

## **Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH**

### **HISTÓRICO DE FALHAS ESTRUTURAIS E SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS NAS GRADES DA TOMADA D'ÁGUA DA USINA HIDRELÉTRICA GOV. JOSÉ RICHÁ**

**DIEGO ORLANDO DE BORTOLI(1); RODRIGO DE CAMPOS(1); JOSE BOZ NETO(1); ROMILDO TRISTANTE(1); LEONARDO ENTA(1);**

**Copel GET(1);**

## **RESUMO**

O projeto e a confecção dos painéis de grades da tomada d'água (TDA) da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (UHE GJR) seguiram as normas técnicas vigentes e recursos tecnológicos da época da sua construção na década de 90. Mesmo assim, em seus 20 anos de operação, estes equipamentos tiveram ocorrências com trincas e quebras de segmentos metálicos em seus painéis.

Neste período, a COPEL realizou diversos estudos e melhorias buscando soluções, a fim de eliminar o modo de falha, sendo que após um estudo bastante estruturado com coleta de dados e análises computacionais, alcançou-se ganhos significativos de confiabilidade nestes equipamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Painéis de Grades, Tomada d'água, Usina Hidrelétrica Governador José Richa, Canal de Adução, simulação CFD.

## **1.0 – INTRODUÇÃO**

A Usina Hidrelétrica Governador José Richa (UHE GJR) é um empreendimento de geração de energia elétrica, uma concessão da ANEEL à Companhia Paranaense de Energia – COPEL e que entrou em operação comercial em 1999 com 4 unidades geradoras, cada uma com capacidade de 310MWh. A usina situa-se entre os municípios de Capitão Leônidas Marques, Nova Prata do Iguaçu e Boa Vista da Aparecida, no estado do Paraná.

A tomada d'água (TDA) é formada por oito vãos, dois por unidade geradora, e tem como principal objetivo conduzir a água do reservatório para o conduto forçado. Em cada um destes vãos são montados seis painéis de grades empilhados e intercambiáveis de 4,73m de altura x 6,23m de largura cada, posicionados em um ângulo de 12° com a vertical e totalizando 28,38m de altura.

Durante a operação da usina, o fluxo de água que passa pela TDA carrega corpos flutuantes e submersos, de variadas formas e dimensões, que são bloqueados pelos painéis de grade, impedindo sua passagem para o interior da unidade geradora. O acúmulo destes materiais na face montante dos painéis de grades causa nos painéis de grades: redução da área livre da seção; aumento da velocidade da água na entrada na seção jusante; perda de carga e aumento das zonas de recirculação do fluido. Em condições críticas, este fenômeno pode gerar danos nos painéis de grades e consequentemente até na unidade geradora.

Os painéis foram projetados de acordo com a NBR 11213 – Grade de tomada d'água para instalação hidráulica – Cálculo, e atenderam todos os requisitos estabelecidos pela norma. Porém, em 2001, após dois anos da entrada de operação da Usina Hidrelétrica Governador José Richa, surgiram as primeiras trincas nos painéis metálicos.

Após estas primeiras avarias e até os dias atuais, através de soluções próprias ou em conjunto com laboratórios de pesquisa e simulações computadorizadas, a COPEL está na quarta geração de painéis da UHE GJR, com o Usina Hidrelétrica Gov. José Richa – PR-592 km 22 – CEP 85.790-000 Capitão Leônidas Marques – PR – Brasil  
Tel: (+55 45) 3327-7743 – Fax: (+55 45) 3327-7710 – Email: [diego.bortoli@copel.com](mailto:diego.bortoli@copel.com)

intuito de buscar uma solução que atenda às necessidades de operação da usina e priorize a mínima alteração de projeto visando a intercambialidade entre os painéis existentes, desta forma, minimizando custos.

A Copel compartilha sua experiência com grades da tomada d'água, as quais foram projetadas atendendo a norma vigente da época, sendo estas normas recentemente canceladas e sem substituta até o momento. Como verificado neste caso apresentado, somente o cumprimento dos requisitos de uma norma técnica pode não garantir uma operação sem falhas destes equipamentos.



*Figura 1 - Vista montante TDA UHE GJR (1997)*

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO

A seguir será demonstrada a cronologia de atuações da COPEL, bem como dados de projeto da grade da Tomada d'água da UHE GJR, a qual baseou-se na NBR-11213, atualmente cancelada.

### 2.1 – Geração 01: Painel original de grade UHEGJR

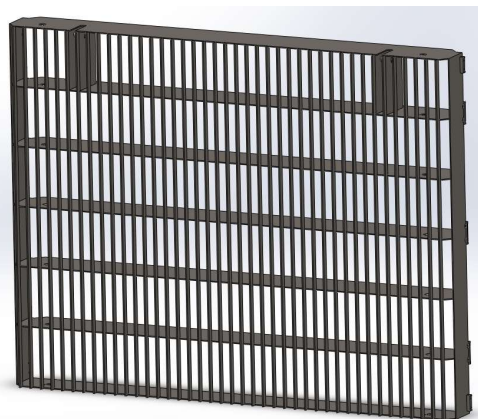
Como já citado, a UHE GJR entrou em operação em 1999, com 4 unidades geradoras, e em cada uma está montado um conjunto de 12 painéis de grades da tomada d'água, totalizando 48 grades.

Os painéis foram fabricados e fornecidos por empresa nacional, a qual forneceu juntamente com os painéis toda a parte de documentação de cálculos, manuais de montagem, operação e manutenção, lista de desenhos, materiais e o data book. A empresa seguiu as normas vigentes da época, tais como a NBR 11213:1990 (NB 1098) – Grade de tomada d'água para instalação hidráulica - Cálculo e NBR 8883:1996 – Cálculos de comportas hidráulicas – Procedimento.

Realizando uma comparação entre o memorial de cálculo do fabricante e a norma técnica da época, podemos verificar que a norma foi utilizada como base para realização do dimensionamento dos painéis de grade da tomada d'água. Atualmente, ambas as normas foram canceladas, sem normas substitutas.

O painel de grade original possui as seguintes características:

- Material: aço ASTM A-36;
- Massa: aproximadamente 5.500kg;
- Dimensões (mm): 6367,4 x 4730,10 x 610;
- Possui 41 barras verticais (largura 2.1/2") soldadas de topo com as 07 chapas horizontais.



*Figura 2 - Representação do Painel das Grades TDA (Original) - UHE GJR*

## 2.2 – Inspeções de 1999 a 2005

Entre o primeiro ano de operação da UHE GJR (1999) e 2005, foram executadas inspeções durante todos os anos, sendo que a grande maioria delas contava com o suporte de mergulhadores e era executada de forma submersa.

Após a segunda inspeção (2000), mesmo sendo realizada de forma submersa, foi possível identificar trincas em um painel da unidade geradora 04 (UG4). Na quarta inspeção submersa, realizada no ano de 2002, identificou-se trincas e barras soltas em 5 painéis da unidade 04, constatando um agravamento na situação e que possivelmente não se tratava de defeito de fabricação.

Em 2004, foram retirados os painéis da UG4 da água, inspecionados e recuperados os danificados, nesta oportunidade também foi realizada uma análise pelas equipes locais de manutenção da usina das causas prováveis destas avarias.



*Figura 3 - Retirada de painel para inspeção a seco*

Devido a dimensão do painel e as características construtivas do mesmo, em que existem 41 barras verticais de 2.1/2" soldadas de topo em chapas horizontais, sendo que estas chapas apresentam parte de sua estrutura em balanço, a conclusão foi de que devido a vibração da estrutura metálica, baixa rigidez e alta liberdade de movimentação da estrutura, aliada a pouca área de solda, havia uma condição favorável para o aparecimento de trincas nas regiões das soldas entre as barras verticais e as chapas horizontais e rompimentos nas barras verticais de todo um segmento.

Na Figura 4, é possível verificar o modo de falha mais usual, na solda, entre a barra vertical e a bandeja horizontal.



*Figura 4 - Trinca em painel de grade original da UHE GJR*

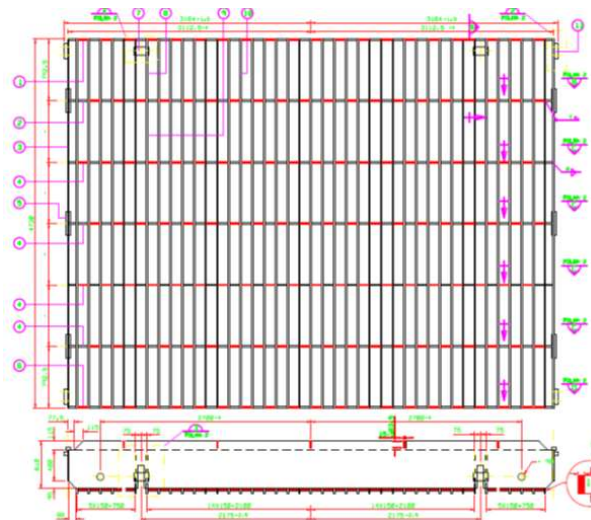
### **2.3 Geração 02: Inserção de segmentos de reforço**

De 2006 a 2009, com o intuito de aumentar a área de solda entre as barras verticais e aumentar a rigidez do painel metálico, foi realizado a contratação do serviço para inserção de um reforço intercalado, este serviço contemplava as atividades de lixamento das áreas de soldagem, processo de soldagem, acabamento da superfície e recuperação da proteção anti-corrosiva.



*Figura 5 - Reforço soldado no painel de grade da tomada d'água da UHEGJR*

As peças de reforço foram confeccionadas em aço ASTM A36 (mesmo material do painel), foram cortadas, chanfradas e depois de soldadas, além da realização de ensaio de líquido penetrante para verificação de trincas.



*Figura 6 - Desenho estrutura do painel com novos reforços inseridos*

Os painéis com reforços intercalados, chamados de geração 02, foram instaladas nas áreas críticas, de fluxo

mais turbulento e maior velocidade de entrada de água no conduto forçado, região esta mais próxima a região central do empilhamento de painéis, ou seja, como cada vão é composto por um empilhamento de 6 painéis, a região mais crítica compreende, de cima para baixo, os painéis nas posições 3, 4 e 5.

Nas inspeções preventivas de 2011 e 2012, apesar de menor quantidade em relação às inspeções anteriores, verificou-se novamente o aparecimento de trincas e segmentos faltantes, os quais foram reparados.

Sendo assim, apesar da redução da quantidade, o modo de falha continuava presente, com trincas nas soldas das barras verticais com as chapas horizontais.

## 2.4 - Geração 03: Chapa central e engastamento ½" das barras verticais

Como os painéis apresentavam condições não satisfatórias, a busca por soluções a serem implementadas continuou por parte das equipes de engenharia de manutenção da geração da COPEL. O conceito seguia pela mesma conclusão já apontada anteriormente, de que a área de soldagem das barras verticais permitia um grau de liberdade, que alinhada a vibração do conjunto grades mais fluxo d'água, acarretava em trincas, nas soldas, por fadiga. Em 2013, foi desenvolvida uma nova versão dos painéis de grades, com as seguintes modificações:

- Modificação na largura das barras verticais, de 2.1/2" para 3";
- Engastamento da barra vertical com a chapa horizontal de 1/2" (original: solda de topo entre barra e chapa);
- Inserção de chapa vertical na região central da grade, a fim de amenizar os efeitos de torção do painel.

Desta versão foram fabricados e colocados 4 novos painéis em operação na unidade geradora 04, a qual historicamente apresentava maior quantidade de defeitos nas grades.

Em 2014, o estado do Paraná, e principalmente a região da Bacia do Rio Iguaçu, foram acometidos por um período rápido e volumoso de chuvas, gerando uma vazão de água que se aproximou da máxima "*decamilenar*", período de reincidência igual a dez mil anos. Grande quantidade de objetos foram direcionados às grades, acarretando em avarias significativas, incluindo o descarte total de 2 painéis das gerações passadas.

Ocorreram também grandes danos nos painéis desta geração 03, mostrando que a solução não havia sido eficaz como previsto, pois o volume de trincas e segmentos faltantes nestes 4 painéis fabricados foi similar aos demais.



*Figura 7 - Painel de grade Geração 03 (com avarias após evento de 2014)*

## 2.5 Estudos para novas alterações de projeto

A gravidade desta ocorrência de 2014 alertou para uma necessidade eminente de estudos mais embasados de soluções que buscassem resolver o modo de falha que vinha se repetindo até então, sendo que a baixa confiabilidade dos painéis, em eventos similares, poderiam acarretar em danos de grande monta às unidades



geradoras da UHEGJR, pois nesta situação que ocorreu, barras verticais inteiras se desprenderam dos painéis e ficaram depositadas no canal de adução, como também algumas foram direcionadas para o rotor da turbina, sendo que, logo após o evento, foi detectado ruído anormal proveniente do rotor da Unidade 04 e ao ser parada a unidade geradora e realizada inspeção, verificou-se que havia uma barra presa a turbina, danificando a pintura do distribuidor, porém, apesar do alto dano que poderia ter acarretado, não houveram avarias no próprio rotor.

A partir de então, a COPEL realizou um grupo de estudos com integrantes da Engenharia de Manutenção da Geração, Engenharia de Construção da Geração, Manutenção Mecânica da UHEGJR, Hidrologia e demais áreas que pudessem contribuir com a análise e proposição de melhorias. Na sequência, foi contratada uma consultoria do Instituto LACTEC, um centro de ciência e tecnologia, para complementar o estudo de soluções com o desenvolvimento de modelagem da tomada d'água e das grades.

Foi iniciado um projeto, em que foram feitos estudos com os dados já existentes do reservatório, projeto e documentação técnica dos painéis originais, além de ensaios adicionais, em campo, para a coleta das condições de contorno, sendo assim, foi possível realizar uma simulação, em CFD (Computational fluid dynamics), acurada das linhas de corrente do escoamento na tomada d'água. A análise dos esforços estruturais nas grades foi feita, em Fluid-structure interaction (FSI), através do método dos elementos finitos, sendo que então, com a conclusão dos dados do mapeamento das condições do fluxo de água que alimenta as unidades geradoras, foi possível testar diferentes modificações nos painéis, tomando como base o projeto original, e quais seriam seus impactos com relação a comportamentos de deformação e vibração, e assim, ser possível apresentar uma proposta que, embasado com dados de campo, experiências anteriores e simulação computacional, procurasse aumentar a confiabilidade das grades.

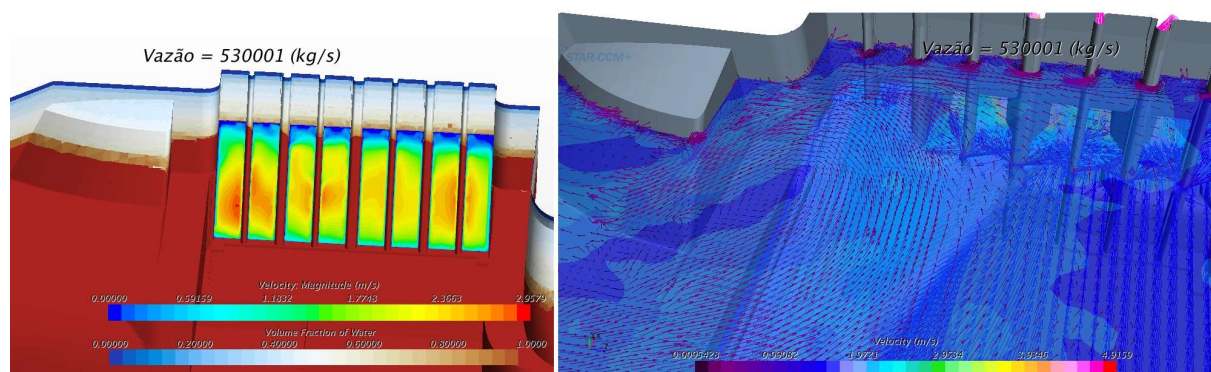


Figura 8 – Simulação Velocidade da entrada de água nas UGs (a esquerda) e reservatório UHEGJR (a direita)

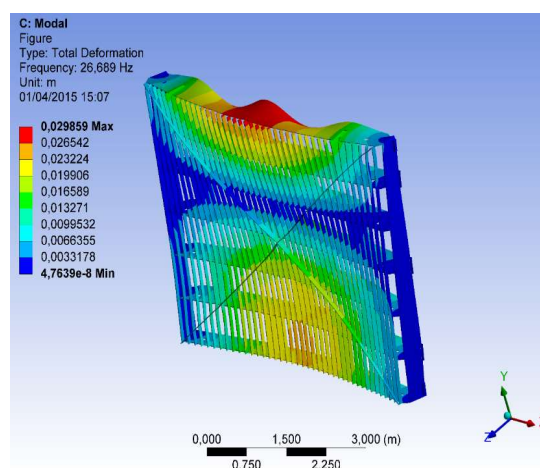


Figura 9 - Simulação computacional de deformação no painel de grade

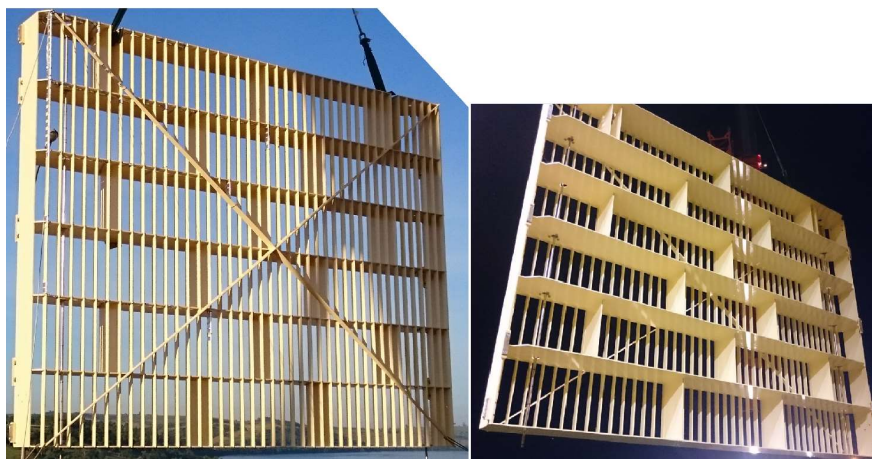
## 2.6 - Geração 04: Modificações no projeto original oriunda das simulações computacionais

Todo o trabalho de análise e simulação originou um relatório com as propostas de modificações nos painéis de grades, considerando como ponto de partida, o projeto original e os painéis já existentes, para assim, ser

possível um processo de reforma destas grades que já estavam instaladas e operavam por mais de 20 anos na Usina Hidrelétrica Governador José Richa.

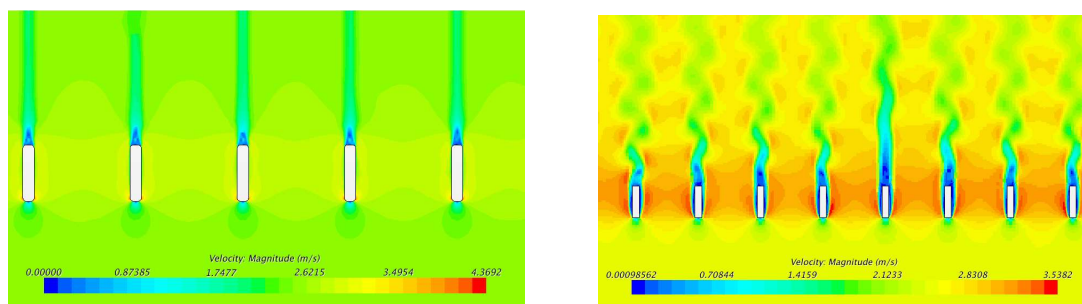
Dentre as modificações testadas, a que resultou em melhores respostas, na dessintonização das frequências dos modos de vibrar com as de formação de vórtices, foram as seguintes:

- Substituição de todas as barras verticais de largura 2.1/2" (41 unidades), por barras de 3" de largura com arestas arredondadas;
- Alteração na forma de fixação das referidas barras no painel, de solda de topo no projeto atual, para engastamento total nas chapas horizontais de suporte;
- Adequação da estrutura e inserção de segmentos de reforço composto por chapas verticais entre as chapas horizontais;
- Adequação da estrutura e inserção de reforço sendo estrutura metálica em X, na parte frontal do painel.



*Figura 10 - Painel de grade geração 04*

Nas figuras abaixo podemos notar o efeito gerado pela alteração do arredondamento das barras verticais no mecanismo de formação de vórtices:



*Figura 11 - Redução na formação de vórtices nas barras c/ arredondamento (a esquerda) e vórtices nas barras verticais sem arredondamento (a direita)*

A faixa crítica de formação de vórtices varia entre as frequências de 18 a 21Hz, portanto, é importante dessintonizar os modos de vibrar dos painéis de grades desta faixa apontada. Como podemos ver abaixo, o painel original possuía vários modos de vibrar exatamente na faixa crítica, sendo assim, estava bastante suscetível a fadigas por operar nestas condições.

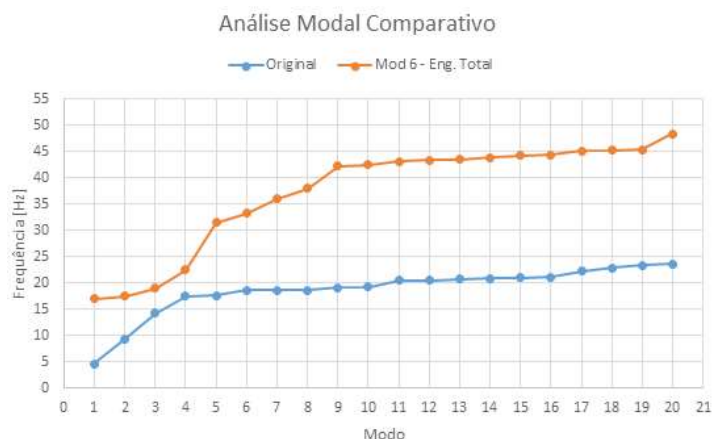


Figura 12 - Gráfico comparativo modos de vibrar (painel original x painel geração 04)

## 2.7 - Geração 05: Início de operação e primeiros resultados dos painéis

Na sequência, foi definido pela fabricação de 06 (seis) painéis seguindo o modelo sugerido no relatório apresentado, para colocação em operação nas condições mais críticas, sendo estas na Unidade 04 e na região central dos vãos (posições 3, 4 e 5).

Após fabricação, na instalação dos painéis novos para operação e também após os painéis já estarem em operação pelo período de 1 ano, em ambas as oportunidades foram realizados ensaios para validação dos dados computacionais, abrangendo, medição da velocidade real do escoamento da água ao passar pelos painéis e da deformação dos painéis em diferentes pontos e condições de potência da unidade geradora. A finalidade destes ensaios era realizar o comparativo entre os dados computacionais empíricos utilizados nas simulações e as condições reais.

O resultado dos ensaios foram bastante satisfatórios, apresentando medições muito próximas dos dados utilizados para a realização das simulações computacionais.

Após 1 ano de operação dos painéis desta nova geração também foram realizadas inspeções de garantia para verificação da integralidade dos painéis, sendo que, verificou-se resultados satisfatórios, pois o modo de falha, de trincas localizadas nas soldas, foi eliminado, sendo constatados 3 painéis totalmente íntegros e 3 painéis com número máximo de 2 trincas por painel, porém, de características distintas às trincas anteriores.

Logo após, foram reformados 2 painéis de grades da UHEGJR com base nas alterações propostas e colocados em operação (2018), sendo neste ano de 2019 realizada a segunda inspeção dos 06 painéis novos fabricados e colocados em operação em 2016 e a primeira inspeção dos painéis reformados citados anteriormente.

Não houve registro de trincas novas em nenhum dos 6 painéis que estavam na segunda inspeção, porém foram verificadas algumas trincas nos 2 painéis reformados e que estavam com um ano de operação. As trincas encontradas nestes painéis reformados possuem caracterização diferente das que foram encontradas anteriormente nos outros 6 painéis novos, e em primeira análise, apresentam características que reforçam serem oriundas do processo de fabricação e do método utilizado para confecção do entalhe para o encaixe das barras de 3" nas chapas horizontais.

Atualmente, de posse de dados de medições dos parâmetros de deformação e velocidade de escoamento, bem como do mapeamento e caracterização das trincas nos painéis novos e reformados desta nova geração, deverá ser realizado o cruzamento de dados e informações com as simulações computacionais, além de estudos na área de soldagem, para ser possível o refinamento deste projeto em que há ganhos reais de confiabilidade pois extinguiu-se o modo de falha anterior.

## 3.0 - CONCLUSÃO

Apesar das grades da Usina Hidrelétrica Governador José Richa terem sido especificadas e confeccionadas atendendo as normas técnicas vigentes da época, a COPEL registrou, nesta usina, diversas ocorrências com



trincas em seus painéis.

Após a realização de uma série de tentativas, bem como aprendizados e estudos, a partir de 2016, foi desenvolvida e implantada uma nova geração de grades modificadas que registraram aumento da confiabilidade e minimização dos modos de falhas que ocorriam nos painéis originais.

Porém, como os painéis de grades originais possuíam diversos modos de vibrar próximos das condições de frequências em que ocorrem a formação de vórtices no reservatório, sendo que com a implementação das modificações foi possível dessincronizar a grande maioria dos modos de vibrar, mas poucos modos ainda trabalham próximo a faixa crítica, desta forma, é natural que existam a ocorrência de novas trincas, entretanto, o objetivo é para que as mesmas apresentem comportamentos que não coloquem todo o conjunto do painel de grade em risco, sendo que este, até a análise atual, foi alcançado. A formação de trincas ainda se mantém como objeto dos estudos de melhorias, agora baseados num modelo computacional para racionalizar novas etapas.

Atualmente, as normas técnicas que embasam a confecção de painéis de grades de tomada d'água estão canceladas e não há previsão de que novas normas sejam lançadas, sendo assim, compartilhando sua experiência neste assunto, a COPEL já trabalha com normas internacionais como referência e coeficientes de segurança mais elevados em especificações de grades, pois as condições que serão encontradas nos reservatórios das futuras usinas possuem grande quantidade de variáveis, bem como incertezas dos esforços que os painéis serão solicitados, além de que, acompanhamentos periódicos, devido aos componentes operarem submersos, bem como qualquer alteração de projeto, se tornam extremamente complexos, demorados e onerosos.

## 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bardella S.A – Manual de Operação e Manutenção das grades, n°50042-18424-007 de 27/11/1996;
- (2) Bardella S.A – Manual de Montagem, n°50042-18413-013 de março de 1996;
- (3) INSTITUTO LACTEC. Relatório Grades SCX\_DVSM\_7496\_2017, de 31/05/2017;
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grade de tomada d'água para instalação hidráulica – Cálculo – NBR. Brasil.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Diego Orlando de Bortoli

2010: Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná – Curitiba – PR

2013: Pós-Graduação em MBA de Liderança e Gestão – Estação Business School – Curitiba – PR

2010 – Atual: Admissão na Companhia Paranaense de Energia – COPEL em 2010, na função de Engenheiro de Manutenção Mecânica de Usinas, na Usina Hidrelétrica Governador José Richa, sendo nesta usina na qual desempenha atualmente a função de supervisor de serviço de manutenção mecânica.