



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

Avaliação de desempenho e custo de pintura anticorrosiva de transformadores

ALBERTO PIRES ORDINE(1); EDSON DE SOUZA SANTOS(2); CRISTINA DA COSTA AMORIM(1); ELBER VIDIGAL BENDINELLI(1); MARCOS MARTINS DE SA(1); FILIPE BATISTA FONTES(1); CEPEL(1);ELN(2);

RESUMO

A partir de um estudo de caso sobre as causas de falhas prematuras na pintura anticorrosiva de transformadores, em operação na região Norte do Brasil, verificou-se quais os critérios essenciais para um bom desempenho anticorrosivo, desde a especificação até a cura do revestimento. Com o auxílio de uma ferramenta computacional, foram realizadas simulações de custo do esquema de pintura, quando aplicado de forma adequada e das formas que resultaram em falhas no revestimento. Tal análise permitiu avaliar o quanto o custo direto da manutenção não programada impactou no custo final do esquema de pintura.

PALAVRAS-CHAVE

Corrosão, Transformadores, Custo, Pintura, Manutenção

1.0 - INTRODUÇÃO

Seja na geração, em linhas de transmissão, em subestações de energia elétrica ou em redes de distribuição, o setor elétrico utiliza muitos equipamentos e estruturas confeccionados a partir de materiais metálicos. Tais materiais estão sujeitos a diversos agentes de intemperismo, que aceleram processos corrosivos, podendo abreviar a vida útil das estruturas. Para as empresas do setor, as paradas não programadas para realizar manutenção em seus ativos são financeiramente proibitivas, visto que geram custos diretos e indiretos relativamente elevados. Além disso, a corrosão das estruturas pode ocasionar danos físicos para pessoas e para o meio ambiente. Dessa forma, uma proteção anticorrosiva adequada das estruturas metálicas tem um papel importante a fim de retardar o aparecimento e desenvolvimento de corrosão, evitando falhas prematuras nos equipamentos e mantendo a continuidade das operações elétricas.

Sendo assim, as tecnologias de pintura industrial apresentam características técnicas importantes, que devem ser conhecidas pelos fabricantes de equipamentos para se garantir que o revestimento apresente o desempenho esperado. Tal desempenho corresponde àquele que permitirá ao equipamento operar por longo prazo, sem ocorrência de paradas por conta de corrosão. Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar, a partir de um estudo de caso de falha prematura na pintura anticorrosiva de transformadores, quais são as boas práticas de pintura anticorrosiva a serem seguidas para a cura adequada do revestimento e seu bom desempenho anticorrosivo na proteção do equipamento.

No artigo, são destacados os principais defeitos registrados na pintura anticorrosiva de transformadores, após cerca de três anos de operação na região Norte do Brasil. Apontam-se as possíveis causas para os problemas e discutem-se como estes poderiam ter sido evitados. Com o auxílio de uma ferramenta computacional para a

estimativa de custos de serviços de pintura para o setor elétrico, foram realizadas simulações do custo do esquema de pintura, considerando que o mesmo tivesse sido aplicado de forma adequada e considerando as possíveis falhas durante o processo de aplicação. Tal análise foi extrapolada para o momento presente, em que seria necessária a realização de uma manutenção não programada, mostrando-se o quanto o custo direto desta manutenção impactou no custo final do esquema de pintura. Algumas metodologias de gerenciamento da manutenção anticorrosiva também foram discutidas, como a identificação dos erros associados ao processo de pintura e conceitos de gestão visual. E mostrou-se que estes princípios podem reduzir significativamente a ocorrência de não conformidades na pintura, que levariam à corrosão dos equipamentos nas subestações.

2.0 - FALHA PREMATURA NA PINTURA DOS TRANSFORMADORES

A seguir, serão discutidos os problemas de falha prematura na pintura anticorrosiva, observados em transformadores conversores trifásicos 230-37,8 kV, instalados numa subestação de energia elétrica, localizada na região Norte do Brasil. A pintura em questão refere-se às áreas externas dos painéis principais de sete transformadores. Sabe-se que também são aplicados sistemas de pintura nos tanques e nos radiadores dos transformadores. Porém, estas áreas dos equipamentos não fazem parte do escopo desta investigação, porque não apresentaram problemas na pintura.

2.1 Observações de Campo

A subestação está situada no interior do País, a mais de 3000 km de distância do litoral, num ambiente sem presença de poluição industrial. A umidade relativa do ar média anual é de 83%. Ou seja, o ambiente é tipicamente rural, com umidade acima do valor crítico. Este último corresponde a 70%, acima do qual a velocidade de corrosão de aço carbono e ligas ferrosas aumenta apreciavelmente (1). Os transformadores foram fabricados na Suécia, em 2011, entraram em operação em 2012 e as falhas na pintura começaram a ser observadas em 2015, ou seja, com apenas três anos de instalação. Esta ocorrência não era esperada, porque o sistema de pintura aplicado nos transformadores, discriminado na Tabela 1, é o tipo de esquema com requisitos técnicos próprios para a proteção de estruturas em aço carbono instaladas em ambientes de elevado grau de corrosividade atmosférica, conforme recomenda a Norma Eletrobras NE-004 (2). De fato, em trabalhos de pesquisa experimental anteriores, o Cepel observou excelente desempenho anticorrosivo deste tipo de esquema de pintura, em ambientes de elevada agressividade e após longos períodos de tempo de exposição aos agentes de intemperismo (3).

Tabela 1 – Características técnicas do esquema de pintura aplicado nos transformadores, à pistola convencional, para proteção de estruturas de aço carbono em ambientes de elevado grau de corrosividade atmosférica (2).

Tinta	Características técnicas	Espessura a seca (µm)
Fundo	Tinta epóxi poliamida, bicomponente, com um teor mínimo de zinco metálico na película seca de 88%. Atende os requisitos da Norma Eletrobras NE-023 (4)	80
Intermediária	Tinta epóxi poliamida de alta espessura, bicomponente, pigmentada com óxido de ferro micáceo. Atende os requisitos da Norma Eletrobras NE-021 (5)	150
Acabamento	Tinta de poliuretano acrílico alifático, bicomponente, com elevada resistência à radiação ultravioleta. Atende os requisitos da Norma Eletrobras NE-011 (6)	90
Espessura total do esquema de pintura		320

Segundo as especificações do esquema de pintura, fornecidas pelo fabricante do equipamento, o esquema foi aplicado em uma superfície preparada por jateamento abrasivo seco até a obtenção do grau de limpeza mínimo denominado de “metal quase branco” ou Sa 2½, conforme a Norma ISO 8501-1 (7), que é uma excelente qualidade de limpeza de superfície. O abrasivo utilizado foi granalha de aço, de modo a se obter um perfil de rugosidade mínimo de 50 µm, o que garantiria uma boa aderência do revestimento. Como apresentado na Tabela 1, o revestimento, todo aplicado à pistola convencional, era composto de uma tinta de fundo pigmentada com zinco, uma tinta intermediária epóxi pigmentada com óxido de ferro micáceo e uma tinta de acabamento de poliuretano acrílico alifático. Este esquema de pintura é conhecido por apresentar alto desempenho, porque o pigmento da tinta de fundo, o zinco, protege o substrato atuando como anodo de sacrifício, no caso de um dano.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

A tinta intermediária apresenta elevada espessura por demão e confere ao esquema excelente propriedade de barreira e resistência química e a tinta de acabamento apresenta elevada impermeabilidade aos agentes de intemperismo e resistência à radiação ultravioleta (8).

Apesar da excelente propriedade anticorrosiva do esquema de pintura, os painéis dos transformadores apresentaram diferentes tipos de falha na pintura, sendo que algumas destas são evidenciadas na Figura 1. Vale destacar as seguintes observações sobre falhas de pintura que estão relacionadas com o problema em questão.

O empolamento caracteriza-se pelo aparecimento de bolhas no revestimento. Estas podem surgir devido a uma espessura excessiva da película, uma temperatura de superfície elevada durante a aplicação das tintas ou um balanço inadequado dos solventes das tintas (9). Também é possível que as bolhas na pintura sejam resultantes da contaminação da superfície anteriormente à aplicação do esquema de pintura (10). As causas desta falha estão associadas à superfície indevidamente limpa, anteriormente à pintura, remanescendo nos locais de surgimento de bolha compostos salinos sob o revestimento. Num ambiente de elevada umidade, por efeitos de pressão osmótica, o contaminante sob o revestimento acelera a permeação da água através deste, hidrolisa-se e acelera a corrosão metálica (11). As bolhas tornam-se volumosas e sendo o revestimento de alta espessura, com baixa flexibilidade, podem levar à perda de aderência.

A perda de aderência da pintura, com falha coesiva na demão de fundo é comum de se observar em esquemas de pintura com tintas pigmentadas com zinco. Estas devem ser bastante porosas, a fim de promover o contato elétrico entre as partículas de zinco e destas com o substrato, para que o pigmento se corra protegendo o substrato num eventual dano na película (8), por isto a coesão deste tipo de tinta é baixa. Entretanto, o sistema de pintura em questão é conhecido por apresentar compatibilidade entre as tintas (2) e não se espera perdas de aderência. Pela Figura 1, avalia-se que as tintas intermediária e de acabamento apresentaram baixa flexibilidade, ao contrário da tinta de fundo, favorecendo a perda de aderência, supostamente a partir de processos de empolamento. Assim, se não for o caso de problemas de formulação nas tintas, a causa desta falha pode estar associada ao excesso de espessura das demãos posteriores à tinta de fundo.

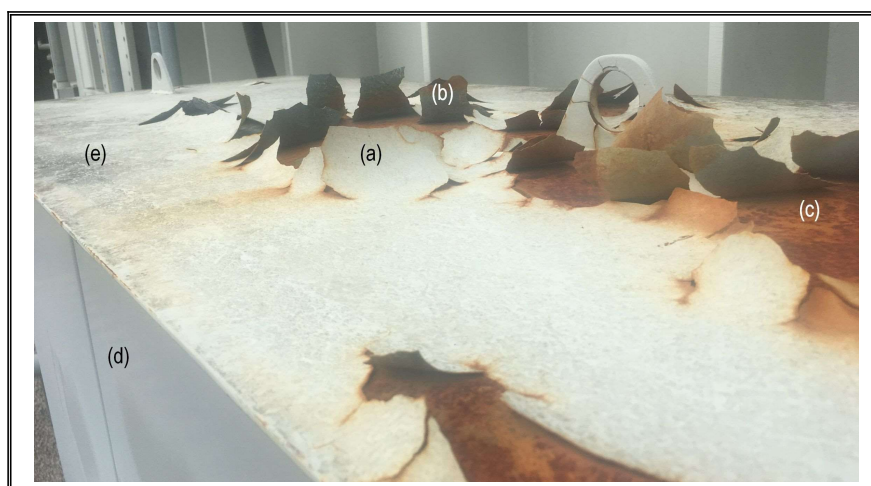


FIGURA 1 – Falhas na pintura dos painéis dos transformadores. (a) Perda de aderência, (b) falha coesiva da tinta de fundo, (c) corrosão vermelha, (d) região com gizamento (formação de pó), (e) fungos (regiões escuras).

A corrosão vermelha significa a oxidação do ferro do substrato, produzindo os produtos de corrosão de coloração vermelho-amarronzada, conhecidos como ferrugem. No caso em questão, uma vez que a pintura apresentou perda de aderência com falha coesiva da tinta de fundo, por esta ser porosa, facilita-se o contato da umidade com o substrato, promovendo-se a corrosão deste em várias áreas do equipamento.

A perda de cor e brilho e o processo de “empolamento” ou “gizamento” são causados pelo uso de uma tinta de acabamento com fraca resistência à radiação ultravioleta (UV), que acelera a degradação da resina da tinta, resultando na liberação do seu pigmento (formação de pó). No esquema utilizado, teoricamente, a tinta de

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

acabamento é resistente à radiação UV (poliuretano acrílico alifático). Tintas desta natureza resistem por mais de 1500 horas de ensaio acelerado de exposição à radiação UV-B sem apresentar qualquer problema (12). Dessa forma, a causa para o gizamento da pintura dos transformadores em questão deve-se ao uso de uma tinta com propriedades inferiores da especificada. Conforme demonstrado em pesquisa experimental anterior, é possível formular tintas de poliuretano com diferentes graus de resistência a UV (13). Quanto menor a resistência, menor o custo da tinta.

Os fungos são as manchas escurecidas que se desenvolveram na superfície da tinta de acabamento, que são favorecidos em ambientes de elevada umidade e pelo uso de tinta que não contém aditivos anti-fungos. Os fungos ficam bastante aderidos na tinta e seu crescimento em revestimentos modifica as cores dos equipamentos, que ficam mais escurecidos, trazendo prejuízos à função de sinalização da pintura.

2.2 Investigação de Laboratório

Para um melhor entendimento das causas das falhas de pintura nos transformadores, partes da pintura foram encaminhadas para o Laboratório de Corrosão do Cepel, a fim de serem analisadas. Foram realizadas inspeção visual, medições de espessura da camada, análises de microscopia ótica e identificação dos tipos de tinta por análises químicas. A Figura 2 apresenta imagens de uma das películas analisadas. No recebimento da película do esquema de pintura, verificou-se que esta era bastante espessa e na superfície da tinta de acabamento (cinza), comprovou-se a presença de fungos (manchas escurecidas). Na fotografia da seção transversal é possível identificar a tinta intermediária vermelha e a de acabamento cinza que visualmente apresentam espessuras equivalentes. Este fato indica que a espessura do esquema está fora de sua especificação adequada (Tabela 1). Comprovadamente, as medidas de espessura da película por meio de um paquímetro e de um medidor por indução magnética registraram valores de 730 μm e 740 μm , respectivamente. Ou seja, há um excesso de espessura nas demãos intermediária e de acabamento. Assim, comprovou-se a razão para a perda de aderência, ou seja, a aplicação de camadas com espessura excessiva, tornando-as bastante rígidas e vitrificadas, ao contrário da demão de fundo, que é porosa e flexível. Uma diferença acentuada de propriedades mecânicas propiciou o desenvolvimento de trincas na película, a medida que o sistema de pintura trabalhava, e como consequência, perda de aderência. O empoamento também pode ser justificado pela elevada espessura da tinta de acabamento, o que favorece a retenção de solvente. Ao evaporar, a substância encontra uma barreira a sua passagem, ficando retida na película e formando bolhas. As bolhas são áreas frágeis na pintura, podendo acelerar a formação de trincas e descascamento, sobretudo com tintas rígidas, como é o caso.

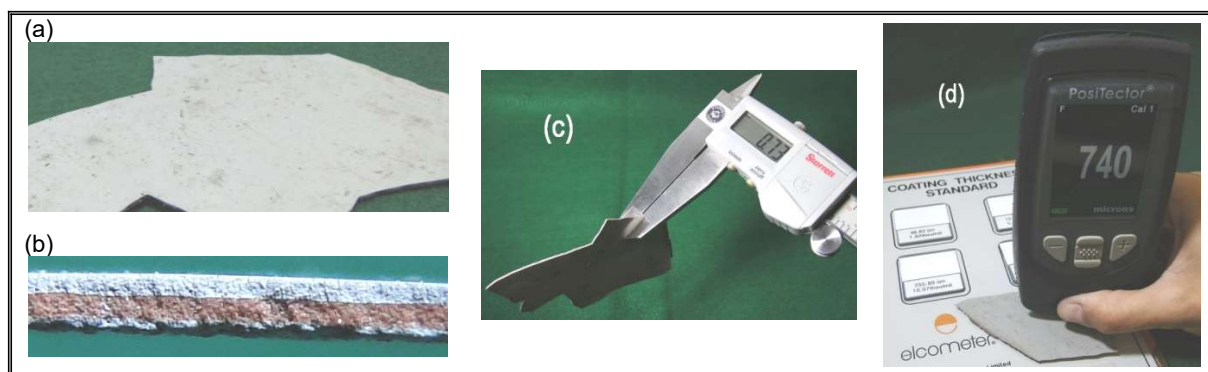


FIGURA 2 – Fotografias da película do esquema de pintura do transformador. (a) Tal como recebida, (b) da seção transversal, (c) em medição de espessura com um paquímetro, (d) em medição de espessura com um medidor por indução magnética.

A Figura 3 mostra a microscopia ótica da seção transversal da película do esquema de pintura, onde se observa a tinta de fundo pigmentada com zinco (camada inferior), em que as partículas de zinco correspondem aos pontos mais claros. A demão intermediária é vermelha, por conta da tinta ser pigmentada com óxido de ferro micáceo. Tal pigmento, além de vermelho, tem morfologia lamelar. A tinta de acabamento corresponde à camada acima da intermediária na imagem. A técnica de microscopia permitiu determinar a espessura de cada demão, cujos valores médios estão indicados na Figura 3.

Dentre os valores de espessura apresentados, aqueles da tinta intermediária e de acabamento representam a espessura real do esquema. No caso da tinta de fundo, como esta apresentou falha coesiva, parte de sua camada permaneceu no transformador. Desse modo sua espessura real é maior do que este valor médio obtido por microscopia. Como se observa, os valores de espessura encontrados são bem mais elevados que aqueles da especificação técnica do esquema (Tabela 1). Os valores da Tabela 1 seriam os adequados, a fim de resultar num bom desempenho anticorrosivo. Diante disto, conclui-se que a principal causa para a falha prematura da pintura dos transformadores foi o excesso de espessura das camadas, fora dos padrões técnicos para o tipo de esquema de pintura em questão.

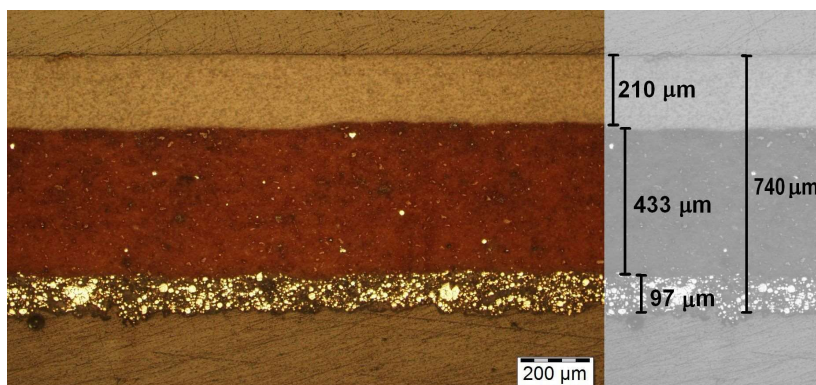


FIGURA 3 – Imagem de microscopia ótica da seção transversal da película do esquema de pintura aplicado nos transformadores.

Adicionalmente, realizaram-se duas análises químicas com a película de tinta recebida. A primeira foi a identificação da tinta de acabamento por uma reação química com ácido sulfúrico concentrado, conforme a Norma NE-005 (14), que estabelece testes qualitativos para identificação de pintura aplicada em equipamentos do setor elétrico. O teste indicou resultado positivo para a tinta de poliuretano. Uma técnica complementar de análise de laboratório foi a espectroscopia de infravermelho, em que foi possível identificar a natureza química das tintas intermediária e de acabamento pela comparação dos espectros das amostras com aqueles de padrões epóxi e poliuretano. De forma qualitativa, comprovou-se que a tinta intermediária tem resina epóxi e a tinta de acabamento é um poliuretano. Porém a análise não permite identificar o tipo de poliuretano.

3.0 - ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA

3.1 Simulação de Custos de Esquemas de Pintura

A análise técnico-econômica foi realizada com o auxílio de uma ferramenta computacional de estimativa de custos em serviços de pintura anticorrosiva, desenvolvida pelo Cepel. O custo dos esquemas de pintura foi calculado considerando-se o custo de mão de obra e aquele associado ao preço das tintas. O resultado final é obtido em R\$/m², sendo que no custo de mão de obra, leva-se em conta o tempo gasto em cada etapa do processo de pintura, além do valor de Homem-Hora por atividade. E no custo do material, leva-se em conta o rendimento das tintas, além de seus preços, fornecidos pelos fabricantes. Tal metodologia foi detalhada anteriormente (15).

Primeiramente, o custo do esquema aplicado na pintura dos transformadores em questão foi estimado considerando que o mesmo seguiu os padrões de qualidade inerentes às boas práticas de proteção anticorrosiva (Tabela 1). Como referência, utilizou-se os padrões constantes das Normas Eletrobras de Pintura Anticorrosiva. Tais documentos compreendem nove Normas de procedimentos e vinte Normas de tintas, que são utilizadas nos serviços de pintura mais comuns empregados no setor elétrico. As Normas de tintas apresentam os requisitos técnicos de análise química das tintas líquidas e de desempenho das películas secas, em ensaios acelerados de corrosão. O atendimento a tais requisitos é uma garantia de qualidade de que as

tintas apresentarão um bom desempenho anticorrosivo nas condições reais, quando estiverem aplicadas em estruturas metálicas e equipamentos do setor elétrico. As Normas foram as primeiras da Eletrobras de caráter técnico, estão vigentes desde 2016 e são de domínio público, disponíveis para serem baixadas na página da *internet* da Eletrobras (16).

Além do custo associado ao esquema, considerando que tivessem sido seguidas as boas práticas de pintura anticorrosiva, também se estimou o custo considerando o que realmente foi aplicado. Dessa forma, os custos simulados foram associados aos esquemas denominados “A”, “B” e “C”, conforme a seguinte descrição.

A) Esquema aplicado conforme os padrões das Normas Eletrobras de Pintura Anticorrosiva (NE), Tabela 1.

B) Esquema aplicado considerando-se que todas as tintas foram aquelas conforme os padrões das NE, mas com as espessuras mais elevadas, obtidas da análise da película em laboratório (por microscopia ótica).

C) Esquema aplicado considerando-se que todas as tintas foram aquelas conforme os padrões das NE, exceto pela tinta de acabamento, que não apresentava resistência à radiação ultra-violeta. Neste caso, considerou-se o uso de uma tinta de qualidade inferior, com um preço 50% menor que a tinta de poliuretano acrílico alifático, conforme requisitos da Norma NE-011 (6).

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações, considerando o custo de mão de obra e o custo de material (tintas) para a aplicação de cada esquema.

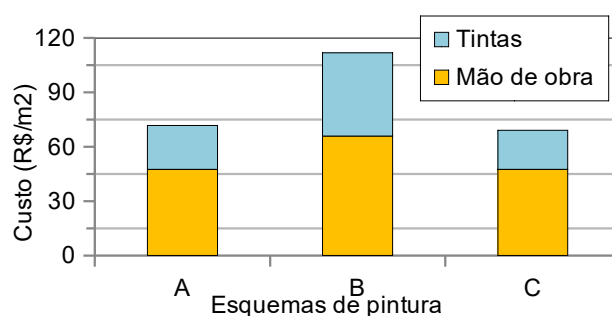


FIGURA 4 – Custo dos esquemas de pintura, simulados com a ferramenta computacional desenvolvida pelo Cepel. Esquema A: atende padrões de qualidade das NE; esquema B: tal como aplicado nos transformadores; esquema C: atende padrões técnicos das NE, exceto pela tinta de acabamento, com custo 50% menor.

Verificou-se que seguindo os padrões das NE (esquema A), o custo teria sido 44 % menor em comparação ao que foi aplicado (esquema B). Ou seja, gastou-se mais do que o necessário, devido às elevadas espessuras das camadas, o que acabou levando a falhas prematuras na pintura. O esquema C foi o de menor custo, porém o uso de uma tinta de poliuretano com fraca resistência à radiação UV resultaria em uma manutenção não programada, para corrigir o problema.

3.2 Simulação de Custos Associados à Manutenção

A Figura 5 apresenta os resultados de custos totais dos esquemas de pintura, considerando duas parcelas, a do custo inicial e aquele associado à manutenção dos transformadores (custos diretos, somente considerando a recuperação do esquema de pintura). Para o esquema A, não haveria qualquer custo de manutenção. Para o esquema B, a simulação contemplou duas possibilidades, a da repintura parcial (com o esquema descrito a seguir) e a da repintura total com o mesmo esquema inicial (Tabela 1). E para o esquema C, seria realizada uma recuperação apenas da tinta de acabamento.

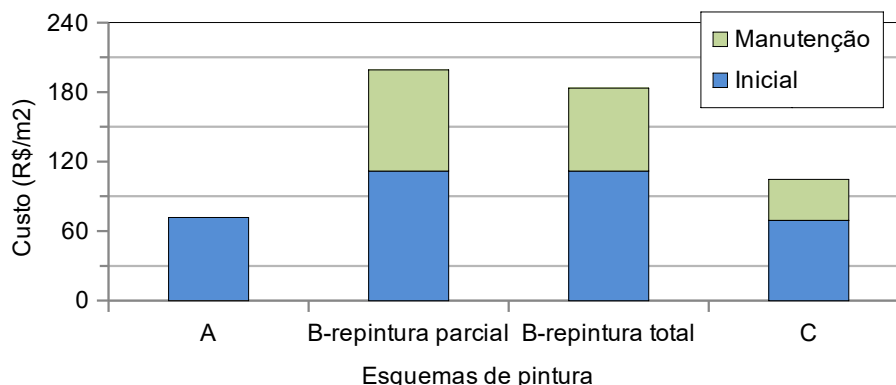


FIGURA 5 – Custos totais (custos iniciais acrescidos dos custos de manutenção) dos esquemas de pintura, simulados com a ferramenta computacional desenvolvida pelo Cepel. Esquema A: sem custo de manutenção; esquema B: duas possibilidades de manutenção, repintura parcial e repintura total; esquema C: repintura parcial.

No esquema B, para definir estratégias de manutenção, primeiramente avaliou-se o grau de degradação da pintura dos transformadores inspecionados em campo, conforme a Norma NE-009 (17). Esta Norma padroniza a classificação de falhas na pintura, conforme o tipo e a intensidade destas falhas, o que permite estabelecer o tipo de manutenção, uma repintura parcial ou total. No caso dos transformadores avaliados, o grau de degradação da pintura foi determinado durante a inspeção em campo como sendo igual a 2. Este grau corresponde a uma pintura com gizamento, perda de cor e brilho, e manchas de oxidação do substrato, presença bolhas e descascamento do revestimento, além de 10% a 33% da área total inspecionada com corrosão do substrato (17). Nesta condição, a Norma NE-007 (18), que trata da pintura de manutenção de aço carbono, estabelece uma repintura parcial, ou seja, as áreas com descascamento seriam removidas, permanecendo na estrutura somente a pintura que ainda estivesse bem aderida ao substrato. As áreas com corrosão seriam tratadas por ferramentas mecânicas e manuais, até a obtenção do grau de limpeza St 3, conforme a Norma ISO 8501-1 (7). A pintura aderida seria tratada por lixamento mecânico superficial. Em seguida, seria realizada uma limpeza com solvente de toda área a ser recuperada, anteriormente às tintas. Como o ambiente é tipicamente rural, o seguinte esquema de pintura seria aplicado.

- Tinta de fundo: nas áreas com corrosão, uma demão de tinta epóxi pigmentada com alumínio, curada com poliamina, NE-022 (19), com espessura seca de 120 μm .

- Tinta de acabamento: ao se atingir o intervalo de repintura da tinta de fundo, duas demãos de tinta de poliuretano acrílico alifático, NE-011 (6), com espessura de película seca de 60 μm , por demão.

Simulando-se o custo deste esquema de pintura, obteve-se o resultado de R\$ 87,39/m². Dessa forma, o custo total do esquema B, no caso de uma repintura parcial seria igual a R\$ 199,11/m², 178 % maior que o custo do esquema A, no qual não seria necessária a manutenção.

Nota: Na realidade, a Empresa de Energia Elétrica detentora dos transformadores optou pela repintura parcial da parte externa dos painéis dos equipamentos, nas regiões de pintura degradada, utilizando-se uma tinta à base de resina alquídica, como uma medida paliativa para evitar multa em função de notificação da fiscalização da ANEEL. Programou-se para o final do período chuvoso na região a repintura total dos painéis dos equipamentos.

Sendo realizada a repintura total, devem ser seguidos os requisitos de preparação de superfície da Norma NE-003 (20) e da Norma NE-004 (2), na qual se opta pelo mesmo esquema da Tabela 1. O custo associado a tal procedimento é o mesmo calculado para o esquema A. Portanto, considerando agora o custo direto de manutenção do esquema B, este esquema apresentaria um custo total de R\$ 183,37/m², 156 % maior que o custo do esquema A. É interessante notar que na manutenção do esquema B, seria economicamente mais vantajoso realizar a repintura total, ao invés da parcial. Isto se deve ao fato do tratamento de superfície com

ferramentas mecânicas e manuais apresentar um custo de mão de obra bem maior (R\$ 43,37/m²), em comparação ao jateamento abrasivo seco (R\$ 8,58/m²).

Considerando-se que o único problema do esquema C seria o gizamento, sua manutenção compreenderia uma etapa de lixamento superficial da pintura e aplicação da tinta de poliuretano, que atendesse os requisitos da Norma NE-011 (6), aplicada em duas demãos de 60 µm, por demão (18). Simulando-se esta manutenção, o custo total do esquema C aumentaria para R\$ 104,56/m², correspondendo a 46 % maior que o custo do esquema A. Como este último não precisaria de manutenção, é evidente que o uso de uma tinta de poliuretano com baixa resistência à radiação ultravioleta não vale a pena, pois implicaria um custo adicional para corrigir o problema de gizamento, em curto prazo.

É importante destacar que nesta análise considerou-se apenas o custo direto da manutenção. Deve-se levar em conta que, na prática, existem custos indiretos associados a serviços de manutenção não programados, tais como: parada de equipamentos, quedas de produção, operações de manobra para compensar perdas elétricas, mobilização de pessoal técnico, multas dos órgãos reguladores, enfim, custos gerais sobre indisponibilidade de ativos. Portanto, mostra-se a importância em se adotar as boas práticas de proteção anticorrosivas, representada neste trabalho pelo esquema de pintura A. Este teria sido a melhor opção, pois estaria de acordo com padrões de qualidade que garantiriam um bom desempenho anticorrosivo, além de dispensar a manutenção não programada. Em longo prazo, seguir as boas práticas de pintura anticorrosiva torna-se a solução de melhor relação custo-benefício, o que já foi comprovado por outros estudos (15).

3.3 Metodologias de Gerenciamento da Manutenção Anticorrosiva

Por certo, a manutenção deve ser estruturada, de modo a garantir a qualidade técnica da pintura anticorrosiva e evitar custos adicionais no futuro. Algumas metodologias de gerenciamento da manutenção anticorrosiva são discutidas a seguir, como a identificação dos erros associados ao processo de pintura e conceitos de gestão visual. Estes princípios podem vir a reduzir significativamente a ocorrência de não conformidades na pintura, que levariam à corrosão dos equipamentos nas subestações.

Um conceito que, cada vez mais, mostra seu potencial de interação com a manutenção é o de *Lean* (21). Esta metodologia baseia-se em melhorias contínuas para maximizar o valor de um produto ou serviço prestado por todo tipo de empresa. Dessa forma, o pensamento *Lean* define oito desperdícios que todas as companhias realizam, mas que quando eliminados podem trazer grandes benefícios em termos de lucro, segurança e produtividade. Estes são: transporte, estoque, movimentação desnecessária, espera, processamento excessivo, produção excessiva, defeitos e retrabalho, e conhecimento.

O desperdício de transporte pode ser exemplificado pelo movimento desnecessário de equipamentos e ferramentas para a manutenção, elevando o tempo gasto com o serviço e aumentando as chances de acidentes. Este é similar à movimentação desnecessária de indivíduos, causada pela falta de planejamento da manutenção. Como exemplo, pode-se citar uma equipe de manutenção que deve realizar um serviço em uma unidade distante. A metodologia *Lean* busca estudar tais processos e propor configurações de ambiente de trabalho que otimizem o fluxo de pessoas em função do tempo de resposta da equipe de manutenção. Dessa forma, aconselha-se a realização de reuniões constantes para alinhamento da estratégia da gerência de manutenção e padronização de procedimentos, para que a equipe não esqueça equipamentos importantes ou movimente cargas em excesso.

O estoque pode ser uma fonte de desperdícios quando os insumos ou materiais para realização do serviço são mal especificados. Imaginemos que uma equipe de manutenção anticorrosiva adquira apenas dez trinchas para tratar de uma aplicação de elevada área de aplicação, neste caso o estoque de trinchas é insuficiente. Por outro lado, esta mesma equipe fez a aquisição de quarenta galões de tinta para um serviço que necessitava de apenas vinte galões. Os galões restantes permanecerão em estoque até que uma nova demanda apareça, e caso isso não ocorra toda esta tinta comprada será descartada (uma vez que perderá a validade), fazendo com que a empresa tenha investido em material que não foi usado. Em outro cenário, esta mesma empresa pode não descartar o material fora do prazo de validade, mas usá-lo mesmo assim, o que pode ser mais arriscado tendo em vista que a proteção anticorrosiva deste revestimento já não é mais garantida pelo fabricante. Estes exemplos são recorrentes em manutenção anticorrosiva, e quando evitados podem representar ganhos econômicos para a empresa.



No campo da pintura anticorrosiva, a experiência de campo de pessoal técnico mostra que os maiores desperdícios estão vinculados a vida útil do revestimento em função da escolha equivocada do esquema de pintura, falhas nos métodos de preparação da superfície e aplicação das tintas, que demandam custos do retrabalho e, em alguns casos, da indisponibilidade dos equipamentos. Os desperdícios de defeitos e retrabalho devem ser combatidos com treinamento e padronização de procedimentos. Esses defeitos podem ser de aplicação de espessura em excesso buscando uma proteção anticorrosiva melhor, ausência de tratamento de superfície ou de uma das demãos para acelerar o serviço ou até uma especificação errada de tinta. Os gastos com este tipo de desperdícios podem ser enormes, pois envolvem a compra de materiais inadequados, ou custo de retrabalho quando a estrutura sofre corrosão antes do tempo estimado. Dessa forma, percebe-se que o investimento em conhecimento é crucial para a equipe de manutenção anticorrosiva.

Para controlar estes fatores, utiliza-se de conceitos como o de organização do ambiente de trabalho, gestão visual e padronização do serviço. A limpeza e a arrumação do local onde o serviço é realizado promovem melhorias em termo de produtividade, uma vez que eliminam desperdícios em atividades como procurar ferramentas, equipamentos e relatórios, além de reduzir o risco de acidentes. A próxima etapa no controle de desperdícios consiste no desenvolvimento de procedimentos padronizados que devem ser seguidos pelos funcionários que atuam na manutenção. Uma vez que a equipe esteja treinada e siga os procedimentos, a probabilidade de falhas operacionais e acidentes é reduzida e a produtividade, elevada. Dessa forma, a padronização do serviço deve ser mantida até que um novo procedimento seja desenvolvido pela equipe de engenheiros.

Por fim, pode se aplicar os conceitos de gerenciamento visual, extremamente importantes para os processos de O&M de uma planta, organização de almoxarifados, laboratórios e escritórios. No âmbito da pintura industrial, estes se destacam em aspectos de controle de temperatura de armazenamento, tipos e validade de produtos. Por exemplo, cita-se o uso de adesivos coloridos para especificar quando uma ferramenta está fora de calibração ou imprópria para uso na manutenção, ou quando um galão de tinta está esperando liberação do laboratório para que a tinta possa ser aplicada. Este tipo de ação garante autonomia ao funcionário, além de reduzir significativamente o custo de retrabalho. Uma vez que estes conceitos começam a ser aplicados, é importante a observação e o controle para garantir que a equipe continue respeitando as novas regras. Tais mudanças nem sempre são bem recebidas, mas o responsável pela melhoria deve ser persistente e criativo para garantir que os novos procedimentos se tornem hábitos organizacionais, que vão modificar a visão de sua equipe para uma cultura com foco na geração de valor, segurança e garantia da qualidade.

4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de caso sobre falha prematura na pintura de transformadores instalados em uma subestação de energia elétrica na região Norte do Brasil. Com base nas informações de inspeção de campo e a partir de análises de laboratório sobre a pintura, foi possível avaliar as prováveis causas das falhas observadas. Verificou-se que certos padrões de qualidade, importantes para o bom desempenho anticorrosivo não haviam sido observados na aplicação do revestimento, sobretudo no que diz respeito às espessuras das tintas intermediárias e de acabamento, muito mais elevadas do que recomendam requisitos técnicos das tintas utilizadas.

Realizou-se também uma análise técnico-econômica do esquema de pintura, estimando o custo do mesmo, considerando sua aplicação conforme as boas práticas de pintura anticorrosiva e em condições que fugiam a tais padrões de qualidade, inclusive na condição inspecionada em campo. No primeiro caso, como referência, adotou-se procedimentos e tintas constantes das Normas Eletrobras de Pintura Anticorrosiva. Nos casos de campo, foi possível realizar uma simulação dos custos diretos de manutenção, considerando-se quais seriam as soluções mais adequadas para corrigir os problemas encontrados.

Observou-se que o desconhecimento técnico sobre a especificação de esquemas de pintura pode elevar custos desnecessariamente e resultar em falhas prematuras na pintura de transformadores. A correção dos problemas envolve não só custos diretos, devido à recuperação do sistema de pintura, mas também vários custos indiretos associados à indisponibilidade dos ativos das empresas. Por isto, como o trabalho exemplificou através de um caso real, é importante seguir as boas práticas de proteção anticorrosiva, que conferem aprimorado desempenho e resultam em menores custos de manutenção.



Destacou-se ainda algumas técnicas de gerenciamento de manutenção anticorrosiva que têm como objetivo melhorar o trabalho desenvolvido por uma equipe de manutenção. A etapa de planejamento é crucial para garantir que o serviço seja realizado com excelência e dentro do prazo, por isso o estudo de gestão deve ser desenvolvido frequentemente por gerentes e coordenadores. Ao final, apresentou-se ferramentas que vão ajudar a transformar a cultura da equipe de manutenção, e garantir que hábitos antiprodutivos sejam eliminados e substituídos por hábitos focados em melhoria contínua.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Gentil, V., Corrosão, 4ª ed., 2003
- (2) NE-004, Esquemas de Pintura de Equipamentos e Estruturas Metálicas, 2018
- (3) Fragata, F., Ordine, A., Desempenho Anticorrosivo de Esquemas de Pintura com Tintas Primárias em Pó Pigmentadas com Zinco, *Corros. Prot. Mater.*, Vol. 28, Nº 2, 2009
- (4) NE-023, Tinta de Fundo Epóxi Rica em Zinco Curada com Poliamida, 2018
- (5) NE-021, Tinta Epóxi Poliamida de Alta Espessura e Elevado Teor de Sólidos, 2018
- (6) NE-011, Tinta de Poliuretano Acrílico Alifático, 2018
- (7) ISO 8501-1 – *Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products - Visual Assessment of Surface Cleanliness - Part 1: Rust Grades and Preparation Grades of Uncoated Steel Substrates and of Steel Substrates after Overall Removal of Previous Coatings*, 2007
- (8) Ordine, A. P., Amorim, C. C., Fontes, F. B., Sá, M. M., Oliveira, W. P., Avaliação de custo e benefício de esquemas de pintura de base aquosa, contendo tintas de fundo pigmentadas com zinco, em comparação a esquemas tradicionais. *7th International Corrosion Meeting* - INTERCORR 2018, São Paulo – SP, 2018
- (9) Fragata, F. L., Pintura Anticorrosiva – Falhas e Alterações nos Revestimentos, 1ª ed., 2016
- (10) Amorim, C. C., Café, Y. H. P., Sá, M. M., Ordine, A. P., Efeito da preparação de superfície de aço carbono na formação de produtos de corrosão sob tinta epóxi. *6th International Corrosion Meeting* - INTERCORR 2016, Búzios – RJ, 2016
- (11) Fuente, D., Chico, B., Morcillo, M., *The effects of soluble salt at the metal/paint interface: advances in knowledge. Portugaliae Electrochimica Acta*, 24, pp 191-206, 2006
- (12) Fragata, F., Amorim, C. C., Ordine, A. P., Desempenho de Tintas de Acabamento frente às Radiações Ultravioleta, UVA e UVB, e Condensação de Umidade, *Corros. Prot. Mater.*, Vol. 29, Nº 3, 2010
- (13) Fragata, F. L., Amorim, C. C., Ordine, A. P., Cordeiro, B. N., Desempenho de Tintas de Poliuretano Alifático à Radiação Ultravioleta e Condensação de Umidade. *4th International Corrosion Meeting* - INTERCORR 2012, Salvador – BA, 2012
- (14) NE-005, Identificação e Compatibilidade entre Esquemas de Pintura, 2018
- (15) Ordine, A. P., Amorim, C. C., Sá, M. M., Bendinelli, E. V., Padrões de Qualidade para Serviços de Pintura Anticorrosiva Aplicados ao Setor Elétrico, XXIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, 2017
- (16) <http://eletrobras.com/pt/Paginas/Normas-Eletobras-de-Pintura-Anticorrosiva.aspx>, acessada em março de 2019
- (17) NE-009, Classificação de Grau de Degradação em Pintura, 2018



- (18) NE-007, Pintura de Manutenção de Aço Carbono, 2018
- (19) NE-022, Tinta de Fundo Epóxi Pigmentada com Alumínio, Curada com Poliamina, 2018
- (20) NE-003, Jateamento Abrasivo e Hidrojateamento de Aço Carbono, 2018
- (21) LBS Partinners. *Introduction to Lean. University of Limerick.* 2014

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alberto Pires Ordine, nascido em 1974, no Rio de Janeiro – RJ, graduou-se em engenharia química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1997, obtendo o título de Mestre em Ciências, em 2000 e de Doutor em Ciências, em 2004, ambos pelo Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, na área de Corrosão. Atuou como professor universitário em cursos de engenharia, como pesquisador na área de eletroquímica e desde 2006, é pesquisador efetivo do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, realizando pesquisa na área de corrosão para o setor elétrico. Em 2011, tornou-se gerente do Laboratório de Corrosão do Cepel. Atualmente, é autor de, aproximadamente, 80 publicações, considerando artigos técnicos em revistas e em anais de congressos e seminários.