

## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT**

### **AValiação de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica para Mitigar a Erosão por Cinzas em Tubos de Caldeiras de Usinas Termelétricas**

**BRUNO REIS CARDOSO(1);ROBERTA MARTINS DE SANTANA(1);HELOISA CUNHA FURTADO(1);PAMELLA KESSELER DE CAMPOS(2);DIEGO DE LIMA GOMES(2);FREDERICO GARCIA BINDI DE LACERDA(2);GUSTAVO DUCIAK(3);MARILIA GARCIA DINIZ**  
**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1);UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO(2);CGT ELETROSUL(3)**

#### **RESUMO**

Revestimentos obtidos por aspersão térmica podem ser utilizados na proteção de componentes da indústria que atuam sob condições severas de abrasão, impacto de partículas e corrosão. O presente informe técnico tem como objetivo apresentar o desenvolvimento, a caracterização e a avaliação de revestimentos feitos a partir de ligas metálicas, aplicados pelo método de aspersão térmica nas tubulações de aço submetidas ao impacto de partículas provenientes da queima do carvão mineral brasileiro. Os resultados mostraram que os revestimentos metálicos podem auxiliar na redução dos custos de manutenção, e como consequência, na redução do número de paradas não programadas de caldeiras.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Caldeiras; Aspersão térmica; Erosão por cinzas; Extensão de vida útil

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

A geração de energia elétrica no setor elétrico brasileiro é predominantemente proveniente de fonte hidráulica, porém cerca de 30% da capacidade instalada provém das termelétricas. Desta parcela, a geração termelétrica utilizando carvão mineral corresponde a cerca de 30% da capacidade instalada no país. Trata-se de 22 (vinte e duas) plantas com uma capacidade instalada de cerca de 3.600MW. Os depósitos de carvão do Brasil situam-se nos Estados de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, totalizando 32,3 bilhões de toneladas. Distribuem-se em oito grandes jazidas, sete das quais no Rio Grande do Sul, o que corresponde a 90% das reservas, e uma em Santa Catarina. O ambiente em que foram formados os carvões brasileiros determinou suas características e possíveis aplicações nos dias de hoje, e resultou em um mineral com alto teor de cinzas, sílica, enxofre e ferro, disseminados na forma de pirita.

As usinas termelétricas brasileiras que empregam o carvão mineral como fonte térmica utilizam a tecnologia de combustão pulverizada em caldeira. O carvão é processado até a granulometria adequada e injetado por meio de queimadores na caldeira. O baixo poder calorífico dos carvões brasileiros requer um volume de carvão elevado para a obtenção das condições adequadas de temperatura na caldeira. O calor liberado na queima do carvão é transferido à água que circula nos tubos que envolvem a fornalha da caldeira, que passará por outros componentes até se tornar vapor superaquecido, que posteriormente será expandido na(s) turbina(s) acoplada(s) ao gerador. Os tubos que fazem parte dos componentes da caldeira estão sujeitos a alta temperatura, ambiente agressivo e a erosão causada pelos fluxos de gases e particulados resultantes da queima do carvão.

Do ponto de vista de materiais, considerando-se o alto percentual de cinzas presentes no carvão brasileiro, as partes metálicas do interior da caldeira e, em especial os tubos, sofrem desgaste acentuado em função da composição das cinzas. Esse processo de ataque às superfícies metálicas, potencialmente, é capaz de reduzir a espessura dos tubos e, por consequência, aumentar a frequência de ocorrência de danos, tais como perfurações causando a indisponibilidade da unidade. Os tubos da parede d'água, dos superaquecedores, rea aquecedores e dos economizadores, dependendo do projeto da caldeira, são fabricados com aço carbono ou aços Cr-Mo, conformados por laminação a quente e estiramento a frio. O procedimento de reparo dos tubos internos das caldeiras é trabalhoso e acarreta longos tempos de paralisação em função da necessidade de resfriamento da unidade. A indisponibilidade da caldeira gera perdas substanciais às geradoras por lucros cessantes. Na impossibilidade de modificar o projeto da caldeira (queima do carvão, fluxo de gases, posicionamento dos queimadores, etc.) uma forma de minimizar as ocorrências causadas pelo desgaste dos tubos é a investigação detalhada do desgaste nas paredes das tubulações causado pelo impacto de partículas presentes nas cinzas do carvão mineral queimado e a pesquisa de revestimentos metálicos ou compósitos nas regiões críticas da caldeira.

O presente informe técnico tem como objetivo apresentar o desenvolvimento, a caracterização e a avaliação de revestimentos feitos a partir de ligas metálicas, aplicados pelo método de aspersão térmica a arco elétrico, nas tubulações de aço submetidas ao impacto de partículas de sílica em caldeiras utilizadas em termelétricas que utilizam carvão mineral brasileiro.

Os resultados provenientes da análise dos tubos que ficaram expostos ao impacto das cinzas, dentro de uma caldeira de uma usina termelétrica nacional, mostraram que a utilização de revestimentos metálicos em componentes que estão expostos ao mecanismo de erosão por cinza podem auxiliar na redução dos custos de manutenção, e como consequência, na redução do número de paradas não programadas de caldeiras.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A aspersão térmica dos revestimentos de ligas metálicas foi realizada pela empresa VGK Engenharia, localizada no Rio de Janeiro, através da técnica de arco elétrico, utilizando um equipamento da Praxair Surface Technologies, modelo TAFA 8835, operado manualmente.

Os parâmetros utilizados para produção de todas as amostras são apresentados na Tabela 1 e foram determinados pela empresa parceira. Esta empresa realizou o processo de aspersão tendo por base a experiência técnica da mesma com o processo. A combinação de parâmetros utilizada para a obtenção dos revestimentos foi elaborada de modo a gerar um tamanho de partícula considerado “ótimo”, pois partículas grandes promovem a formação de poros e partículas muito finas favorecem a oxidação [1]. O gás atomizante utilizado no processo foi ar comprimido.

**Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a produção dos revestimentos de ligas metálicas por aspersão.**

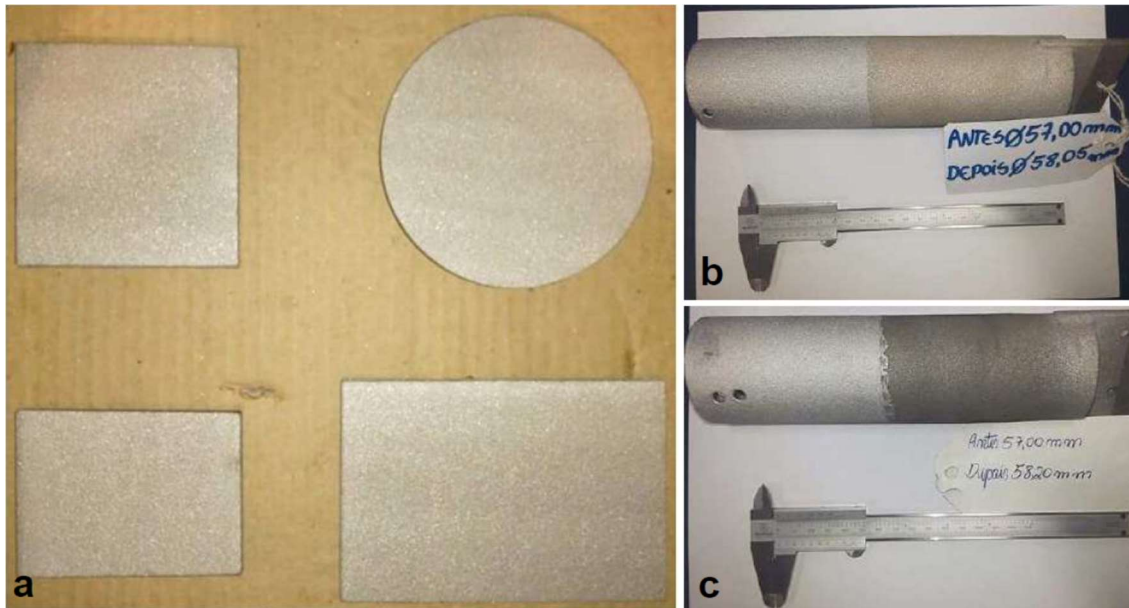
Tensão (V)	30
Corrente (A)	100
Pressão do ar atomizante (psi)	70
Distância de projeção (mm)	100
Ângulo de projeção	90°
Taxa de deposição (kg/h)	5

Foram utilizadas duas ligas metálicas distintas, cujas composições químicas são apresentadas na Tabela 2, para confecção de dois diferentes revestimentos, com o objetivo de produzir uma camada de deposição com espessura média de 500 µm. Foram produzidas amostras em chapas e tubos, conforme Figura 1. Para revestir externamente o tubo, este foi fixado em torno e permaneceu girando com velocidade controlada, enquanto o operador manuseava a pistola de aspersão. Os revestimentos foram depositados em substratos de aço baixa liga, tipicamente utilizado em usinas termelétricas.

As ligas que atuarão como revestimentos foram selecionadas a partir de características técnicas e propriedades mecânicas de materiais resistentes a temperaturas elevadas (temperaturas de operação das caldeiras entre 550 - 800°C). A escolha do processo de aspersão térmica a arco elétrico foi devido a possibilidade de produzir revestimentos em grandes superfícies e em campo, o que se reflete em custos relativamente baixos de produção comparado com outras técnicas de deposição similares [2-4].

**Tabela 2 – Composição química dos consumíveis metálicos utilizados no processo de aspersão.**

Elemento (% em peso)	Cr	Nb	Ni	B	Al	Mn	Si	Fe
Liga A	13,2	6,00	5,50	4,20	2,00	1,30	1,20	Balanço
Liga B	29,0	-	-	3,75	-	1,65	1,60	Balanço



**Figura 1 – Amostras produzidas por aspersão térmica: (a) ligas A e B em chapas; (b) liga A em tubo; (c) liga B em tubo.**

As chapas metálicas revestidas com as Ligas A e B foram submetidas a caracterização sem que fossem expostas às condições reais de trabalho. Já os tubos revestidos foram submetidos a caracterização apenas após a exposição, não sendo realizada nenhuma análise anterior ao período de 14 meses ano em que permaneceram expostos no interior de uma caldeira de geração termelétrica nacional.

Para caracterização por microscopia ótica as amostras, chapas e tubos, foram submetidas ao procedimento padrão de preparação metalográfica, sendo este iniciado por corte com refrigeração, seguido por embutimento em baquelite e posterior lixamento e polimento. As metalografias obtidas das amostras passaram por processamento digital de imagens para quantificação dos defeitos nos revestimentos. Para quantificação dos defeitos foram utilizados aproximadamente 30 campos de imagens de cada uma das amostras preparadas.

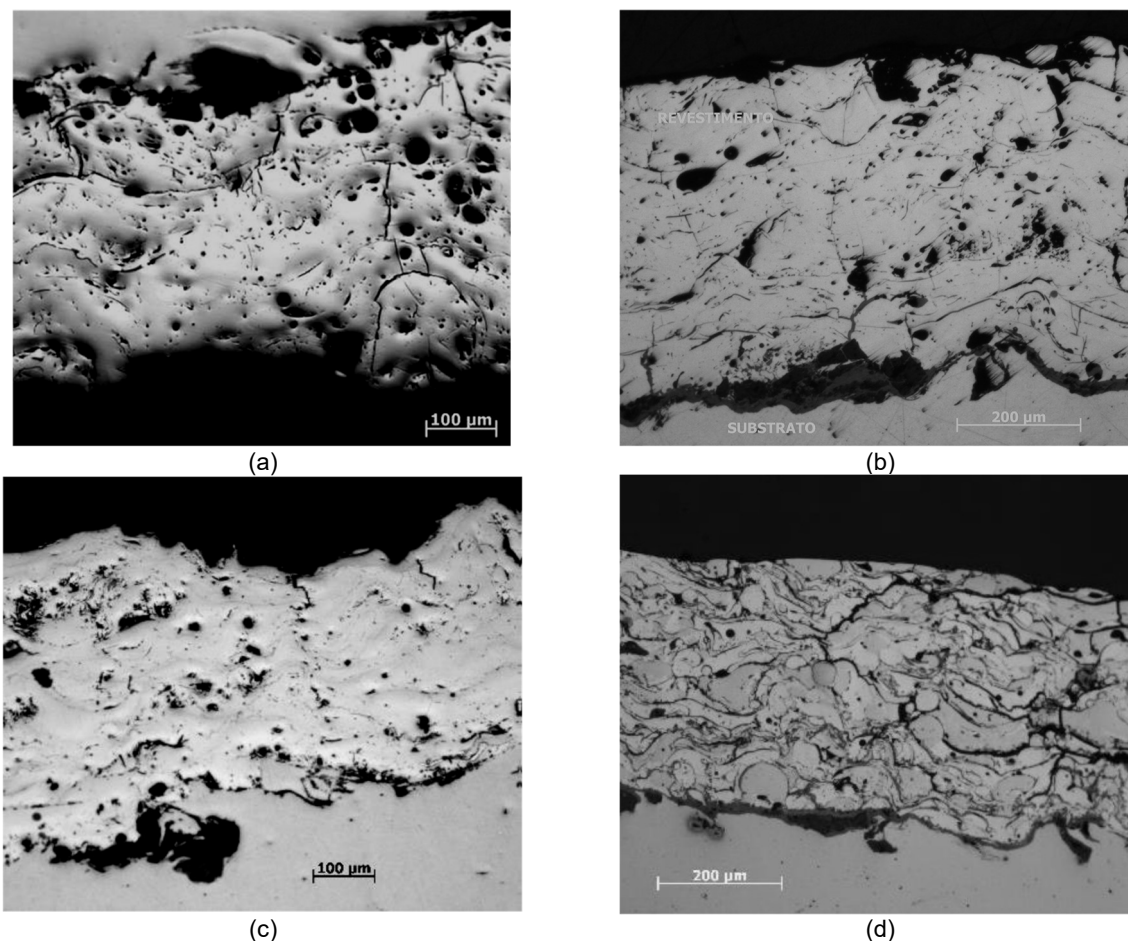
Foram realizados ensaios de microdureza Vickers para avaliação do comportamento mecânico dos revestimentos.

Para avaliação do comportamento dos revestimentos em ambientes corrosivos foram realizados ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). O eletrólito utilizado nos ensaios eletroquímicos foi carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) com concentração 0,1 mol/L. As amostras das chapas foram submetidas a ensaios de EIE em tempos de 1, 24 e 144 horas de imersão a fim de simular um envelhecimento das mesmas em meio agressivo. Como já haviam sido expostas a condições reais de trabalho por 14 meses, as amostras dos tubos foram submetidas apenas a ensaios após 1 hora de imersão.

### 3.0 RESULTADOS

A Figura 2 apresenta as metalografias dos revestimentos depositados nas chapas e nos tubos. Verifica-se que o revestimento da liga B no tubo apresentou uma aparência diferenciada dos demais, o que pode ser atribuído ao processo de deposição do revestimento no tubo.

Os revestimentos estudados apresentaram aspectos típicos, como partículas parcialmente fundidas, fases heterogêneas, óxidos, trincas, microtrincas e porosidade, conforme pode ser observado na Figura 2. Estes resultados estão de acordo com o que a literatura apresenta para defeitos típicos associados a revestimentos obtidos por aspersão térmica a arco elétrico [5].



**Figura 2 – Revestimentos obtidos para as ligas A e B em chapas e tubos: (a) Liga A em chapa; (b) Liga A em tubo; (c) Liga B em chapa; (d) Liga B em tubo.**

Após um período de 14 meses na caldeira, os revestimentos dos tubos analisados apresentaram uma suavização da superfície do revestimento. Nas Figuras 2(b) e 2(d) é possível perceber, de forma qualitativa, que a rugosidade característica do processo de aspersão térmica por arco elétrico diminuiu, sem que houvesse redução da espessura do revestimento, que permaneceu em torno de 500 µm. Isto ocorreu devido ao impacto de partículas de cinzas do carvão mineral com o revestimento dentro da caldeira, que eliminaram os picos de rugosidade da superfície inicial, partículas estas provenientes de resíduos da queima do carvão mineral [6]. A eliminação dos picos de rugosidade atua de forma benéfica nos revestimentos minimizando os efeitos dos impactos subsequentes das partículas de cinzas nos mesmos.

A Tabela 3 apresenta o percentual de defeitos medidos nas amostras através da técnica de processamento digital de imagens. O percentual de defeitos obtido para todas as condições analisadas está dentro do esperado ( $\leq 15\%$ ) para a técnica de aspersão térmica por arco elétrico [7, 8]. Em todos os casos houve predominância de defeitos alongados, em sua maioria formados por poros interlamelares [5].

Os resultados mostraram valores bem próximos para a quantidade total de defeitos nas amostras em formato de chapas, o que sugere uma influência majoritária dos parâmetros de aspersão no resultado final da morfologia destes revestimentos. Por outro lado, as amostras dos tubos apresentaram valores de defeitos totais maiores em relação às chapas, o que corrobora a análise qualitativa das imagens do revestimento dos tubos, Figura 2 acima, e uma provável influência da geometria do substrato no aumento deste percentual, tendo em vista que foram utilizados os mesmos ajustes no processo.

**Tabela 3 – Comparativo do percentual médio de defeitos totais, alongados e arredondados das amostras analisadas.**

Amostras	Defeitos Totais (%)	Defeitos Alongados (%)	Defeitos Arredondados (%)
Liga A – Chapa	$5,0 \pm 2,0$	$4,0 \pm 2,0$	$1,0 \pm 0,5$
Liga A – Tubo	$7,6 \pm 5,5$	$7,0 \pm 5,2$	$0,6 \pm 0,3$
Liga B – Chapa	$5,6 \pm 3,0$	$5,0 \pm 2,9$	$0,6 \pm 0,5$

Liga B – Tubo	$14,9 \pm 5,8$	$14,4 \pm 5,5$	$0,6 \pm 0,3$
---------------	----------------	----------------	---------------

A tabela 4 apresenta os valores médios de microdureza Vickers das amostras avaliadas no presente informe técnico, assim como a dureza média da cinza resultante da queima de carvão da central termelétrica onde os tubos ficaram expostos [9].

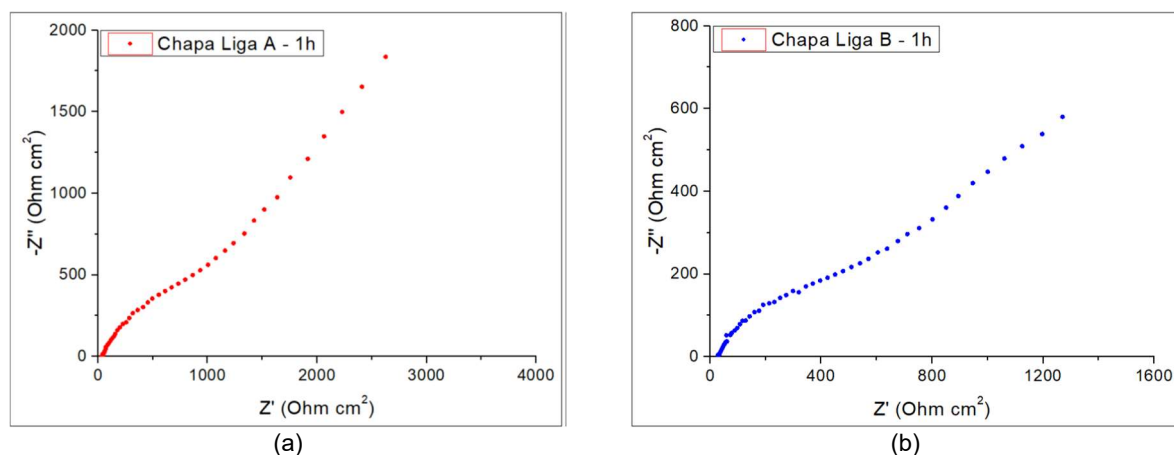
**Tabela 4 – Valores médios de dureza das amostras analisadas e das partículas de cinza da central termelétrica onde os tubos ficaram expostos.**

Amostras	Dureza (HV)	
	Chapa	Tubo
Liga A	1.115,0	1.212,0
Liga B	730,0	1250,0
Cinza	825,0	

Do ponto de vista mecânico, é fundamental que a dureza dos revestimentos seja superior ao do agente abrasivo, caso contrário o mecanismo de dano por erosão continuaria atuando. Uma vez que os resultados de microdureza dos revestimentos mostraram-se superiores ao valor de microdureza das cinzas, os mesmos corroboram a análise qualitativa feita por microscopia ótica, onde se notava que os revestimentos ficaram preservados mesmo após um período de 14 meses de exposição na região crítica da caldeira do ponto de vista da erosão por cinzas.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em meio de carbonato de sódio 0,1 mol/L, com o intuito de se aproximar do meio em que as amostras dos tubos foram expostas, isto é, em uma caldeira a vapor rica em  $\text{CO}_2$ , o qual é proveniente dos produtos da queima do carvão mineral.

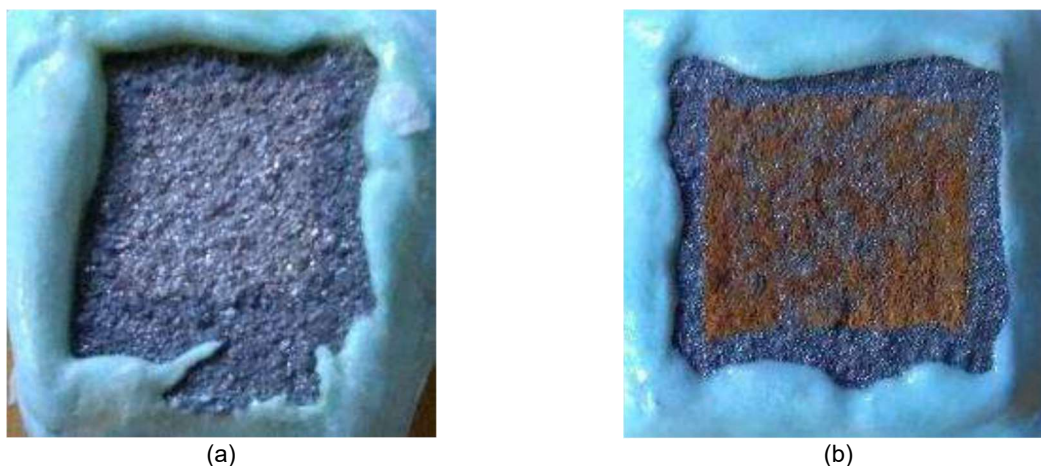
A Figura 3 mostra o diagrama de Nyquist para as amostras das chapas com os revestimentos das ligas A e B após 1 hora de imersão no eletrólito, com a formação de um arco capacitivo incompleto seguido por uma reta ascendente característica de revestimentos porosos onde há difusão de produtos de corrosão através dos poros [10]. A mesma característica foi identificada nos diagramas das amostras dos tubos.



**Figura 3 – Diagrama de Nyquist para as amostras após 1h de permanência na solução: (a) Liga A; (b) Liga B.**

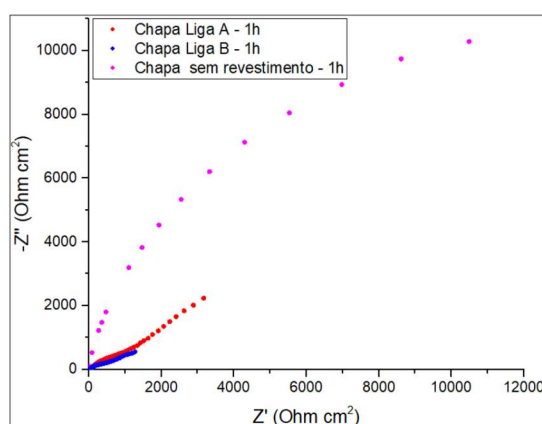
A Figura 4 apresenta o aspecto da superfície das amostras das chapas das ligas A e B após 144h de permanência na solução e realização dos ensaios de EIE.

A Chapa da liga B aparentemente acumulou sobre a superfície produtos de corrosão, provavelmente oriundos do substrato, que emergiram para o topo do revestimento [11, 12]. Este produto de corrosão pode ter sido o que “fechou” os poros e conferiu a Chapa Liga B o aumento do arco capacitivo após as primeiras horas de exposição, enquanto o substrato protegido pelo revestimento Liga A pode não ter sido atacado dentro do período de 144h de ensaio, devido dificuldade de penetração da solução ou ausência de porosidade interconectada.



**Figura 4 – Superfície das amostras das chapas após 144h de permanência na solução: (a) Liga A; (b) Liga B.**

A Figura 5 apresenta dados de impedância para as chapas contendo os revestimentos com as ligas A e B e o substrato sem revestimento após 1h de imersão. Durante o período inicial de exposição, ambos os revestimentos pulverizados apresentaram defeitos que resultaram em valores de impedância mais baixos do que a superfície não revestida. Com o aumento do período de exposição, a tendência é que os valores de impedância do substrato não revestido decaiam [13].



**Figura 5 – Diagrama de Nyquist para as amostras CA, CB e substrato sem revestimento (1h).**

#### 4.0 CONCLUSÕES

A aplicação de revestimentos por aspersão térmica a arco elétrico mostra-se uma alternativa viável tecnicamente, do ponto de vista dos resultados obtidos com os revestimentos estudados, e devido sua facilidade de aplicação no campo, quando comparada com técnicas mais avançadas de aspersão térmica.

Os revestimentos apresentaram defeitos dentro do aceito pela literatura e resistiram bem ao período de exposição de 14 meses numa caldeira de uma central termelétrica nacional, corroborando a viabilidade técnica para utilização dos mesmos como possibilidades reais para mitigar o problema da erosão por cinzas em tubos de caldeira de centrais termelétricas nacionais.

A possibilidade conexão entre os defeitos dos revestimentos apresenta um risco do ponto de vista de proteção anticorrosiva, uma vez, que o eletrólito pode alcançar o substrato e corroê-lo. Além disso, do ponto de vista mecânico, há um risco de quebra ou perdas de partes do revestimento devido a conexão entres os defeitos poder formar uma macrotrinca no revestimento. É necessária uma melhoria nos parâmetros de aspersão térmica da liga B em chapas e tubos.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a liga A se apresentou como uma melhor opção para aplicação em tubos de caldeiras. A liga A apresentou uma melhor estrutura quando aplicada em tubos, apresentou uma dureza superior à das cinzas que causam a erosão e mostrou-se mais resistente ao ambiente corrosivo, uma vez que não surgiram produtos de corrosão provenientes do substrato durante os ensaios de EIE.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- [1] Kromer, R.; Cormier, J.; Costil, S. Role of Powder Granulometry and Substrate Topography in Adhesion Strength of Thermal Spray Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016.
- [2] Galedari, S. A., Mahdavi, A., Azarmi, F., Huang, Y., & McDonald, A. (2019). A Comprehensive Review of Corrosion Resistance of Thermally-Sprayed and Thermally-Diffused Protective Coatings on Steel Structures. *Journal of Thermal Spray Technology*. doi:10.1007/s11666-019-00855-3
- [3] Yury K., Filippov M., Makarov A., Malygina I., Soboleva N., Fantozzi D., Andrea M., Koivuluoto H., Vuoristo P. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering. *Coatings*. 2018; 8(2):71. doi.org/10.3390/coatings8020071
- [4] Kumar, S., Kumar, M., Handa, A. (2018). Combating hot corrosion of boiler tubes – A study. *Engineering Failure Analysis*. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.08.004
- [5] Vreijling, M. P. W., *Electrochemical Characterisation of Metallic Thermally Sprayed Coatings*, PhD Thesis, disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ae1b040fb-c63b-4666-883b-3786517b3a68>, acessado em fevereiro de 2020.
- [6] Thiyagarajan, B.; Senthilkumar, V. Experimental studies on fly-ash erosion behavior of Ni-Cr based nanostructured thermal spray coating in boiler tubes. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016.
- [7] Paredes, R.S.C. *Aspersão Térmica*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- [8] Pawlowski, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, Wiley Publishing, Inglaterra, 2008.
- [9] Gomes, D., L., Cardoso, B. R., Furtado, H. C., Diniz, M. G. Characterization of Fly Ash and a Protective Coating for Brazilian Thermal Power Plant Boilers, *Materials Research*. 2020; 23(6): e20200257, DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0257>
- [10] Cano, E.; Lafuente, D.; Bastidas, D.M. Use of EIS for the evaluation of the protective properties of coatings for metallic cultural heritage: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*. Springer-Verlag, 2009.
- [11] Jin, Z., Liu, M., Zhu, L., Wang, H., Ma, G., Xing, Z., Chen, S. Microstructure and Corrosion Behavior of Aluminum Coatings Prepared by High-Efficiency Supersonic Plasma Spraying and Oxygen–Acetylene Flame Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020.
- [12] Lee, H.-S., Singh, J.K., Ismail, M.A. An effective and novel pore sealing agent to enhance the corrosion resistance performance of Al coating in artificial ocean water. *Scientific Reports*, 2017.
- [13] Lee, H.-S., Park, J., Singh, J.K., Ismail, M.A. Deposition of Coating to Protect Waste Water Reservoir in Acidic Solution by Arc Thermal Spray Process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2004), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (2007) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017). Atualmente é pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: alta temperatura, avaliação de integridade, fluência, estimativa de vida residual.

## (2) ROBERTA MARTINS DE SANTANA

Formada em Licenciatura em Matemática pela Unigranrio e Mestra em Ciências, em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Atualmente cursando o Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Técnica em Mecânica Industrial pelo CEFET-RJ atuando na área desde 1998. Trabalha desde 2006 no área de metalografia e análise de falhas no CEPEL – Ilha do Fundão. Experiência em Microscopia Eletrônica, Preparação Metalográfica de Amostras e Preparação de Amostras para Microscopia Eletrônica, Análise de Falhas, Ensaios de Fluência e Fluência Small Punch e Inspeção em Caldeiras Termelétricas. Trabalhou de 2000 a 2001 na GE Aircraft Engines - Petrópolis/RJ

## (3) HELOISA CUNHA FURTADO

Engenheira metalúrgica e de materiais formada pela UFRJ, tendo concluiu o mestrado e o doutorado na COPPE/UFRJ na mesma área. Realizou curso de MBA em Energia no IBMEC e pós-doutorado no Instituto Técnico de Lisboa na área de materiais para usinas termelétricas. Trabalha desde 1986 no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) atuando na área de Avaliação de Integridade Estrutural em Plantas Térmicas. É membro da ABRAGE desde a sua fundação, atuando no grupo de Trabalho de manutenção de Usinas termelétricas (GTMT). É coordenadora da Comissão de Inspeção de equipamentos do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP).

## (4) PAMELLA KESSELER DE CAMPOS

Graduada em Engenharia Mecânica pela UERJ (2015). Mestrado em Engenharia Mecânica pela UERJ o com ênfase em materiais (2017). Atualmente desenvolve pesquisa de doutorado em parceria com o CEPEL. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, no setor de óleo e gás, com o desenvolvimento de projetos e propostas comerciais de sistemas de remoção de sulfato para água de injeção. Na área de Engenharia de Materiais, tem experiência em caracterização mecânica e metalúrgica de materiais, metalurgia da soldagem e em pesquisa e desenvolvimento de materiais utilizados em sistemas de geração de energia elétrica.

## (5) DIEGO DE LIMA GOMES

Diego Gomes: Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ, 2016), Mestrado em Engenharia Mecânica com ênfase em Materiais (UERJ, 2018) e Doutorado em Engenharia Mecânica (UERJ, em curso) - Área de concentração em Mecânica dos Sólidos. Foi pesquisador em inovação tecnológica nível 3 do Centro de Tecnologia e Ciências da Faculdade de Engenharia UERJ. Atualmente é Pesquisador da Faculdade de Engenharia UERJ. Desenvolve sua linha de pesquisa em materiais compósitos e sustentabilidade de rejeitos industriais. Na área de Engenharia, tem experiência em caracterização mecânica e metalúrgica de materiais.

## (6) FREDERICO GARCIA BINDI DE LACERDA

Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2020) com ênfase em mecânica dos sólidos. Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2016). Técnico em mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (2010).

## (7) GUSTAVO DUCIAK

Graduado em Engenharia Mecânica pela UFRGS e Mestre na área de Fenômeno de transporte pela UFRGS. Profissional com 5 anos de experiência na área de inspeção em termoelétricas, principalmente em caldeiras de grande porte e seus periféricos. Durante este período adquiri conhecimentos relacionados à metalurgia, vasos sob pressão, NR13, RBI, ASME e API. Também possui 5 anos e meio de experiência na área de eficiência energética, reduzindo o consumo de energia em sistemas de ar comprimido, refrigeração industrial, climatização, bombeamento e geração e distribuição de vapor. Profissional flexível, proativo, comunicativo. Foco em qualidade e resultados, trabalho em equipe e autodesenvolvimento.



(8) MARILIA GARCIA DINIZ  
Possui graduação em Engenharia Industrial Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense (1989) , mestrado em Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1992) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2001) . Professor Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro com experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando nos seguintes temas: Caracterização de materiais, controle de processo de fabricação de novos materiais, biomateriais, análise e processamento digital de imagens, metalografia colorida, análise de falhas por fratura, sistemas de energias renováveis, soldagem e revestimentos obtidos por aspersão térmica.