

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estudo de caso de corrosão metálica em equipamentos elétricos da subestação Angelim, PE

Alberto Pires Ordine^a, Fernando de Loureiro Fragata^b, Mauro Zanini Sebrão^c,
Francisco Alexandre Filho^d, Luiz Raimundo Barbosa^e

Abstract

This paper presents a case study about an investigation to identify the causes of a corrosion process observed in connection bars made of aluminum. These aluminum bars were used to connect primary terminals of 500 kV current transformers (TC) to rigid bars, installed in Angelim substation, located in the state of Pernambuco. The investigation was carried out in 2008 by Cepel, answering a request from Chesf, when field samples were inspected, materials were collected and laboratory tests were accomplished. The tests included chemical analysis of aqueous solutions obtained from the washing water of some substation samples and metallographic analysis of the material collected from the substation. In this last case, it was applied energy dispersion technique allied with a scanning electron microscopy and X-ray diffraction technique. The study revealed that the way the aluminum bar was installed, which was supposed to improve the electric conductivity for the equipment, created a specific condition to develop a pronounced corrosion process. So, it is shown in the paper the importance to consider basic knowledge of corrosion mechanisms during the design of equipments and metallic structures.

Keywords: aluminum, atmospheric corrosion, electric equipments

Resumo

Este artigo apresenta um estudo de caso sobre uma análise pericial para a identificação das causas do processo de corrosão observado em barras de conexão de alumínio. Tais barras encontravam-se entre os terminais primários de transformadores de corrente (TC) de 500 kV e barramentos rígidos, instalados na subestação Angelim, localizada no interior do Estado de Pernambuco. A investigação foi realizada em 2008 pelo Cepel, atendendo à solicitação da Chesf, em que foram inspecionadas peças em campo, coletados materiais para análise e realizados ensaios de laboratório. Os ensaios compreenderam análises químicas em extratos aquosos de peças da subestação e análises metalográficas de materiais coletados, utilizando a técnica de dispersão de energia associada à microscopia eletrônica de varredura e a técnica de difração de raio-X. Constatou-se que a forma como foi construída a peça para servir aos equipamentos, com o objetivo de melhorar a condução elétrica, acabou gerando uma condição

^a D. Sc., Engenheiro Químico – Eletrobras Cepel

^b Engenheiro Químico

^c M. Sc., Engenheiro Metalúrgico

^d Engenheiro Mecânico

^e Engenheiro Mecânico – Eletrobras Chesf

propícia e específica para desenvolver um acentuado processo de corrosão da barra de alumínio. Assim, o trabalho mostra que é importante levar em conta conhecimentos básicos sobre mecanismos de corrosão em etapas de projeto de equipamentos e estruturas metálicas.

Palavras-chave: alumínio, corrosão atmosférica, equipamentos elétricos

Introdução

Às vezes, problemas de corrosão em estruturas metálicas podem ser evitados com medidas simples durante o projeto das estruturas, ou mesmo por uma avaliação criteriosa durante a manutenção das mesmas. Por exemplo, deve-se evitar estagnação de água, frestas, contatos bimetalicos, prever acessibilidade de manutenção de equipamentos, trabalhar com cordões de solda bem acabados, cantos arredondados, entre outros (1). Apesar disso, é possível que projetistas de diversas áreas de conhecimento ou mesmo pessoal de manutenção aperfeiçoem condições de operação de equipamentos e estruturas metálicas, levando-se em conta somente conhecimentos técnicos de suas áreas de atuação. E acabam-se gerando processos corrosivos metálicos por se criar condições específicas que favorecem esses processos. Um caso já investigado pelo Cepel anteriormente serve de exemplo para tal afirmação (2). O presente estudo também corrobora para o fato e aconteceu em transformadores de corrente (TC) da subestação de energia elétrica Angelim, pertencente à Eletrobras Chesf e localizada no interior do estado de Pernambuco.

Por um lado, pretendia-se aprimorar a condução elétrica entre os equipamentos e seus barramentos rígidos, e projetou-se uma barra de conexão confeccionada em alumínio para atender a este objetivo. Porém criou-se uma condição favorável ao desenvolvimento de um acentuado processo corrosivo do alumínio. Assim, neste trabalho, descreve-se o estudo de caso envolvendo perícia técnica para explicar o problema de corrosão nas citadas barras de alumínio, da subestação Angelim. Este trabalho foi realizado pelo Cepel em conjunto com a Chesf no ano de 2008 e envolveu investigações em campo e em laboratório. O objetivo do trabalho é apresentar a metodologia e os resultados desta investigação, chamando atenção para a corrosão como um fenômeno natural a ocorrer, se criadas condições propícias para isso. Dessa forma, destaca-se a importância em se ter conhecimentos técnicos mínimos sobre mecanismos simples de corrosão por projetistas e equipes de manutenção que trabalhem com materiais metálicos.

Metodologia

O problema de corrosão foi observado na barra de conexão de alumínio entre os terminais primários dos TC de 500 kV e os barramentos rígidos. Sobre os TC, tais equipamentos operavam na SE há cerca de 30 anos, sem que tivessem sido efetuadas quaisquer troca de materiais constituintes dos mesmos. Eram 29 transformadores originais de 500 kV, todos apresentando o mesmo problema de corrosão na barra de conexão. A Figura 1 mostra um dos TC, bem como o local da conexão onde se observou corrosão. Tal problema foi relatado pela Chesf ao Cepel em março de 2008, quando foram fornecidas fotografias da barra corroída, retiradas pela equipe de manutenção da SE Angelim, por ocasião de uma desmontagem de tal conexão. A Figura 2 apresenta algumas fotos enviadas pela Chesf ao Cepel, naquele momento. Observa-se uma quantidade significativa de um produto de corrosão de cor branca.

Este produto parecia ser pouco aderente, uma vez que se encontra boa parte do mesmo no chão ao redor da estrutura.



Figura 1 – Foto do TC de 500 kV, destacando-se a conexão em que foi observado o problema de corrosão na SE Angelim, PE



Figura 2 – Fotos enviadas pela Chesf ao Cepel, de uma das barras com corrosão após desmontagem da conexão entre a barra do terminal primário do TC e o barramento rígido

Pela Figura 2, observa-se a presença de um revestimento (indicado pelas setas), cujo objetivo era conferir uma melhor condutividade elétrica na região de contato entre a barra e o terminal primário do TC. Vale destacar que esse revestimento estava presente somente na região de contato com a barra do terminal primário do TC e não naquela região de contato com o

barramento rígido. Ou seja, somente metade da barra de conexão era revestida, como ilustrado no esquema da Figura 3.

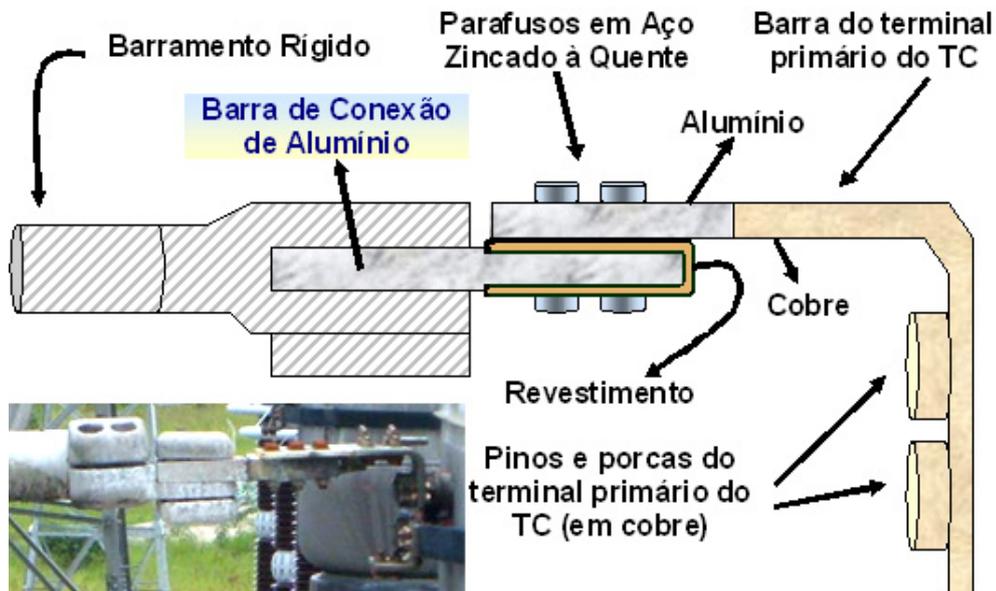


Figura 3 – Esquema da montagem da barra de conexão entre a barra do terminal primário do TC e o barramento rígido

A partir da solicitação da Chesf ao Cepel para investigar o problema de corrosão da barra de conexão de alumínio, a metodologia de trabalho teve início por uma visita técnica à subestação Angelim. O objetivo foi avaliar a atmosfera local, a presença de poluentes, a existência ou não de corrosão em outras estruturas e coletar informações com a equipe local que ajudassem no entendimento do processo corrosivo em questão. Além disso, realizou-se uma documentação fotográfica, a coleta de materiais para análise em laboratório e a lavagem de áreas de estruturas da subestação, com água destilada, recolhendo-se esta água em frascos previamente esterilizados para posterior análise química do extrato aquoso.

Numa segunda etapa do trabalho, realizada em laboratório nas instalações do Cepel, foram conduzidas análises metalográficas dos materiais coletados e análises químicas dos extratos aquosos. As primeiras compreenderam a técnica de dispersão de energia associada à microscopia eletrônica de varredura, para identificação dos elementos químicos presentes no produto de corrosão do alumínio e no revestimento e a técnica de difração de raio-X, para determinação dos compostos gerados pela corrosão do alumínio. Realizou-se também uma microscopia ótica da seção transversal do revestimento com determinação de espessura da camada. Na análise química dos extratos aquosos, determinou-se valores de pH, condutividade, teor de sulfato e teor de cloreto. A concentração de cloreto foi obtida por método colorimétrico, e a de sulfato, por método turbidimétrico.

Resultados – Visita técnica à subestação Angelim

A subestação (SE) Angelim está instalada na cidade de mesmo nome e situa-se a 230 km de Recife, no interior do Estado de Pernambuco e, portanto, longe da região costeira. Não existem indústrias nas proximidades e o ambiente é rural, sendo a SE rodeada de morros com

vegetação rasteira e árvores de pequeno porte. As fotos da Figura 4 mostram os arredores em torno da SE e uma vista geral da mesma. Destaca-se que, principalmente na época do ano em que foi realizada a visita (maio-julho), a região cobre-se de uma intensa neblina à noite e no início da manhã, quando a temperatura ambiente cai (médias de 18 °C, à noite e 25 °C, durante o dia). Observou-se condensação de umidade no início da manhã, indicando que é elevada a umidade local, naquela época do ano. Durante esta visita técnica, foi realizada uma inspeção geral nos equipamentos com auxílio de binóculos, coletados diferentes materiais para análises nos laboratórios do Cepel e por meio da montagem de um andaime (Figura 5), foi possível inspecionar de perto o problema de corrosão na barra de conexão de um dos TC, especificamente aquele localizado na posição operacional 95E3 fase A.



Figura 4 – Paisagens em torno da SE Angelim, um ambiente tipicamente rural e vista geral da SE



Figura 5 – Montagem de andaime para inspeção da barra de conexão do TC de posição operacional 95E3 fase A

Os materiais constituintes dos equipamentos da SE Angelim são, basicamente, o cobre, o aço zincado por imersão à quente e o alumínio. De modo geral, observou-se que estes materiais estavam em bom estado de conservação, considerando que se encontravam naquele ambiente por aproximadamente 30 anos. Algumas estruturas aéreas de aço zincado por imersão à quente apresentavam a superfície metálica ainda intacta, como mostra a Figura 6, o que é um indicativo da baixa agressividade da atmosfera.

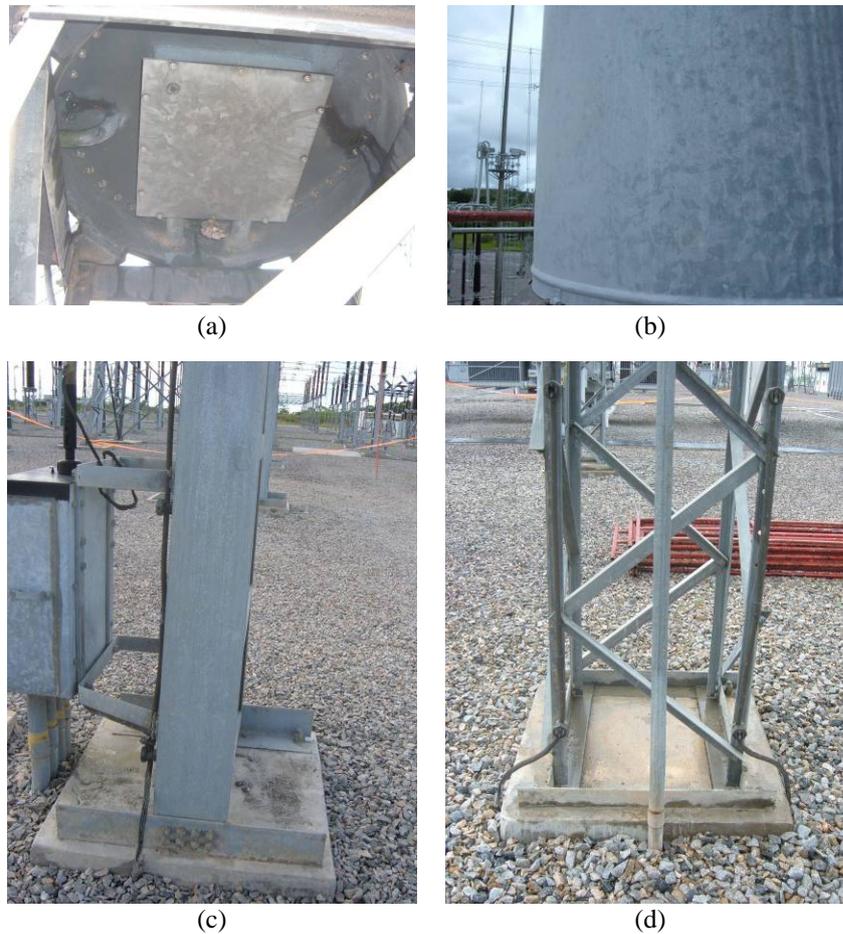


Figura 6 – Diferentes estruturas confeccionadas em aço zincado por imersão à quente apresentando bom estado de conservação, sendo (a) fundo de um TC, (b) cuba de proteção da cabeça de um TC, (c) estrutura de uma chave seccionadora, (d) estrutura de sustentação de um TC

Em relação aos materiais de cobre, foram inspecionados os cabos de aterramento de diferentes estruturas e os pinos e porcas dos terminais primários do TC de posição operacional 95E3 fase A. A Figura 7 mostra fotos dos cabos de aterramento. Alguns dos cabos apresentavam-se escurecidos, como mostra a Figura 7(a), devido à formação do óxido de cobre, que é um processo normal para o tipo de atmosfera em questão. Observou-se ainda a presença de um produto de corrosão esverdeado, Figura 7(b), fato este não esperado, haja vista que a atmosfera local não evidenciava possuir cloreto (Cl^-) ou sulfato (SO_4^{2-}). Por esta razão, este produto esverdeado foi coletado para análise em laboratório. Tanto o óxido de cobre, quanto o produto esverdeado possuíam características protetoras, o que foi confirmado, lixando-se a superfície. Como mostra a Figura 7(c), por exemplo, observou-se que o produto esverdeado é fino e após o lixamento, mostra a superfície brilhante e intacta do cobre. Assim, não há o que se preocupar com os processos de corrosão observados nos cabos de aterramento. Qualquer que seja o produto de corrosão, ambos constituem-se numa película protetora, fina e que não levará a perdas de material, nem à perda de propriedades mecânicas e elétricas do cobre. Quanto aos pinos e porcas de cobre do terminal primário do TC inspecionado, apresentados na Figura 8, a característica do processo corrosivo foi a mesma daquela observada em

trabalho de perícia técnica anterior, realizado pelo Cepel, em outra subestação (2), no caso, a SE Olindina, localizada na Bahia. O produto de corrosão foi colhido e analisado em laboratório no Cepel, confirmando-se o mesmo resultado daquele de Olindina. Como o trabalho já foi publicado, o resultado é o mesmo e não é o objetivo do presente artigo, este não será apresentado.

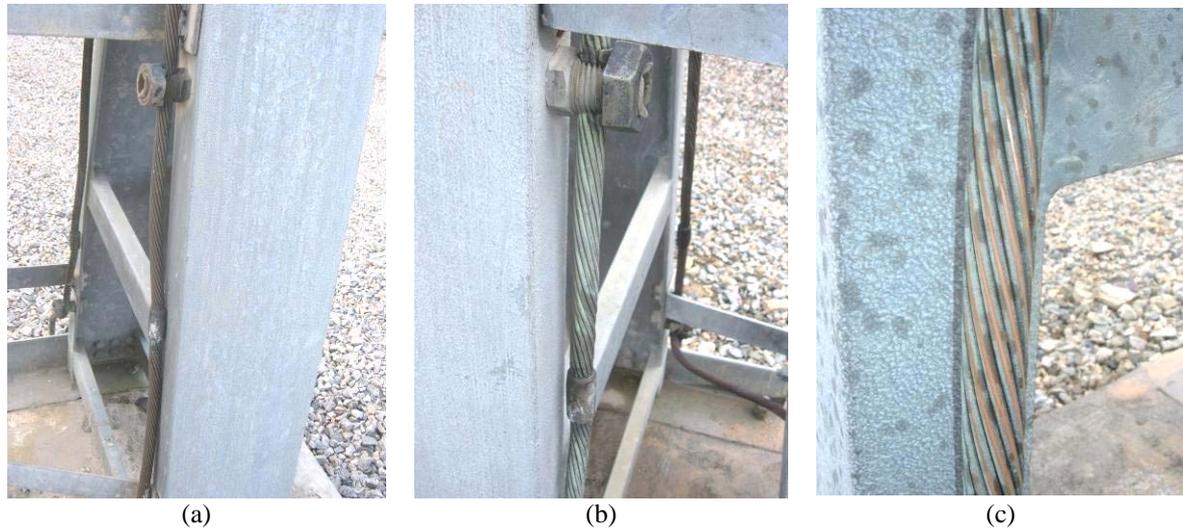


Figura 7 – Aspecto visual do cobre, constituinte dos cabos de aterramento, mostrando-se (a) escurecido ou (b) esverdeado. Após o lixamento (c) da superfície esverdeada, observa-se o cobre intacto



Figura 8 – Pinos e porcas do terminal primário do TC de 500 kV AOK – BBC, posição operacional 95E3 fase A, apresentando características de processo corrosivo idênticas àquelas observadas na SE Olindina (2). À direita, observa-se o cobre de cor “viva”, tal como em Olindina, após retirada do produto de corrosão superficial para identificação no Cepel

Por fim, durante a visita técnica, documentou-se o problema de corrosão da barra de conexão entre o terminal primário e o barramento rígido, como pode ser visto pelas fotografias da Figura 9. Foram coletados para análise no Cepel o produto de corrosão branco e pedaços do revestimento lateral, já solto. A Figura 9 comprova o que já havia sido observado com as imagens enviadas pela Chesf ao Cepel, ou seja, o produto de corrosão formou-se sob o revestimento, provocando sua delaminação.



Figura 9 – Corrosão da barra de conexão de alumínio sob o revestimento

Além disso, verificou-se que somente onde há a presença do revestimento é que se observou a intensa corrosão da barra. Existem poucas regiões com produtos de corrosão nas áreas não revestidas da barra de conexão, e também nas peças do barramento rígido que se acoplam na barra, como mostra a Figura 10. Nestas, a maior quantidade de produtos de corrosão encontrava-se na região inferior das peças, provavelmente devido à condensação de umidade. Na região superior, a umidade é mais facilmente dissipada por ventos e incidência solar.



Figura 10 – Aspecto dos conectores do barramento rígido e da barra de conexão na região não revestida

Assim, sobre a região da barra de conexão, onde não havia o revestimento e sobre as peças de acoplamento do barramento rígido, pode-se dizer que os materiais ainda se encontravam em bom estado de conservação, considerando-se os quase 30 anos de exposição. Quanto à região da barra de conexão onde havia o revestimento, observou-se uma corrosão intensa. Após a inspeção no TC de 500 kV AOK-BBC de posição operacional 95E3 fase A, com o auxílio de binóculos, observou-se o estado de todas as barras dos 29 TC do mesmo tipo daquele inspecionado de perto, verificando-se o mesmo problema em todos. É o que se pode

comprovar pela Figura 11, que apresenta alguns exemplos da região revestida em outros TC, com o mesmo processo corrosivo do TC inspecionado. Estas fotografias foram tomadas em modo de aproximação da máquina fotográfica, pois tais peças situavam-se a 8 m do solo. Estas condições são representativas dos 29 TC, que se encontravam em estados semelhantes.



Figura 11 – Corrosão sob o revestimento, observada em todas as barras de conexão entre os TC e os barramentos rígidos da SE Angelim

Por fim, durante a visita técnica à subestação, observou-se que havia uma equipe lavando os equipamentos com água proveniente de um poço próximo à SE Angelim. De acordo com informações prestadas pela equipe da subestação, esta água é tratada numa estação de tratamento presente na própria subestação antes de ser utilizada. A mesma foi coletada para análise química no Cepel. A Figura 12 mostra a operação de lavagem dos equipamentos observada durante a visita.



Figura 12 – Operação de lavagem dos equipamentos da SE Angelim

Resultados – Análise em laboratório dos materiais coletados na subestação Angelim

Por meio da técnica de Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS) foi realizada uma análise semi-quantitativa dos teores dos elementos químicos presentes nos seguintes produtos sólidos coletados:

- Produto de corrosão esverdeado, presente nos cabos de aterramento (material: cobre);
- Produto de corrosão branco, sob o revestimento, da barra de conexão entre o terminal primário do TC inspecionado e o barramento rígido (material: alumínio).

A Figura 13 e a Tabela 1 apresentam, respectivamente, o espectro de dispersão de energia e os teores relativos dos elementos encontrados no produto de corrosão esverdeado do cobre dos cabos de aterramento, obtidos pela técnica de EDS.

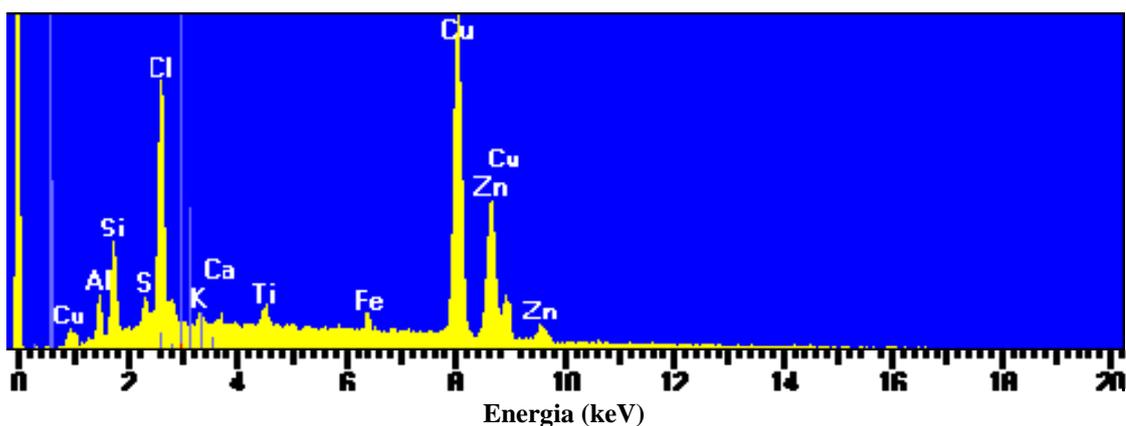


Figura 13 – Espectro de dispersão de energia do produto de corrosão esverdeado coletado do cabo de aterramento da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase B da SE Angelim

Tabela 1 – Teores dos elementos presentes no produto de corrosão esverdeado coletado do cabo de aterramento da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase B da SE Angelim

Elemento	Teor (%)
Alumínio (Al)	1,76
Silício (Si)	3,38
Enxofre (S)	0,80
Cloro (Cl)	8,26
Potássio (K)	0,44
Cálcio (Ca)	0,32
Titânio (Ti)	1,07
Ferro (Fe)	1,42
Cobre (Cu)	53,09
Zinco (Zn)	29,45

É importante destacar nestes resultados o teor significativo do elemento cloro (Cl), o que indica que o produto de corrosão pode ser cloreto de cobre. Os demais elementos, com exceção do zinco (Zn), encontram-se em teores bem baixos, sendo, provavelmente, constituintes de materiais particulados oriundos do ambiente e aderidos ao produto coletado. Em relação ao expressivo teor de zinco observado, este é devido ao arraste do mesmo pela espátula, durante o procedimento de coleta de material. Este fato ocorreu porque, anteriormente à coleta do produto esverdeado do cabo de aterramento, raspou-se um parafuso, que fixa o cabo de aterramento, com a mesma espátula usada para coletar o produto, sem a preocupação de se fazer uma limpeza na espátula. Naquele momento, acreditou-se que o parafuso também era constituído de cobre, porém, por esta análise, presume-se que o parafuso era, na verdade, constituído de latão, que é uma liga Cu-Zn. A Figura 14 e a Tabela 2 apresentam os resultados de EDS do produto raspado do parafuso, confirmando a presença de zinco em teor elevado e, portanto, indicando que o parafuso era mesmo uma liga Cu-Zn.

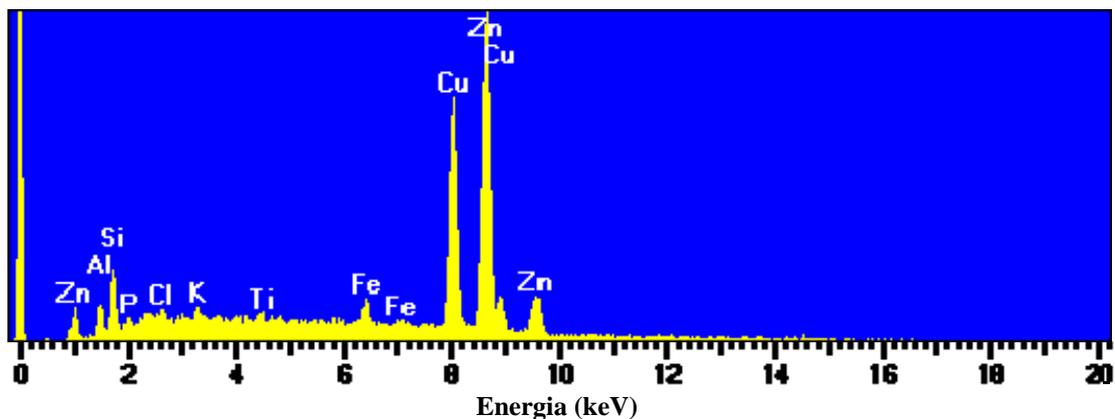


Figura 14 – Espectro de dispersão de energia do produto de corrosão esverdeado coletado do parafuso de fixação do cabo de aterramento da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase A da SE Angelim

Tabela 2 – Teores dos elementos presentes no produto de corrosão esverdeado coletado do parafuso de fixação do cabo de aterramento da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase A da SE Angelim

Elemento	Teor (%)
Alumínio (Al)	1,25
Silício (Si)	2,14
Pósforo (P)	0,30
Cloro (Cl)	0,29
Potássio (K)	0,32
Titânio (Ti)	0,26
Ferro (Fe)	1,51
Cobre (Cu)	32,75
Zinco (Zn)	61,19

A Figura 15 apresenta o espectro de dispersão de energia do produto de corrosão branco, coletado sob o revestimento da barra de conexão de alumínio entre o TC inspecionado e o barramento rígido, cujo resultado indicou 100% de alumínio (Al). Como a técnica de EDS não é sensível para identificar H e O, o composto químico foi identificado por análise de difração de raios-X, mostrada na Figura 16, confirmando que o produto é composto de formas de hidróxido de alumínio. Ainda neste produto, procedeu-se uma análise sobre a região diretamente em contato com o revestimento metálico. Nesta região, observou-se uma coloração azul clara e os resultados desta análise estão apresentados na Figura 17 e na Tabela 3, indicando a presença de cobre e cloro na região de contato entre o produto de corrosão e o revestimento, além do alumínio já identificado.

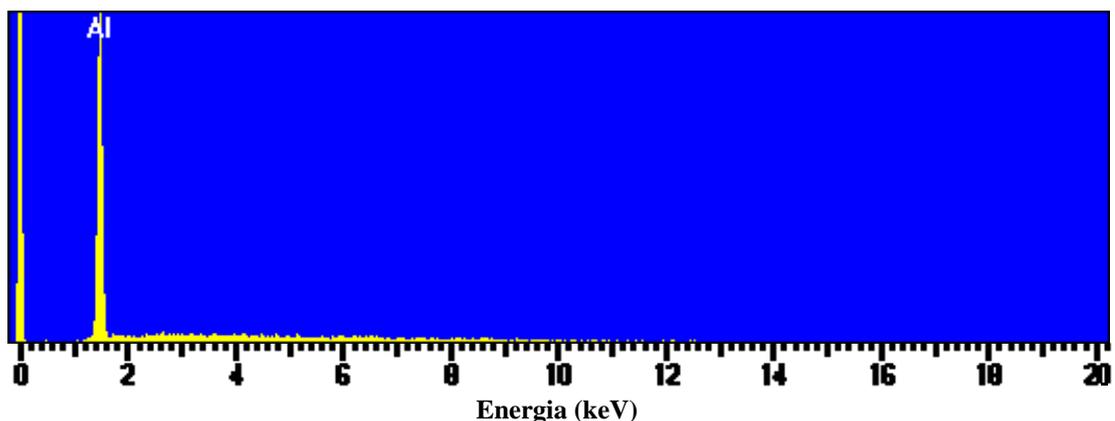


Figura 15 – Espectro de dispersão de energia do produto de corrosão branco sob o revestimento da barra de conexão entre o terminal primário do TC inspecionado e o barramento rígido

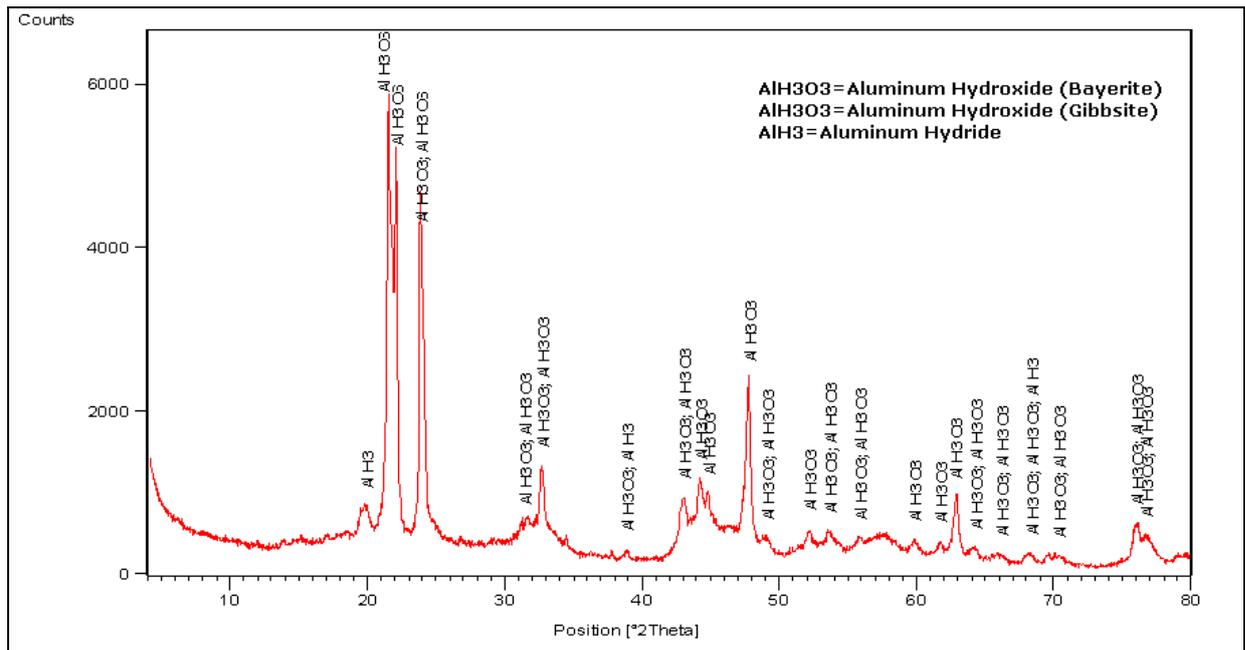


Figura 16 – Análise de difração de raios-X do produto de corrosão branco coletado da barra de conexão de alumínio

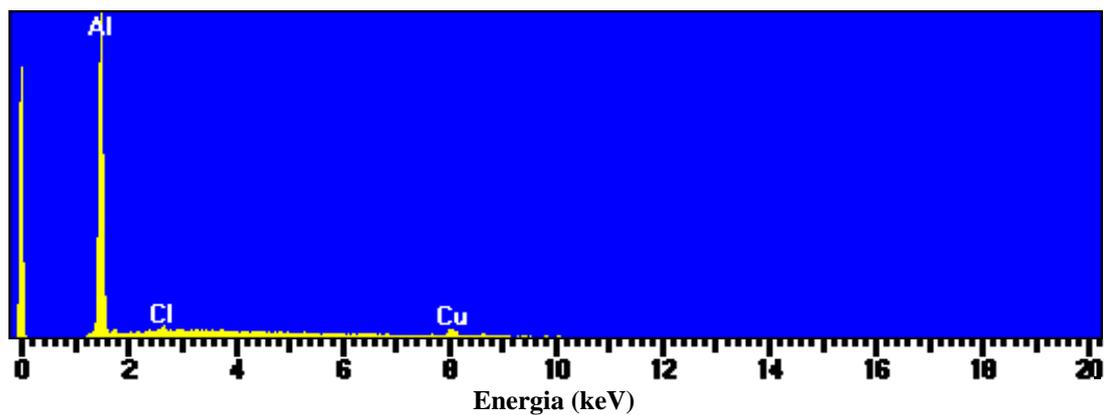


Figura 17 – Espectro de dispersão de energia do produto de corrosão branco sob o revestimento da barra de conexão entre o terminal primário do TC inspecionado e o barramento rígido, na região de contato entre o produto de corrosão e o revestimento

Tabela 3 – Teores dos elementos presentes na região de contato entre o produto de corrosão e o revestimento do produto de corrosão branco, sob o revestimento, da barra de conexão entre o terminal primário do TC inspecionado e o barramento rígido

Elemento	Teor (%)
Alumínio (Al)	81,64
Cloro (Cl)	2,63
Cobre (Cu)	15,73

Foi coletado um pedaço do revestimento metálico da barra de conexão inspecionada para investigação por técnica de EDS no Cepel, tendo sido analisadas ambas as faces do

revestimento. A face interna, diretamente em contato com a barra de alumínio, apresentava produtos de corrosão aderidos à sua superfície. Estes foram removidos por cuidadosa fricção com o auxílio de uma espátula. Após a limpeza, observou-se que a superfície interna do revestimento apresentava um brilho metálico e uma cor característica de cobre. De fato, esta observação foi confirmada pelo espectro de EDS, apresentado na Figura 18, cuja análise indicou um teor de 99,2% de cobre (Cu) e 0,8% de alumínio (Al), sendo este provavelmente devido a algum resíduo de produto de corrosão que ainda ficou aderido na superfície. Assim, o revestimento aplicado sobre a barra de alumínio corresponde a um revestimento de cobre como camada de fundo.

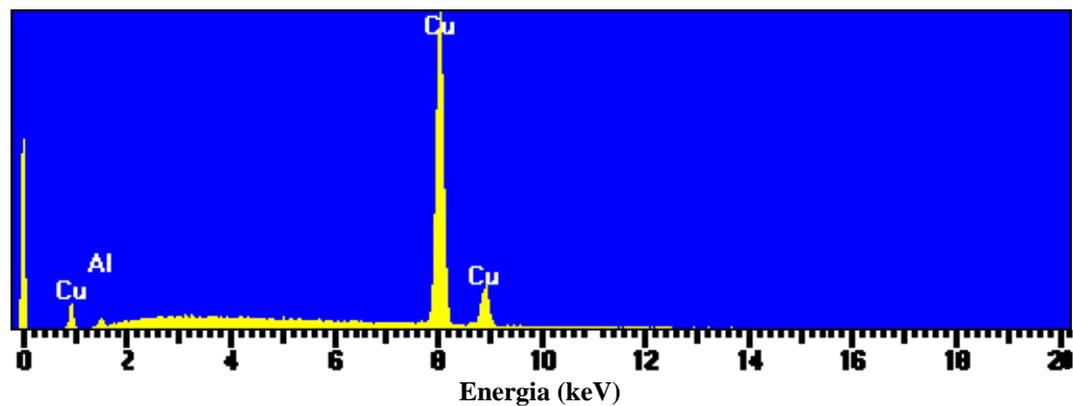


Figura 18 – Espectro de EDS da face interna do revestimento presente na barra de conexão de alumínio inspecionada

A face externa do revestimento metálico também foi limpa com o auxílio de uma espátula, anteriormente à análise de EDS. Neste caso, observou-se a presença de sujeiras e lodo aderidos ao revestimento. Após a limpeza, verificou-se que a superfície externa do revestimento também apresentava um brilho metálico, porém de cor branca. O espectro de EDS mostrado na Figura 19 identifica a face externa do revestimento como sendo **100% de prata (Ag)**. Ou seja, a camada de topo do revestimento também é uma camada metálica, confirmando a primeira informação fornecida pela Chesf que este revestimento tem como objetivo melhorar propriedades de contato elétrico. Adicionalmente, analisou-se a seção transversal do revestimento por microscopia ótica com o objetivo de se determinar a espessura das camadas e investigar se o revestimento é composto apenas por duas camadas ou se existem camadas intermediárias. De fato, foram encontradas somente duas camadas, como mostra a Figura 20. Assim, a camada de fundo corresponde à cobre e a camada de acabamento corresponde à prata. A Tabela 4 apresenta as medições de espessura ao longo das camadas, que se mostraram bem homogêneas, refletindo-se nos baixos valores de desvio padrão. A espessura medida da camada de fundo (cobre) apresentou um valor médio de 65 μm e da camada de acabamento (prata), de 7 μm .

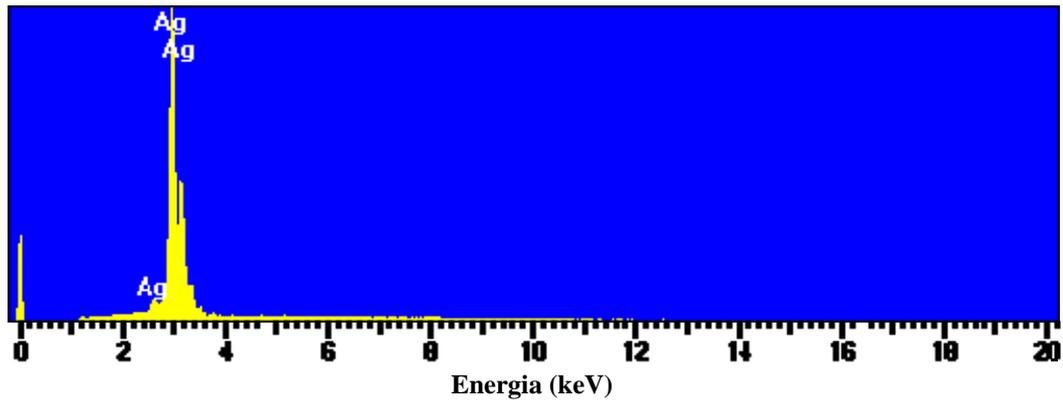


Figura 19 – Espectro de EDS da face externa do revestimento presente na barra de conexão de alumínio inspecionada

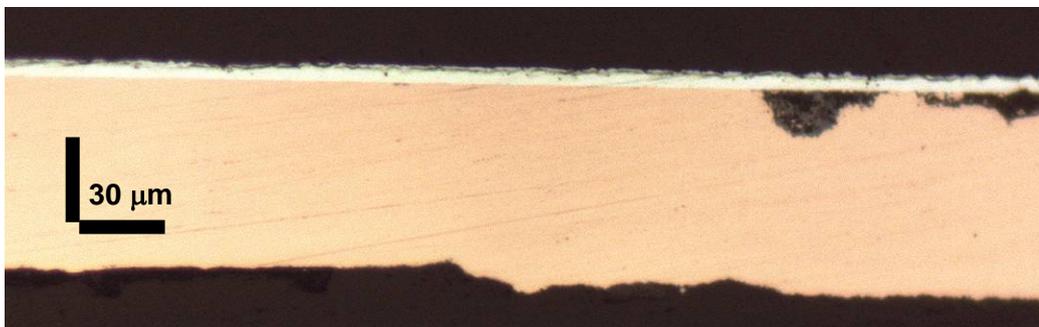


Figura 20 – Microscopia Ótica da seção transversal do revestimento metálico da barra de conexão de alumínio inspecionada (aumento de 200 X)

Tabela 4 – Medidas de espessura ao longo das camadas que compõem o revestimento, realizadas por meio de microscopia ótica

Leitura	Camada de prata (μm)	Camada de cobre (μm)
1	7,7	65,1
2	7,2	66,3
3	6,9	65,1
4	6,0	65,4
5	8,7	64,2
6	6,3	64,0
7	8,4	63,9
8	4,5	64,4
9	7,2	68,8
10	7,2	63,9
Média	7,0	65,1
Desvio padrão	1,2	1,6

A seguir descrevem-se as amostras líquidas coletadas para análise química no laboratório do Cepel, visando determinar os valores de pH, condutividade e os teores de cloreto e sulfato

presentes. A Amostra 1 corresponde àquela água que estava sendo utilizada pela Chesf para a lavagem dos equipamentos no dia em que foi realizada a inspeção na SE Angelim, conforme apresentado na Figura 12. Já as Amostras 2, 3 e 4, correspondem às soluções obtidas pela lavagem de diferentes materiais, utilizando-se água destilada, que foi levada do Cepel para a subestação. Este procedimento consistiu em lavar cada material com a água destilada e recolher essa água, após lavagem, para análise no Cepel. Assim, a Tabela 5 apresenta os resultados das análises químicas das seguintes soluções.

Amostra 1 – Água usada pela Chesf para lavagem dos equipamentos.

Amostra 2 – Solução recolhida após a lavagem, utilizando água destilada, do cabo de aterramento (cobre) da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase A.

Amostra 3 – Solução recolhida após a lavagem, utilizando água destilada, da estrutura de aço zincado a quente da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase A.

Amostra 4 – Solução recolhida após a lavagem, utilizando água destilada, do produto de corrosão branco da barra de conexão do TC inspecionado.

Tabela 5 – Análise química das soluções recolhidas durante a visita à SE Angelim

Amostra	Volume de amostra (mL)	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)
1	490	7,9	517	32	1
2	430	6,5	9	2	<1
3	450	6,4	10	2	<1
4	410	6,3	55	14	<1

A Tabela 5 mostra que, em termos de pH, considerando as amostras 2, 3 e 4, há poucas diferenças, tendo o pH se situado na faixa neutra. Os teores de sulfato mostraram-se muito baixos em todos os casos. O pH da amostra 1 mostrou-se levemente alcalino. Em termos de condutividade, como referência de comparação, cita-se que uma água bidestilada tem condutividade de $1,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ e uma água da CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro – tem uma condutividade de $66 \mu\text{S}/\text{cm}$. Assim, a água utilizada pela Chesf na lavagem dos equipamentos (Amostra 1) apresentou uma condutividade alta, o que está associado à origem desta água (água de poço), ou ao tratamento que é realizado na mesma. Isto significa que esta água contém quantidades consideráveis de sais dissolvidos. Notadamente, foi a amostra que também apresentou o maior teor de cloreto. Isto pode explicar a presença do produto verde nos cabos de aterramento como sendo um tipo de cloreto de cobre. Se esse procedimento de lavagem é realizado com frequência, o cloreto presente na água vai se acumulando ao longo dos anos nas estruturas e propiciando condições para a ocorrência dos processos de corrosão.

A condutividade da solução coletada após a lavagem do produto branco (Amostra 4) está associada a solubilização dos compostos presentes neste produto e a presença de cloreto também não é surpresa, pois na parte azulada deste produto já havia se detectado a presença

de cloro em pequena quantidade pela análise de EDS (Figura 17 e Tabela 3). As Amostras 2 e 3 apresentaram baixas condutividades e os mais baixos teores de cloreto.

Adicionalmente, foi determinada a solubilidade do produto de corrosão branco, presente na superfície do alumínio, por método analítico de Espectrofotometria de Absorção Atômica. Para isso, foi adicionado 0,4472 g do produto em 100 mL de água, agitado e deixado em repouso por 24 horas, verificando-se que o produto de corrosão apresenta uma solubilidade inferior a 6 mg/g. Ou seja, pode-se dizer que o produto de corrosão do alumínio tem uma solubilidade muito baixa.

Discussão dos resultados

Durante a visita técnica à SE Angelim, basicamente 3 problemas de corrosão puderam ser identificados. O primeiro refere-se à corrosão dos cabos de aterramento, em que foram identificados dois tipos de produtos formados, um produto de corrosão escuro, devido à formação do óxido de cobre e um produto esverdeado. Ambos apresentam características protetoras, inclusive o produto esverdeado, que forma uma camada fina sobre o cobre, não havendo comprometimento mecânico ou elétrico dos cabos de aterramento. Estudos realizados com cobre e suas ligas em exposição atmosférica revelaram que em ambientes contendo cloreto, há a formação de um cloreto básico de cobre, algumas vezes contendo uma camada interna de óxido cuproso (Cu_2O), e que esses produtos formam uma pátina protetora que mantém a integridade do metal base (3).

De fato, o produto esverdeado é supostamente um tipo de cloreto de cobre, cujo cloro foi identificado pela técnica de EDS, realizada no produto coletado do cabo de aterramento da chave seccionadora de posição operacional 35E3-8 fase B. A presença deste produto pode estar relacionada ao acúmulo de cloreto nas estruturas ao longo dos anos proveniente da água utilizada pela Chesf para lavagem dos equipamentos. Tal água apresentou uma alta condutividade e a presença de cloreto em teor de 32 mg/L.

O segundo problema de corrosão observado ocorreu com os pinos e porcas do terminal primário dos TC de 500 kV, sendo idêntico àquele observado com os TC da SE Olindina e cuja investigação e discussão das prováveis causas já foram publicadas (2).

O terceiro problema de corrosão observado na SE Angelim é o objetivo principal deste estudo e motivo pelo qual a Chesf solicitou ao Capel a visita à SE Angelim. Este problema ocorreu nas barras de conexão de alumínio situadas entre os terminais primários dos TC de 500 kV e os barramentos rígidos. Verificou-se que o problema ocorreu com todos os TC do mesmo tipo presentes na subestação. Há a formação de uma espessa camada de produto de corrosão do alumínio, de cor branca, sob o revestimento metálico, sendo que este recobre metade da barra de conexão. As fotos da Figura 10 mostraram que a metade da barra que não se encontra revestida está, de modo geral, em bom estado de conservação, não apresentando corrosão significativa. Este fato já é um indicativo de que a presença do revestimento pode ser uma das causas do processo de corrosão observado.

O que contribui fortemente para tal afirmação são os resultados da análise de EDS do revestimento metálico, que mostrou que este é constituído por uma camada de fundo de cobre. Sabe-se que o cobre é um metal mais catódico do que o alumínio e o contato elétrico entre

estes dois metais, havendo a presença de eletrólito pode resultar na formação de um par galvânico ou uma “pilha”, em que o metal mais anódico, no caso, o alumínio, corroe-se. Este processo, provavelmente, foi favorecido por uma deficiência de aderência entre o revestimento metálico e a barra de conexão, o que permitiu a entrada de eletrólito (umidade) entre os dois. Assim, obteve-se todas as condições necessárias para o desenvolvimento do processo corrosivo, ou seja, um anodo (o alumínio), um catodo (o revestimento de cobre), o contato elétrico entre anodo e catodo e eletrólito entre os mesmos e desenvolveu-se um mecanismo básico de corrosão, conhecido como corrosão galvânica (4).

O alumínio é um metal que em condições atmosféricas normais forma um óxido de alumínio (Al_2O_3) protetor na sua superfície e apresenta boas propriedades anticorrosivas. Esta camada é fortemente ligada ao metal e qualquer dano na mesma, expondo o metal base, gera uma nova camada oxidada rapidamente. Esta camada tem apenas 1 nm de espessura e forma uma barreira passiva na superfície, protegendo o alumínio contra corrosão (5).

Entretanto, a corrosão do alumínio a ponto de comprometer estruturalmente o material é verificada em condições específicas, tais como em soluções bastante alcalinas, com valores de pH maiores do que 10. Portanto, é um metal que somente apresenta corrosão espontânea em situações muito particulares. A região de Angelim é um ambiente tipicamente rural e não apresenta qualquer indício de uma atmosfera agressiva. Estes são outros fatos que devem ser levados em conta para afirmar que o problema observado de corrosão nas barras de conexão deve estar associado a uma questão de projeto dos equipamentos, que, no caso, representa a formação de uma condição particular, isto é, a concepção de um par galvânico entre o alumínio e o cobre do revestimento.

Uma vez formado tal par galvânico, iniciou-se a corrosão do alumínio sob o revestimento. Esta corrosão ocorreu de forma generalizada e o produto de corrosão branco resultou numa espessa camada que acabou delaminando o revestimento, ao longo dos anos. A tendência deste processo é se manter, ou seja, a corrosão da barra de alumínio continua, seja pelo contato bimetálico que ainda existe em algumas áreas da peça, seja pela formação de produtos óxidos e hidróxidos que ao bloquearem o metal base criam uma condição favorável para a corrosão deste. Qualquer que seja o processo, a taxa de corrosão deve ser mais lenta do que aquela do início do processo.

Conclusões

Com base nos resultados da inspeção técnica, dos ensaios realizados em laboratório e nas informações fornecidas pela Chesf, pode-se concluir que:

- a) A corrosão na barra de conexão de alumínio, situada entre o terminal primário do TC de 500 kV e o barramento rígido, na região revestida, foi devido à formação de um par galvânico entre a barra de alumínio e o cobre constituinte do revestimento. Este processo corrosivo tende a continuar, possivelmente com taxa de corrosão menor do que no seu início. Por ser um processo de corrosão generalizado e a chapa de alumínio apresentar espessura alta, a curto prazo não deve ocorrer comprometimento mecânico da peça. Porém, é necessária a troca da mesma, principalmente porque nesta condição, o produto de corrosão pode ter características isolantes e modificar as propriedades de condução elétrica na região de contato com a barra do terminal primário.

- b) Os produtos de corrosão dos materiais de cobre constituintes dos cabos de aterramento das estruturas presentes na subestação são protetores e não prejudicam as propriedades mecânicas e elétricas do cobre.

Este trabalho apresentou uma metodologia na investigação de um problema de corrosão em campo. Verificou-se que o processo de corrosão em questão está relacionado a um mecanismo básico de corrosão, podendo ser explicado pelo contato elétrico entre dois metais com potenciais de eletrodo diferentes. Dessa forma, há a tendência de um destes atuar como anodo (no caso, o alumínio) e o outro, como catodo (o cobre). Este estudo de caso é um exemplo para chamar a atenção de projetistas e equipes de manutenção sobre a importância em se considerar conceitos de corrosão ao se trabalhar com equipamentos e estruturas metálicas.

Referências bibliográficas

- (1) GENTIL, V., **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003. p. 223-229.
- (2) SEBRÃO, M. Z.; ORDINE, A. P.; FILHO, F. A., Determinação da(s) Causa(s) de Corrosão nos Terminais Primários dos Transformadores de Corrente (TC) em uma Subestação de Energia Elétrica de 500 KV. Um Mistério? In: 10^a COTEQ - CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 2009, Salvador. **Anais: 10^a COTEQ - Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, 2009.**
- (3) ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook: Corrosion**. 6. ed. EUA, 1998. v. 13. p. 610-640.
- (4) JONES, D., **Principles and Prevention of Corrosion**. EUA: Macmillan Publishing Company, 1992. p. 167-197.
- (5) ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook: Corrosion**. 6. ed. EUA, 1998. v. 13. p. 583-609.