



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Márcio Mesquita Cossenza

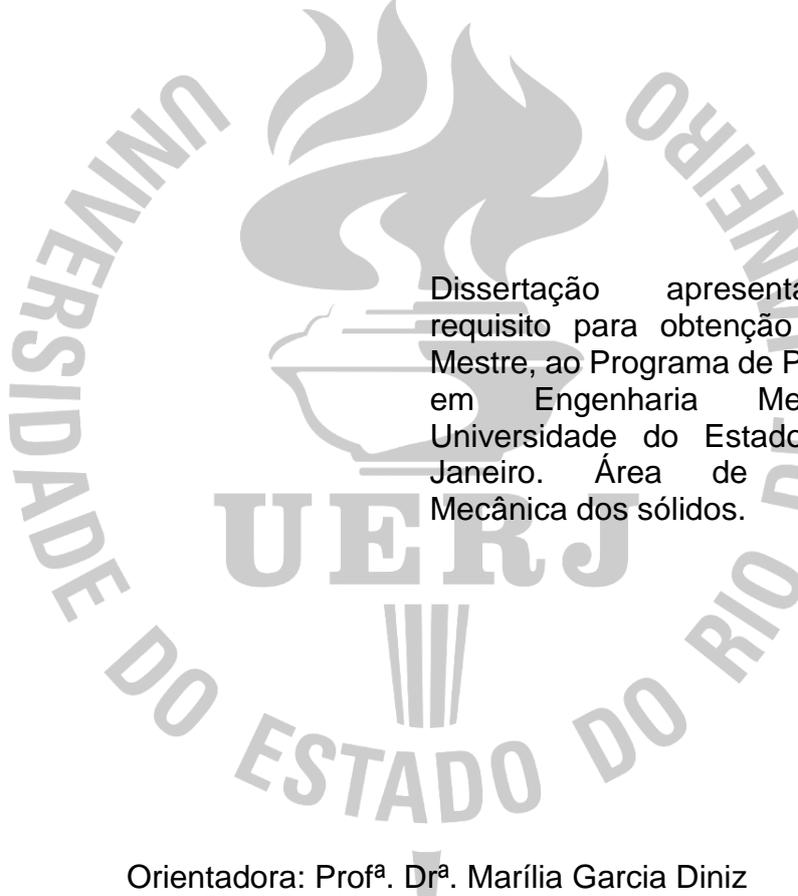
Caracterização de revestimento metálico à base de ferro-cromo-nióbio obtido por aspensão térmica para tubos de caldeiras que operam a carvão mineral.

Rio de Janeiro

2018

Márcio Mesquita Cossenza

Caracterização de revestimento metálico à base de ferro-cromo-nióbio obtido por aspensão térmica para tubos de caldeiras 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.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marília Garcia Diniz

Rio de Janeiro

2018

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

M764 Cossenza, Márcio Mesquita
Caracterização de revestimento metálico à base de ferro-cromo-nióbio obtido por aspersão térmica para tubos de caldeiras que operam a carvão mineral / Márcio Mesquita Cossenza. 2018. 82f.

Orientadora: Marília Garcia Diniz.
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica. 2. Processo de revestimento
I. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. II. Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 620.197:004.932

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

Assinatura

Data

Márcio Mesquita Cossenza

**Caracterização de revestimento metálico obtido à base de
Ferro-cromo-nióbio obtido por aspersão térmica para tubos de
caldeiras 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.

Aprovada em: 19 de dezembro de 2018.

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. José Roberto Moraes D’Almeida
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Bruno Reis Cardoso, Dr.
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Heloísa Cunha Furtado, Dr^a.
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Rio de Janeiro
2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antenor e Suely, por estarem sempre ao meu lado, e por toda a dedicação dispensada para que tudo sempre tenha acontecido da melhor forma.

Aos meus irmãos e suas famílias, que sempre me apoiaram, procurando fazer do interesse pelo meu trabalho mais um instrumento para minha motivação.

A todos os amigos que estiveram ao meu lado.

Aos colaboradores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Prof. Manoel Augusto e Diego de Lima Gomes (MSc), bem como ao Sr. Antônio Carlos de Araújo Santos (MSc) pelo apoio técnico.

Ao pessoal da empresa parceira VGK, Sr. Guilherme W. Bungner, Srta. Alexandra Marins e Sr. Leandro Duarte da Silva, pelo apoio técnico.

Ao pessoal do Departamento de Química da UERJ, Prof^a. Márcia Cristina Amorim (DSc) e Srta. Jéssica (MEV).

Aos profissionais Arthur de Castro Ribeiro (MSc), Cristina da Costa Amorim (DSc), Marcos Martins de Sá, Antônio Carlos de Andrade e Silva, Roberta Martins de Santana e aos pesquisadores Bruno Reis Cardoso (DSc) e Heloísa Furtado (DSc), todos do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), pelo apoio técnico.

Ao André Pimenta (DSc) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Rio de Janeiro (Faetec Campus Paracambi) pelo apoio técnico.

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Marília Garcia Diniz (UERJ), cuja dedicação ao meu trabalho foi fundamental para que fosse possível a realização desse projeto.

À companhia ArcelorMittal Brasil pelo subsídio de material fornecido.

Os agradecimentos são extensivos a Capes. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A Deus, por sempre me indicar o melhor caminho, com sabedoria, para a realização dos meus sonhos.

RESUMO

COSENZA, Márcio Mesquita. **Caracterização de revestimento metálico à base de ferro-cromo-nióbio obtido por aspersão térmica para tubos de caldeiras que operam a carvão mineral**. 2018. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

No processo de geração de energia, as centrais termelétricas brasileiras utilizam o carvão mineral. As usinas empregam o carvão com baixa granulometria para obtenção de melhor rendimento na queima. Entretanto, a qualidade do carvão brasileiro gera muitos resíduos, e os tubos das caldeiras ficam expostos ao impacto de partículas de cinzas com elevada dureza. Para evitar o desgaste prematuro das tubulações, revestimentos que apresentem elevada resistência ao desgaste, alta difusividade térmica, grande adesão ao substrato, e elevada resistência à corrosão, podem ser aplicados. Neste trabalho, um revestimento metálico aplicado por processo de aspersão térmica a arco elétrico sobre um substrato de aço foi avaliado. Os ensaios para caracterização do revestimento avaliaram sua resistência ao desgaste abrasivo, a difusividade térmica, a adesão ao substrato, e sua integridade em altas temperaturas. No ensaio de desgaste por jateamento, partículas abrasivas com 50 μm foram projetadas nas amostras com os ângulos de 90, 60, 45 e 30 graus, resultando em taxas de erosão de 0,027, 0,021, 0,018 e 0,017 mg/g, e partículas com 125 μm foram projetadas a 90 e 45 graus, com taxas de 0,022 e 0,014 mg/g. A difusividade térmica foi medida em quatro amostras de paredes compostas por substrato e revestimento, onde foi obtido o valor médio de 3,9 mm^2/s . Os testes de adesão do revestimento ao substrato chegaram a uma tensão média de 13,3 MPa, de onde foi concluído na análise da ruptura que trabalhos futuros deverão utilizar um outro adesivo que possa fornecer melhores resultados. A simulação térmica a 550°C mostrou que o revestimento não sofreu perda de integridade, bem como a simulação a 800°C mostrou pouca modificação na microdureza Vickers, de 1115 HV para 1042 HV. Os resultados indicaram que o revestimento teve desempenho satisfatório, estando apto para uso em caldeiras aquatubulares.

Palavras-chave: caldeiras, revestimentos, aspersão térmica a arco elétrico, desgaste erosivo, difusividade térmica, força de adesão, simulação térmica

ABSTRACT

COSSENZA, Márcio Mesquita. **Characterization of metallic coating based on iron-chromium-niobium obtained by thermal spraying for pipes of boilers that operate with mineral coal.** 2018. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

In the process of energy generation, Brazilian thermoelectric powerplants use mineral coal. The plants use the coal with lower granulometry to obtain better combustion performance. However, the quality of the Brazilian coal produces a lot of ashes, and the boiler pipes become exposed to the impact of hard particles. In order to avoid premature wear of the pipes, coatings that present high wear resistance, high thermal diffusivity, high adhesion to the substrate, and high corrosion resistance, can be applied. In this study, a metallic coating applied by electric arc thermal spraying process over a steel substrate was evaluated. The tests for the characterization of the coating evaluated the abrasive wear resistance, the thermal diffusivity, the adhesion to the substrate, and the integrity in higher temperatures. In the blasting wear test, 50 μm abrasive particles were used to impact the samples with the angles of 90, 60, 45 and 30 degrees, resulting in erosion rates of 0.027, 0.021, 0.018 and 0.017 mg/g, and 125 μm particles were used with the angles of 90 and 45 degrees, with erosion rates of 0.022 and 0.014 mg/g. The thermal diffusivity was measured on four samples with walls composed by substrate and coating where was obtained an average value of 3,9 mm^2/s . The adhesion tension from the coating to the substrate reached an average tension of 13.3 MPa, and it was concluded in the analysis of the rupture that future works shall use another adhesive that can provide better results. The thermal simulation at 550°C showed that the coating did not change in its integrity, as well as the simulation at 800°C presented small modification on the Vickers microhardness, from 1115 HV to 1042 HV. The results showed that the coating had satisfactory performance, being approved for the use in acquatubular boilers.

Keywords: boilers, coatings, electric arc thermal spraying, erosive wear, thermal diffusivity, adhesion strength, thermal simulation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	–	Esquema simplificado da geração de energia termelétrica	17
Figura 2	–	Esquema da caldeira aquatubular	18
Figura 3	–	Esquema do impacto e arrancamento do material da parede do tubo	21
Figura 4	–	Esquema dos ângulos de ataque das partículas de cinzas impactando o tubo da caldeira em cinco situações diferentes	22
Figura 5	–	Tubos danificados por erosão em caldeira aquatubular	22
Figura 6	–	Esquema dos principais elementos da aspersão térmica	26
Figura 7	–	Esquema dos elementos constituintes de uma pistola de aspersão térmica por arco elétrico	28
Figura 8	–	Esquema de defeitos comuns em um revestimento aspergido	31
Figura 9	–	Esquema do tubo revestido com a direção do fluxo de calor	35
Figura 10	–	Esquema dos tipos de ruptura possíveis no ensaio de adesão	37
Figura 11	–	Aspecto do revestimento de Liga A depositado sobre o substrato ..	40
Figura 12	–	Esquema dos ângulos de ataque do jato abrasivo sobre as amostras	42
Figura 13	–	Amostras montadas no chassi para introdução no equipamento de medição da difusividade térmica	44
Figura 14	–	Esquema dos carretéis utilizados no ensaio de adesão	46
Figura 15	–	Esquema de montagem do conjunto amostra-carretel-dispositivo ..	48
Figura 16	–	Conjunto amostra-adesivo-carretel-dispositivo preparado para ensaio	50
Figura 17	–	Imagens do acabamento superficial da amostra S1 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x	52
Figura 18	–	Imagens do acabamento superficial da amostra S2 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x	52
Figura 19	–	Imagem de uma impressão obtida pelo penetrador de microdureza na região próxima à superfície jateada da amostra S2 com aumento de 600x	53

Figura 20 –	Imagens do acabamento superficial da amostra S3 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x	54
Figura 21 –	Amostras revestidas após o ensaio por jateamento abrasivo	54
Figura 22 –	Esquema do corte transversal das amostras no ensaio de difusividade térmica	59
Figura 23 –	Aspecto macroscópico do arrancamento do revestimento da amostra A7 pelos carretéis 1, 2 e 3	64
Figura 24 –	Aspecto macroscópico do arrancamento do revestimento da amostra A8 pelos carretéis 5, 6 e 7	65
Figura 25 –	Aspectos da superfície do arrancamento na região do carretel 6 da amostra A8 com aumentos de 64x, 200x e 544x obtidos no MEV com mapeamento químico por EDS	66
Figura 26 –	Mapeamento químico por EDS na região de arrancamento do carretel 6 da amostra A8	67
Figura 27 –	Aspectos do revestimento de Liga A antes e após a simulação térmica a 550°C	68
Figura 28 –	Visualização da amostra em mosaico de 7 mm de comprimento após a simlução térmica a 550°C	69
Figura 29 –	Esquema do gride de medidas de microdureza Vickers do revestimento submetido a simulação térmica a 800°C.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Efeito da variação dos ângulos de ataque sobre a taxa de erosão...	55
Gráfico 2	–	Efeito da variação da granulometria do abrasivo sobre a taxa de erosão	56
Gráfico 3	–	Tendência de variação da difusividade térmica em função do parâmetro E_r/E_a para o sistema testado	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades do carvão mineral produzido no Brasil	19
Tabela 2	– Propriedades do carvão mineral importado pelo Brasil	20
Tabela 3	– Materiais aplicáveis para variadas condições de operação	24
Tabela 4	– Materiais mais usados na aspersão térmica por Arco Elétrico para revestimentos em caldeiras	24
Tabela 5	– Materiais mais usados na aspersão térmica por HVOF para revestimentos em caldeiras	25
Tabela 6	– Características dos principais métodos de aspersão térmica	27
Tabela 7	– Propriedades termofísicas do aço inoxidável e do aço carbono	36
Tabela 8	– Composição química do substrato a ser revestido	39
Tabela 9	– Composição química do arame de Liga A para o revestimento	39
Tabela 10	– Parâmetros de avaliação das superfícies S1, S2 e S3	55
Tabela 11	– Correspondência do tipo de superfície das amostras submetidas aos ensaios de desgaste abrasivo, difusividade térmica, adesão e simulação térmica com as superfícies características S1, S2, S3 ...	55
Tabela 12	– Parâmetros de jateamento e propriedades das amostras revestidas	55
Tabela 13	– Parâmetros de jateamento e propriedades das amostras não revestidas	57
Tabela 14	– Comparação dos resultados obtidos pelo jateamento abrasivo da Liga A em relação a três revestimentos metálicos testados por Martins e Kejelin (2012)	58
Tabela 15	– Relação entre as medidas de difusividade térmica e as espessuras das amostras	60
Tabela 16	– Características das amostras e dos carretéis, e os resultados da tensão de ruptura no ensaio de adesão	62
Tabela 17	– Composição química (em percentual de peso) do revestimento de Liga A em comparação com o ranqueamento obtido em análise por EDS na região de arrancamento do carretel 6 da amostra A8 no ensaio de adesão	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSE	Back-scattered Electron
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EDS	Energy Dispersion Spectroscopy
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HVOF	High Velocity Oxi Fuel
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
SAE	Society of Automotive Engineers
SEI	Secondary Electrons Imaging

LISTA DE SÍMBOLOS

kcal / kg	quilocaloria por quilograma
%	porcentagem
g / cm ³	grama por centímetro cúbico
pH	potencial hidrogeniônico
r-X	raio-X
SiO ₂	óxido de silício
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
°C	graus centígrados
µm	micrometro
HV	dureza Vickers
α	ângulo de ataque
Al	alumínio
Cr	cromo
Ni	níquel
WC	carboneto de tungstênio
MPa	megapascal
Fe	ferro
Mn	manganês
Si	silício
C	carbono
Mo	molibdênio
Co	cobalto
B	boro
W	tungstênio
CrC	carboneto de cromo
m / s	metro por segundo
kg / h	quilograma por hora
mm	milímetro
mg / g	miligrama por grama
mg / min	miligrama por minuto

g / min	grama por minuto
mg / mm ³	miligrama por milímetro cúbico
mm ³ / g	milímetro cúbico por grama
a	coeficiente de difusividade térmica
λ	coeficiente de condutividade térmica
c_e	calor específico
ρ	massa específica
T	temperatura
W / m.°C	watts por metro por grau centígrado
kg / m ³	quilograma por metro cúbico
J / kg.°C	joules por quilograma por grau centígrado
m ² / s	metro ao quadrado por segundo
kV	quilovolt
kPa	quilopascal
mesh	mesh
Ra	parâmetro de rugosidade superficial média
Ea	espessura da amostra
Er	espessura do revestimento
Es	espessura do substrato
Nb	nióbio

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
1.1 Usinas termelétricas no Brasil	17
1.2 Caldeiras aquatubulares	18
1.3 O carvão mineral brasileiro	19
1.4 Caracterização das cinzas do carvão mineral	20
1.5 Mecanismos de deterioração nas caldeiras	21
1.6 Mecanismos de proteção para as caldeiras	23
1.6.1 Características aplicáveis aos revestimentos	23
1.6.2 Materiais típicos usados nos revestimentos	24
1.7 Processo de produção do revestimento por aspersão térmica	25
1.7.1 Aspersão térmica com aquecimento por combustão	26
1.7.2 Aspersão térmica com aquecimento elétrico	27
1.7.3 Características dos principais métodos de aspersão térmica	27
1.7.4 Aspersão térmica por Arco Elétrico	28
1.7.5 Prepação da superfície para aplicação do revestimento	29
1.7.6 Parâmetros utilizados na produção do revestimento	29
1.8 Caracterização dos revestimentos aspergidos termicamente	30
1.8.1 Espessura do revestimento	30
1.8.2 Porosidades e redes de óxidos	30
1.8.3 Densidade do revestimento	31
1.8.4 Microdureza Vickers	32
1.8.5 Desgaste acelerado do revestimento por jateamento abrasivo	32
1.8.6 Difusividade térmica do conjunto substrato-revestimento	34
1.8.7 Adesão do revestimento ao substrato	36
2. MATERIAIS E MÉTODOS	39
2.1 Análise do substrato utilizado	39
2.2 Aplicação do revestimento	39
2.3 Ensaio de desgaste por jateamento abrasivo	40
2.4 Ensaio de difusividade térmica	43
2.5 Ensaio de adesão do revestimento	44

2.6	Simulação térmica do revestimento	48
2.7	Características das superfícies das amostras submetidas aos ensaios de jateamento abrasivo e adesão	50
2.8	Plano de amostras	50
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1	Características das superfícies das amostras utilizadas	51
3.1.1	Aço do substrato conforme recebido	51
3.1.2	Aço do substrato com rugosidade preparada	52
3.1.3	Revestimento aspergido com a Liga A	53
3.2	Taxas de erosão do desgaste acelerado por jateamento abrasivo	54
3.3	Difusividade térmica do conjunto substrato-revestimento	59
3.4	Valor da tensão de adesão do revestimento ao substrato	61
3.5	Análise do revestimento após simulação térmica a 550°C	68
3.6	Análise do revestimento após simulação térmica a 800°C	70
	CONCLUSÃO	71
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro tem a responsabilidade de manter a rotina de milhões de cidadãos, bem como manter a economia do país em movimento. Dentro desse contexto, embora os recursos hídricos sejam a maior fonte natural para a geração de energia elétrica, o carvão mineral também tem significativa participação neste segmento, devido a sua utilização em centrais termelétricas.

Apesar de vantajoso devido a abundância de reservas no país, o carvão mineral brasileiro apresenta baixo poder calorífico. Isto torna necessária a utilização de grandes quantidades desse combustível para a produção de energia térmica. O carvão utilizado também apresenta um teor de resíduos inorgânicos acima da média, quando comparado com aqueles importados de outros países (EPE, 2016). Durante a queima, suas cinzas ricas em óxidos com elevada dureza são projetadas na direção das partes internas das caldeiras que produzem o vapor, principalmente contra os tubos trocadores de calor. A contínua exposição ao impacto desse particulado em altas temperaturas provoca desgaste abrasivo-erosivo nas paredes das tubulações (CAMPOS, 2017).

Os processos de corrosão e erosão das superfícies atingidas podem ser minimizados com a aplicação de revestimentos que possuam elevada resistência ao desgaste por impacto de partículas de cinzas, boa difusividade na transmissão do calor, boa adesão à parede da tubulação, e boa resistência à corrosão em altas temperaturas.

De acordo com trabalho desenvolvido por Szymański e colaboradores (2014), alguns materiais são indicados para serem aplicados como revestimentos para as mesmas condições de operação, ou seja, com temperaturas acima de 500°C e sob o impacto de partículas. Alguns métodos para a produção dos revestimentos também têm sido recomendados, entretanto, a possibilidade de aplicação do revestimento no local e sem a remoção da tubulação da caldeira é requisito fundamental.

O processo de aspersão térmica por arco elétrico para deposição de ligas com alto percentual de cromo e níquel em base de ferro é indicado por apresentar boa qualidade do produto final e boa produtividade, com a vantagem de permitir a portabilidade do equipamento de aplicação em locais de difícil acesso (MONTANI, 2016).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar um revestimento metálico proposto e obtido por aspersão térmica a arco elétrico. Para tanto, foram disponibilizadas diversas amostras, onde foram utilizadas técnicas metalográficas, microscopia óptica (MO), análise e processamento digital de imagens (PDI), microscopia eletrônica de varredura (MEV), mapeamento químico semi-quantitativo por técnica de Espectroscopia por Dispersão de Energia – *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*, medidas de microdureza Vickers (HV), ensaios de desgaste acelerado por jateamento abrasivo segundo a norma ASTM G-76, medidas de difusividade térmica pelo método *flash* segundo a norma ASTM E-1461, ensaio de adesão ao substrato pelo método *pull-off* conforme a norma ASTM C-633 para revestimentos aspergidos termicamente, simulação térmica na temperatura de 550°C (temperatura média de operação em caldeiras), e simulação térmica a 800°C. Após o processo de caracterização, foi concluído que o revestimento está adequado para ser utilizado internamente em caldeiras aquatubulares.

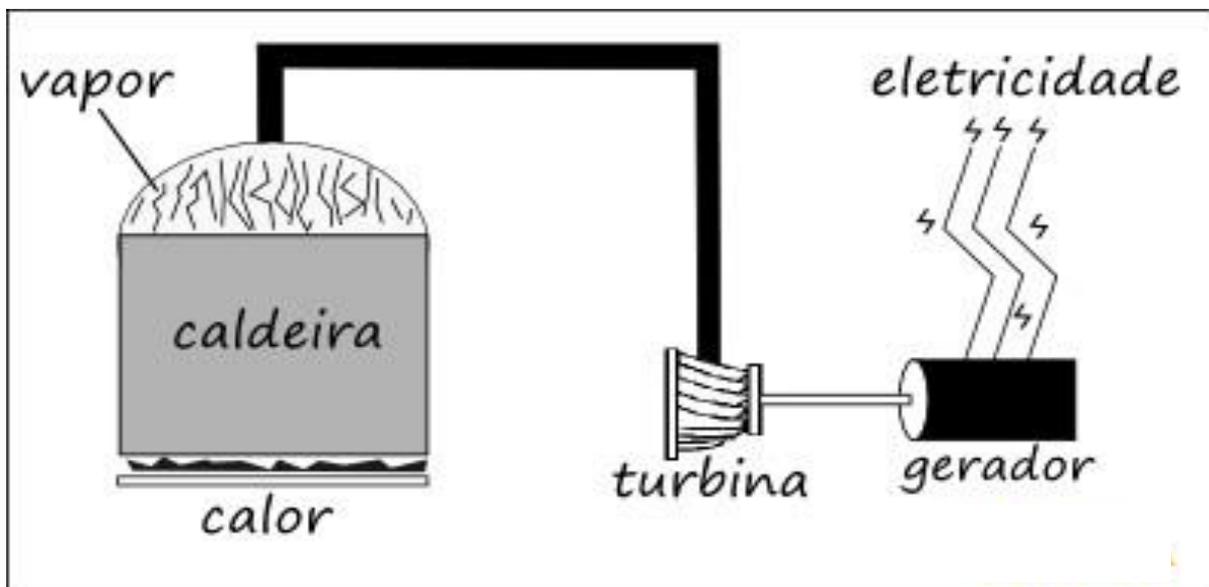
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Usinas termelétricas no Brasil

Entre todas as formas de energia que são utilizadas no Brasil, a energia elétrica tem máxima importância, devido a sua facilidade de transmissão e transporte. Esta pode ser gerada em locais específicos e remotos, a partir de outras fontes de energia, antes de ser transportada por milhares de quilômetros. A energia elétrica é gerada por várias formas, a partir de fontes renováveis ou não renováveis. Pode ser produzida em usinas termelétricas à partir da queima de combustíveis de origem fóssil, tais como o carvão mineral, óleo ou gás natural, entre outros.

Nas centrais termelétricas, o calor gerado permite que a água se transforme em vapor no interior das caldeiras. O vapor em alta pressão é dirigido às turbinas, que, por sua vez, são acopladas a um gerador para produção de eletricidade (CAMPOS, 2017). Um esquema simplificado mostra o fluxo da energia na Figura 1.

Figura 1 – Esquema simplificado da geração de energia termelétrica



Fonte: O Autor, 2018.

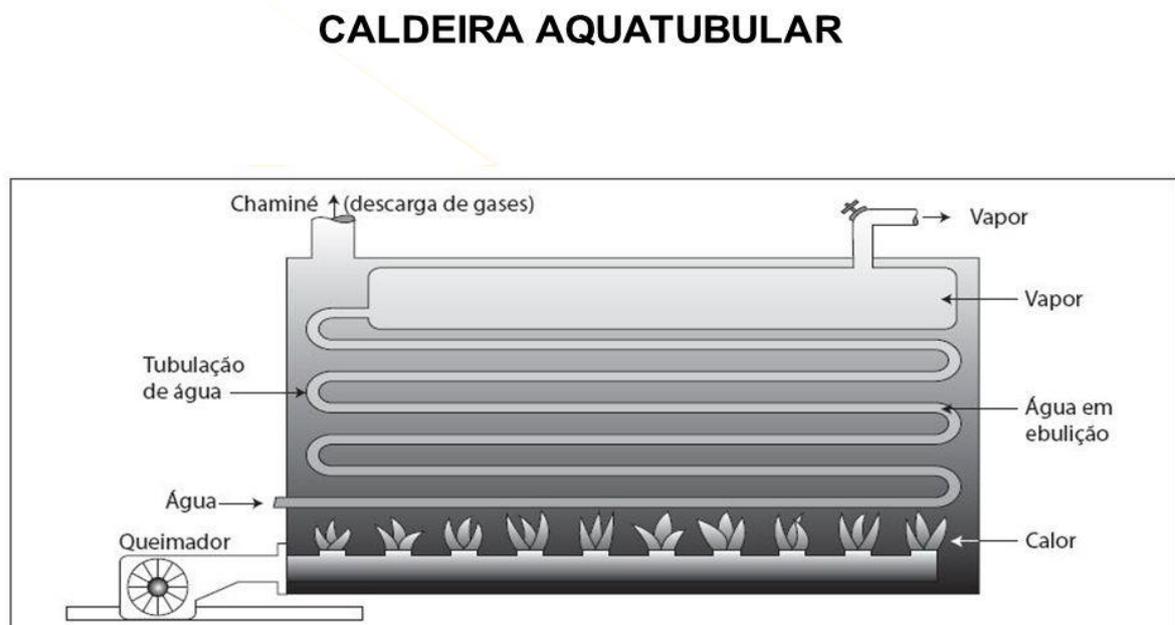
Algumas usinas termelétricas no Brasil estão localizadas na região sul do país, onde existe abundância de carvão mineral para a geração da energia térmica. A parcela de energia elétrica gerada a partir do carvão mineral é bem significativa. Aproximadamente 28% da energia elétrica é produzida por usinas termelétricas no

Brasil, das quais cerca de 9% têm o carvão como fonte de combustível (CAMPOS, 2017). Em estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética, considera-se uma potência nominal instalada de 3388 megawatts no país com uso do carvão, incluídas duas usinas termelétricas particulares com autoprodução na indústria do alumínio. O consumo de carvão na energia térmica está em crescimento no Brasil, com mais 1785 megawatts contratados em novos projetos (EPE, 2016).

1.2 Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares a carvão mineral, usadas nas usinas termelétricas, são aquelas em que a água flui através de um feixe de tubos para se transformar em vapor de alta pressão, enquanto a fonte de calor se localiza na parte externa aos tubos. A temperatura de operação média nas tubulações destes trocadores de calor é de aproximadamente 550°C (CAMPOS, 2017). A Figura 2 apresenta uma caldeira aquatubular de forma esquemática.

Figura 2 – Esquema da caldeira aquatubular.



O carvão mineral é utilizado com baixa granulometria. Durante a combustão, este é pulverizado nos queimadores, e sua matéria inorgânica com alto ponto de fusão transforma-se em cinzas, que são compostas por um aglomerado de óxidos, e são projetadas sobre as superfícies dos tubos onde ocorre a transferência de calor. Ao mesmo tempo em que ocorre a redução da eficiência da troca térmica devido a impregnação desse material nas paredes externas dos tubos, o particulado acelera os processos de corrosão e erosão das superfícies atingidas (JOÃO et al, 2012). A qualidade do carvão mineral é determinante para o funcionamento satisfatório das caldeiras das centrais termelétricas (CAMPOS, 2017).

1.3 O carvão mineral brasileiro

Com relação às propriedades do carvão, um importante parâmetro de avaliação é seu poder calorífico, ou seja, sua capacidade de gerar determinada quantidade de energia térmica por unidade de peso do combustível. Essa qualidade está relacionada com um maior percentual de carbono na sua composição química. Por outro lado, o resíduo oriundo da queima é característica indesejável. Além de não contribuírem com elementos que possam gerar energia térmica, as cinzas podem trazer prejuízos aos equipamentos que utilizam o carvão (CAMPOS, 2017). A Tabela 1 apresenta algumas características do carvão mineral produzido no Brasil em três estados da região sul do país (EPE, 2016).

Tabela 1 – Propriedades do carvão mineral produzido no Brasil

Estado Produtor	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Enxofre (%)	Cinzas (%)
Paraná	4.875	30,2	6,9	44,0
Rio Grande do Sul	3.364	26,0	1,4	50,8
Santa Catarina	2.750	24,0	4,5	60,2

Fonte: EPE, 2016.

O poder calorífico médio de 3663 kcal/kg do carvão oriundo das jazidas dos três estados da região sul é bem mais baixo do que o poder calorífico de alguns carvões que são importados pelo Brasil, como aqueles vindos de seus dois principais

fornecedores, ou seja, Estados Unidos e Austrália, conforme apresentados na Tabela 2 (EPE, 2016).

Tabela 2 – Propriedades do Carvão Mineral Importado pelo Brasil

Fornecedores	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Enxofre (%)	Cinzas (%)
Estados Unidos	7.053	70,8	1,3	13,6
Austrália	5.370	44,3	0,4	24,0

Fonte: EPE, 2016.

A partir das informações da Tabela 2, pode-se calcular um poder calorífico médio de 6211 kcal/kg, com percentual de carbono maior do que aquele do carvão produzido no Brasil. O percentual de cinzas na queima é menor, o que também indica uma qualidade superior do carvão importado em relação ao brasileiro.

1.4 Caracterização das cinzas do carvão mineral

Considerando o alto teor de cinzas presentes no carvão mineral produzido no Brasil, e que estas são um dos principais motivos do desgaste das tubulações de trocadores de calor nas centrais termelétricas, é de grande importância conhecer as propriedades químicas, físicas e mecânicas deste material.

Sabedot e colaboradores (2011) classificaram esses resíduos como escórias, cinzas pesadas e cinzas leves. As características físicas e químicas dos resíduos dependem da composição do carvão utilizado e das condições de queima. Os resultados do trabalho apresentaram uma densidade das cinzas entre 2,1 e 2,4 g/cm³ e um pH entre 8,5 a 12,6 para um determinado carvão utilizado em caldeiras de termelétricas localizadas na região sul do Brasil (SABEDOT *et al*, 2011).

Jair João e colaboradores (2012) analisaram a composição química das cinzas geradas à partir da queima de determinado carvão mineral, oriundo também de usina termelétrica da região sul do Brasil, por técnicas de absorção atômica, fluorescência de raio-X e spectroquant. Os resultados obtidos nas análises pelas três metodologias indicou um percentual médio de 60,5 % de óxido de silício (SiO₂), e um percentual médio de 18,2 % de óxido de alumínio (Al₂O₃). Com relação a fusibilidade das cinzas,

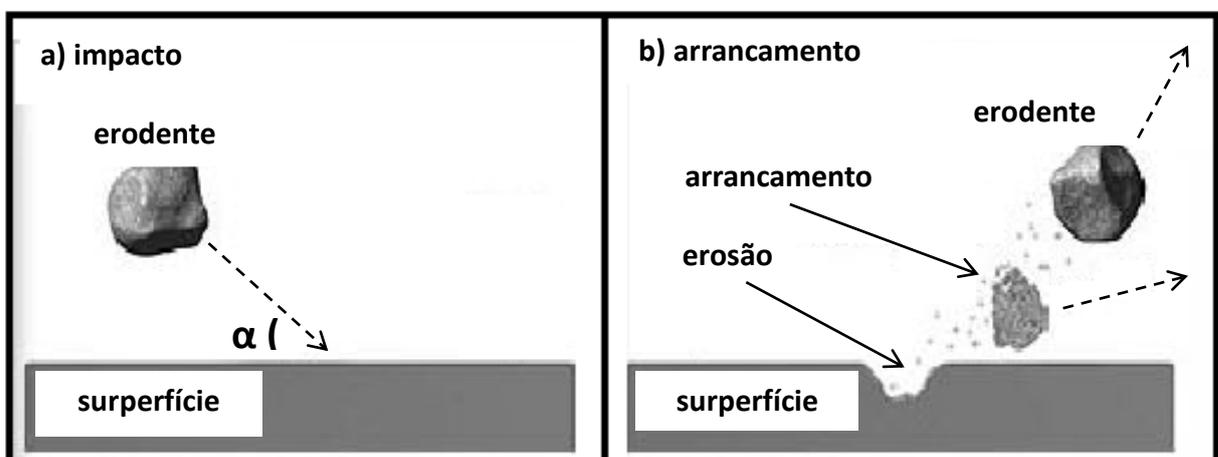
foram determinadas as temperaturas dos estágios de amolecimento e derretimento, com início da fusibilidade, entre 1378°C e 1421°C (JOÃO *et al*, 2012).

Gomes (2018) também caracterizou cinzas leves geradas pela queima de carvão mineral pulverizado, usado como fonte de energia para uma caldeira de central termelétrica da região sul do Brasil. As partículas analisadas no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura eram basicamente esféricas com diâmetro médio de $41 \pm 29 \mu\text{m}$. O valor médio para a microdureza Vickers do particulado foi de $825 \pm 155 \text{HV}$. As características alcalinas verificadas pelo potencial hidrogeniônico (pH) foram 9,4 em meio aquoso. Os resultados levaram à conclusão que o desgaste pelo impacto das partículas de cinzas pode ser mais intenso do que o mecanismo de corrosão, visto que o ambiente possuía caráter alcalino e sem enxofre (GOMES, 2018).

1.5 Mecanismos de deterioração nas caldeiras

A erosão em tubos de trocadores de calor por cinzas leves em alta temperatura é um problema. O desgaste está relacionado a compostos como o SiO_2 e o Al_2O_3 , de elevada dureza (BUQIAN e LUER, 1998). As cinzas são arrastadas pela pressão dos ventiladores que insuflam o carvão pulverizado, e impactam os tubos, que são fabricados com material de menor dureza (MARTINS e KEJELIN, 2012). A Figura 3 mostra esquematicamente o particulado das cinzas erodentes impactando a superfície e provocando o arrancamento o material.

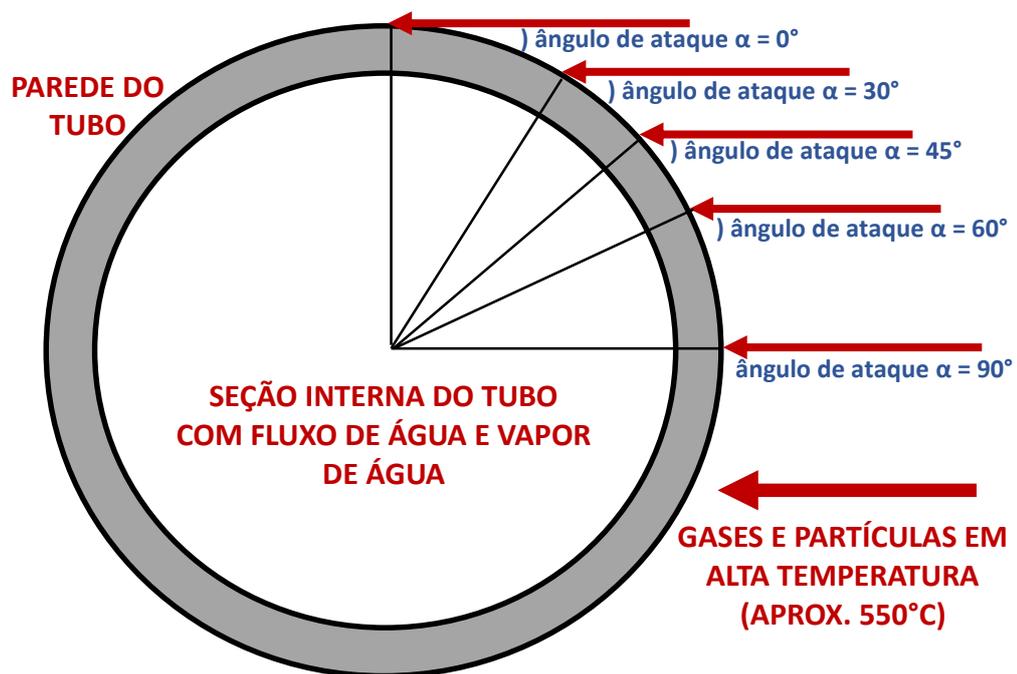
Figura 3 – Esquema do impacto e arrancamento do material da parede do tubo



Fonte: MARTINS e KEJELIN, 2012.

O esquema da Figura 3 mostra a partícula erodente atacando o material com determinado ângulo entre a sua projeção e a superfície atingida, com o conseqüente arrancamento do material. Na figura 4 são ilustrados alguns ângulos de ataque das cinzas erodentes sobre a tubulação de um trocador de calor.

Figura 4 – Esquema dos ângulos de ataque das partículas de cinzas impactando o tubo da caldeira em cinco situações diferentes.



Fonte: O Autor, 2018.

A ilustração mostra alguns dos ângulos pelos quais o particulado pode atingir a parede externa da tubulação. São desenhadas cinco inclinações escolhidas como 0° , 30° , 45° , 60° e 90° , onde o ângulo de ataque (α) é definido como aquele formado pela direção de um particulado que atinge o tubo, e a reta tangente à superfície do tubo, no ponto de impacto. A Figura 5 mostra alguns tubos danificados em caldeiras aquatubulares de central termelétrica.

Figura 5 – Tubos danificados por erosão em caldeira aquatubular



Fonte: MARTINS e KEJELIN, 2012.

As tubulações por onde circula a água nas caldeiras aquatubulares estão sujeitas ao ambiente corrosivo em altas temperaturas e desgaste abrasivo, causados pela queima do carvão, e pelo fluxo de gases com particulados de elevada dureza. O processo de ataque às superfícies metálicas é capaz de produzir a redução da espessura dos tubos e provocar perfurações nas suas paredes. O procedimento de reparo dos tubos na parte interna das caldeiras é difícil e acarreta longos tempos de paralisação dos equipamentos com perdas substanciais às empresas geradoras de energia (CAMPOS, 2016).

1.6 Mecanismos de proteção para as caldeiras

Uma forma de eliminar ou minimizar a deterioração das paredes dos tubos é o desenvolvimento e a utilização de revestimentos que possam ser aplicados com relativa facilidade nas regiões críticas afetadas. Como mecanismo de proteção para os tubos das caldeiras aquatubulares, alguns revestimentos já foram desenvolvidos e testados ao longo dos tempos, e apresentados em trabalhos anteriores, como os de Martins e Kejelin (2012), Szymański e colaboradores (2014) e Gomes (2018).

+-

1.6.1 Características aplicáveis aos revestimentos

Szymański e colaboradores (2014) apresentaram mecanismos de degradação em caldeiras a carvão mineral e algumas soluções encontradas a respeito. A escolha de materiais apropriados para revestimentos e seus métodos de aplicação foram objeto de pesquisa direcionado para a indústria polonesa. De acordo com o trabalho,

os motivos de falhas de muitos elementos de caldeiras a carvão são os processos combinados de erosão e corrosão em altas temperaturas, intensos na câmara de combustão dos trocadores de calor. Os dispositivos são atingidos por partículas de cinzas duras por vários ângulos, em temperaturas de até 550°C, nas condições de operação.

As propriedades dos revestimentos comumente utilizados nessas condições resultam da aplicação de compostos para a obtenção de uma matriz metálica resistente (SZYMÁNSKI *et al*, 2014). A Tabela 3 apresenta algumas ligas comumente utilizadas como revestimentos em condições específicas. São discriminados também os processos de aplicação por aspersão térmica a arco elétrico e pela chama oxi-gás de alta velocidade (*High Velocity Oxi Fuel* ou HVOF).

Tabela 3 – Materiais aplicáveis para variadas condições de operação

Proteção contra	Aspersão Térmica	Grupo de Material
Corrosão atmosférica	Arco Elétrico	Aços inoxidáveis
Corrosão em alta temperatura	Arco Elétrico	Ligas de Al e alto Cr
Desgaste abrasivo	Arco elétrico e HVOF	Ligas de Ni, Cr e WC
Desgaste em altas temperaturas	Arco elétrico e HVOF	Ligas de Ni, Cr e WC

Fonte: SZYMÁNSKI *et al*, 2014.

O método mais utilizado é o Arco Elétrico, pela vantagem do baixo custo. Uma tecnologia opcional é o método por HVOF, que permite a produção de revestimentos com alta dureza (~1600 HV), baixa porosidade (~2%) e alta adesão (~80 MPa), com matriz metálica na forma de pó (SZYMÁNSKI *et al*, 2014).

1.6.2 Materiais típicos usados nos revestimentos

Na pesquisa de Szymánski e colaboradores (2014) foram discriminadas as composições das ligas metálicas mais comumente aplicadas por arco elétrico e HVOF. A Tabela 4 apresenta algumas ligas aplicadas pelo processo a arco elétrico.

Tabela 4 – Materiais mais usados na aspersão térmica por Arco Elétrico para revestimentos em caldeiras

Nome Comercial	Elementos de Composição	Aplicação
Metcoloy 5	Fe, Cr (18), Mn (8,5), Ni, Si, C	Aço austenítico com baixo carbono, para revestimentos com resistência a corrosão
SM-8222	Fe, Cr (28), C (5), Mn	Aço com alto cromo, para revestimentos com resistência a corrosão e ao desgaste
SM-8625	Ni (21,5), Cr, Mo (8,5), Fe, Co	Liga com resistência a fluência em alta temperatura e a corrosão acima de 1000°C
SM-8718	Ni (19), Cr, Fe (18), Mo	Liga com resistência a fluência em alta temperatura e a corrosão acima de 1000°C
W-685.1	Fe, Cr (23), B (3), C, W, Si, Mo	Liga com resistência ao desgaste abrasivo e corrosão
FMI-2	Fe, Al, Cr, B	Liga com resistência ao desgaste abrasivo e corrosão

Fonte: SZYMÁNSKI et al, 2014.

A Tabela 5 apresenta algumas ligas aplicadas pelo método de HVOF.

Tabela 5 – Materiais mais usados na aspersão térmica por HVOF para revestimentos em caldeiras

Elementos	Dureza Vickers (HV)	Aplicação
WC-Co	1100-1450	Elevada resistência a abrasão e erosão Baixa resistência a corrosão
WC-Co-Cr	1250-1450	Elevada resistência a abrasão e erosão Boa resistência em soluções aquosas
WC-CrC-Ni	1050-1350	Elevada resistência a abrasão e erosão Excelente resistência em soluções aquosas
Cr ₃ C ₂ -NiCr	800-1100	Elevada resistência ao desgaste erosivo Excelente resistência em soluções aquosas

Fonte: SZYMÁNSKI et al, 2014.

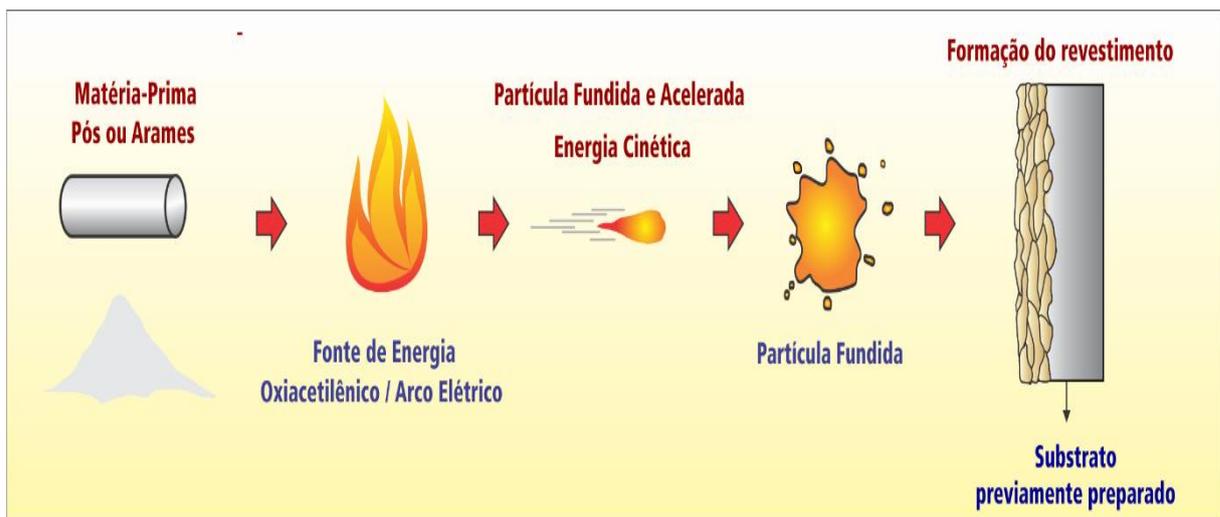
Considerando as condições de desgaste dentro da caldeira, os revestimentos produzidos pelos métodos de HVOF e Arco Elétrico se caracterizam por uma microestrutura relativamente densa, com alta dureza e com boa resistência à

corrosão. Os revestimentos considerados de maior qualidade, contendo carbonetos, são obtidos pelo método HVOF (SZYMÁNSKI et al, 2014).

1.7 Processo de produção do revestimento por aspersão térmica

A aspersão térmica é um processo onde materiais metálicos ou não-metálicos são depositados em condição fundida ou semifundida sobre um substrato preparado, formando um depósito aspergido (LIMA, 2007). Os depósitos formam sucessivas camadas de pequenas partículas que se sobrepõem achatadas e aderem à superfície do substrato, onde formam o revestimento (MARANHO, 2006). A ligação metalúrgica entre o revestimento e o substrato é limitada, e a aderência se dá por um mecanismo de ancoragem mecânica. A tensão de adesão é função do material e do processo de aspersão, cuja fonte de calor pode ser proveniente de combustão ou aquecimento elétrico. Os materiais dos revestimentos podem ser fornecidos na forma de vareta, arame, cordão e pó (ANTUNES, 2013). A Figura 6 mostra esquematicamente os principais elementos do processo de aspersão térmica.

Figura 6 – Esquema dos principais elementos da aspersão térmica



Fonte: EUTECTIC CASTOLIN, www.eutectic.com.br, acesso em 08/08/2017.

As gotículas fundidas pelo calor gerado nos arames metálicos ou pó são aceleradas de encontro ao substrato. Durante o trajeto elas ficam sólidas e pastosas, aderindo mecanicamente à superfície.

Existe uma ampla gama de funções para os revestimentos aspergidos, tais como, resistência ao desgaste, isolamento térmico, resistência à corrosão, e restauração dimensional (BRITO, 2010).

Os processos de aspersão térmica podem ser classificados de acordo com o tipo da fonte de calor utilizada, seja pelo aquecimento por combustão, ou pelo aquecimento elétrico (MARQUES, 2003).

1.7.1 Aspersão térmica com aquecimento por combustão

Neste caso o processo ocorre pela reação química de um combustível, que gera o calor necessário para a fusão da matéria prima do revestimento.

No processo por Chama Convencional ou Oxi-acetilênica (*Flame Spraying*), uma chama gera calor para fusão do material de deposição. Em baixas temperaturas pode produzir revestimentos com baixa adesão e alta porosidade (BRITO, 2010).

No processo por Detonação (*Detonation Gun* ou *D-Gun*), uma vela de ignição detona a mistura de gases que impulsiona o pó a uma velocidade hipersônica, enquanto um pulso de nitrogênio é usado para interromper a combustão após cada detonação, repetindo-se várias vezes por segundo (MONTANI, 2016).

No processo por Chama Oxi-gás de Alta Velocidade (*High Velocity Oxi Fuel* ou HVOF), jatos de gases são aplicados em altíssimas velocidades para conduzir o material em forma de pó até o substrato, e obter revestimentos com alta densidade, baixa porosidade, e elevada adesão (MONTANI, 2016).

1.7.2 Aspersão térmica com aquecimento elétrico

No processo por Arco Elétrico (*Arc Spraying*), os revestimentos são aspergidos com alta taxa de deposição, em camadas densas e resistentes (LIMA, 2001).

No processo por Plasma (*Plasma Spraying*), uma mistura de gases passa através de um catodo de tungstênio e um anodo de cobre, gerando um plasma. O pó é alimentado no plasma e acelerado em direção ao substrato (BRITO, 2010).

1.7.3 Características dos principais métodos de aspersão térmica

A Tabela 6 apresenta algumas propriedades dos métodos de aspersão.

Tabela 6 – Características dos principais métodos de aspersão térmica

Processo	Temperatura da Chama (°C)	Velocidade das Partículas (m/s)	Porosidade (%)
Chama	2.200 – 2.800	30 - 200	10,0– 20,0
D-Gun	3.300 – 4.227	760	0,5 – 2,0
HVOF	2.700 – 3.170	1200	1,0 – 5,0
Arco Elétrico	4.000 – 6.000	250	2,0– 10,0
Plasma	5.600 – 14.000	800	1,0 – 7,0

Fonte: MORAIS, 2016.

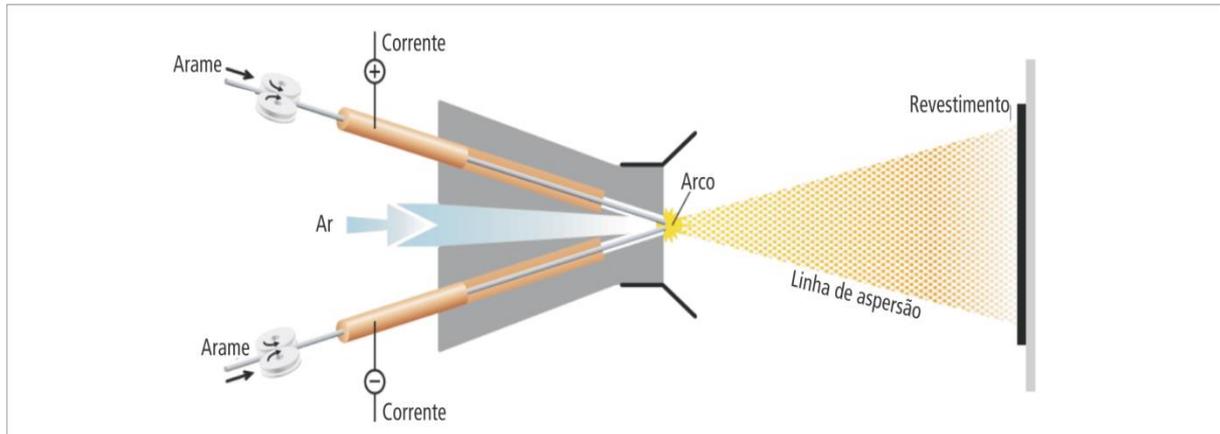
O método por arco elétrico apresenta o maior rendimento, com taxa de deposição de 12 kg/h, seguido pelo plasma com 3 a 9 kg/h, a chama oxi-acetilênica com 2 a 6 kg/h, e HVOF e D-Gun, com 2 a 4 kg/h (CHATTOPADHYAY, 2001).

1.7.4 Aspersão térmica por Arco Elétrico

O processo de aquecimento por arco elétrico consiste em estabelecer uma diferença de potencial entre dois arames consumíveis diante de um jato de gás. A abertura do arco na ponta dos eletrodos funde os arames (Marques, 2003). Um jato de gás atomizante, em geral ar comprimido, é lançado em alta velocidade e projeta gotículas do metal fundido contra o substrato. Gases inertes podem ser usados na atomização, como argônio, hélio ou nitrogênio, para reduzir a oxidação dos revestimentos (Brito, 2010). O processo por arco elétrico propicia maior produtividade, com custo operacional menor para a produção de revestimentos em larga escala (Martins e Kejelin, 2012). O sistema completo inclui fonte de corrente contínua, alimentadores de arame com controle de velocidade, um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável e tocha de aspersão. A Figura 7 apresenta

esquemáticamente o funcionamento de uma pistola de aspersão térmica pelo método do arco elétrico.

Figura 7 – Esquema dos elementos constituintes de uma pistola de aspersão térmica por arco elétrico



Fonte: EUTECTIC CASTOLIN, www.eutectic.com.br, acesso em 08/08/2017.

O equipamento consiste basicamente de duas entradas para os arames, que podem ter a mesma composição química ou não, e uma passagem para o ar atomizante. O processo a arco elétrico produz maior coesão interlamelar do que os revestimentos aspergidos com baixa velocidade. A pressão de atomização baixa resulta em revestimentos mais ásperos, enquanto as mais altas produzem textura de superfície mais lisa. A presença de óxidos também pode ser reduzida com taxas de alimentação maiores, em função da amperagem da máquina (DORFMAN, 2002).

1.7.5 Preparação da superfície para aplicação do revestimento

Uma vez que a aderência do revestimento é resultante do impacto das partículas contra o substrato, a satisfatória ancoragem dependerá da velocidade de impacto, da limpeza do substrato, e da rugosidade da superfície (CORTÉS, 1998).

A correta preparação do substrato para o processo de aspersão consiste da limpeza da superfície para retirada de impurezas, e da formação de um perfil de rugosidade para a ancoragem mecânica do revestimento. Uma rugosidade adequada é tão importante quanto à limpeza (BRITO, 2010). Martins e Kejelin (2012) recomendam uma rugosidade superficial média de 6 μm na preparação da superfície

do substrato para aplicação do revestimento por aspersão térmica a arco elétrico. Em seus experimentos os substratos foram preparados com rugosidades que variaram entre 6 e 8 μm (MARTINS e KEJELIN, 2012).

Um pré-aquecimento do substrato, além de melhorar a limpeza, favorece a redução das tensões internas, aumentando a aderência e a coesão (ANTUNES, 2013). O comportamento dos revestimentos pode ser significativamente afetado pela presença de oxidação e contaminantes na superfície. A norma ISO 8501 (2006) estabelece um método de avaliação visual da limpeza após jateamento abrasivo. Na limpeza por jato abrasivo ligeiro (Sa-1), a superfície deve ficar isenta de óleo, gordura, carepa de laminação, ferrugem, tinta e resíduos com fraca aderência. Na limpeza por jato abrasivo intenso (Sa-2), além do disposto para Sa-1, somente devem permanecer resíduos firmemente aderidos. Na limpeza por jato abrasivo a fundo (Sa-2.1/2), resíduos de contaminação devem aparecer somente como manchas ou riscos. Na limpeza por jato ao metal branco (Sa-3), a superfície deve apresentar cor metálica uniforme (MONTANI, 2016).

1.7.6 Parâmetros utilizados na produção do revestimento

Na deposição do revestimento por aspersão térmica a arco elétrico, Martins e Kejelin (2012) utilizaram tensão de 27 volts, corrente de 100 amperes, pressão de atomização de 0,4 MPa, e distância da tocha de 120 mm. No trabalho de Gomes (2018), para aspersão também a arco elétrico, foi utilizada uma tensão de 30 volts, com corrente de 100 amperes, pressão do ar atomizante de 0,48 MPa, e distância da tocha de 100 mm, para produzir um revestimento a uma taxa de 5 kg/h.

1.8 **Caracterização dos revestimentos aspergidos termicamente**

Algumas características dos revestimentos utilizados em tubulações de trocadores de calor merecem atenção especial, tais como espessura de cobertura, percentual de porosidade, percentual de óxidos, densidade do revestimento, microdureza, rugosidade superficial, resistência ao desgaste abrasivo por impacto de partículas duras, difusividade térmica, força de adesão ao substrato, e resistência a corrosão em altas temperaturas. A seguir são descritos alguns pontos a respeito dessas características.

1.8.1 Espessura do revestimento

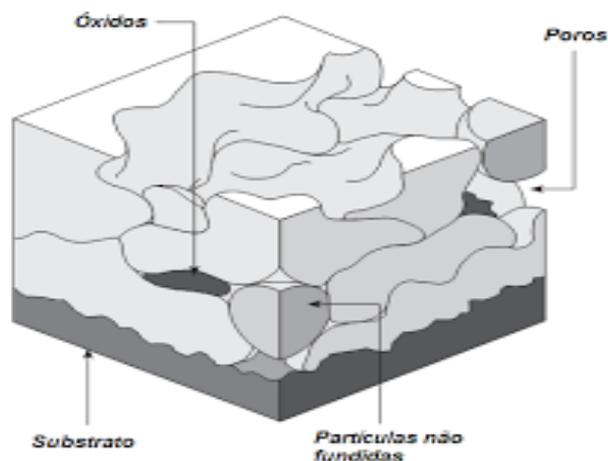
A espessura do revestimento é definida pela necessidade do usuário. Na aplicação, os fatores determinantes para obtenção da espessura requerida são a quantidade de passes realizados pelo operador, a velocidade de alimentação do consumível, a distância entre o bico de jato e a peça e a vazão dos gases utilizados no jato (MARANHO, 2006), durante o processo de aspersão térmica.

Em trabalho desenvolvido por Gomes (2018), sobre a caracterização de revestimento aspergido termicamente por arco elétrico, foi determinada uma espessura média do recobrimento de $410 \pm 36 \mu\text{m}$.

1.8.2 Porosidades e redes de óxidos

Os revestimentos aspergidos termicamente são formados por superposição de partículas, e apresentam porosidade e rede de óxidos. A concentração percentual dessa característica depende do processo de aspersão utilizado. Os poros e fissuras são considerados passantes quando cruzam todo o revestimento, desde a superfície até o substrato, e não-passantes quando não chegam ao substrato (CREUSU, 1999). As cavidades podem ser isoladas ou interconectadas, permitindo o acesso de líquidos e gases ao substrato (MENEZES, 2007). A presença de porosidade e fissuras são falhas que podem gerar permeabilidade nociva do revestimento (BRITO, 2010). A Figura 8 mostra alguns defeitos comuns de uma camada aspergida.

Figura 8 – Esquema de defeitos comuns em um revestimento aspergido



A porosidade dos revestimentos aspergidos tende a aumentar nos processos realizados com baixas temperaturas e baixas velocidades de pulverização (MARANHO, 2006). Pesquisadores têm verificado que a escolha da técnica utilizada para a aspersão térmica também têm influencia significativa na porosidade dos revestimentos. Aqueles que são depositados pelo método de chama combustível de alta velocidade apresentam percentuais de porosidade menores do que os métodos por arco elétrico (VARAVALLO, 2008).

Gomes (2018) definiu em 5 % o percentual de porosidade e rede de óxidos de um revestimento aspergido por arco elétrico, valor próximo da média entre os limites de 2% a 10% para este método. O acabamento superficial do revestimento foi avaliado considerando a presença de poros abertos, com largura média 80 μm e profundidade média de 40 μm , revelando poros mais largos do que profundos. A geometria do defeito é um parâmetro importante que influencia no comportamento mecânico do revestimento (GOMES, 2018).

1.8.3. Densidade do revestimento

A densidade da liga metálica nos revestimentos está relacionada diretamente com a densidade da liga utilizada, associada com as descontinuidades inerentes ao processo de aspersão. Normalmente o revestimento depositado possui uma densidade menor do que aquela da liga que o constitui, devido à porosidade e à presença de óxidos inerente ao processo de aspersão (MARTINS e KEJELIN, 2012).

1.8.4 Microdureza Vickers

Hutchings e Shipway (1992) entendem que a dureza da superfície revestida deve ser 20% maior que a dureza das partículas erosivas. Divakar e colaboradores (2005) consideram que um aumento deliberado da dureza em detrimento da tenacidade, pode causar fraturas frágeis no impacto das partículas abrasivas. Segundo Costa (2012), as redes de óxidos em revestimentos pode aumentar o teor de óxidos entre lamelas e causar perda de coesão entre as camadas depositadas.

Diante desse contexto, Martins e Kejelin (2012) consideram que o uso de materiais para revestimento com dureza superior a dureza de partículas erosivas, tais como a sílica (~800HV), pode resultar em maior resistência ao desgaste por impacto

de partículas duras. Em trabalho recente Gomes (2018) calculou a microdureza Vickers do revestimento aspergido por arco elétrico como 1115 HV, ou seja, 35% maior que a dureza de 825 HV das cinzas que impactam o revestimento.

1.8.5 Desgaste acelerado do revestimento por jateamento abrasivo

O Método de Teste Padrão para Realização de Testes de Erosão por Impacto de Partículas Sólidas usando Jatos de Gás pela norma ASTM G76-05 (2005) visa padronizar a determinação da taxa de perda de material por erosão, com jato de partículas sólidas arrastada por gás. Os usuários do método devem determinar a correlação dos resultados obtidos com os resultados de outros testes, para classificar a resistência à erosão de materiais sob condições de teste específicas. Algumas variantes dos ensaios são permitidas, quanto aos tamanhos de partículas abrasivas, e as velocidades e ângulos de ataque dos jatos, conforme características específicas requeridas.

Segundo a Norma ASTM G76-05 (2005), entende-se como erosão a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido ao impacto entre a superfície e um fluido ou sólido. O conceito da Taxa de Erosão de um material, quantificado em miligramas por grama (mg/g), está relacionado com a razão entre a massa erodida de uma amostra jateada, expressa em miligramas por minuto (mg/min), e o fluxo de massa do abrasivo jateado sobre a amostra, expresso em gramas por minuto (g/min), conforme é apresentado na Equação (1).

$$\text{Taxa de Erosão do Material (mg/g)} = \frac{\text{Erosão do Material}}{\text{Fluxo de Abrasivo}} \quad (1)$$

Quando a Taxa de Erosão (mg/g) é dividida pela densidade do material erodido, expressa em miligramas por milímetro cúbico (mg/mm³), encontra-se o valor da Taxa de Erosão Volumétrica, expressa em milímetros cúbicos por grama (mm³/g), conforme é apresentado na Equação (2).

$$\text{Taxa de Erosão Volumétrica (mm}^3\text{/g)} = \frac{\text{Taxa de Erosão do Material}}{\text{Densidade do Material}} \quad (2)$$

Ainda segundo a norma, uma configuração de amostra conveniente é uma peça retangular de 10mm por 30mm, mas amostras maiores podem ser usadas. A distância da extremidade do bico do jato até o centro da projeção do jato na superfície da amostra deve ser de 10mm. Condições de ensaio diferentes deverão ser especificadas claramente. Cada programa de testes deve incluir entre os materiais testados uma amostra do material de referência que é o aço SAE-1020, testado sob as mesmas condições da norma ASTM G76 (2005).

No desgaste erosivo de uma superfície dúctil, pode ocorrer uma deformação elástica ou uma deformação plástica, dependendo do limite de escoamento do material. No desgaste de materiais frágeis, diferentes modos de formação de trincas contribuem para a perda de material por erosão (HUTCHINGS, 1974). Quando partículas duras se chocam com uma amostra de material frágil, ocorre o crescimento de trincas radiais em torno dos danos causados na superfície frágil (FINNIE, 1979). Em seu trabalho, Bertuol (2014) tratou o aço inoxidável ASTM A743 com jateamento abrasivo visando estudar a influência do processo na microdureza do material, onde observou um acréscimo médio de 17% na dureza superficial.

Segundo Wang (1999), o desgaste erosivo é função também do tipo de abrasivo empregado, onde constituintes mineralógicos de alta dureza e formas angulares promovem elevado desgaste. Segundo estudos de Kulu e Zimakov (2000), a rugosidade e a morfologia da superfície afetam fortemente sua resistência ao desgaste por jateamento abrasivo, e revestimentos com porosidade maior que 5% podem perder consideravelmente sua resistência ao desgaste. Segundo Vicenzi e colaboradores (2003) muitos são os fatores responsáveis pelo processo de erosão, tais como, ângulos de ataque, velocidade das partículas, temperatura, ambiente corrosivo, densidade, morfologia e dureza das superfícies atacadas.

Martins e Kejelin (2012) estudaram ligas metálicas comerciais à base de cromo e níquel, na busca por boas propriedades de resistência contra o desgaste abrasivo em temperaturas elevadas. Após a aplicação dos revestimentos, foram avaliadas a microdureza, a porosidade, e a resistência ao desgaste erosivo por partículas sólidas projetadas perpendicularmente às superfícies das amostras. A liga comercial SM-8297, com dureza de 1044 HV e porosidade de 11,5%, apresentou alta taxa de erosão, equivalente a 0,074 mg/g. O Inconel-625, com dureza de 339 HV e porosidade de 3,5%, apresentou taxa de erosão de 0,033 mg/g. A liga AISI-420, com dureza de 508 HV e porosidade de 2,1%, apresentou taxa de erosão de 0,022 mg/g. Os

resultados mostraram que a dureza não deve ser um guia único para a seleção do material para revestimentos aspergidos, onde a porosidade também tem importância sobre a resistência à erosão.

1.8.6 Difusividade térmica do conjunto substrato-revestimento

A Difusividade Térmica (a) é uma propriedade específica do material, que define o quão rapidamente ele reage às mudanças de temperatura do seu entorno, e como o calor se difunde no material. A difusividade depende da condutividade térmica (λ), que é definida pela velocidade de condução do calor no interior do material, do calor específico (c_e), definido pela quantidade de energia térmica necessária para modificar a temperatura de determinada massa do material, e da massa específica (ρ). A partir da difusividade pode ser calculado o coeficiente de condutividade térmica (λ), com base na Equação 3 (<https://www.netzsch.com.br>, acesso em 14/03/2018).

$$\lambda (T) = \rho (T) \cdot c_e (T) \cdot a (T) \quad (3)$$

Onde:

$\lambda (T)$ = condutividade térmica (W/m·°C) em função da temperatura

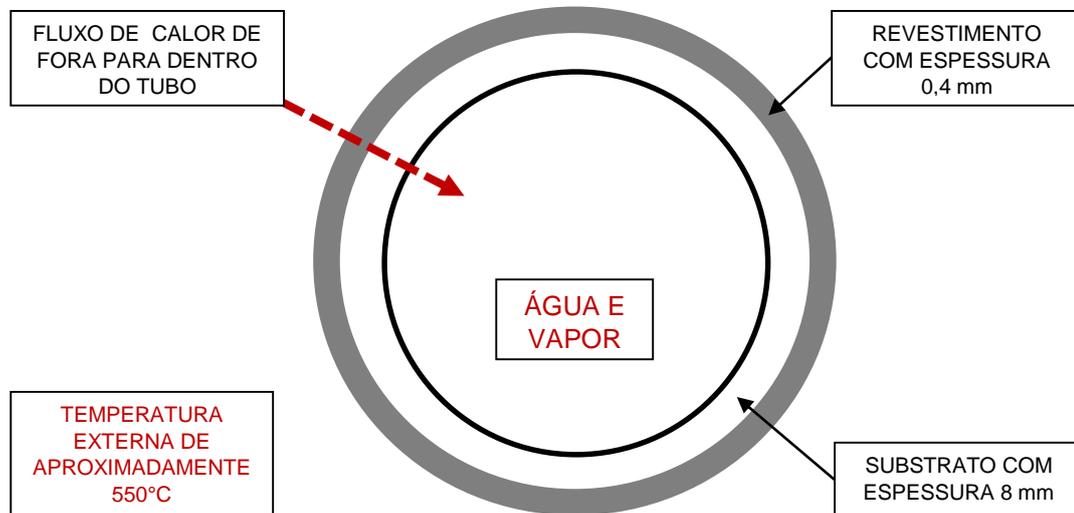
$\rho (T)$ = massa específica (kg/m³) em função da temperatura

$c_e (T)$ = calor específico (J/kg·°C) em função da temperatura

$a (T)$ = difusividade térmica (m²/s) em função da temperatura

Um material adequado para revestimento de tubos trocadores de calor não deve alterar de forma significativa a difusividade térmica do conjunto substrato-revestimento, em relação ao material original do tubo. Segundo a empresa Netzsch (<https://www.netzsch.com.br>, acesso em 14/03/2018), fabricante de equipamentos medidores de difusividade térmica, entende-se que revestimentos podem alterar as propriedades térmicas do projeto original dos tubos trocadores de calor de caldeiras, o que torna necessário o recálculo da difusividade do conjunto substrato-revestimento, após a deposição do material sobre a parede da tubulação. A Figura 9 ilustra uma parede composta por materiais dissimilares, com 8 mm de espessura do material original do tubo e 0,4 mm de revestimento de liga metálica.

Figura 9 – Esquema do tubo revestido com a direção do fluxo de calor



Fonte: O Autor, 2018.

Uma parede constituída de material com alta difusividade, aquecida em uma das faces, se aquecerá mais rapidamente na outra face do que uma parede de material de baixa difusividade, para uma mesma área e uma mesma espessura de parede (<https://www.netzsch.com.br>, acesso em 14/03/2018). A Tabela 7 apresenta a massa específica e as propriedades térmicas de dois tipos de aços.

Tabela 7 – Propriedades termofísicas do aço inoxidável e do aço carbono

Material	Condutividade térmica (W/m.K)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Difusividade térmica (m ² /s)
Aço 5%Cr-13%Ni	20	7.857	465	5,6 x 10 ⁻⁶
Aço 0,5 % de C	54	7.833	465	14,7 x 10 ⁻⁶

Fonte: O AUTOR, 2018 e ÖZISIK, 1993

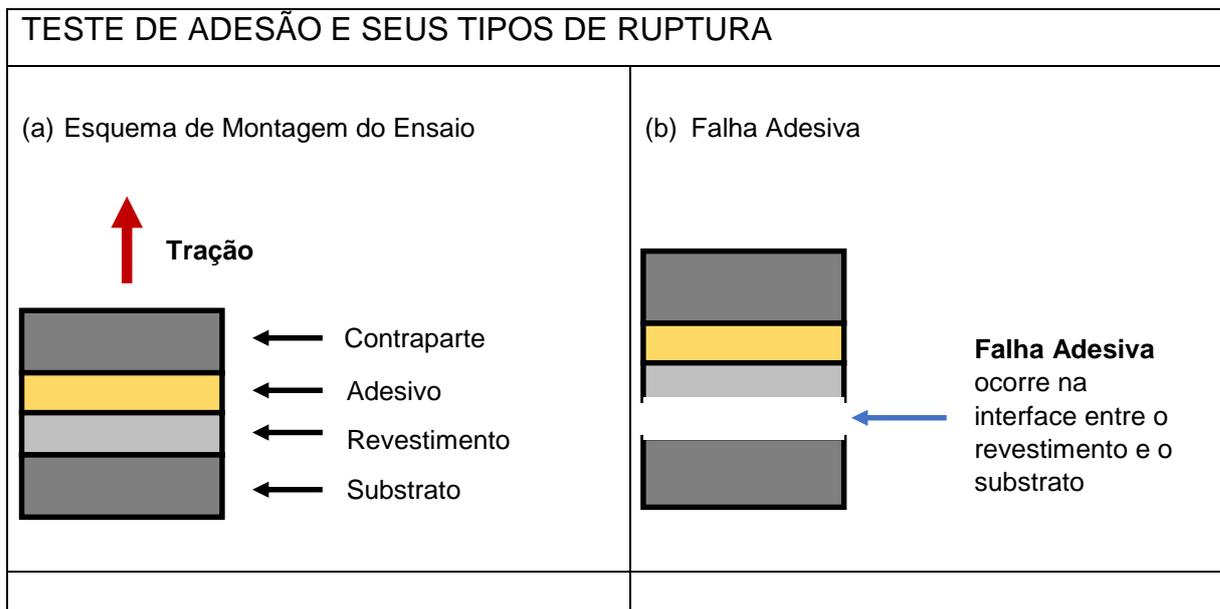
Segundo a norma ASTM E1461 (2013) do Método de Teste para Difusividade Térmica por Método Flash, as amostras para uso nos equipamentos medidores de difusividade térmica devem possuir pouca espessura e ter as superfícies preparadas com as faces planas e paralelas, para minimizar as incertezas de medição. Entretanto,

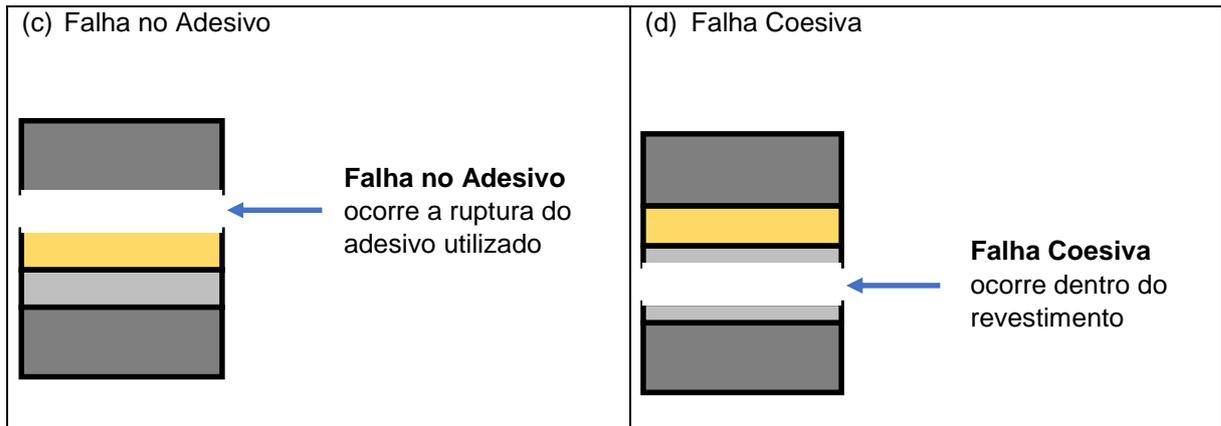
as amostras devem ser espessas o suficiente para serem representativas do material de teste, com superfícies isentas de crateras, arranhões e marcações. No caso de materiais refletivos, deve ser aplicada uma camada fina de grafite por pulverização (*spray*) nas duas faces de cada amostra, para aumentar sua capacidade de absorver a energia aplicada.

1.8.7 Adesão do revestimento ao substrato

A metodologia descrita pelo Método de Teste Padrão para Força de Adesão ou Coesão de Revestimentos de Pulverização Térmica da norma ASTM C633-01 (2001) visa padronizar a forma de obtenção da força de adesão de um revestimento com o substrato, por uma tensão de tração normal às superfícies de interface, em coberturas aplicadas por pulverização térmica. O método não deve ser usado para determinar se um valor medido da força de adesão resistirá a condições específicas, mas para comparar forças de adesão em diferentes ensaios de materiais. A Força de adesão ou coesão é calculada pela carga máxima atingida dividida pela área da seção transversal na interface avaliada. A falha de adesão do revestimento é aquela que ocorre quando a ruptura se dá totalmente na interface do revestimento-substrato, e é considerada falha coesiva se esta ocorre dentro do revestimento. A Figura 10 mostra ilustrações dos possíveis modos de falha.

Figura 10 – Esquema dos tipos de ruptura possíveis no ensaio de adesão





Fonte: O Autor, 2018

A preparação do substrato para aplicação do revestimento é a etapa mais crítica para a resistência a adesão ao substrato (SILVA, 1981).

Em seus estudos, Barrera e Lima (2003) testaram a adesão ao substrato de um revestimento de carboneto de tungstênio (WC-17Co) segundo a norma ASTM-C633, que foi depositado por aspersão térmica, pelo método HVOF, onde conseguiram uma tensão de adesão média de 57 MPa para o revestimento depositado em substrato preparado com abrasivo novo, e de 28 MPa para o revestimento depositado sobre superfície preparada com abrasivo usado, utilizando os adesivos Scotch Weld EC-2214 e DP-460, ambos da 3M.

Varavallo e colaboradores (2008) testaram dois revestimentos metálicos depositados por HVOF, pelo método de tração vertical segundo a norma ASTM-C633, em que a tensão de adesão do revestimento de Stellite 6 PM SD 38 EF foi de 54 MPa, e a do revestimento 1342-VM foi de 60 MPa, utilizando um adesivo Scotch Weld DP-460 (3M) previamente testado com 63 MPa de adesividade.

A norma da Petrobrás N-2568 (2011) sobre revestimentos metálicos por aspersão térmica fixa requisitos para a deposição sobre substratos metálicos, comumente aplicados para a manutenção de tubulações e equipamentos, e aprova revestimentos de aço inoxidável depositados por aspersão térmica a arco elétrico que apresentem tensão de adesão média de 14 MPa, com valor mínimo de 10 MPa.

No trabalho publicado por Gomes (2018), a análise do revestimento aspergido por arco elétrico mostrou a presença de óxidos de alumínio na interface do substrato com o revestimento, o que pode provocar perda de adesão, e de porosidades no revestimento, que podem provocar perda de coesão, devido a diminuição da área de contato entre as lamelas do revestimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Análise do substrato utilizado

O substrato utilizado como base para a aplicação do revestimento foi obtido a partir de uma chapa de aço com 8 mm de espessura nominal, fornecida pela Arcelor Mittal. A escolha do material foi baseada na semelhança da sua composição química com aquela dos tubos comumente usados em caldeiras de centrais termelétricas e trocadores de calor, e que possuem classificação ASTM A178 (2012). A Tabela 8 apresenta a composição química do material, de acordo com informações do fornecedor.

Tabela 8 – Composição química do substrato a ser revestido.

	Manganês	Carbono	Cromo	Fósforo	Enxofre	Ferro
Substrato	1,17 %	0,17%	0,17%	0,019%	0,0027%	Balance

Fonte: ARCELORMITTAL, (<http://brasil.arcelormittal.com.br>, acesso em 04/03/2018).

Antes do processo de aspensão térmica, a superfície do substrato recebeu uma preparação por jateamento abrasivo com óxido de alumínio G16/20 angular, composto por partículas de 0,8 a 1,2 mm (<https://www.vitalianocosta.pt>, acesso em 08/08/2017). O jato conferiu à superfície uma rugosidade superficial de 26 μm , medida com rugosímetro analógico da marca Elcometer modelo Ry-5, com faixa de medição de 1 mm e resolução de 1 μm .

2.2 Aplicação do revestimento

A escolha dos arames consumíveis da liga denominada A resultou em uma composição química para o revestimento definida pelo fabricante conforme descrito na Tabela 9.

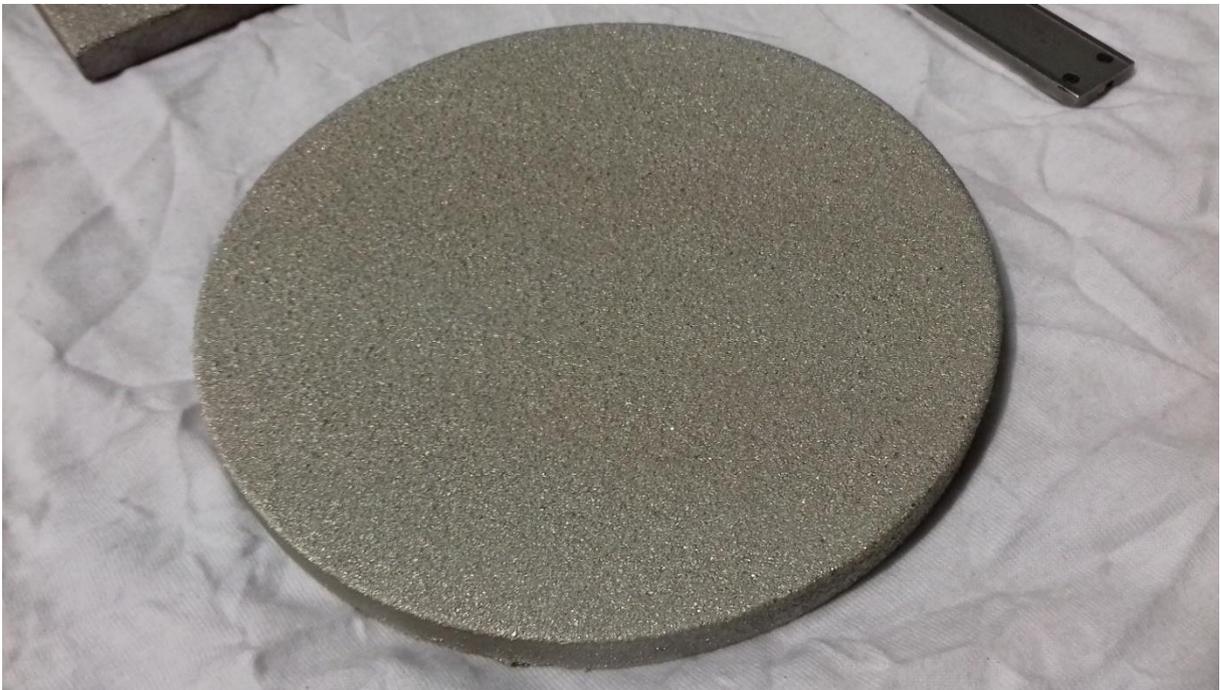
Tabela 9 – Composição química do arame de Liga A para o revestimento.

	Cr	Nb	Ni	B	Al	Mn	Si	Fe
Liga A	13,2 %	6,0 %	5,5 %	4,2 %	2,0 %	1,3 %	1,2 %	Balanço

Fonte: Dados fornecidos pela empresa VGK, 2017.

A deposição do arame de Liga A foi feita imediatamente após o jateamento, para evitar a oxidação do substrato. A aplicação consistiu de varreduras com a pistola de aspersão térmica ao longo do material. A técnica de arco elétrico foi escolhida e utilizada pela empresa parceira VGK, devido à viabilidade do uso dos equipamentos de aplicação nas futuras condições de uso dentro de caldeiras aquatubulares. Os parâmetros de aspersão para o arco elétrico foram escolhidos pela própria empresa. Foi utilizada uma tensão de 30 volts com corrente de 100 amperes no equipamento para aspersão térmica a arco elétrico modelo TAFA 8835. A pressão do ar comprimido para atomização das partículas fundidas da Liga A foi de 480 kPa. A deposição foi realizada em apenas uma face do substrato e aplicada a uma distância de 100 mm entre o bico da pistola de aspersão e a peça. A espessura do revestimento, escolhida pela empresa VGK como um valor entre 400 e 500 μm , foi obtida pela velocidade de varredura e pelo número de passes realizados pelo operador, com uma taxa de deposição programada em 5 kg/h. A Figura 11 mostra uma peça após o revestimento com a Liga A, com dimensões 8,60 mm x 127 mm x 127 mm.

Figura 11 – Aspecto do revestimento de Liga A depositado sobre o substrato.



Fonte: O Autor, 2018

2.3 Ensaio de desgaste por jateamento abrasivo

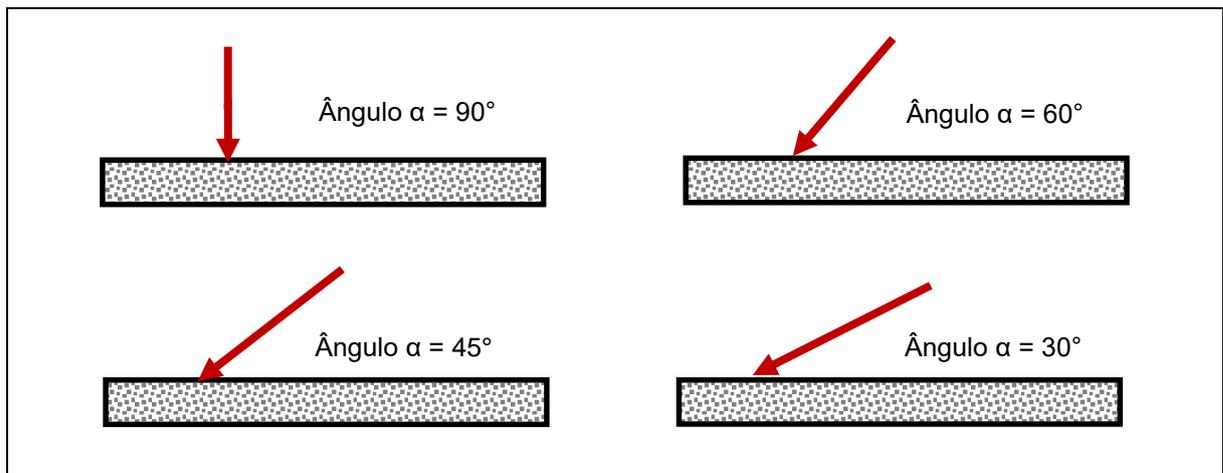
O ensaio de desgaste por jateamento abrasivo foi feito com base no Método de Teste Padrão para a Condução de Testes de Erosão por Impacto de Partículas Sólidas Usando Jatos de Gás da norma ASTM G76 (2005). O objetivo foi apresentar um método de avaliação da perda de material, simulando o que ocorre nas paredes dos tubos das caldeiras em decorrência do impacto das cinzas do carvão mineral ao longo do tempo. Para tanto, nove amostras foram preparadas em cortadeira metalográfica marca Arotec modelo Arocor 80, a saber:

- uma amostra de aço SAE-1020 sem revestimento, com dimensões de 6,60 x 20 x 36 mm, preparada para a calibração da velocidade do jato;
- seis amostras revestidas com a Liga A, com dimensões de 8,60 x 15 x 40 mm, preparadas e identificadas com os códigos J1, J2, J3, J4, J5 e J6;
- duas amostras de material do substrato sem revestimento, com dimensões de 8,15 x 15 x 40 mm, sendo a primeira identificada por J7 com a superfície conforme recebida e a segunda identificada por J8 com superfície preparada com valor de rugosidade próximo a superfície do revestimento.

Para o início dos testes de jateamento abrasivo em laboratório foram feitos ensaios em corpos de prova de aço SAE-1020, de material idêntico ao usado para obtenção das taxa de erosão descritas na norma ASTM G76 (2005), que é referência para a padronização dos resultados. O fluxo e a velocidade das partículas abrasivas foram ajustados no equipamento de jato com uso de partículas de 50 µm de óxido de alumínio projetadas a 90° e com velocidade de 30 m/s, conforme definido no corpo da referida norma. A utilização destes parâmetros nos ensaios realizados pelos laboratórios credenciados pela ASTM resultou em uma taxa de erosão volumétrica de $2,734 \times 0,001 \text{ mm}^3/\text{g}$ para o aço SAE-1020, o que corresponde a taxa de erosão 0,021 mg de material erodido por grama de abrasivo jateado. Este valor passou então a ser a meta de taxa de erosão buscada no momento da calibração da pressão de trabalho a ser usada para todos os jateamentos na sequência dos ensaios. Foram utilizados diversos corpos de prova de aço SAE-1020 até que se chegasse a esse valor de taxa de erosão por meio da regulagem da pressão do fluxo de ar entre o compressor e a câmara de jato. O ensaio prosseguiu com a pesagem das amostras em balança analítica do fabricante Marte, modelo AY220, com capacidade para 220 gramas e resolução de 0,0001 grama.

Os ensaios utilizaram partículas abrasivas de 50 μm em quatro amostras revestidas, aplicando-se os ângulos de ataque de 90°, 60°, 45° e 30°, e partículas de 125 μm em outras duas amostras revestidas, aplicando-se os ângulos de ataque de 90° e 45°. Entende-se como ângulo de ataque, aquele formado entre a direção da projeção do centro do jato e a superfície da amostra no ponto de impacto. A Figura 12 ilustra os quatro ângulos de ataque utilizados no jateamento das amostras.

Figura 12 – Esquema dos ângulos de ataque do jato abrasivo sobre as amostras



Fonte: O Autor, 2018.

Cada amostra foi submetida ao ensaio de jateamento em câmara de jato de bancada da marca Essence modelo Precision, com aberturas para manipulação das amostras e dispositivos. Dentro da câmara, um suporte para o bico de jato com regulagem angular permitia a montagem do bico nos ângulos já mencionados de 30, 45, 60 e 90 graus, sempre respeitando a distância de 10 mm entre a extremidade do bico e o ponto de impacto projetado na amostra, conforme estabelecido na norma ASTM G76 (2005). Um compressor de ar da marca Schulz modelo CSL10BR acoplado a câmara de jato, com capacidade de compressão de 800 kPa, possuía regulador para estabelecer a pressão de trabalho no bico de jato. As partículas abrasivas eram de óxido de alumínio (Al_2O_3) com granulometria de 50 μm da marca Renfert (www.renfert.com, acesso 04/11/2017) e 125 μm da marca Defama (www.defama.com.br, acesso 04/11/2017), ambas com pureza de 99,5%, segundo os respectivos fabricantes.

O tempo determinado para a exposição de cada amostra ao jateamento foi de 24 minutos, medidos com precisão de 1 segundo. Para a amostra revestida e submetida ao jato raso de 30°, foi programada somente uma impressão de 24 minutos.

Entende-se aqui como impressão uma área da superfície da amostra que foi erodida pelo jato abrasivo, sem que houvesse deslocamento do bico de jato ou da amostra, durante o tempo de impacto pelas partículas abrasivas. Para as amostras revestidas e submetidas aos jatos a 45° e 60° foram programadas duas impressões de 12 minutos cada, e para as amostras revestidas e submetidas ao jato a 90° foram programadas três impressões de oito minutos cada. O número maior de impressões com tempos menores de exposição ao jato nas amostras impactadas com ângulos de ataque maiores foi necessário para que o jato não chegasse ao substrato em nenhuma das amostras revestidas, uma vez que ângulos maiores apresentaram maior erosão, e conseqüentemente maior profundidade nas impressões. Para as amostras do aço SAE-1020 (calibração) e as outras duas amostras sem revestimento, ainda que atacadas com jatos perpendiculares, foram determinadas impressões únicas de 24 minutos para cada peça, uma vez que não havia revestimento, e o jato incidente iria erodir somente o aço, não fazendo transição entre dois materiais diferentes. A análise do desgaste é feita sempre sobre somente um material em cada amostra. Terminado o jateamento das amostras, todas foram submetidas a limpeza por ultrassom, imersas em acetona com pureza analítica por 10 minutos, com a finalidade de remover partículas de alumina ou quaisquer outros resíduos agregados no material. Após a secagem, as amostras erodidas foram pesadas novamente em balança analítica, para procedimento do cálculo da taxa de erosão. Ainda segundo a norma ASTM G76 (2005), durante os ensaios também é previsto algum desgaste do orifício do bico de jato, cujo aumento do diâmetro interno não deve exceder 10% em relação ao seu diâmetro na calibração. Para controlar possíveis alterações na velocidade das partículas devido a este aumento, os fluxos de partículas foram verificados após cada amostra ensaiada. Para tanto, uma porção de partículas era jateada em um vasilhame estanque por 1 minuto, e verificado seu peso. A taxa de erosão era então calculada com base na taxa atualizada de fluxo do abrasivo.

2.4 Ensaio de difusividade térmica

O Ensaio de Difusividade Térmica foi realizado nos laboratórios do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) de acordo com o Método de Teste Padrão para Difusividade Térmica pelo Método Flash da norma ASTM E1461 (2013), utilizando quatro amostras.

As quatro amostras de substrato com revestimento de Liga A foram cortadas nas dimensões de 12,70 x 12,70 mm e identificadas por D1, D2, D3 e D4. Em seguida foram desbastadas com o disco da cortadeira metalográfica Arotec modelo Arocor 80, e lixadas com lixas metalográficas até adquirirem espessuras entre 1 e 2 mm, adequadas para uso no equipamento de ensaio de difusividade térmica.

As amostras foram preparadas com faces paralelas, para evitar incertezas nos resultados, e com as espessuras de 1,11 mm, 1,74 mm, 1,92 mm, e 2,08 mm. O desbaste das amostras a partir da espessura de 8,60 mm (espessura substrato + revestimento) foi feito sempre pelo lado do substrato, de forma a manter as espessuras médias de 0,41 mm dos revestimentos da Liga A, calculadas no trabalho de Gomes (2018). Após atingir a espessura final, foi feita a limpeza por ultrassom, com acetona de pureza analítica. A Figura 13 mostra o posicionamento das amostras para a realização do ensaio de difusividade térmica.

Figura 13 – Amostras montadas no chassi para introdução no equipamento de medição da difusividade térmica

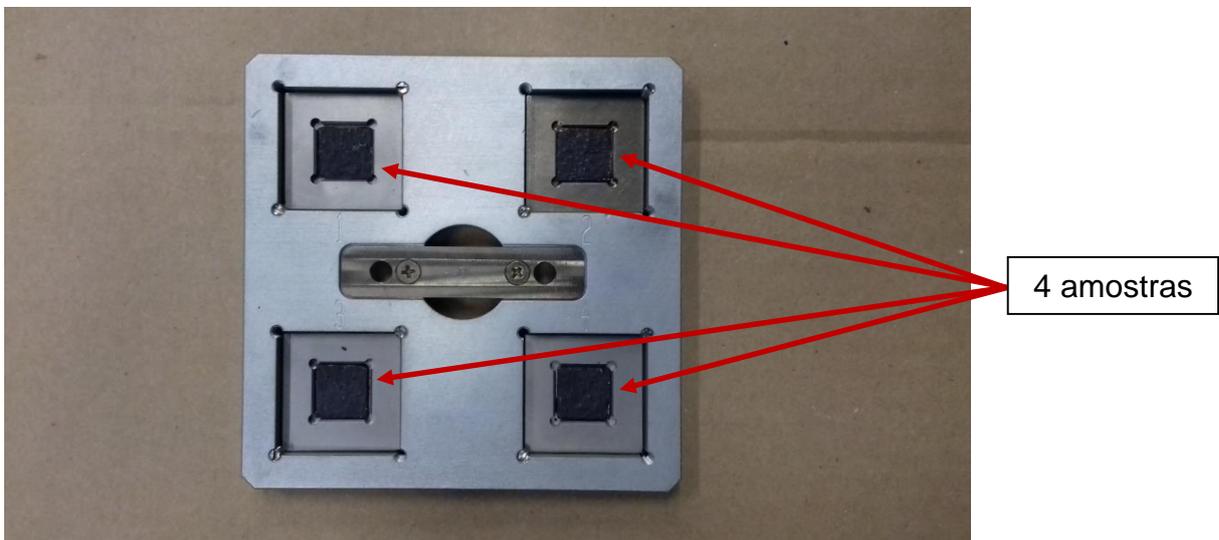


Foto: O Autor, 2018

Pelo fato das amostras serem de materiais refletivos, uma fina camada de grafite da marca Farnell (<https://uk.farnell.com/kontakt-chemie>, acesso 14/03/2018), tipo Graphit 33, foi pulverizada de maneira uniforme em ambas as faces das amostras, com a finalidade de melhorar a absorção da energia aplicada.

As amostras foram submetidas ao ensaio de difusividade térmica pelo equipamento da marca Netzsch modelo LFA 447 e segundo a norma ASTM E1461 (2013), em ambientes devidamente climatizados. O relatório do equipamento fornece o valor do coeficiente de difusividade térmica (α). Com base nas espessuras das paredes compostas do substrato-revestimento, e dos coeficientes de difusividade térmica das amostras, foi possível estabelecer relações em gráfico para melhor visualização das informações obtidas.

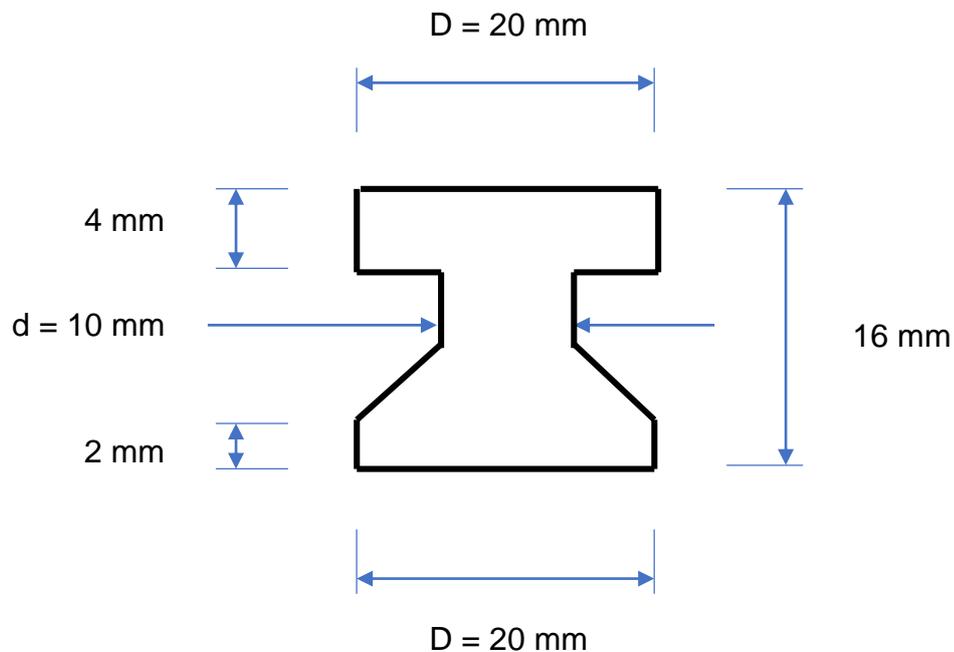
2.5 Ensaio de adesão do revestimento

O Ensaio de Adesão foi orientado pelo Método de Teste Padrão para Adesão ou Força de Coesão de Revestimentos por Pulverização Térmica da norma ASTM C633 (2001), que pode ser aplicada no caso de revestimentos obtidos por aspersão térmica a arco elétrico. O ensaio prevê a junção do corpo de prova com uma contraparte por meio de substância adesiva. A contraparte se apresenta na forma de um carretel adaptável à máquina de ensaio do tipo *pull-off*. Neste método o carretel de contraparte está colado à superfície da amostra e sujeito à uma tensão de tração pela máquina de teste por meio de dispositivo próprio, que provoca uma ruptura no adesivo ou de um revestimento em teste. Os ensaios de adesão do tipo *pull-off* tiveram como objetivo definir a força de adesão do revestimento com o substrato, e foram programados em duas etapas.

Na primeira, um teste preliminar utilizou duas amostras de aço sem revestimentos e quatro carretéis de liga de alumínio como contraparte, estes com rugosidade superficial de 27 μm . No ensaio, a ruptura ocorreu de forma simultânea no adesivo e nas cristas dos perfis de rugosidade da superfície do carretel. Pequenas partículas do carretel se soltaram e ficaram incorporadas no adesivo, sendo visíveis com a vista desarmada e mais evidentes no microscópio ótico. Essa fratura prematura dos pontos frágeis da superfície do carretel fez a área de colagem diminuir e precipitar a ruptura do adesivo. Os resultados tinham a finalidade de avaliar o comportamento do adesivo Sikadur 32, e apontaram tensões de ruptura de 15,0 MPa para a amostra A1, e 8,0 MPa para A2, quando o fabricante do adesivo indicava 60 MPa de adesividade para a cura em 24 horas. Para a continuidade da primeira etapa dos testes, carretéis de aço SAE-1020 com melhores propriedades mecânicas do que aqueles de liga de alumínio foram fabricados com perfil de rugosidade superficial

maior, obtido por um jateamento abrasivo industrial, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema dos carretéis utilizados no ensaio de adesão



Fonte: O Autor, 2018

As amostras testadas foram duas chapas de aço (A3 e A4) fabricadas com o material do substrato sem revestimento, com dimensões $8,15 \times 100 \times 100 \text{ mm}$, e submetidas também ao jateamento industrial com partículas abrasivas de óxido de alumínio G16/20 angular com tamanho de $0,8$ a $1,2 \text{ mm}$ (www.vitalianocosta.pt, acesso em 08/08/2017), para adquirir perfil de rugosidade específico, e mais duas chapas de aço SAE-1020 sem revestimento (A5 e A6), e com dimensões de $6,35 \times 100 \times 150 \text{ mm}$. Desta vez foram utilizados os adesivos Sikadur 32 e DP-460, de modo a aumentar as chances de se obter uma tensão de adesividade maior. Para a colagem das amostras de teste nos carretéis de contraparte foram usados o Sikadur 32 da marca Sika (<https://bra.sika.com>, acesso em 27/04/2018) e o Scotch Weld DP-460 da 3M (<https://www.3m.com.br>, acesso em 26/07/2018). No caso do Sikadur 32, o fabricante indica que o adesivo apresenta uma força de adesão de 60 MPa após 24 horas de cura. No caso do adesivo epóxi Scotch Weld DP-460, o fabricante indica uma

força de adesão na superfície do aço laminado de 19,3 MPa após um tempo mínimo de 7 dias de cura.

Na chapa de 8,15 mm de espessura foram colados dois carretéis com o adesivo epóxi Sikadur 32 e dois colados com o adesivo epóxi Scotch Weld DP-460. Na chapa com espessura de 6,35 mm, foram colados quatro carretéis, sendo dois colados com Sikadur 32 e outros dois com a Scotch Weld DP-460. Assim como no teste com os carretéis de alumínio, o preparo do adesivo Sikadur 32 foi feito com a mistura dos componentes na proporção indicada pelo fabricante. Para tanto, foi utilizada uma balança analítica da marca Shimadzu modelo BL3200H, com capacidade de 3200 gramas e resolução de 0,01 gramas. Após a colocação do primeiro componente, a tara foi zerada e colocou-se o segundo componente, com peso pré-calculado de acordo com o peso do primeiro. Os componentes foram misturados e homogeneizados. Para o preparo do adesivo DP-460 não foi necessário o uso da balança analítica uma vez que o fabricante disponibiliza dispositivo próprio, que já mistura os dois componentes na saída do recipiente, na proporção correta. Justo antes da colagem, os carretéis foram submetidos a limpeza por imersão em acetona com pureza analítica durante 15 minutos, e posterior secagem. A colagem foi feita tomando-se as precauções necessárias para que não permanecesse qualquer bolha de ar no interior do adesivo, entre a amostra e o carretel de contraparte. Também foi removido o excesso de adesivo no entorno do seu diâmetro, de modo a não aumentar a área de colagem, além das superfícies delimitadas pelo diâmetro de 20 mm. A colagem ficou em espera por 13 dias na temperatura ambiente, respeitando aqueles tempos mínimos de cura definidos por ambos os fabricantes dos adesivos.

Após os resultados preliminares de medidas de força de adesão *pull-off* com as amostras sem revestimento, foram programados os ensaios com as amostras revestidas, coladas com o adesivo epóxi Scotch Weld DP-460, que obteve o melhor resultado nos ensaios preliminares. Os ensaios foram realizados com seis carretéis, sendo três carretéis em cada chapa. Foram aguardados 13 dias para a cura do adesivo, antes do novo ensaio.

Para testar a força de adesão do revestimento de liga A, foram utilizadas duas amostras revestidas (A7 e A8) com dimensões 8,60 x 100 x 100 mm. Como peças de contraparte (Figura 14), foram utilizados os carretéis de aço carbono SAE-1020 usinados com diâmetro de 20 mm na superfície de colagem e que também foram

submetidos ao jateamento com o oxido de alumínio G16/20 angular sobre sua área de contato.

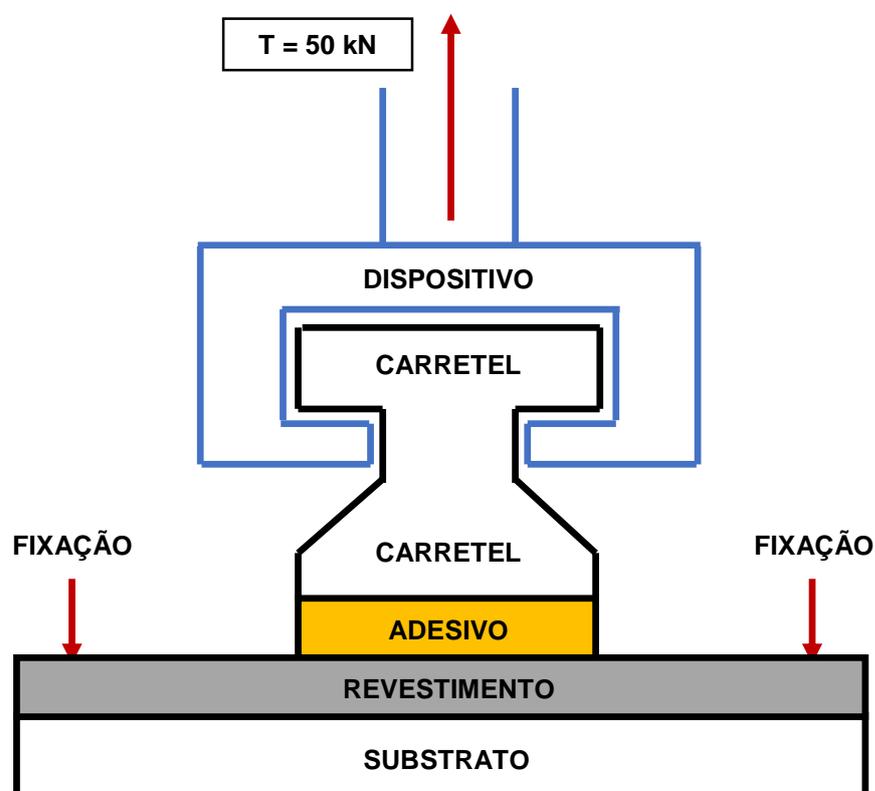
Todas as chapas e os carretéis foram submetidos a limpeza com jato de ar comprimido seco e conservados envoltos em sílica gel, para minimizar a presença de umidade e evitar corrosão antes dos testes de *pull-off*.

Todos os materiais (superfícies das amostras conforme recebidas, jateadas e revestidas) tiveram suas rugosidades medidas por um medidor de perfil digital da marca Elcometer, modelo 223, com faixa de medição de 0 a 1 milímetro e resolução de 1 μm .

A espessura de 0,41 mm do revestimento medido por Gomes (2018) atendeu ao requisito de espessura mínima de 0,38 mm recomendável pela norma ASTM C633 (2001) para que o adesivo não chegue ao substrato pela porosidade do revestimento.

O conjunto de teste compreendia um suporte para a amostra e outro para o carretel, que mantinham as faces paralelas e normais ao eixo de carregamento, conforme ilustrado na Figura 15. Os ensaios foram realizados em máquina de ensaio universal da marca EMIC modelo DL-30000, localizada no Laboratório de Propriedades Mecânicas do CEPEL, para medição da força de adesão pela carga de ruptura. A carga aplicada pela máquina nos ensaios foi de 50 kN com velocidade do atuador de 1 mm/minuto.

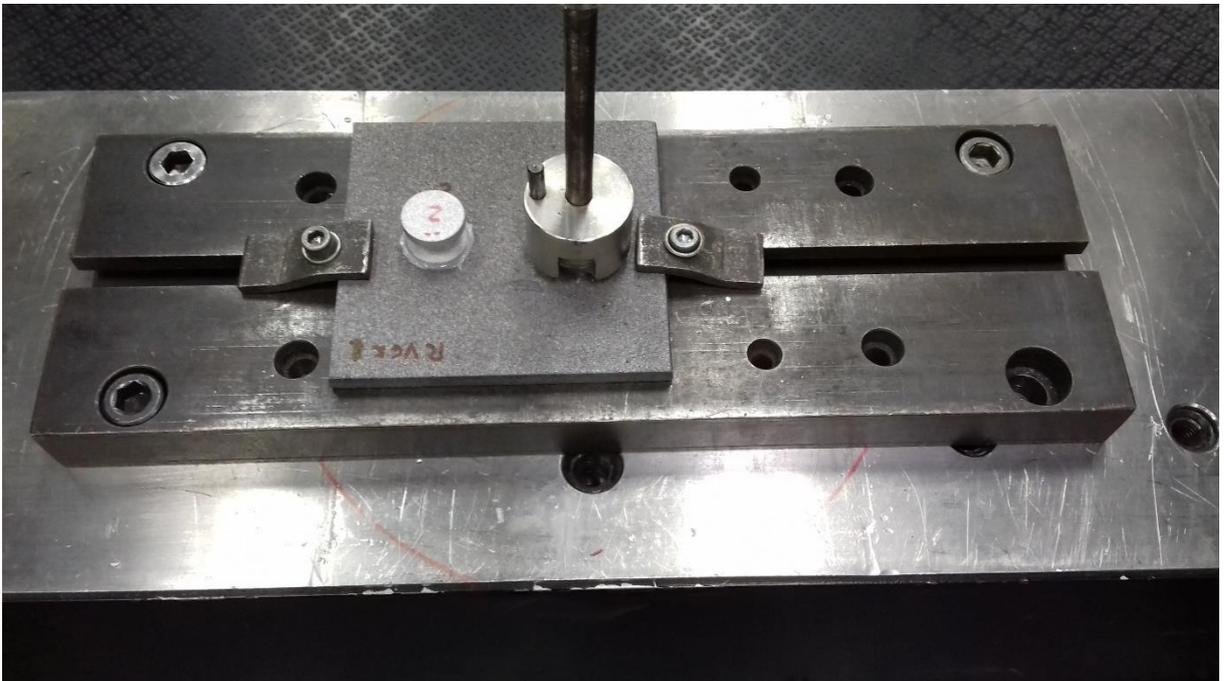
Figura 15 – Esquema de montagem do conjunto amostra-carretel-dispositivo



Fonte: O Autor, 2018

O conjunto do equipamento para tração possui programa de *software* que calcula a tensão de tração de ruptura com base na força registrada na máquina e na informação de entrada sobre o diâmetro da superfície de colagem do carretel. Na Figura 16 é possível observar à esquerda um carretel colado à superfície da amostra, e à direita o dispositivo para tração encaixado no carretel, que está colado à amostra conforme o da esquerda.

Figura 16 – Conjunto amostra-adesivo-carretel-dispositivo preparado para ensaio



Fonte: O Autor, 2018

Aspectos do arrancamento com eventual falha no adesivo foram analisados por microscopia óptica (MO) nos laboratórios do Cepel, através de um estereoscópio da marca Olympus modelo SZX71, e microscopia eletrônica de varredura (MEV) através de um Zeiss modelo EVO40, operando a 20 kV, com detector de elétrons secundários (SEI) e detector para espectrometria por dispersão de energia (EDS), para microanálise química semi-quantitativa de elementos presentes. Foi feita análise no MEV sobre a superfície delimitada por um dos carretéis, na região do arrancamento.

Foram feitas imagens com aumentos de 64x, 200x, 544x, a 20 kV, e mapeamento químico por EDS.

O revestimento fraturado e os resíduos do adesivo foram objeto de estudo segundo a norma ASTM C633 (2001), para definição de qual tipo de falha ocorreu, se adesiva, coesiva, ou se no adesivo. A quantificação das áreas de arrancamento foram realizadas através de processamento digital de imagem com uso do *software* Image J versão 2.00-68/1.52e (<https://imagej.net/downloads>, acesso em 04/09/2018).

2.6 Simulação térmica do revestimento

É comum na avaliação de materiais que trabalham em altas temperaturas, que os mesmos sejam submetidos a simulações térmicas. Uma vez que a temperatura de operação da caldeira da usina termelétrica referida neste trabalho está estabelecida em torno de 550°C (CAMPOS, 2017), esta foi a temperatura utilizada para simulação térmica do revestimento. Entretanto, para coleta de informações em temperaturas que eventualmente possam ultrapassar o valor de operação, foi feita uma simulação também a 800°C. A caracterização pós-aquecimento incluiu análise em microscópio óptico (MO) e ensaio de microdureza Vickers (HV). Para os testes de simulação térmica, duas amostras do aço revestido foram preparadas com corte por eletroerosão a fio, com dimensões 8,60 x 10 x 40 mm.

A primeira amostra, identificada por T1, foi colocada no forno da marca Quimis Mufla modelo 0318S25T, microprocessado, trabalhando com tensão de 220 volts, 6000 watts de potência, e programável até 1200°C. O forno foi aquecido até 550°C a partir da temperatura ambiente, com patamares de 20 minutos aos 400 e 500 graus. A amostra permaneceu na temperatura de 550 graus por 100 horas.

Em outra simulação, uma segunda amostra identificada por T2, também foi colocada no forno a temperatura ambiente, e aquecida até 800°C, com patamares de 20 minutos, aos 400, 500, 600 e 700 graus. A amostra permaneceu na temperatura de 800 graus por 100 horas. O resfriamento seguiu os mesmos patamares até a temperatura ambiente. Foi feita a espera de uma hora para a abertura do forno, e mais uma hora para a retirada da amostra.

Após simulações térmicas, as amostras foram submetidas às etapas de preparação metalográfica com lixamento manual com a sequência granulométrica de

lixas 100, 180, 220, 400, 600, 800 e 1200 mesh. Posteriormente, foi feito polimento com pastas de diamante nas granulometrias 3, 1 e $\frac{1}{4}$ μm , nesta ordem.

A amostra T1 foi observada em MO da marca Zeiss Axio Imager modelo M2m, que dispunha de placas motorizadas e sistema de aquisição digital de imagens. Foi utilizado o recurso da placa motorizada para gerar um mosaico com aproximadamente 7 mm de comprimento. A amostra T2 foi observada em MO da marca ZEISS Axio Imager modelo M1m, com sistema de aquisição digital de imagens. Apenas na amostra T2 foram feitas medidas de microdureza Vickers (HV) por um microdurômetro Pantec modelo MV-1000A, aplicando-se carga de 100 gramas por um tempo de 15 segundos. Sobre a face transversal do revestimento da amostra foram feitas 14 impressões, em uma grade de 5 por 3, cobrindo uma região próxima ao substrato, uma região intermediária, e uma região distante do substrato, de acordo com a Norma ABNT NBR NM ISSO 6507-1 (2008).

2.7 Características das superfícies das amostras submetidas aos ensaios de jateamento abrasivo e adesão

As superfícies das amostras submetidas aos ensaios de desgaste por jateamento abrasivo e ensaios de adesão foram classificadas em três diferentes tipos característicos, onde foram disponibilizadas três amostras, identificadas por S1, S2 e S3, representativas de tais superfícies. A amostra do aço do substrato conforme recebido, identificada por S1, não sofreu qualquer tratamento de superfície. A amostra do aço do substrato com rugosidade preparada, identificada por S2, foi submetida a um jato de produção industrial, para que fosse obtida uma rugosidade superficial semelhante às amostras revestidas. A amostra com revestimento aspergido de Liga A, identificada por S3, apresentou um perfil de rugosidade superficial ainda maior que S2, decorrente da superposição de lamelas no processo de aspersão térmica.

Para a avaliação quantitativa do perfil de rugosidade das superfícies foi utilizado um rugosímetro medidor de perfil digital da marca Elcometer modelo 223, com faixa de medição de 0 a 1000 micrometros e resolução de 1 micrometro. Na avaliação da microdureza Vickers das superfícies foi utilizado um microdurômetro da marca Pantec modelo MV-1000A, com carga de 100 gramas aplicada por 15 segundos.

Na caracterização qualitativa da topografia das superfícies das amostras, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de bancada da marca Hitachi

modelo TM-3000 tabletop microscope, com visualização de topografia por detector BSE no baixo vácuo e com aceleração de 5 kV.

As amostras S1, S2 e S3, que representaram as superfícies características das diferentes amostras utilizadas nos ensaios de desgaste por jateamento abrasivo e de adesão, foram preparadas nas dimensões de 8,15 x 15 x 40 mm.

2.8 Plano de Amostras

Devido à diversidade de amostras utilizadas, tornou-se conveniente apresentar um plano das amostras, que pudesse relacionar as superfícies estudadas com suas características de acabamento superficial e dureza. As amostras S1, S2 e S3 foram utilizadas para definir as características das superfícies das amostras submetidas aos ensaios de desgaste e de adesão. A Tabela 10 apresenta o tipo de superfície característico de cada uma das três amostra e os parâmetros medidos, de rugosidade superficial média (Ra) e microdureza Vickers (HV).

Tabela 10 – Parâmetros de avaliação das superfícies S1, S2 e S3.

Condição da Superfície	Amostra	Parâmetros Quantitativos Avaliados
Aço do Substrato Conforme Recebido	S1	- Rugosidade Superficial Média Ra (μm) - Microdureza Vickers (HV)
Aço do Substrato com Rugosidade Preparada	S2	- Rugosidade Superficial Média Ra (μm) - Microdureza Vickers (HV)
Revestimento Aspergido com Liga A	S3	- Rugosidade Superficial Média Ra (μm) - Microdureza Vickers (HV)

Fonte: O Autor, 2018

A seguir, a Tabela 11 apresenta a relação entre as amostras submetidas aos ensaios de jateamento abrasivo e adesão com o respectivo tipo de superfície que apresentam, se S1, S2 ou S3. A tabela mostra ainda que as amostras submetidas ao ensaio de difusividade térmica e a simulação térmica não apresentam relevância para o tipo de superfície.

Tabela 11 – Correspondência do tipo de superfície das amostras submetidas aos ensaios de desgaste abrasivo, difusividade térmica, adesão e simulação térmica com as superfícies características das amostras S1, S2, S3.

Ensaio Realizado	Condição da Superfície das Amostras			
	conforme S1	conforme S2	conforme S3	Não Aplicável
Desgaste por Jateamento Abrasivo	J7	J8	J1, J2, J3, J4, J5, J6	
Difusividade Térmica				D1, D2, D3, D4
Adesão do Revestimento		A1, A3, A4	A7, A8	A2, A5, A6
Simulação Térmica				T1, T2

Fonte: O Autor, 2018.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O revestimento composto pela Liga A tem a finalidade de cobrir e proteger as paredes externas das tubulações no interior de caldeiras aquatubulares. É importante ressaltar que alguns dados do revestimento, assim como da liga metálica utilizada na sua confecção, foram mencionados na revisão bibliográfica, quando abordado o trabalho de Gomes (2018). Algumas amostras do seu trabalho foram retiradas das mesmas peças revestidas de onde foram retiradas as amostras aqui estudadas. Desta forma, alguns resultados já publicados por Gomes (2018) na caracterização das cinzas do carvão mineral e do revestimento de Liga A foram considerados aqui como resultados obtidos, tais como, o tamanho das partículas de cinzas igual a $41 \pm 29 \mu\text{m}$, a espessura do revestimento com $410 \pm 36 \mu\text{m}$, o percentual de $5 \pm 2 \%$ da fração volumétrica da porosidade e rede de óxidos no revestimento, e a microdureza Vickers do revestimento medida em $1115 \pm 140 \text{HV}$.

3.1 Características das superfícies das amostras utilizadas

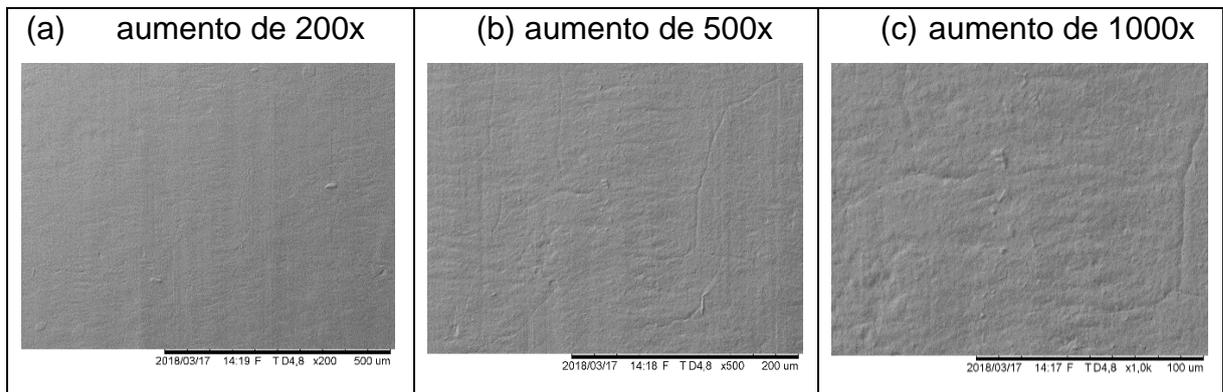
As propriedades das superfícies das amostras avaliadas neste trabalho são um assunto de extrema importância, uma vez que os resultados quantitativos dos experimentos relativos ao desgaste abrasivo-erosivo acelerado e ao ensaio de adesão do revestimento dependem deste fator.

Como já foi visto, as superfícies do aço do substrato conforme recebido, do aço do substrato com rugosidade preparada pelo jato de produção industrial e do revestimento aspergido com Liga A foram as superfícies estudadas para referência nos ensaios por jateamento abrasivo e de adesão ao substrato.

3.1.1 Aço do substrato conforme recebido

A superfície da amostra S1, sem qualquer tratamento mecânico na superfície, apresentou perfil de rugosidade superficial médio (R_a) igual a $8 \mu\text{m}$. Seu aspecto morfológico pode ser observado na Figura 17, como uma topografia relativamente suave e sem picos ou depressões elevados, quando comparadas às demais superfícies estudadas e que serão apresentadas na sequência.

Figura 17 – Imagens do acabamento superficial da amostra S1 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x.



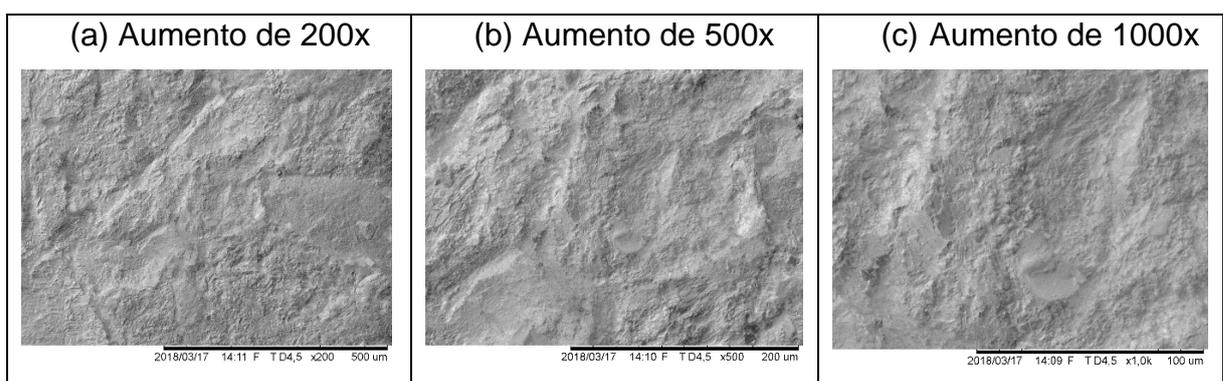
Fonte: O Autor, 2018

A dureza medida na seção transversal da amostra S1 foi de 187 ± 9 HV. Este valor médio foi obtido considerando medidas próximas à superfície, cujo acabamento é observado na Figura 16, e distante da superfície. As medidas de durezas foram muito próximas, o que pode ser observado pelo baixo valor do desvio padrão.

3.1.2 Aço do substrato com rugosidade preparada

A superfície da amostra S2 revelou um perfil de rugosidade superficial médio (Ra) igual a $43 \mu\text{m}$. O jateamento industrial foi realizado sobre o substrato aumentando em mais de cinco vezes a rugosidade medida em S1, com o intuito de equiparar a rugosidade gerada no processo de aspensão térmica. O aspecto morfológico pode ser observado na Figura 18, com picos e depressões mais elevados do que S1.

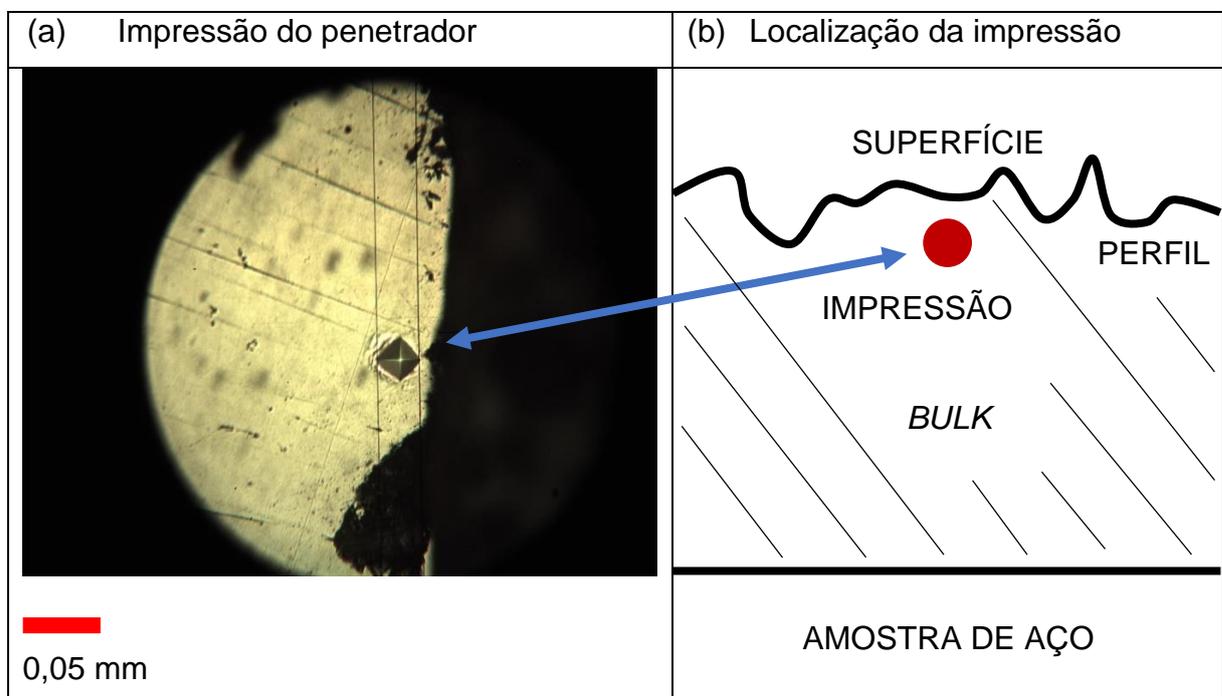
Figura 18 – Imagens do acabamento superficial da amostra S2 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x.



Fonte: O Autor, 2018

O valor da microdureza Vickers na seção transversal da amostra, próxima à superfície observada na Figura 17, foi de 264 ± 10 HV. Este valor foi 41 % maior que a dureza do substrato conforme recebido, provocado pelo encruamento da superfície após o jato industrial. Bertuol (2014) já havia concluído esse efeito em seus estudos com um tratamento por jateamento abrasivo no aço inoxidável, que produziu aumento médio de 17 % na dureza superficial. O aspecto de uma das impressões de dureza em S2 é ilustrado na Figura 19, com sua localização já dentro do perfil de rugosidade.

Figura 19 – Imagem de uma impressão obtida pelo penetrador de microdureza na região próxima à superfície jateada da amostra S2 com aumento de 600x.

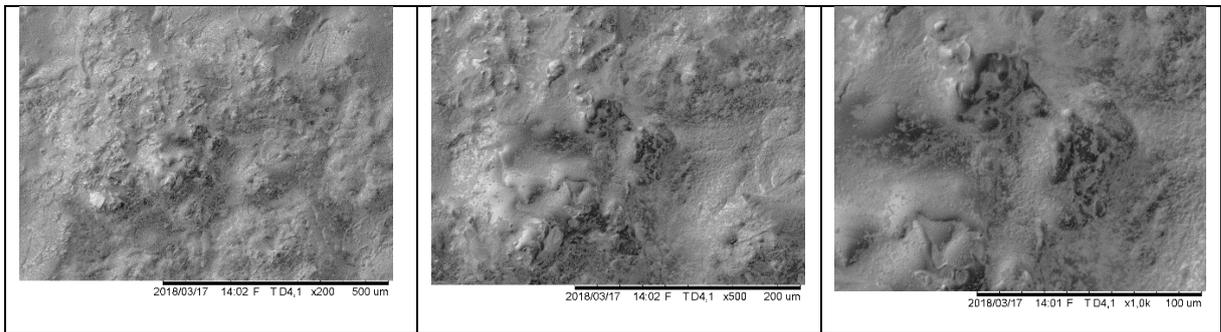


Fonte: O Autor, 2018.

3.1.3 Revestimento aspergido com a Liga A

A superfície da amostra S3 apresentou perfil de rugosidade superficial média (Ra) igual a $51 \mu\text{m}$, ou seja, cerca de seis vezes maior do que a do substrato conforme recebido e um valor de rugosidade próximo ao do substrato jateado industrialmente. O aspecto morfológico apresentado pela Figura 20 apresentou picos e depressões elevados em comparação com a superfície da amostra conforme recebida (amostra S1), porém mais arredondados e suaves que os da superfície da amostra de substrato submetido ao jateamento industrial (amostra S2).

Figura 20 – Imagens do acabamento superficial da amostra S3 obtidas pelo MEV nos aumentos de 200x, 500x e 1000x.



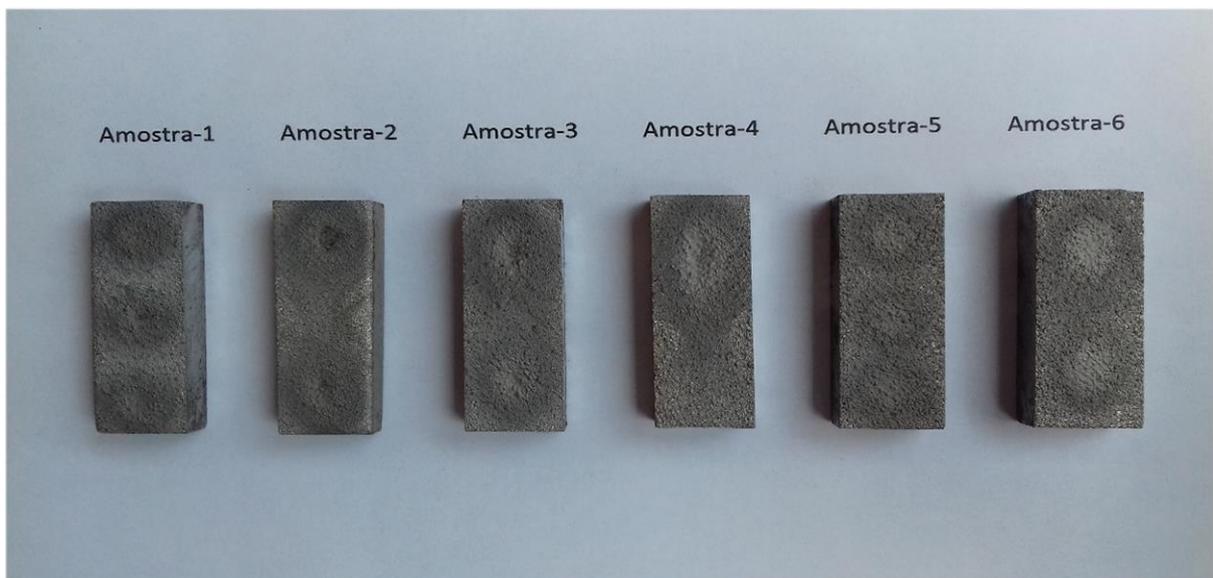
Fonte: O Autor, 2018.

O valor da microdureza do revestimento foi subsidiado pelo trabalho de Gomes (2018) com o valor de 1115 ± 140 HV. O revestimento de Liga A apresentou dureza seis vezes maior do que a dureza do substrato conforme recebido e cerca de quatro vezes maior do que a dureza da região encruada submetida ao jateamento industrial.

3.2 Taxas de erosão do desgaste acelerado por jateamento abrasivo

Foram utilizadas seis amostras revestidas para avaliação das taxas de erosão do revestimento, identificadas por J1, J2, J3, J4, J5 e J6, e que estão apresentadas em situação pós-jateamento na Figura 21.

Figura 21 – Amostras revestidas após o ensaio por jateamento abrasivo.



Fonte: O Autor, 2018.

A Tabela 12 apresenta as seis amostras revestidas com seus parâmetros de jateamento, microdureza, rugosidade superficial e taxas de erosão.

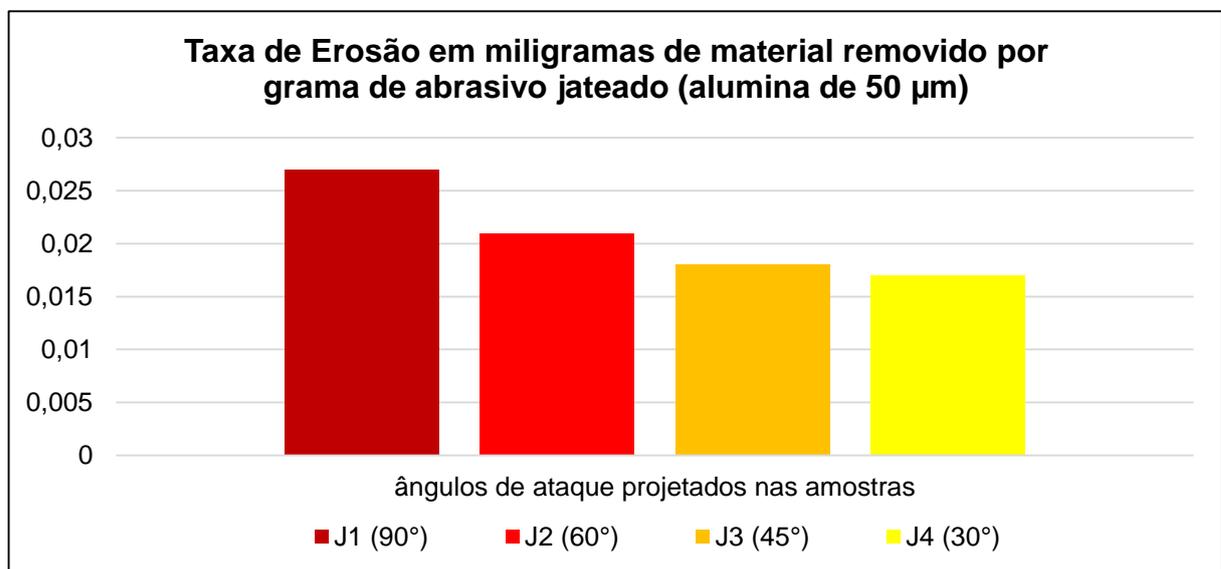
Tabela 12 – Parâmetros de jateamento e propriedades das amostras revestidas.

Amostra Revestida	Abrasivo (μm)	Ângulo de ataque ($^\circ$)	Microdureza Vickers (HV)	Rugosidade Ra (μm)	Taxa de erosão (mg/g)
Liga A (J1)	50	90	1.115	51	0,027
Liga A (J2)	50	60	1.115	51	0,021
Liga A (J3)	50	45	1.115	51	0,018
Liga A (J4)	50	30	1.115	51	0,017
Liga A (J5)	125	90	1.115	51	0,022
Liga A (J6)	125	45	1.115	51	0,014

Fonte: O Autor, 2018 e Gomes, 2018.

Algumas análises podem ser feitas em relação à Tabela 10, a respeito dos ângulos de ataque e da granulometria das partículas abrasivas utilizadas. Para analisar a influência dos ângulos de ataque sobre a taxa de erosão, foram selecionadas as amostras jateadas com partículas abrasivas de 50 μm . A amostra J1 (impactada a 90 $^\circ$) desgastou 31% mais do que J2 (60 $^\circ$), que desgastou 16% mais do que J3 (45 $^\circ$), que desgastou 8% mais do que J4 (30 $^\circ$). O Gráfico 1 ilustra os resultados.

Gráfico 1 – Efeito da variação dos ângulos de ataque sobre a taxa de erosão.

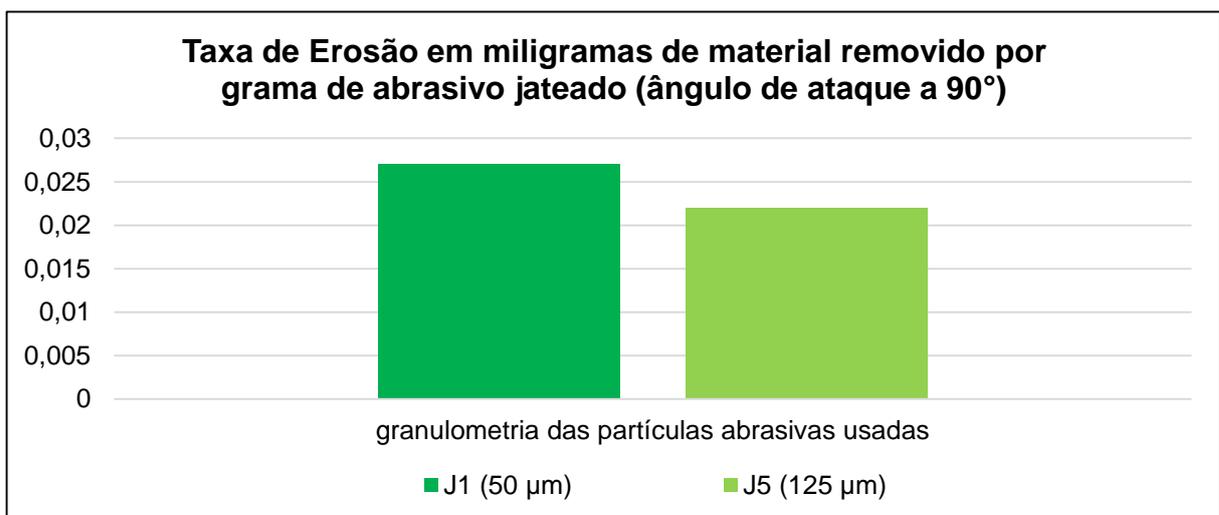


Fonte: O Autor, 2018.

Os resultados obtidos mostram que um maior ângulo de projeção das partículas sobre a amostra provocou aumento da taxa de erosão. As amostras J5 e J6, ambas submetidas ao jateamento com partículas abrasivas de alumina de 125 μm também mantiveram o mesmo comportamento em relação ao ângulo de ataque. A amostra J5 (90°) desgastou 56% mais do que J6 (45°), corroborando com a mesma lógica observada nos ensaios com a amostras impactadas pelas partículas de 50 μm , confirmada em duas situações diferentes. De acordo com Vicenzi e colaboradores (2003) os ângulos de ataque, morfologia e dureza das superfícies atacadas são fatores que influenciam o processo de desgaste.

Por outro lado, foi verificado também o efeito da granulometria da partícula abrasiva utilizada sobre as amostras. Foram selecionadas as amostras revestidas J1 e J5, que possuíam as mesmas características de dureza e rugosidade superficial, e que eram relacionadas pelo mesmo ângulo de ataque a 90°. A primeira foi atacada com abrasivo de 50 μm , e a segunda atacada com abrasivo de 125 μm . A peça J1 (50 μm) desgastou 27% mais do que J5 (125 μm). O efeito da mudança do tamanho da partícula abrasiva sobre a taxa de erosão do revestimento de Liga A é apresentado pelo Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 – Efeito da variação da granulometria do abrasivo sobre a taxa de erosão



Fonte: O Autor, 2018.

A observância de que a partícula abrasiva de menor tamanho provocou maior taxa de erosão pode ser confirmada quando são analisadas também as amostras J3 e J6, atacadas a 45°. A amostra J3 jateada com abrasivo de 50 µm apresentou taxa de erosão 30% maior que J6, atacada com abrasivo de 125 µm, indicando que o uso da alumina de 50 µm também desgastou mais o revestimento.

Durante os trabalhos de jateamento, e diante dos primeiros resultados, foi levantada uma questão sobre qual seria a influência do acabamento superficial sobre a taxa de erosão, pois a rugosidade superficial do revestimento das amostras é inerente ao processo de aspersão térmica. Nas amostras revestidas testadas essa rugosidade foi de 51 µm. Para avaliar a influência do acabamento superficial sobre a taxa de erosão, as amostras J7 e J8 foram preparadas sem revestimento, no mesmo aço do substrato, onde a primeira apresenta acabamento superficial do aço conforme recebido, e a segunda apresenta rugosidade superficial preparada, com perfil mais próximo da rugosidade do revestimento aspergido. A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados e os resultados obtidos para estas amostras.

Tabela 13 – Parâmetros de jateamento e propriedades das amostras não revestidas.

Amostra não revestida	Abrasivo (µm)	Ângulo de Ataque (°)	Microdureza (HV)	Rugosidade Ra (µm)	Taxa de erosão (mg/g)
Substrato (J7)	50	90	187	8	0,017
Substrato (J8)	50	90	264	43	0,024

Fonte: O Autor, 2018.

A amostra J8, com rugosidade superficial média igual a 43 µm, apresentou taxa de erosão 42% maior do que a amostra J7, com rugosidade superficial média igual a 8 µm, ainda que J8 tenha apresentado maior dureza do que J7. Os resultados mostram uma tendência que uma maior rugosidade superficial possa induzir maior desgaste abrasivo da superfície, ainda que poucas amostras tenham sido testadas.

A questão do tamanho da partícula abrasiva foi considerada porque este trabalho é desenvolvido sobre caldeiras que tiveram suas cinzas caracterizadas com tamanho médio de 41 ± 29 µm (GOMES, 2018). Assim, a escolha da partícula de alumina com 50 µm de granulometria foi considerada apropriada como referência para os efeitos erosivos que simulassem a situação real em caldeiras. Por outro lado, Martins e Kejelin (2012) estudaram os efeitos do jateamento com partículas abrasivas

de 160 µm para os revestimentos de três ligas comerciais também aspergidas pela técnica do arco elétrico. Para termos de comparação a amostra J5 foi jateada com partículas de alumina com 125 µm de tamanho. Os resultados são mostrados na Tabela 14, junto com as amostras J1 e J5 testadas aqui, também impactadas a 90°.

Tabela 14 – Comparação dos resultados obtidos pelo jateamento abrasivo da Liga A em relação a três revestimentos metálicos testados por Martins e Kejelin (2012).

Amostra Revestida	Abrasivo (µm)	Ângulo de Ataque (°)	Microdureza (HV)	Porosidade (%)	Taxa de erosão (mg/g)
Liga A (J1)	50	90	1115	5,0	0,027
Liga A (J5)	125	90	1115	5,0	0,022
AISI-420	160	90	508	2,1	0,022
Inconel-625	160	90	339	3,5	0,033
SM-8297	160	90	1044	11,5	0,074

Fonte: O Autor, 2018 e Martins & Kejelin, 2012.

O material do revestimento de Liga A, que contém 13 % de cromo e 6 % de níquel, tem composição química próxima do aço inoxidável austenítico AISI-301 (<https://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>, acesso em: 19.dez.2018). O revestimento SM-8297 testado por Martins e Kejelin (2012), com 26 % de carboneto de tungstênio e 13 % de cromo, apresentou elevada dureza (1044 HV), entretanto sua alta porosidade (11,5 %) pode ter sido responsável por um mal desempenho no jateamento abrasivo. O Inconel-625, com 58 % de níquel e 22 % de cromo, possuía baixa dureza relativa (339 HV), mas o menor percentual de porosidade (3,5 %), parece ter contribuído na sua resistência ao desgaste abrasivo. Dos revestimentos testados por Martins e Kejelin (2012), o que mostrou resultado mais parecido com a Liga A foi o revestimento obtido pela aspensão térmica do aço inoxidável AISI-420, com 13 % de cromo. Sua dureza foi em torno de metade da dureza da liga A aspergida (508 HV), e sua porosidade 2,5 vezes menor (2,1%). Assim, pode-se concluir que não só a dureza do revestimento é importante frente ao desgaste erosivo de partículas impactantes, mas também a porosidade. Esta última, provoca um efeito deletério na referida resistência, conforme já mostrou a literatura.

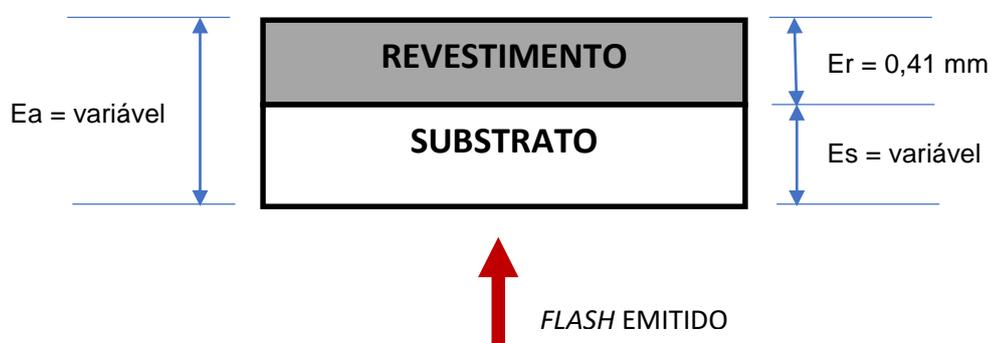
Com base em todos os resultados obtidos para o jateamento abrasivo, pôde-se observar que o revestimento está sujeito a um desgaste maior para ângulos de ataque maiores pelas partículas abrasivas. Foi observado que as partículas com tamanhos de 50 μm provocam maior desgaste do que aquelas com tamanhos de 125 μm , mantidas as demais condições de jateamento. Notou-se ainda que o resultado referente ao substrato de aço carbono com maior rugosidade (43 μm), apresentou maior desgaste do que aquele com menor rugosidade (8 μm). O mecanismo de desgaste aparentemente é mais eficiente quando encontra uma superfície com maior irregularidade superficial. Da mesma forma, a maior porosidade do material revestido pode provocar menor resistência ao jateamento abrasivo. Segundo estudos de Kulu e Zimakov (2000), a rugosidade e a morfologia da superfície afetam fortemente a resistência ao desgaste por jateamento abrasivo, onde revestimentos com porosidade maior que 5% podem perder consideravelmente sua resistência ao desgaste.

Vale ressaltar que tais experimentos foram realizados em temperatura ambiente, não sendo levada em consideração aquela que possa ser a maior virtude do revestimento, ou seja, a sua capacidade de se manter resistente em altas temperaturas.

3.3 Difusividade térmica do conjunto substrato-revestimento

As amostras para medidas de difusividade térmica eram compostas por duas camadas de materiais dissimilares, ou seja, pelo revestimento de Liga A e pelo substrato de aço. A camada do revestimento tinha espessura (E_r) de 0,41 mm (GOMES, 2018). A camada de substrato tinha espessura (E_s) variável em função das pequenas variações nas espessuras das amostras (E_a). A Figura 22 ilustra a seção transversal das amostras e as camadas de revestimento e substrato.

Figura 22 – Esquema do corte transversal das amostras no ensaio de difusividade térmica.



Fonte: O Autor, 2018.

O ensaio em amostras com espessuras diversas permitiu que fosse estabelecida uma relação entre a variação das difusividades térmicas medidas e a variação da proporção entre os dois materiais que tinham difusividade térmica diversa, e compunham a amostra. Para estabelecer a proporção de revestimento em cada amostra, a razão entre a espessura do revestimento (E_r) e a espessura da amostra (E_a), definiu um parâmetro (E_r/E_a). Desta forma, os resultados de difusividade térmica foram organizados a partir das amostras identificadas por D1, D2, D3, D4 e estão apresentados na Tabela 15 em função das relações E_r/E_a .

Tabela 15 – Relação entre as medidas de difusividade térmica e as espessuras das amostras.

Amostras	E_a (mm)	E_r (mm)	E_s (mm)	E_r/E_a (mm/mm)	Difusividade (mm^2/s)
Substrato	-----	0,00	-----	0,00	14,7
D4	2,08	0,41	1,67	0,20	4,6
D3	1,92	0,41	1,51	0,21	4,3
D2	1,74	0,41	1,33	0,23	4,2
D1	1,11	0,41	0,70	0,37	2,5

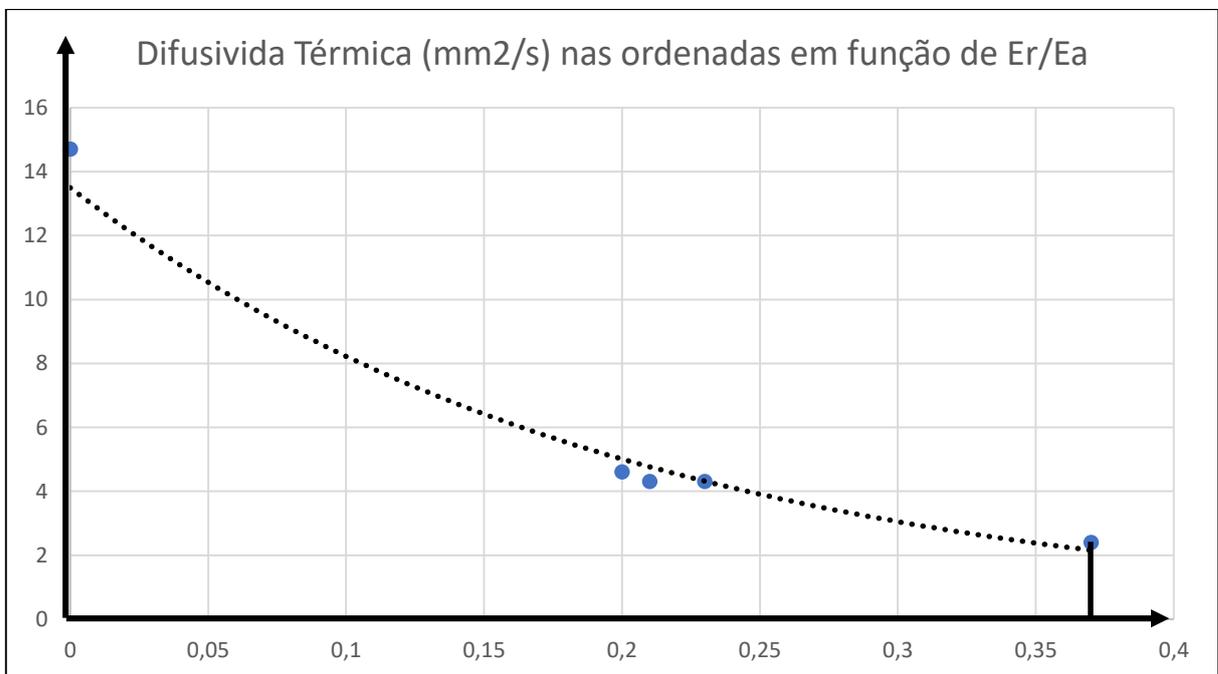
Fonte: O Autor, 2018 e ÖZISIK, 1993.

A primeira linha da Tabela 15 se refere ao aço sem revestimento ($E_r/E_a = 0$). Foi considerado o valor de $14,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ para a difusividade térmica do substrato puro, valor este pesquisado na literatura para aços carbono com 0,5 % de carbono em peso (ÖZISIK, 1993), uma composição que está muito próxima do aço utilizado como substrato, com 0,17 % de carbono (<http://brasil.arcelormittal.com.br>, acesso 04/03/2018). Um aço com 13 % de Ni e 5 % de Cr foi pesquisado também, com composição próxima da Liga A, chegando-se ao valor de difusividade de $5,6 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ÖZISIK, 1993). Entretanto, neste último caso a comparação seria difícil, visto que o

número encontrado na literatura considera material homogêneo, diferente de revestimentos aspergidos, que possuem difusividade térmica diminuída devido a porosidades e óxidos no seu volume.

Com o valor de difusividade atribuída ao substrato e os quatro valores medidos foi possível desenhar um gráfico que mostra uma tendência de curva característica com a variação da difusividade térmica em função do parâmetro E_r/E_a , conforme mostra o Gráfico 3 a seguir.

Gráfico 3 – Tendência de variação da difusividade térmica em função do parâmetro E_r/E_a para o sistema testado.



Fonte: O Autor, 2018 e Özisik, 1993.

Embora não se tenha medido as difusividades térmicas individuais do revestimento e do substrato, pôde-se observar que a difusividade do revestimento é menor do que a do substrato, uma vez que tal propriedade térmica da parede composta diminui à medida que a espessura do revestimento aumenta em relação à espessura da amostra. O valor médio obtido para os experimentos realizados foi de $3,9 \pm 0,8$ mm²/s.

Não foi desenvolvida uma modelagem matemática que pudesse definir uma equação para a curva, entretanto foi possível concluir que o eventual desgaste do

revestimento nas condições de operação da caldeira, tenderia somente a aumentar a difusividade térmica da parede revestida, pela diminuição do parâmetro Er/Ea .

3.4 Valor da tensão de adesão do revestimento ao substrato

Os ensaios de adesão do tipo *pull-off*, tanto para determinação da força de adesão do adesivo nos ensaios preliminares, como na determinação da força de adesão do revestimento, utilizaram ao todo 8 amostras. Os resultados para as amostras de aço (A1 e A2) sem revestimentos e com quatro carretéis de uma liga de alumínio como contraparte, os resultados para amostras de aço (A3, A4, A5 e A6) sem revestimentos e com carretéis de aço SAE-1020 e os resultados para as amostras (A7 e A8) com revestimento, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Características das amostras e dos carretéis, e os resultados da tensão de ruptura no ensaio de adesão.

Amostra	Rugosidade da Amostra (μm)	Material do carretel	Rugosidade do carretel (μm)	Adesivo utilizado	Tensão de adesão (MPa)
A1 (substrato)	41	Alumínio	27	Sikadur 32	$15,0 \pm 0,6$
A2 (aço)	10	Alumínio	27	Sikadur 32	$8,0 \pm 1,9$
A3 (substrato)	41	Aço 1020	41	Sikadur 32	$17,7 \pm 3,0$
A4 (substrato)	41	Aço 1020	41	DP-460	$22,5 \pm 6,8$
A5 (aço)	10	Aço 1020	41	Sikadur 32	$12,3 \pm 3,1$
A6 (aço)	10	Aço 1020	41	DP-460	$25,1 \pm 4,2$
A7 (liga A)	51	Aço 1020	41	DP-460	$13,6 \pm 1,2$
A8 (liga A)	51	Aço 1020	41	DP-460	$12,9 \pm 2,5$

Fonte: O Autor, 2018.

A partir da Tabela 16, pôde-se observar o efeito da rugosidade superficial das amostras, com destaque para os resultados das amostras A1 e A2, onde a primeira apresenta maior rugosidade superficial (41 μm contra 10 μm). Mantidas todas as outras variáveis, o ensaio em A1 apresentou adesão 87% maior do que A2, indicando que a maior rugosidade aumentou a área de colagem, permitindo maior aderência.

A utilização do carretel de aço carbono com a amostra A3 demonstrou aumento na força de adesão em relação a A1, que possuía o mesmo perfil de rugosidade superficial. Com relação ao adesivo, a amostra A4 apresenta os mesmos padrões de

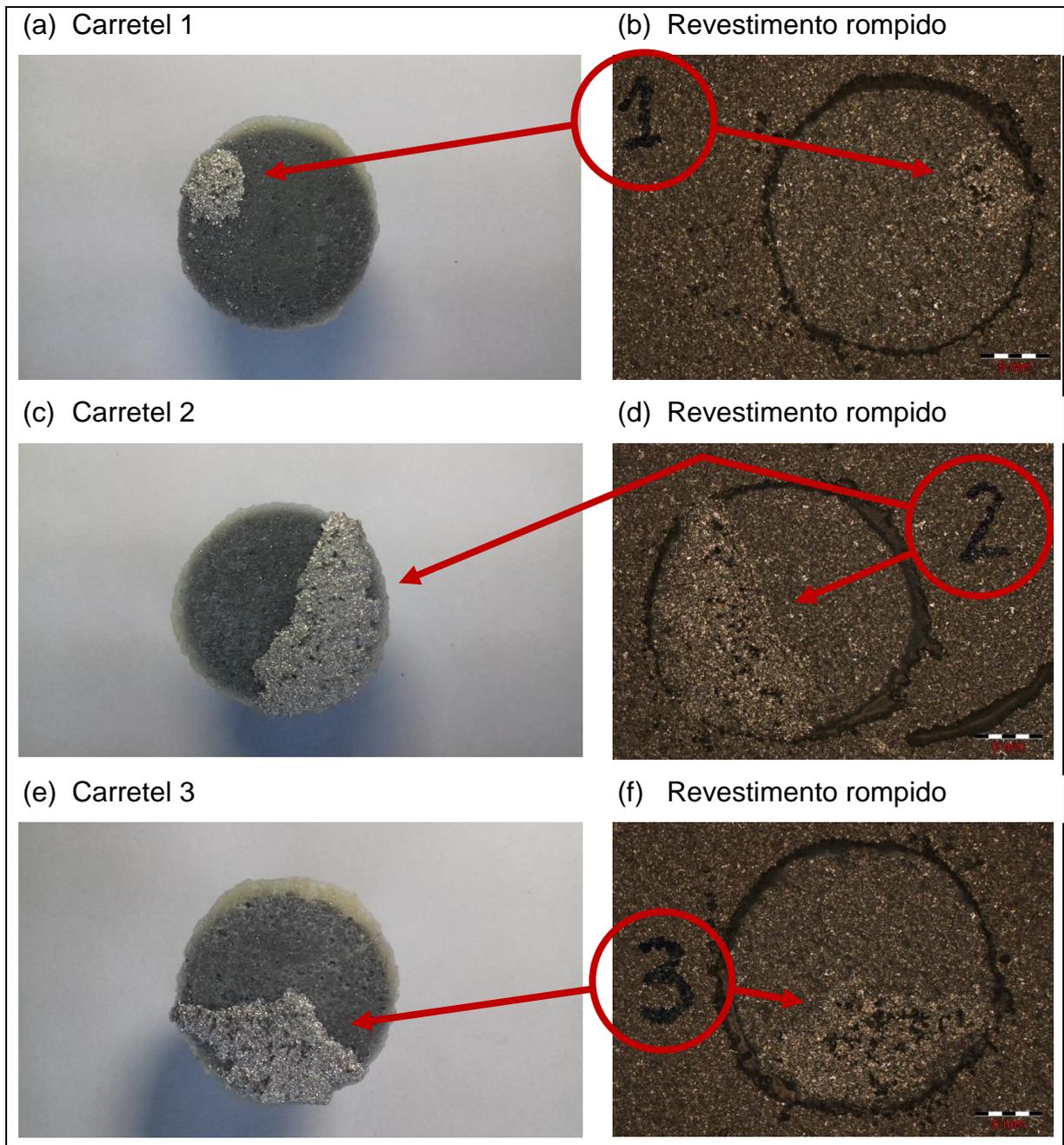
ensaio que A3, exceto pelo adesivo utilizado, da mesma forma que A6 em relação a A5. Em ambos os casos, as amostras coladas com o adesivo Scotch Weld DP-460 da 3M, apresentaram melhor adesividade do que aquelas coladas com o Sikadur 32.

Desta forma foram definidas as condições para melhor performance no ensaio do revestimento das amostras A7 e A8, ou seja, com carretéis de aço carbono e utilização do adesivo Scotch Weld DP-460. A amostra A7 apresentou tensão de adesão obtida pela média de três carretéis ensaiados equivalente a $13,6 \pm 1,2$ MPa. Da mesma forma, a amostra A8 apresentou tensão de adesão do revestimento igual a $12,9 \pm 2,5$ MPa. A média das medidas entre as duas amostras foi de 13,3 MPa.

A norma Petrobrás N-2568 (2011) sobre revestimentos metálicos por aspersão térmica fixa requisitos para a deposição sobre substratos metálicos, aplicados em tubulações e equipamentos, e aprova revestimentos de aço inoxidável depositados por aspersão térmica a arco elétrico que apresentem adesão média de 14 MPa. No trabalho publicado por Gomes (2018), o revestimento de Liga A obtido pela aspersão térmica por arco elétrico mostrou a presença de óxidos de alumínio na interface com o substrato e porosidades no revestimento. Tais ocorrências podem provocar a perda de adesão e de coesão entre as lamelas do revestimento (KULU e ZIMAKOV, 2000).

Era importante saber também como as rupturas ocorreram. Para tanto, foram obtidas imagens das superfícies submetidas à aplicação do adesivo no teste *pull-off*, tanto as revestidas quanto a dos carretéis. As Figuras 23 e 24 apresentam os aspectos macroscópicos das superfícies das amostras revestidas com a liga A (localizadas à direita), e dos carretéis correspondentes, que estão localizados à esquerda e invertidos, com a superfície de colagem para cima, e rebatidas em relação a região da amostra de onde foram rompidos. A numeração de 1 a 3 corresponde à amostra A7, na Figura 23, e a numeração de 5 a 7 corresponde à amostra A8, na Figura 24.

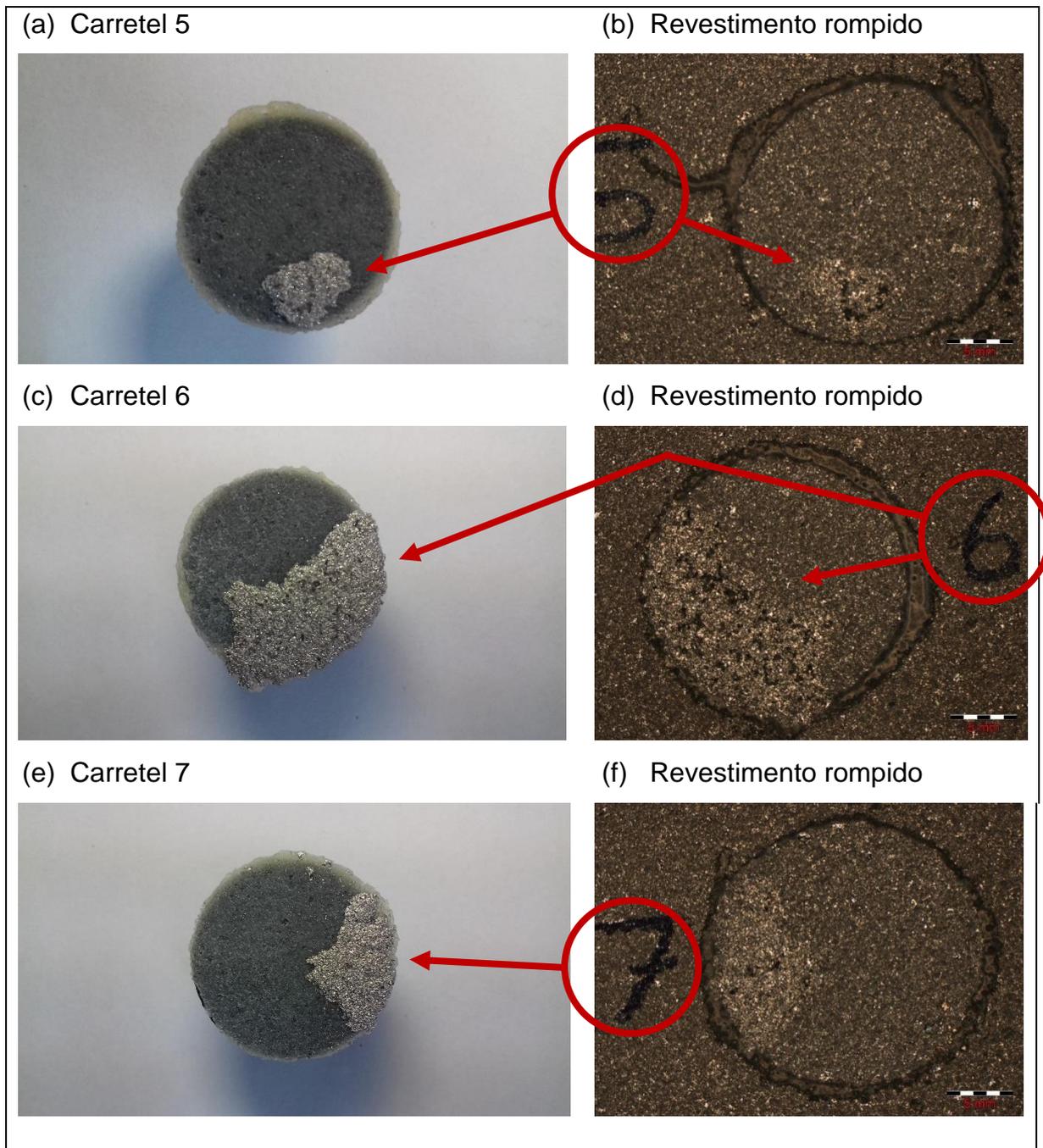
Figura 23 – Aspecto macroscópico do arrancamento do revestimento da amostra A7 pelos carretéis 1, 2 e 3.



Fonte: O Autor, 2018

As imagens obtidas no estereoscópio foram submetidas ao processamento digital de imagem. Os percentuais de arrancamento do revestimento foram calculados sobre as regiões delimitadas pelos diâmetros de 20 mm de cada carretel. Para a amostra A7 os percentuais foram definidos em 10 % na região do carretel 1, em 36 % na região do carretel 2 e em 29 % na região do carretel 3. A média de arrancamento nos carretéis da amostra A7 foi de 25 ± 11 %.

Figura 24 – Aspecto macroscópico do arrancamento do revestimento da amostra A8 pelos carretéis 5, 6 e 7.

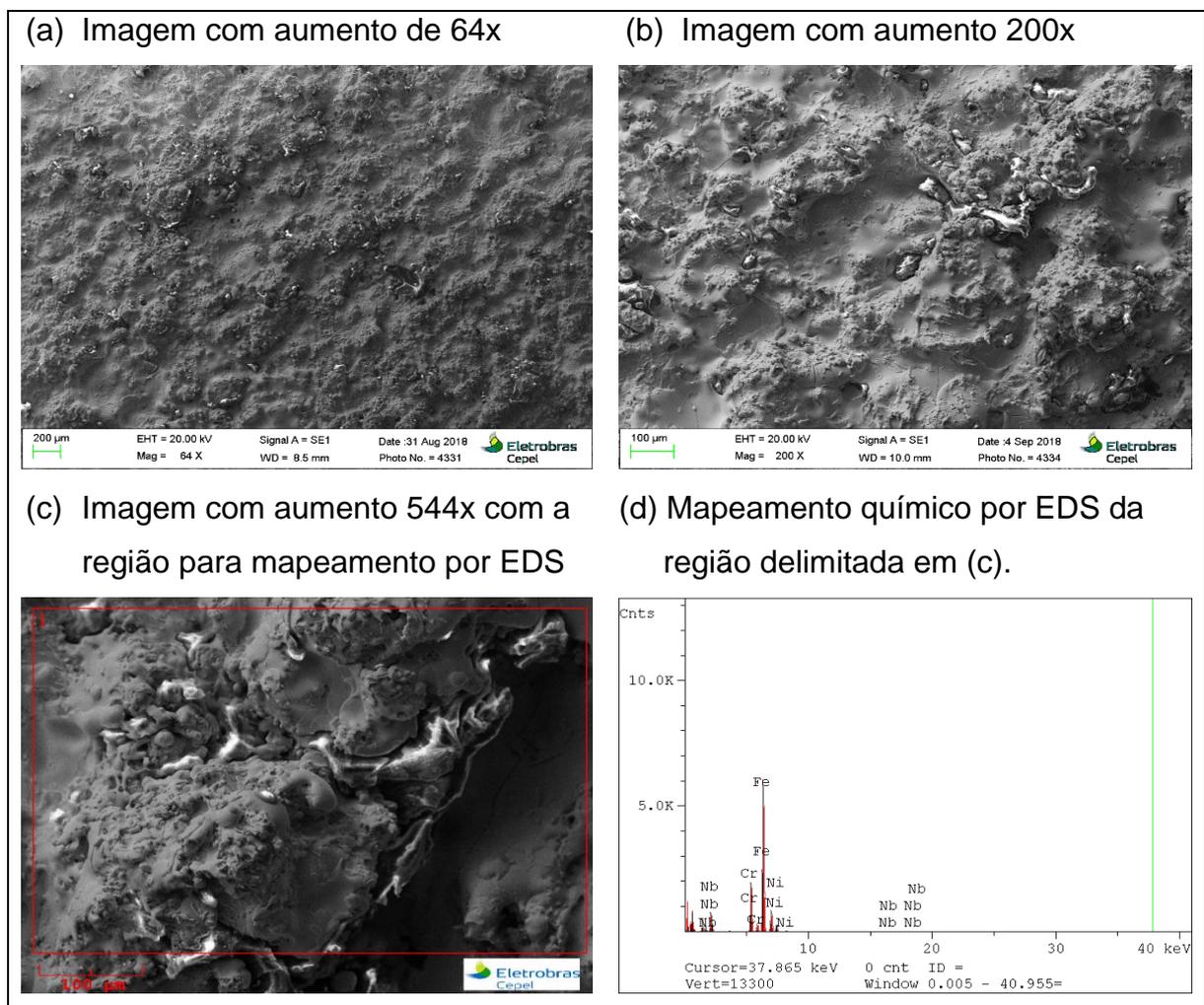


Fonte: O Autor, 2018

Da mesma forma, os percentuais de arrancamento do revestimento, sobre as regiões delimitadas pelos diâmetros de 20 mm de cada carretel da amostra A8, foram definidos em 9 % na região do carretel 5, em 35 % na região do carretel 6 e em 18 % na região do carretel 7. A média de arrancamento nos carretéis da amostra A8 foi de 21 ± 11 %. A média das amostras A7 e A8 foi de 23 % de arrancamento. Não houve

evidência de exposição do substrato em qualquer das imagens. A Figura 25 apresenta as imagens e os resultados obtidos pela análise química semi-quantitativa de elementos químicos presentes realizada numa das regiões de arrancamento do ensaio de adesão. Foram identificadas as energias características dos elementos Fe, Cr, Ni e Nb.

Figura 25 – Aspectos da superfície do arrancamento na região do carretel 6 da amostra A8 com aumentos de 64x, 200x e 544x obtidos no MEV com mapeamento químico por EDS.



Fonte: O Autor, 2018

A Tabela 17 apresenta a composição da liga usada para a confecção do revestimento de Liga A e os elementos obtidos pelo mapeamento por EDS feito na superfície de arrancamento do revestimento na região do carretel 6.

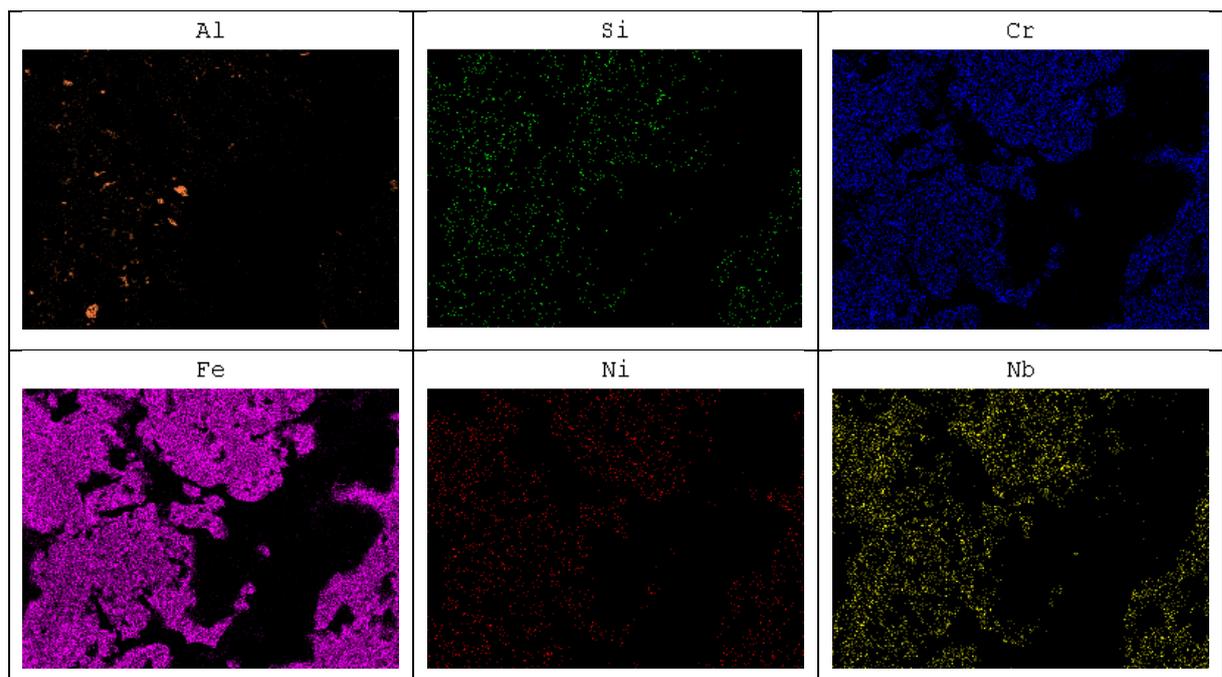
Tabela 17 – Composição química (em percentual de peso) do revestimento de Liga A em comparação com o ranqueamento obtido em análise por EDS na região de arrancamento do carretel 6 da amostra A8 no ensaio de adesão.

	Cr	Nb	Ni	B	Al	Mn	Si	Fe
Liga A (*)	13,2 %	6,0 %	5,5 %	4,2 %	3,0 %	1,3 %	1,2 %	Balanço
EDS (**)	14,2 %	6,3 %	5,2 %		3,0 %		1,1 %	70,2 %

Fonte: (*) Dados fornecidos pela empresa VGK, 2017 e (**) O Autor, 2018.

O resultado do mapeamento de elementos por EDS mostrou que a região de arrancamento apresentou composição química semelhante aquela da Liga A. Deve-se observar que o Mn teve difícil detecção, uma vez que o pico secundário do Cr (elemento que estava em maior quantidade) confunde-se com o pico primário do Mn. Além disso, o B possui baixo peso atômico e por isso não foi detectado no EDS (<https://cfamm.ucr.edu/documents/eds-intro.pdf>, acesso em 11/09/2018). Entende-se portanto que o substrato não ficou exposto, embora parte do revestimento tenha sido arrancada. A Figura 26 mostra o mapeamento para cada elemento constituinte do revestimento de Liga A na região de arrancamento do carretel 6.

Figura 26 – Mapeamento químico por EDS na região de arrancamento do carretel 6 da amostra A8.



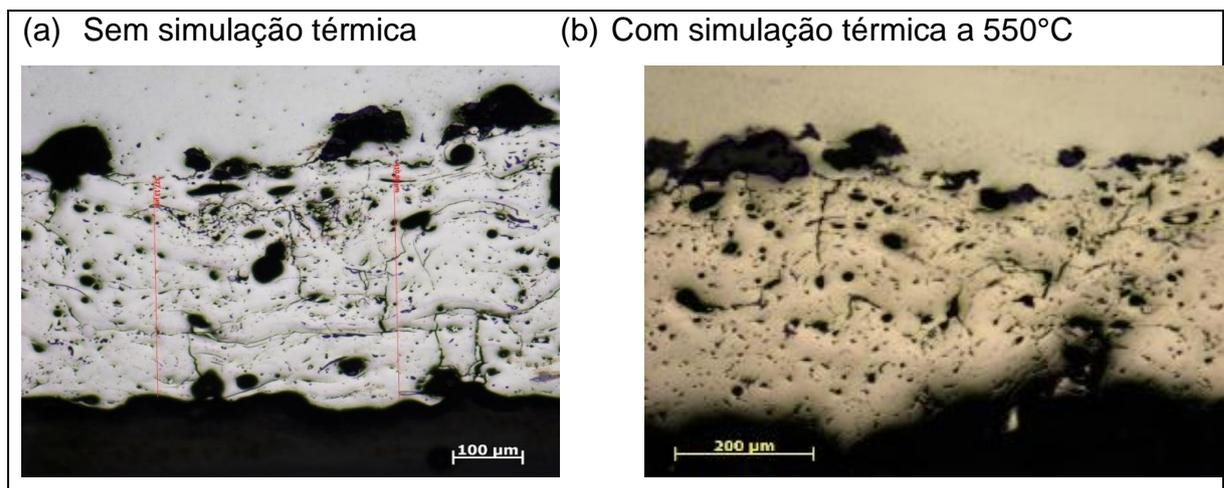
Fonte: O Autor, 2018.

Pode-se concluir que a tensão de ruptura do revestimento foi baixa, com média de 13,3 MPa para as amostras A7 e A8. Considerando um percentual de arrancamento médio de 23 % também para as amostras A7 e A8, entende-se que pode ter havido um início de colapso do adesivo, que fez diminuir a área de resistência do revestimento instantaneamente. A tensão de ruptura correta para o teste seria aquela onde ocorresse 100 % de ruptura do revestimento. Os resultados mostraram que não houve exposição do substrato, ponto de vista corroborado pelo mapeamento de EDS superfície de arrancamento na região do carretel 6 que identificou a intensa presença dos elementos presentes no revestimento.

3.5 Análise do revestimento após simulação térmica a 550°C

Após 100 horas de simulação térmica a 550°C, a amostra T1 sofreu preparação metalográfica para ser submetida a exame em microscópio óptico (MO). A Figura 27 apresenta o aspecto de uma amostra revestida com a liga A submetida à preparação metalográfica sem simulação térmica e a mesma amostra após a simulação térmica.

Figura 27 – Aspectos do revestimento de Liga A antes e após a simulação térmica a 550°C.

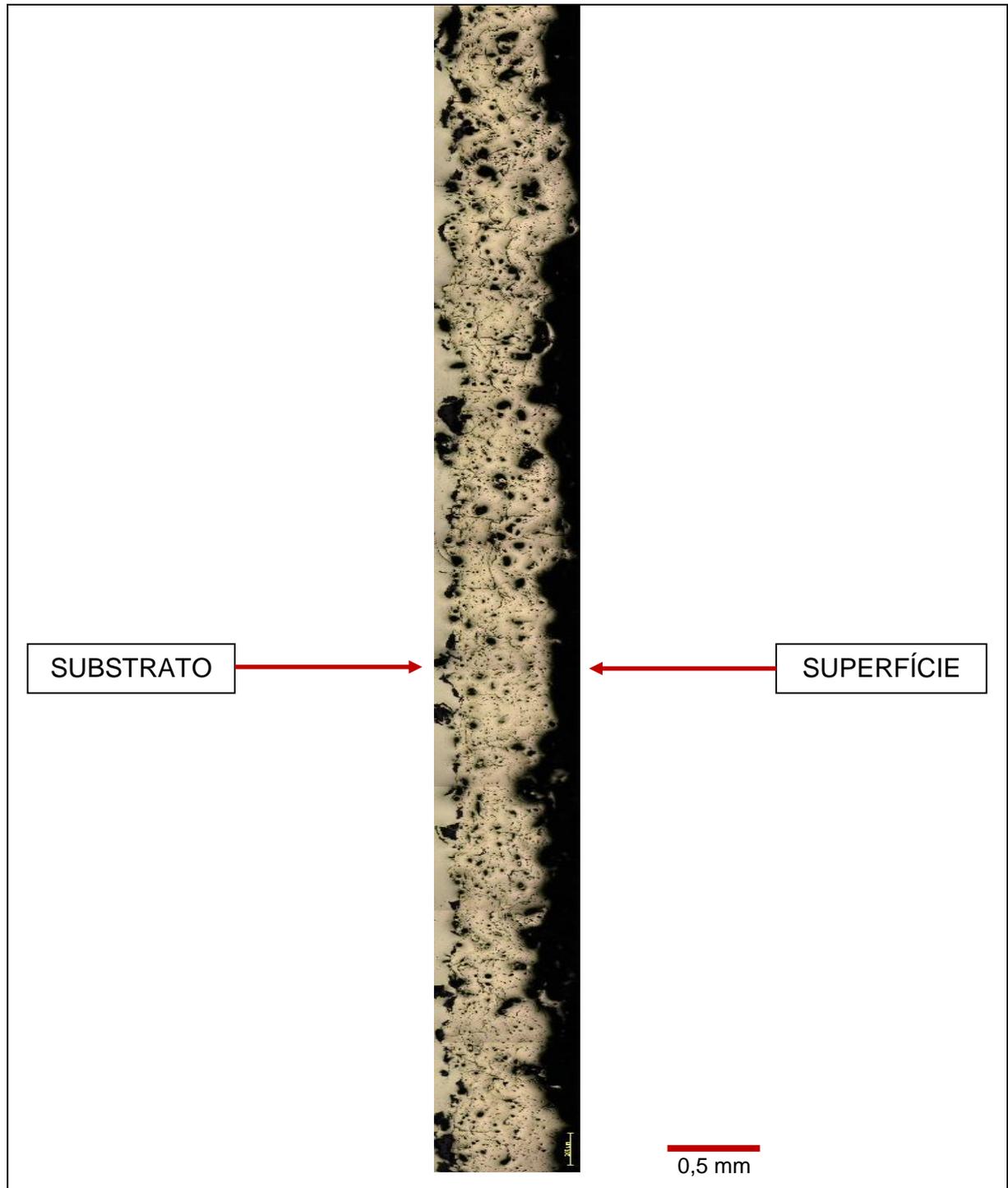


Fonte: 26 (a) Gomes, 2018 e 26 (b) O Autor, 2018.

Uma observação qualitativa mostra que aparentemente não houve mudanças no revestimento da amostra em comparação com a situação antes da simulação térmica, com relação a formação de discontinuidades, tais como as redes de óxidos, porosidades e microtrincas.

A Figura 28 apresenta um mosaico de imagens obtidas no MO em uma extensão de aproximadamente 7 mm de revestimento submetido à simulação térmica.

Figura 28 – Visualização da amostra em mosaico de 7 mm de comprimento após a simulação térmica a 550°C.

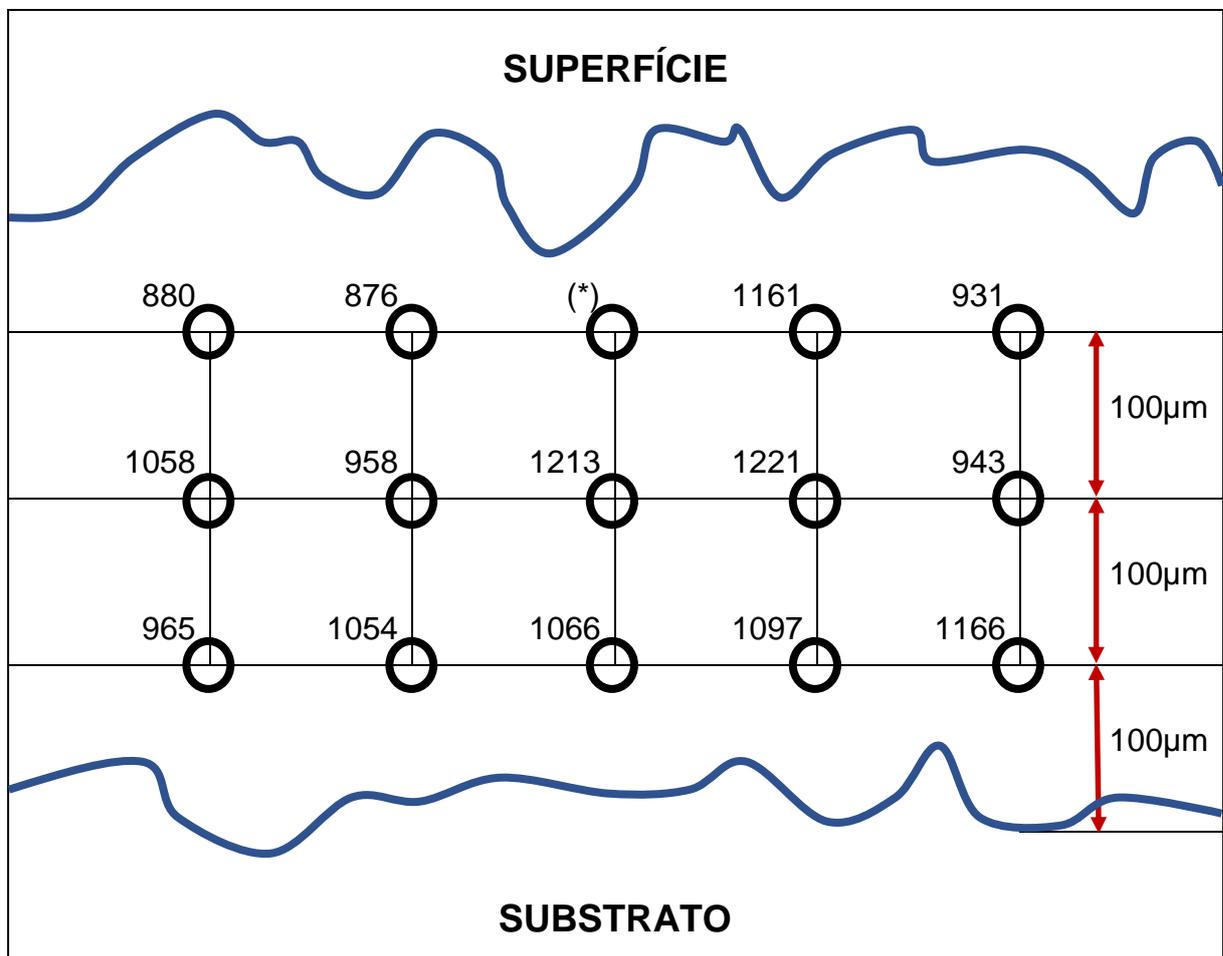


Fonte: O Autor, 2018.

3.6 Análise do revestimento após simulação térmica a 800°C

Após a simulação térmica de 100 horas a 800°C foram tomadas catorze medidas de microdureza Vickers na amostra T2, formando uma malha com cinco medidas próximas ao substrato, cinco medidas em pontos intermediários, e quatro medidas próximas a superfície. A Figura 29 apresenta uma ilustração de como foi organizado o gride.

Figura 29 – Esquema do gride de medidas de microdureza Vickers do revestimento submetido a simulação térmica a 800°C.



Fonte: O Autor, 2018

Foi calculada uma dureza média de 1042 ± 115 HV. Este valor foi bem próximo àquele calculado para o revestimento da Liga A sem simulação térmica e que tinha o valor de 1115 ± 140 HV conforme Gomes (2018).

CONCLUSÃO

No ensaio de desgaste por jateamento abrasivo foi observado que as amostras sujeitas aos maiores ângulos entre a projeção do jato e a superfície impactada, sofreram um desgaste erosivo maior. Os ensaios com partículas de 50 µm projetadas nas amostras com os ângulos de ataque de 90, 60, 45 e 30 graus resultaram em taxas de erosão de 0,027, 0,021, 0,018 e 0,017 mg/g, respectivamente. A informação sobre essa tendência é importante porque pode definir quais são as superfícies da tubulação no interior das caldeiras que estão mais suscetíveis ao desgaste, de acordo com a direção predominante da projeção das cinzas que as impactam.

As partículas com menor granulometria também produziram maior desgaste. O ensaio com partículas de 50 µm projetadas com ângulos de 90 e 45 graus, resultaram em taxas de erosão de 0,027 e 0,018 mg/g, maiores do que as taxas de 0,022 e 0,014 mg/g obtidas com as partículas 125 µm projetadas sob os mesmos ângulos. Os resultados das taxas de erosão do revestimento de Liga A apresentaram valores compatíveis com revestimentos estudados em outros trabalhos, enfatizando aqui um revestimento produzido a partir do aço inoxidável AISI-420 publicado a partir dos ensaios de Martins e Kejelin (2012) com partículas de 160 µm e taxa de erosão de 0,022 mg/g, semelhante àquela encontrada neste trabalho para uso da partícula de 125 µm a 90 graus. A análise desse resultado é positivo para a Liga A se for considerado que partículas menores provocam maiores taxas de erosão.

As superfícies com acabamento mais rugoso também apresentaram maior desgaste. O ensaio no substrato sem revestimento com rugosidade de 43 µm apresentou taxa de 0,024 mg/g contra 0,017 mg/g para a outra amostra com 8 µm de rugosidade. Essa diferença pode ser explicada, talvez, por algum mecanismo de arrancamento específico. As superfícies revestidas com perfil de rugosidade de 51 µm analisadas talvez possam apresentar menor desgaste erosivo se receberem algum tratamento mecânico para diminuição do perfil após o processo de aspersão.

Com relação a difusividade térmica, foi observado que o ensaio feito em quatro amostras com paredes compostas pelo substrato e pelo revestimento apresentou aumento gradativo da difusividade do conjunto a medida que a proporção do substrato na espessura do conjunto foi maior. Isto permite concluir que o substrato possui maior difusividade do que o revestimento, e que o desgaste natural do revestimento em

condições de operação da caldeira só tenderá a aumentar a propriedade de difusividade térmica do tubo revestido.

No ensaio de adesão do revestimento ao substrato foi visto que a força de adesão medida apresentou uma média global de $13,3 \pm 2,0$ MPa para seis medidas feitas em duas amostras. Este valor ficou abaixo do encontrado em outros trabalhos, bem como um pouco abaixo do valor de 14 MPa descrito na norma N-2568 (2011) para revestimentos aspergidos pela técnica do arco elétrico. Entretanto, a ruptura do revestimento não ocorreu de forma completa, apresentando uma média percentual de arrancamento de 23 ± 11 %. Para uma avaliação mais conclusiva torna-se necessário um teste com outro adesivo que possa garantir a ruptura total do revestimento na região delimitada pelo diâmetro do carretel de contraparte. Vale ressaltar que em nenhuma das amostras o substrato ficou exposto, o que caracterizou falhas coesivas do revestimento, que são diferentes das falhas adesivas que ocorrem na interface com o substrato. Há indício de que a ruptura foi iniciada na própria cola adesiva para então provocar a falha prematura no revestimento.

A simulação térmica a 550°C não indicou alterações no material com relação ao crescimento de descontinuidades no revestimento, tais como porosidades, óxidos e microtrincas. A simulação térmica a 800°C também não indicou alteração significativa na dureza do material, que passou daquela medida de 1115 ± 140 HV realizada por Gomes (2018), para 1042 ± 115 HV após a permanência em um patamar de 100 horas no forno elétrico. Esse decréscimo de 6% na dureza após a simulação ainda está dentro do intervalo de incerteza das medidas, definidas pelos desvios calculados sobre as durezas antes e depois da simulação.

O revestimento aspergido com Liga A testado neste trabalho apresentou resultados satisfatórios, com exceção ao ensaio de adesão ao substrato, que mostrou resultado inconclusivo, devido a ruptura prematura do adesivo utilizado. Com relação ao ensaio de desgaste abrasivo, o revestimento apresentou taxas de erosão equivalentes ou menores do que outros revestimentos aspergidos comerciais. Com relação ao ensaio de difusividade térmica o revestimento apresentou difusividade satisfatória do conjunto revestimento-substrato. Com relação à simulação térmica em altas temperaturas o revestimento mostrou-se resistente, mantendo sua integridade, tanto aos 550 quanto aos 800 graus. Conclui-se que o revestimento de Liga A aplicado

por processo de aspersão térmica a arco elétrico se mostrou adequado para uso nas superfícies das tubulações internas às caldeiras aquatubulares que operam a 550°C.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões podem ser úteis para trabalhos futuros e são apresentadas conforme descritas nos tópicos a seguir.

- a) Estudo mais aprofundado do efeito do acabamento superficial (rugosidade e morfologia) de revestimentos de elevada dureza sobre o desgaste por impacto de partículas;
- b) Formulação de um modelo matemático para calcular a variação da difusividade térmica do conjunto substrato–revestimento ao longo do tempo, considerando o desgaste do revestimento, sua perda de espessura e suas variações de propriedades mecânicas;
- c) Utilização de adesivos híbridos como os da Loctite, HY4060GY, HY4070, HY4080GY e HY4090HY (www.loctiteindustrial.com.br) fabricados pela Henkel nos testes de adesão, para tentar garantir o arrancamento completo do revestimento do substrato e aferir corretamente a tensão de adesão do material depositado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3M. *Adesivo Estrutural Scotch-Weld DP-460*. 4p. Disponível em: <<https://www.3m.com.br>>. Acesso em: 26.jul.2018.

ABNT NBR NM ISO 6507-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS): *Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Vickers. Parte 1: Método de Ensaio*. São Paulo, SP, Brasil. 2008.

ANTUNES, F.J. *Avaliação da Adesão e da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Cr e Co Obtidos Através da Técnica de Aspersão Térmica*. 2013. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013.

ARCELOR MITTAL. *Catálogos de Aços Planos*. 52p. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com.br>>. Acesso em: 04.mar.2018.

ASTM A-178 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS): *Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes*. West Conshohocken, PA, USA. 2012.

ASTM C-633 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS): *Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*. West Conshohocken, PA, USA. 2001.

ASTM D-4541 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS): *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. West Conshohocken, PA, USA. 2002.

ASTM E-1461 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS): *Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method*. West Conshohocken, PA, USA. 2013.

ASTM G-76 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS): *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. West Conshohocken, PA, USA. 2005.

CHATTOPADHYAY, R. *Surface Wear: analysis, treatment and prevention*. 291p. 1ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001.

CORTÉS, R.S. *Estudos de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha*. 1998. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil. 1998.

COSTA, R. C. *Desenvolvimento de Novos Revestimentos por Aspersão Térmica à Arco para Proteção contra Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases*. 2012.

86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil. 2012.

CREUS, J.; MAZILE, H.; IDRISSE, H. Porosity evaluation of protective coatings onto steel, through electrochemical techniques. *Surface and Coatings Technology*. Netherland. v.130, p.224-232, 2000.

DEFAMA. *Óxido de Alumínio Famoso*. 1p. Disponível em: <<https://www.defama.com.br>>. Acesso em: 04.nov.2017.

DIVAKAR, M.; AGARWAL V. K.; SINGH S. N. Effect of the Material Surface Hardness on the Erosion of AISI 316. *15th International Conference on Wear of Materials*. Netherlands: Elsevier, 2005, v.259, p.110-117.

DORFMAN, M. R. Thermal Spray Processes. *Advanced Materials and Processes*. Iran. v.160, p.47-50, 2002.

EDS. *Introduction to Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS)*. 12p. Disponível em: <<https://cfamm.ucr.edu/documents/eds-intro.pdf>>. Acesso em: 11.set.2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. 417p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>> Acesso em: 25.mar.2017.

EUTECTIC CASTOLIN. *Metalização – Aspersão Térmica por Arco Elétrico*. 1p. Disponível em: <<https://www.eutectic.com.br>>. Acesso em: 08 ago.2017.

BRAGA FILHO, W. *Transmissão de Calor*. 614p. 1ed. São Paulo: Thompson, 2004.

FARNELL. *Graphit-33 Technical Datasheet*. 2p. Disponível em: <<https://uk.farnell.com/kontakt-chemie>>. Acesso em: 14.mar.2018.

FINNIE, I.; LEVI, A. V.; MCFADDEN, D. H. The fundamental mechanisms of the erosive wear of ductile metals by solid particles. *ASTM International*. Ohio, USA. STP-664, p.36-58, 1979.

GOMES, D. L. *Caracterização de cinzas leves e de revestimento para caldeiras de central termelétrica brasileira*. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

GUERRERO, G. E.; PAREDES, R. S.; VLASSOV, D.; PUKASIEWICZ, A. Influência da geometria do bocal da pistola de aspersão térmica por arco elétrico na microestrutura de revestimentos do aço AWS 309L. *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMat)*. Foz do Iguaçu, PR, 2006. p.6138-6149.

HUTCHINGS, I.M.; SHIPWAY P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 412p. 1ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

IMAGEJ. *User Guide*. 5p. Disponível em <<https://imagej.net/introduction>>. Acesso em: 04.set.2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *EN ISO 8501: Preparação de Substrato de Aço antes da Aplicação de Tintas*. Genebra, Suíça, 2006.

JOÃO, J.J.; SKORONSKI, E.; SILVEIRA, F.; MACHADO, D.B.; BORTOLATTO, L.B. Determinação da Composição Química das Cinzas do Carvão Mineral do Sul Catarinense e sua Correlação com a Temperatura de Fusão. *35º Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. Águas de Lindóia, SP, 2012. ref. ANA-068.

KULU, P.; ZIMAKOV, S. Wear-resistant composite coatings. *Surface Engineering, EUROMAT 99*. Weinheim, Germany: Wiley, 2000, v.11, p.144-149.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. Ensaios de Adesão em Revestimentos Metal-cerâmicos Obtidos por Aspersão Térmica a Plasma. *Revista de Ciência e Tecnologia*. Piracicaba, SP, v.13, p.51-62, 1999.

LIMA, C. C.; TREVISAN, R. E. *Aspersão Térmica – Fundamentos e Aplicações*. 152p. 2ed. São Paulo: Artliber, 2007.

LOCTITE. *Adesivos Estruturais HY4060GY, HY4070, HY4080GY e HY4090*. 2p. Disponível em: <<https://www.loctiteindustrial.com.br>>. Acesso em: 03.out.2018.

MACEDO, D. T.; GOUVÊA, C. A. R.; CRUVINEL, L. B.; NUCCI, R.; CASTELETTI L. C.; Avaliação de Revestimentos Produzidos por Aspersão Térmica em Substrato da Liga de Alumínio 7075-T3. *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMat)*. Foz do Iguaçu, PR, 2006. p.5995-6006.

MARANHO, O. *Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente*. 2006. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2006.

MARQUES, P. V. Aspersão Térmica. *Revista Soldagem & Inspeção*. São Paulo, SP, v.6, n.10, p.21-26, 2001.

MARTINS, B.R.; KEJELIN, N.Z. *Estudo do Desempenho de Revestimentos Metálicos Depositados pelo Processo de Aspersão Térmica à Arco em Relação ao Desgaste Erosivo em Trocadores de Calor Ar/Gases*. Florianópolis: Faculdade SATC e Tractebel Energia, 2012. 25p. Artigo Técnico.

MENEZES, D. D. *Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto*. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

MONTANI, U. R. S. *Quantificação de Defeitos por Processamento Digital de Imagens em Revestimentos obtidos por Aspersão Térmica*. 2016, 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

MORAIS, T. C.; DIACENCO, A. A. *Estudo dos Processos de Aspersão Térmica em Materiais Metálicos de forma a auxiliar a Aplicação de Camadas para Diminuição de Desgastes e Corrosões na Superfície do Metal*. Itajubá: Centro Universitário de Itajubá, 2016. 21p. Artigo Técnico.

NETZSCH. *Difusividade Térmica*. 1p. Disponível em: <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com.br>>. Acesso em: 14.mar.2018.

ÖZISIK, M. N. *Heat Conduction*. 692p. 2ed. New York: Wiley, 1993.

PETROBRÁS N-2568-b. *Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica*. Rio de Janeiro, 2011.

RENFERT. *Materiais Abrasivos Cobra*. 2p. Disponível em: <<https://www.renfert.com>>. Acesso em: 04.nov.2017.

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G.; DE BÖER, S. C.; SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G. O.; RAMOS, C. G. *Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas*. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Unilasalle e Colpemi Mineração, 2011. 15p. Artigo Técnico.

SIKA. *Adesivo Epóxi para Colagem e Ancoragem Estrutural de Média Fluidez Sikadur 32*. 2p. Disponível em: <<https://bra.sika.com>>. Acesso em: 27.abr.2018.

SILVA, P. F. *Introdução à Corrosão e Proteção das Superfícies Metálicas*. 355p. 1ed. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 1981.

SZYMANSKI, K.; HERNAS, A.; MOSKAL, G.; MYALSKA, H. Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for powerplant boilers – A review. *Surface & Coatings Technology*. Katowice, Poland, v.268, p.153-164, 2015.

VARAVALLO, R.; MANFRINATO, M. D.; ROSSINO, L. S.; SOUZA, S. D.; CAMARGO, F. Ensaio de Adesão em Revestimentos Metálicos Obtidos por HVOF. *60ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC)*. Campinas, SP: 2008.

VITALIANO J. COSTA. *Catálogo Geral de Abrasivos e Granalhas*. 5p. Disponível em: <<https://www.vitalianocosta.pt>>. Acesso em: 08.ago.2017.

VICENZI, J.; VILLANOVA D. L.; LIMA M. D.; TAKIMI, A. S.; MARQUES, C. M.; BERGMANN, C. P. Avaliação do Desgaste Erosivo à Quente (~300°C) por Cinzas de Carvão Mineral em Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica. *Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. Salvador, BA: 2003. p.325-329.

WANG, B. Q.; VERSTAK, A. Elevated temperature erosion of HVOF Cr₃C₂/TiC-NiCrMo cermet coating. *Advanced Surface Technologies*. Richmond, VA, USA, p.342-351, 1999.