



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/12

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO – I

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

Análises e procedimentos para recuperação de trincas nas espiras polares do gerador 3 da Usina Hidrelétrica de Salto Santiago

Feitosa, P.H.S. (*) ENGIE	Frari, R.V.D. ENGIE	Santos, M.C.D. ENGIE
Simões, C. TRACTEBEL ENGINEERING	Cieslik, D.J. ENGIE	Hain, F.L. ENGIE
	Ferretti, A.P. ENGIE	

RESUMO

Durante a modernização dos geradores da Usina Hidrelétrica de Salto Santiago, cujo escopo previa a reisolação dos polos do gerador, foram identificadas trincas visíveis e internas nas juntas brasadas das espiras, fato não previsto no escopo do contrato.

Dada a criticidade do problema e seu impacto em relação ao custo e prazo no processo de modernização, toda atenção foi dedicada à identificação da causa raiz das trincas e definição do método de recuperação. Este trabalho tem o intuito de apresentar estas análises, as soluções empregadas e as melhorias obtidas, divulgando a experiência adquirida nesse processo.

PALAVRAS-CHAVE

Trincas, polos, reisolação, brasagem.

1.0 - INTRODUÇÃO

A usina de Salto Santiago fica situada no sudoeste do estado do Paraná, no Rio Iguaçu. Possui 4 (quatro) unidades geradoras com potência de 355 MW cada. A rotação nominal das máquinas é de 120 rpm, portanto cada gerador tem 60 polos.

As unidades geradoras de Salto Santiago entraram em operação em 1980 e 1981 e, recentemente foi concluído o processo de modernização dos equipamentos eletromecânicos para um novo ciclo de vida de no mínimo 35 anos. O escopo de modernização dos polos dos geradores contempla, em particular, a reisolação dos polos através da substituição da isolação original entre espiras a base de asbestos, por Nomex.

Durante a modernização da 3ª unidade geradora, foram encontradas trincas nas juntas brasadas das espiras dos polos durante o processo de retirada da isolação original, de natureza tanto superficial como interna (identificada por ultrassom e raio-X).

Este trabalho tem o intuito de apresentar detalhadamente todas as análises técnicas efetuadas para identificação da causa deste problema, as soluções empregadas e as melhorias obtidas através de análise e experiência adquirida nesse processo.

As análises subsidiaram às conclusões acerca dos processos de soldagem originalmente empregados, à influência do excesso de calor empregado na soldagem, a composição química do material de adição, aos possíveis pontos de concentração de calor ocasionados pelas descontinuidades, a provável carência de métodos de controle de qualidade via ensaios não-destrutivos, concorrendo assim para a inconsistência de penetração do material de adição da junta soldada e fragilidade da junção, levando a formação de trincas mesmo por conformações mecânicas de baixa intensidade, já durante a fabricação.

Com base nos resultados obtidos das análises acima, a engenharia da ENGIE definiu o método de reparo a ser empregado, dentre as opções possíveis, orientando sua decisão considerando a criticidade do problema em relação à segurança operacional da unidade e no seu impacto nos custos e prazos da modernização das unidades geradoras desta Usina.

Todos os métodos de controle de fabricação, incluindo testes elétricos, foram utilizados durante o processo de recuperação das trincas, de modo a prosseguir com a reisolação das mesmas com Nomex e assegurar a integridade do equipamento por mais um período de vida útil projetado.

2.0 - O PROBLEMA

2.1 Características de Projeto

A construção da bobina polar dos polos dos geradores da Usina de Salto Santiago, é feita através de 15 espiras prensadas, sendo cada espira composta por 4 segmentos retangulares de cobre conectados através de juntas brasadas, tipo “jig-saw”, por solda prata, totalizando uma quantidade de 3.600 uniões por gerador.

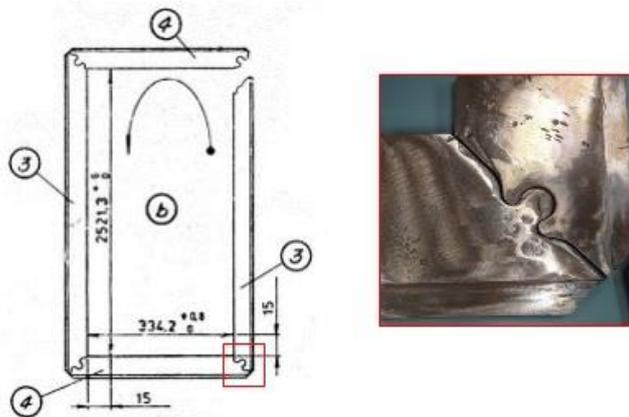


FIGURA 1 – Construção da bobina polar – Encaixe “Jig-Saw”.

De acordo com o desenho de fabricação a bobina é construída a partir de barras de cobre especificação “ASTM B-98 Liga A”, brasadas utilizando o consumível AWS A5.8 BCuP-5. O metal de adição AWS A5.8 BCuP-5 (Ag15Cu80P5) é uma liga padrão comercial da família conhecida como Silfoscooper que tem como elementos de liga ao cobre: 15% de prata e 5% de fósforo.

A maioria dos fabricantes na atualidade já emprega uniões com solda topo (perfis retos). Estas soldas normalmente são executadas através da inserção de lâminas de solda prata e o aquecimento realizado por processo indutivo. Isto traz como benefícios a agilidade do processo, menor susceptibilidade a erros humanos e o menor aquecimento da região brasada, que poderia fragilizar o cobre.

O tipo de união existente no projeto de Salto Santiago é utilizado em diversos geradores em operação no mundo, tanto em projetos mais antigos como projetos recentes. Em função disto, o aparecimento das trincas se mostrou um fato atípico, carecendo de uma investigação mais detalhada.

2.2 Detecção e características das trincas

A detecção das trincas ocorreu durante o processo, previsto no escopo da modernização, de substituição do isolamento antigo a base de asbesto, por uma isolação através de papel isolante (Nomex). A remoção da isolação antiga é realizada por uma empresa especializada, pois exige a necessidade de um correto descarte do material, sendo a nova isolação realizada posteriormente.

As etapas para remoção do asbesto requerem o transporte das bobinas, abertura das espiras com a utilização de cunhas, atividades de lixamento e limpeza, etapas as quais poderiam ser as causadoras das trincas. Esta hipótese, porém, foi descartada pelo corpo técnico da ENGIE após o acompanhamento da abertura das espiras *in-loco*.



FIGURA 2 – Trincas nas conexões brasadas das espiras

As trincas foram detectadas a olho nú, basicamente na região interna dos encaixes das espiras polares (lado do núcleo do polo). Estas também se mostraram concentradas na região central da brasagem, conforme melhor identificado na Figura 3, trinca do tipo 4.

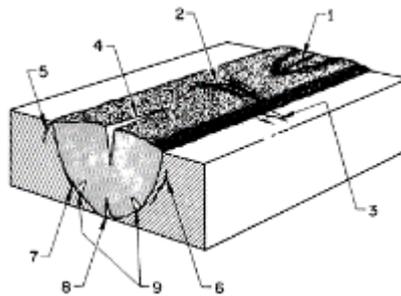


FIGURA 3 – Identificação das trincas de acordo com sua localização. Fonte: (4)

3.0 - ANÁLISES EMPREGADAS

Em função da reduzida quantidade de informações com relação ao processo originalmente empregado na fabricação das espiras, e da inconclusão das verificações iniciais, foram contratados dois laboratórios especializados em análises metalográficas para execução de testes específicos. Estes, além da incumbência de determinar a causa raiz, tiveram papel importante para se determinar a possibilidade de execução de um reparo, assim como os riscos envolvidos neste possível processo.

Os laboratórios utilizaram para os testes amostras com e sem trincas, permitindo uma comparação posterior dos resultados. Os ensaios executados foram:

- Radiografia;
- Macrografia;
- Análises químicas e microscópicas – Fratografia, Análise por EDS (MEV – análise de resíduos + cobre + solda).
- Exames metalográficos da região das trincas.

Abaixo é descrito a conclusão de cada um dos ensaios realizados acima.

3.1 Radiografia

A primeira amostra analisada apresentava uma trinca visível a olho nu com aproximadamente 15 mm de extensão a partir do vértice interno da bobina. Na região adjacente à trinca, o resultado da radiografia indicou uma considerável falta de material no interior da junta na região brasada (indicada pela linha preta).

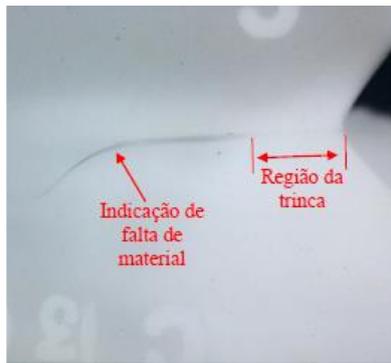


FIGURA 4 – Radiografia das juntas trincadas

Outras juntas analisadas apresentaram as mesmas características, com principal destaque, a indicação de falta de material no interior da brasagem, também existente nas amostras sem qualquer descontinuidade aparente.



FIGURA 5 – Radiografia das juntas trincadas

3.2 Macrografia

Os exames visuais realizados na superfície de diversas amostras trincadas apresentaram praticamente os mesmos resultados. Depois de aberta a superfície da trinca, percebeu-se que o metal de adição só havia se aderido à região de contorno da junta. Na parte central, foram notadas regiões aparentemente sem solda ou com aderência em apenas um dos lados. Em algumas amostras, conforme a Figura 6, foram identificados resíduos de corrosão do cobre (esverdeado) e verniz isolante (marrom). A análise visual mostra claramente que na região central, o preenchimento não ocorreu de forma contínua e uniforme.

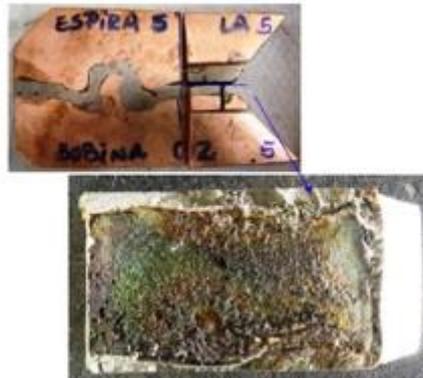


FIGURA 6 – Análise visual da superfície da trinca

3.3 Análises químicas e microscópicas

O exame microscópico revelou que a região de tonalidade mais clara na periferia é o metal de adição fraturado e, no núcleo da junta, o metal de adição mostra superfície de solidificação com ausência de ruptura. A análise micrográfica não mostrou esforços por fadiga/cíclicos, apenas rupturas frágeis por clivagem.

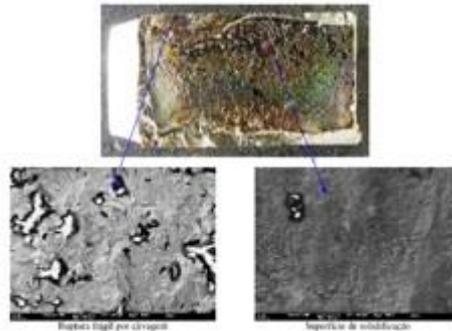


FIGURA 7 – Análise microscópica

As amostras também foram analisadas através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde foi possível realizar análises químicas por espectroscopia por dispersão de energia (EDS). A Figura 8 mostra o aspecto da superfície da região central da trinca analisada pelo MEV.

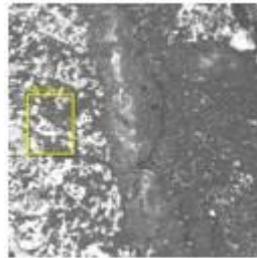


FIGURA 8 – Análise no MEV da região central da trinca

As regiões brancas da imagem são aquelas com grande presença de material não condutor (material orgânico, por exemplo), onde os elétrons se acumulam. Os resultados da análise química na região do retângulo amarelo da Figura 8, indicaram um elevado teor de carbono (66%) e oxigênio (15%), característicos de compostos orgânicos ou ricos em hidrocarbonetos, como o isolante empregado entre as espiras.

Também foram realizadas análises químicas em diferentes regiões do metal de adição utilizado. A Figura 9 mostra um dos resultados dessas análises químicas realizadas.

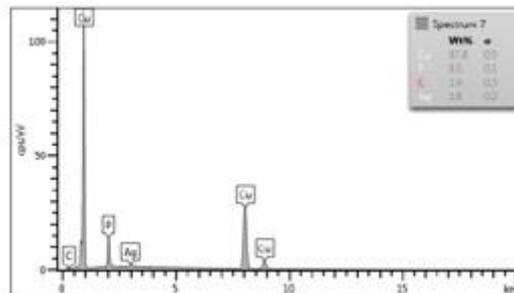


FIGURA 9 – Composição Química por EDS do metal de adição

Nas outras regiões analisadas, os resultados foram similares, indicando sempre um teor de fósforo próximo a 8% e um teor de prata próximo a 2%, sendo o restante cobre. Esta composição é bastante semelhante à liga comercial “Harris 2” cuja especificação dos teores de prata é de 1,5-2,5%, com teor de fósforo entre 6-7%. Esse resultado serve de forte indicação de que a liga utilizada não foi a “Ag15Cu80P5” (que para o referido fabricante recebe a denominação de “Harris 15”), a qual havia sido especificada no desenho de fabricação. Ainda segundo as informações deste fabricante, a liga com maior teor de prata teria alongamento consideravelmente maior.

3.4 Exame metalográfico

O exame metalográfico mostrou falta de adesão na parte central da barra. O defeito se caracterizou por falta de enchimento da junta, provavelmente devido a excesso de afastamento das superfícies a serem unidas.

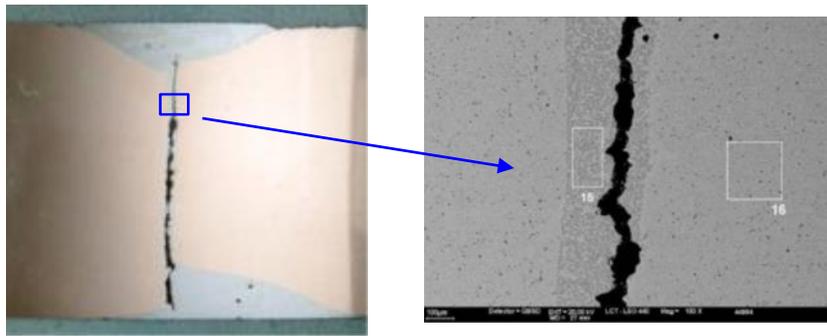


FIGURA 10 – Secção transversal da junta

Na literatura técnico-científica é amplamente divulgada a informação de que a maior pressão capilar é obtida com afastamentos entre 0,05-0,2 mm, sendo que para maiores afastamentos o metal de adição enfrenta maior dificuldade para penetrar na junta. As análises realizadas mostraram que a maior ocorrência de defeitos de falha de preenchimento foi justamente nos locais onde a junta apresentou maior afastamento, estando de acordo com o que é teoricamente esperado.

3.5 Causa raiz

As análises químicas realizada via EDS (MEV) indicam que o metal de adição utilizado é diferente do material indicado no desenho de fabricação, contendo somente cerca de 2% de prata, ao invés dos 15% especificados em projeto. O menor teor de prata no metal de adição tende a diminuir a fluidez do metal líquido no momento da brasagem (dificultando o escoamento do material para dentro da junta) e também tende a piorar as propriedades mecânicas da liga.

Foi notado que a ocorrência das faltas de preenchimento da junta foi maior nos locais onde o afastamento das barras de cobre se apresentava maior (maior “gap” ou abertura da junta). Foram encontradas, também, falhas no preenchimento da junta brasada principalmente na região reta, que fica próxima ao vértice interno da bobina. Em intensidade muito menor, também foram encontradas falhas de preenchimento e porosidades na região situada próxima ao vértice externo, porém sem nenhuma trinca aparente.

Em muitos pontos das seções analisadas, a junta apresentava afastamento (gap) superior à 0,2 mm, dificultando a penetração do metal de adição por capilaridade, dificultando o completo preenchimento da junta.

Diante destes fatores, podemos concluir que a principal causa raiz foi a utilização de um material de brasagem diferente do indicado no projeto de fabricação, agravado pelos grandes afastamentos nas juntas.

Quanto ao período de surgimento destas trincas, a julgar pelo verniz encontrado no interior das juntas, e a ausência de esforços cíclicos (sem sinais de propagação/atrito entre região intersticial), conclui-se que as mesmas devem ter se originado ainda no procedimento de confecção das bobinas.

4.0 - SOLUÇÕES EMPREGADAS

Após realização das análises laboratoriais, fez-se uma estimativa da quantidade de juntas que precisariam ser recuperadas. Esta atividade se deu através de um mapeamento por amostragem e teve um papel muito importante para dimensionar o prazo e os custos envolvidos. A estimativa inicial realizada pela ENGIE apontou a necessidade de cerca de 700 reparos e ao final do serviço se concretizaram 805 reparos, executados em todas bobinas polares.



FIGURA 11 – Ensaio de líquido penetrante nas juntas brasadas

Dentre as soluções tecnicamente viáveis foram analisadas as alternativas conforme abaixo.

4.1 Recuperação total

A proposta de recuperação total das espiras previa a substituição completa de todas as seções inferiores e superiores dos quadros. O objetivo principal seria eliminar o encaixe original, substituindo por uma solda de topo. O processo de soldagem também utilizaria lâminas de prata e o aquecimento por indução. Os detalhes podem ser verificados na Figura 12.

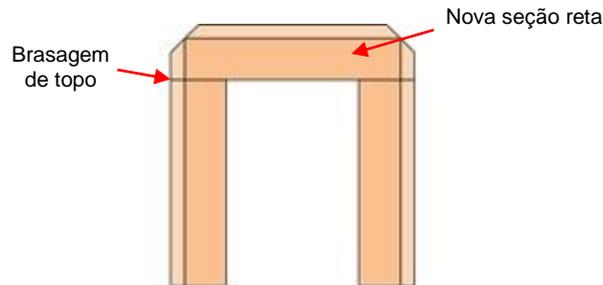


FIGURA 12 – Proposta para recuperação total

4.2 Recuperação parcial

A recuperação parcial prevê a execução de um reparo apenas nas bobinas que apresentam descontinuidades. Para este reparo são previstas as atividades de:

- Remoção do brasagem original nas áreas com descontinuidades através de aquecimento com chama;
- Aplicação de ácido decapante para limpeza das seções a serem unidas (retirada do verniz isolante e demais impurezas);
- Nova brasagem através de chama utilizando a liga adequada (Ag 15%);
- Ensaios de Rohm, LP e US;
- Inspeção visual.

4.3 Solução final

Cada uma das alternativas acima foi avaliada em termos de custos, riscos em operação e prazo de reparo. As análises laboratoriais trouxeram diversas informações relevantes, como a presença de material isolante no interior das juntas, uso de uma liga diferente para brasagem e o processo de ruptura que se mostrou de característica frágil, sem sinais de fadiga ou evolução. Em função destes fatores, a alternativa escolhida foi o reparo parcial.

Este reparo também contou com uma série de ensaios para qualificação do processo e ensaios que subsidiaram e deram maior segurança a decisão.

Abaixo são apresentadas as fotos do processo de recuperação.



FIGURA 13 – Detalhes dos trabalhos de recuperação das trincas

5.0 - CONCLUSÃO

O aparecimento de trincas generalizadas nas espiras polares do gerador da Unidade 3 da Usina de Salto Santiago, durante o processo de modernização, trouxe uma grande preocupação às equipes de engenharia da ENGIE, no que se refere aos custos e prazos associados ao reparo, além dos impactos da existência das mesmas na operação confiável da máquina.

As análises empregadas para estudo da causa raiz e identificação das características do problema, auxiliaram as equipes da engenharia da ENGIE a definir o melhor caminho a ser seguido na correção deste problema, minimizando os custos e riscos associados. Estes estudos, junto às análises da característica do projeto, auxiliaram a definir a solução de maior custo benefício para a empresa, além de capacitar as equipes na análise e identificação de problemas similares que possam surgir em outras plantas, impactando os resultados operacionais da empresa.

Sabe-se que o processo de soldas em brasagem é complexo e requer todos os cuidados nos procedimentos e materiais empregados. Estes requisitos devem ser respeitados para garantir a vida útil da solda, impedindo impactos futuros negativos associados a estes elementos. Toda a experiência adquirida aqui serviu de base para a melhoria do controle sobre a qualificação destes processos de solda.

Além disso, a experiência adquirida subsidiou a especificação de reisolamento de polos de outros ativos da empresa com projeto semelhante, minimizando os riscos associados a este componente.

As conclusões pretendem demonstrar a importância de critérios e controles para soldas em brasagem em geral, e mais especificamente para projetos de bobinas polares que se encontram sob esforços dinâmicos, além dos requisitos de montagem e testes de aceitação, certificados de materiais empregados, e outros fatores que limitam a ocorrência de problemas futuros similares ao relatado neste trabalho.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Speed Cycling and Premature failure of generator components. Bill Moore, P.E.- National Electric Coil – Columbus, Ohio, USA.
- (2) Relatório de Análise de Falha – Causa de trinca ou fratura – Labotest Consultoria e Tecnologia EIRELI – abril, 2016.
- (3) Análise das Trincas de brasagem das bobinas polares da UHSS – Usina Hidrelétrica Salto Santiago – LABSOLDA /UFSC – Instituto de Soldagem e Mecatrônica – abril, 2016.
- (4) ASM Handbook, Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering – ASM International, 1993.
- (5) 2-MR-00085 – Detalhes da bobina polar.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Paulo Henrique Santos Feitosa
nascido em Passos/MG, em 07/05/1983, formado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI em 2006 com especialização em Sistemas Elétricos de Potência em 2012. Trabalha na ENGIE Brasil Energia como Engenheiro de Manutenção em Hidrogeradores desde 2008.

Renato Vargas Del Frari
nascido em Erechim/RS, em 20/11/1985, formado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Passo Fundo em 2010. MBA em Gestão de Projetos - FGV – 2013. Ocupa o cargo de Engenharia de Manutenção em Hidrogeradores na ENGIE Brasil Energia desde 2011.

Marcéu Couto dos Santos
nascido em Medianeira-PR, em 03/10/1981. É formado Técnico em Eletromecânica pela UTFPR-MD em 1999, formado em Tecnologia em Eletromecânica pela UTFPR-PB em 2007 e formado em Engenharia Mecânica pelo FAG em 2014. Tem experiência de 15 anos com manutenção e engenharia de Usinas Hidrelétricas, trabalhando na Engie.

Cláudio Simões

nascido em Florianópolis, SC, 06/03/1959, formado em Engenharia Mecânica pela UFSC, 1981, especializ. Máquinas Hidráulicas pela Universidade de Stuttgart, RFA, 1986, 35 anos de experiência em Equipamentos Mecânicos para Usinas Hidrelétricas, empresas ELETROSUL, Centrais Elétricas do Sul do Brasil SA e TRACTEBEL Engineering.

Diego José Cieslik

nascido em Realeza - PR, em 20/12/1984, formado em Técnico e Tecnólogo em Eletromecânica pela UTFPR - PR em 2008 e Engenharia Mecânica pela FAG - PR em 2016. Experiência de 13 anos com manutenção e 08 anos trabalhando na manutenção mecânica de Usina Hidrelétricas na Engie Brasil Energia.

Fernando Luiz Hain

nascido em Rancharia – SP, em 27/12/1983. Formado em eng. Mecânica em 2017 pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE - campus Foz do Iguaçu-PR. Atua na área de Geração Hidráulica há 9 anos, sendo 2 na área de manutenção e 7 na área de engenharia

Alexandre Puls Ferretti

nascido em 19/12/1974, em Santo André/SP. Graduado em Engenharia Mecânica, pela Unicamp em 1997, e pós-graduado em Gestão de Projetos pela Fundação Vanzolini/USP, em 2002. Trabalhou por 17 anos em multinacionais como Alstom, GE e Andritz. Desde 2015 trabalha na Engenharia de Manutenção na Engie.