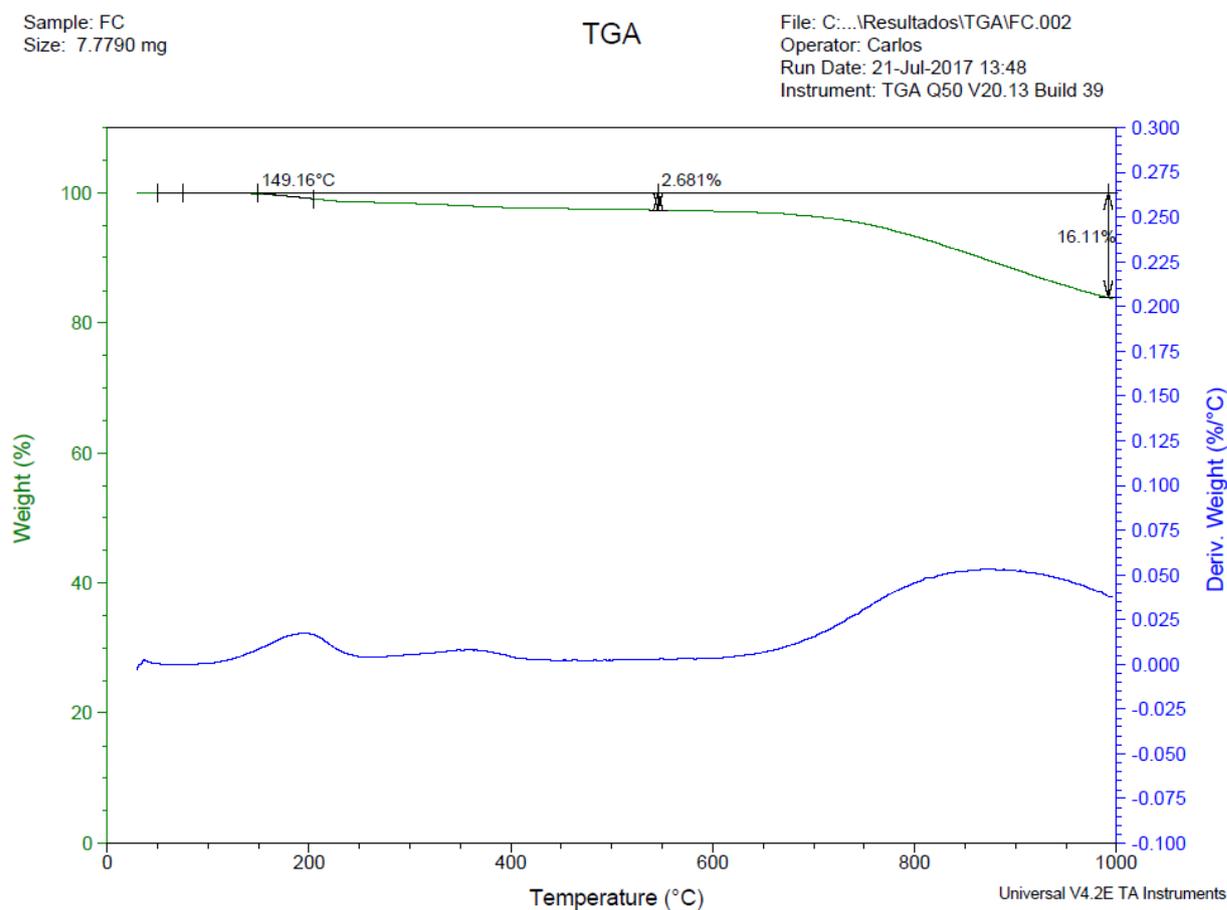


Figura 39: Análise termogravimétrica do tecido de fibra de carbono em atmosfera de nitrogênio.

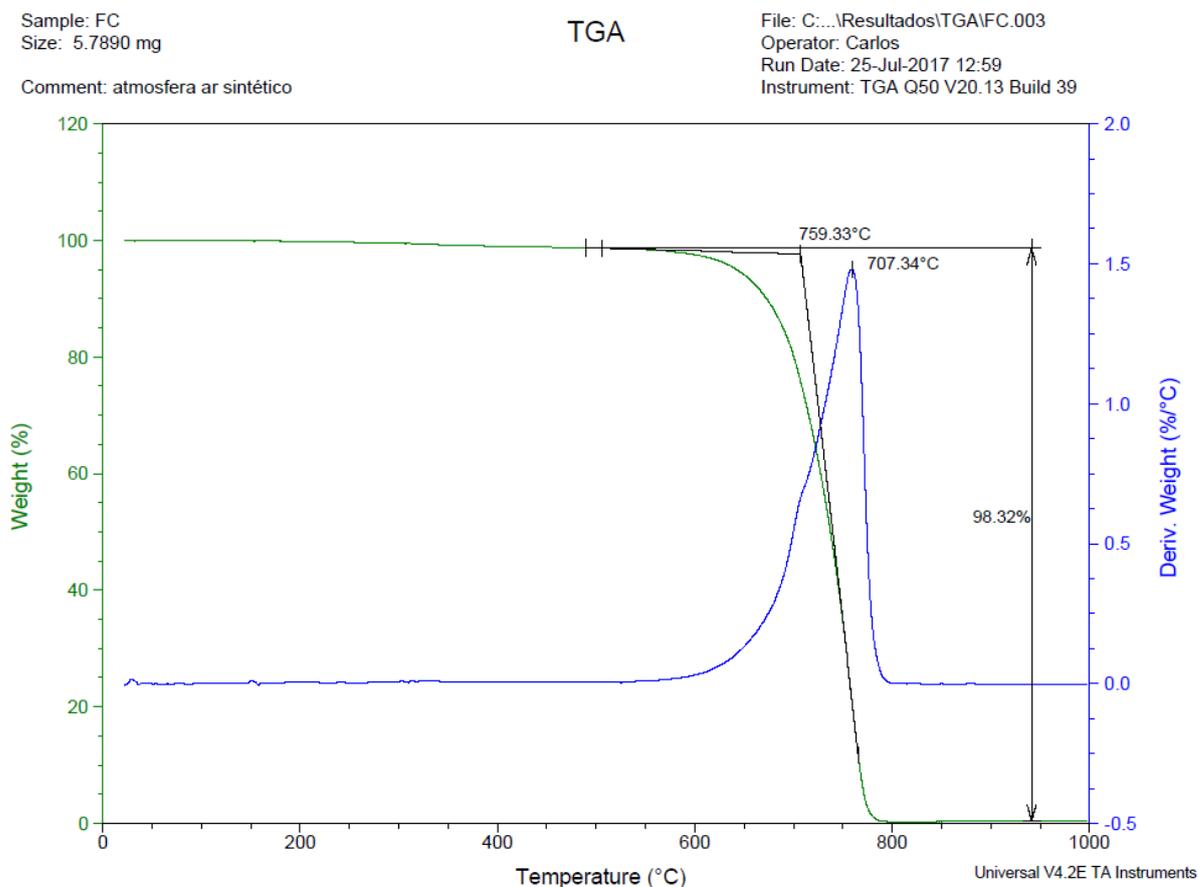


Figura 40: Análise termogravimétrica do tecido de fibra de carbono em atmosfera de ar sintético.

Como podemos observar nos resultados das análises termogravimétricas, houve pouca degradação do tecido de fibra de carbono para a atmosfera inerte a 1000°C, ou seja, o tecido de fibra de carbono se manteve praticamente íntegro nesta faixa de temperatura. Para a atmosfera de ar sintético, observa-se uma degradação acelerada do tecido de fibra de carbono a partir de 600°C. Essa taxa de degradação acelerada é devido ao contato com agente oxidante (O<sub>2</sub>).

Desta maneira, os resultados das análises termogravimétricas não são capazes de explicar por si só o comportamento apresentado pelo tecido de fibra de carbono quando submetido ao forno a 550°C, uma vez que, de acordo com os resultados apresentados no teste de simulação térmica, o material apresentou perda de massa significativa nesta situação.

Esta análise corrobora para uma necessidade de estudar o comportamento do revestimento como um todo quando submetido à alta temperatura com a finalidade de investigar a influência do adesivo cerâmico no comportamento do tecido de fibra de carbono, pois há na literatura trabalhos que comprovam que o tecido de fibra de carbono resiste altas temperaturas [39].

## 5. Conclusão

Com base nos resultados encontrados e a partir dos ensaios realizados em ambos os esquemas de revestimento proposto, pôde-se concluir que:

- Os testes de adesão atenderam à norma ASTM D4541 e os revestimentos foram considerados bem sucedidos no aspecto adesão ao substrato;
- De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de abrasão por fricção contínua e por jateamento abrasivo, os esquemas de revestimento não demonstraram entre si diferença significativa quanto prolongamento do tempo de proteção do substrato. Desta maneira, indica-se o uso do primeiro esquema de revestimento;
- No ensaio de tração, ficou caracterizado que o limite de resistência do revestimento é de 46 MPa para ambos os esquemas de revestimento;
- No ensaio de condutividade térmica, ficou caracterizado que o uso do revestimento de uma camada implica em uma redução da troca térmica de aproximadamente 8%;
- A aplicação do revestimento de apenas uma camada implica em um aumento de despesa de aproximadamente 3,3% ao mês de combustível;
- A simulação térmica realizada mostrou que, diferentemente do que os fabricantes alegaram, o material não permaneceu estável após poucas horas submetido à temperatura de operação 550 graus Celsius. Este resultado deletério obtido na simulação térmica desqualificou o revestimento proposto para uso na situação especificada;
- A análise termogravimétrica não foi capaz de explicar por si só o comportamento apresentado pelo tecido de fibra de carbono a 550 graus Celsius, uma vez que, segundo o ensaio, nesta temperatura o material permaneceu estável.

## 6. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

1. Estudar o comportamento do tecido de fibra de carbono a temperaturas elevadas e a influência do adesivo cerâmico no comportamento do tecido de fibra de carbono;
2. Realizar um estudo da temperatura limite de estabilidade do conjunto fibra de carbono / resina cerâmica;
3. Realizar ensaios de jateamento abrasivo e tração dentro do limite de temperatura do revestimento;
4. Realizar um estudo sobre o impacto da redução da troca térmica da utilização do revestimento no sistema da caldeira como um todo;
5. Explorar possibilidades de aplicações do revestimento proposto;
6. Pesquisar novos revestimentos para tubos de caldeiras aquatubulares utilizando técnicas de aspersão térmica;
7. Pesquisar revestimentos para tubos de caldeiras aquatubulares utilizando materiais vitrocerâmicos.

## Referências

1. Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica – ABRADÉE. Visão geral do setor elétrico. Disponível em <http://abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>. Acessado em 30/05/2016.
2. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Matriz energética brasileira – 4º Trimestre de 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acessado em 30/05/2016.
3. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Banco de Informações de Geração: Capacidade de geração do Brasil* – 4º Trimestre de 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 30/05/2016.
4. Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL. Disponível em <http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=45374c61bd3e40e3a484878003fae937>. Acessado em 31/05/2016.
5. Sistema Furnas de geração e transmissão – Parque gerador – Usina termelétrica convencional. Disponível em [http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_term\\_funciona.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_term_funciona.asp). Acessado em 30/05/2016.
6. TOLMASQUIM, M. T. Energia termelétrica: gás natural, biomassa, carvão mineral e nuclear. 1. Ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. p. 217 – 313.
7. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE/MME. Plano nacional de energia 2030. Disponível em [http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Nacional%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PNE/Estudos\\_12.aspx](http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Nacional%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PNE/Estudos_12.aspx). Acessado em 01/06/2016.
8. Parque gerador – Complexo termelétrico Jorge Lacerda. Disponível em <http://www.engieenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termelétricas/complexo-termelétrico-jorge-lacerda>. Acessado em 14/09/2016.

9. SNOW, D.A. Plant Engineer's Reference Book. 2 ed. Bostom: Butterworth Heinemann, 2002. cap. 10.
10. Norma Regulamentadora (NR) – 13. Caldeiras, vasos de pressão e tubulações. 2014.
11. VISWANATHAN, R. *Mechanisms and life assessment of high temperature components*. 2 ed. Ohio: ASM International; 1993. cap 5.
12. Krzysztof, S.; Hernas, A.; Moskal, G.; Myalska, H. Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers - A review. Polônia: Elsevier, 2016.
13. JAVAHERDASHTI, R; NWAHOHA, C; TAN, T. Corrosion and Materials in the Oil and Gas Industries. 1 ed. CRC Press, 2013. p 26-44.
14. P.L Daniel; S.F.Chou, L.W. Rodgers; P.S.Ayres, Jr. Fireside corrosion in low-NOx combustions systems. Eletric power research institute typical report, 1989. p 3-4.
15. Ówiek, J. Durability evaluation of protection coatings on water walls tubes of low-emission boilers. International scientific journal. Volume 56, 2 ed. 2012. p. 69-74. Mensalmente.
16. LAI, G. Y; BLOGG, N. Unifuse overlay cladding for surface protection against corrosion and erosion/corrosion in power boilers and waste heat recovery systems. Vol.3, Issue 3. UK European technology development, 2004. p 3-6.
17. BRANAGAN, D. J; BREITSAMETER, M; MEACHAM, B. E; BELASHCHENKO, V. High Performance Nanoscale Composite Coatings For Boiler Applications. Volume 14. Issue 2. Journal of Thermal Spray Technology, 2005. p 196–204.
18. SIDHU, B. S.; PRAKASH, S. Nickel-Chromium plasma spray coatings: a way to enhance degradation resistance of boiler tube steels in boiler environment. Volume 15. Issue 1. Journal of Thermal Spray Technology, 2006. p 131-140.
19. Processo de aspersão térmica. Disponível em <http://wwwo.metallica.com.br/processo-contra-a-corrosao>. Acessado dia 19/05/2017.

20. *Analysis of Superheater Boiler Tubes Failed through Non-linear Heating.* ROY, R.K; DAS, S.K; PANDA, A.K; MITRA, A. 1st International Conference on Structural Integrity, ICONS. Elsevier, 2014. P 926-932.
21. GANAN, J; AL-KASSIR, A; GONZALEZ, J.F; TUREGANO, J.; MIRANDA, A.B. *Experimental study of fire tube boilers performance for public heating.* Applied Thermal Engineering 25 (2005). p 1650–1656.
22. *Efficiency studies of combination tube boilers.* PATRO, B. Elsevier, 2016. P 193-202.
23. *The impact of coal quality on the efficiency of a spreader stoker boiler.* TAOLE, R.L; Falcon, R.M.S. ; Bada, S.O. vol.115 n.12. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015. p 1-9.
24. *A Research of Simplified Method in Boiler Efficiency Test.* LV, T; YUA, L; SONG, J. International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems, 2012. P 1007-1013.
25. *ASTM A178 / A178M – 02 Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes.*
26. *DIN 17175-79 Seamless Steel Tube for Elevated temperatures.*
27. Boletim técnico: Adesivo cerâmico 3713C – Treebond. DT – Ver. 02 – 03/02/98.
28. Barracuda advanced composites – Standard product specification: RC200T Carbon Fabric. Version 1001.
29. *American Society for Testing and Materials – ASTM D 4541-02: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Tester.* p 1-13.
30. *ISO 8501-1 – Preparation of steel surfaces before application of paints.* ISO, Genève, Switzerland, 1988.
31. *American Society for Testing and Materials – ASTM D4060 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser.* p 1-5.
32. *American Society for Testing and Materials – ASTM G 76 – 7 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.* p 1-6.

33. *American Society for Testing and Materials – D 3039/D 3039M – 07 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. p 1-13.*
34. *American Society for Testing and Materials – ASTM E1461 - 13 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.p 1-13.*
35. *Fundamentos da transferência de calor e de massa. Incropera. DeWitt. Bergman. Lavine. LTC, 6ªed. Cap. 2. p 43-44.*
36. *SILVA, H. P. Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na especialidade de Construção Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Julho, 2014. p 79-82.*
37. *Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al composite coatings deposited by plasma spraying. YIN, Z; TAO, S;ZHOU, X;DING, C. Applied Surface Science,2008. p 1636–1643.*
38. *SHIGLEY, J.E. Elementos de máquinas. 3ª ed. LTC, 1984. Volume 1. p 55.*
39. *Catalyzed combustion of carbon fibers from carbon fiber-resin composites. GANJEI, J; DOMINGUEZ, D; MACKEY, J; MURDAY, J. Memorandum report 4486. Naval research laboratory. Washington, D.C.*