



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

#### **Análise de Escoamento Fluido e Comportamento Estrutural em Painéis de Grades de Adução através de Análises Numéricas**

**RODRIGO CANESTRARO QUADROS(1); ALESSANDRO PRESZNUK FILHO(1); LEONARDO SIRINO(1);  
PAULO CRISTIANO MORO(1); CLAITON DA SILVA MATTOS(1); JOSÉ BOZ NETO(2);  
LACTEC(1); Copel GET(2);**

#### RESUMO

Painéis de grades de adução tem um papel de grande importância na prevenção de acidentes e falhas prematuras em Usinas Hidrelétricas. Como função primária, as grades atuam como filtros, impedindo a passagem de grandes particulados e detritos à turbina hidráulica. Contudo, projetos de grades, historicamente, não levam em consideração extensas análises, e muitos são os casos de falhas nessas estruturas, que apesar de simples, exigem adequações às condições reais de operação. Desse modo, mostra-se um estudo de caso da UHE GJR da Copel GET, ao qual foram feitas análises numéricas das grades originais de projeto e sugeridas melhorias.

#### PALAVRAS-CHAVE

Adução, Grades, Projeto, Readequação, Simulações

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A utilização de painéis de grades na tomada d'água de uma UHE (Usina Hidrelétrica) ou PCH (Pequena Central Hidrelétrica) tem como objetivo principal proteger a turbina hidráulica de detritos potencialmente perigosos que estão presentes nos cursos de rios e em reservatórios de barragens. São estruturas que vem sendo desenvolvidas e fabricadas há muito tempo, contudo, o tempo dedicado ao projeto e adequação destas estruturas às condições reais de operação de uma usina, nem sempre estão em acordo com a necessidade real. Dessa forma, existem potenciais riscos de que uma estrutura que tem como objetivo principal a proteção da turbina no curso de detritos, possa apresentar falhas, vindo a projetar-se para o conduto forçado da tomada d'água e causar extensos danos à estrutura e ao conjunto motriz, em casos de acidentes.

Partindo do exposto, o correto projeto de estruturas de painéis de grades de tomada d'água mostra-se, que além de serem itens essenciais à segurança da operação, também devem possuir a menor obstrução possível, a fim de maximizar a eficiência de geração, minimizando as perdas de carga logo ao início do conduto forçado.

Durante a execução do serviço "Recuperação e Projeto Novo das Grades da UHE GJR" e "Instrumentação e Monitoramento de Grades de Tomada d'Água Para a UHE GJR", ambos realizados juntamente com a Copel Geração e Transmissão S.A (COPEL GET), foram levantadas as possíveis causas de falhas das estruturas de painéis de grades da adução da UHE GJR (Usina Hidrelétrica Governador José Richa), conforme Figura 1. Historicamente, desde sua construção, a usina vem apresentando problemas recorrentes de falhas nos painéis da UG-04 (unidade geradora número 04). De forma, para mitigar tais falhas, foram realizados estudos das condições operacionais de operação da região de adução desta UG na UHE GJR. Através dos resultados obtidos dos projetos dos painéis originais em relação às simulações fluidodinâmicas e estruturais, foram propostas melhorias estruturais com o objetivo de reduzir o número de falhas, adequando-se o projeto original e mantendo as características geométricas, para permitir a correta instalação.



FIGURA 1 – (a) Trinca passante entre as barras verticais frontais e a bandeja do painel da grade; (b) Falha causada por trincas, com posterior remoção das barras verticais. Fonte: Lactec, 2015.

Dentre as análises realizadas com a estrutura original, tem-se análises de falhas, análises modais (livre e com engastamento da estrutura), análises fluidodinâmicas (geração de vórtices) e simulação estrutural estática. De forma semelhante, as mesmas análises foram feitas para as novas estruturas propostas, até a obtenção de uma geometria otimizada em relação à original. Para a confirmação dos dados obtidos por simulação fluidodinâmica da velocidade de escoamento nas estruturas dos painéis de grades, foram feitas medições em campo através de hidrômetros calibrados em cinco pontos de leitura. E para a validação dos resultados obtidos por simulação estrutural, foi realizada a instrumentação dos painéis de grades novos fabricados para a validação dos resultados das deformações e tensões obtidas através de extensometria convencional.

## 2.0 - MODELO ORIGINAL DE PAINÉIS DE GRADES

Tanto para os modelos de painéis originais, quanto os modelos propostos e selecionados para a execução do projeto executivo foram modelados em software CAD, permitindo a portabilidade para softwares de simulação.

### 2.1 Modelo tridimensional do Painel Original

Para a elaboração das simulações computacionais do modelo do projeto original dos painéis de grades da UHE GJR, foram elaborados modelos tridimensionais em software CAD (*Computer Aided Design*), ver Figura 2, e posteriormente repassados para ferramentas de simulação computacional.

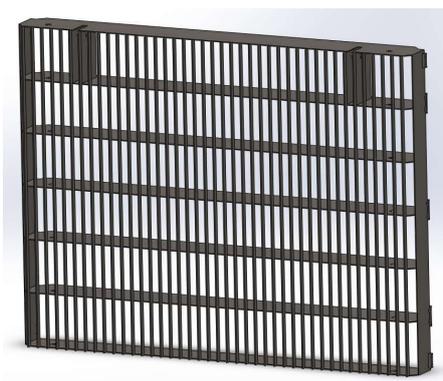


FIGURA 2 – Modelo tridimensional computacional do modelo original de um painel de grade. Fonte: Lactec, 2015.

### 2.2 Modelo tridimensional da barragem

Além dos painéis de grades, a estrutura da barragem também foi modelada em 3D (Figura 3), em software CAD, para a elaboração de simulações computacionais fluidodinâmicas, com o objetivo de realizar o levantamento das velocidades de escoamento nas regiões suscetíveis a falhas dos painéis originais.

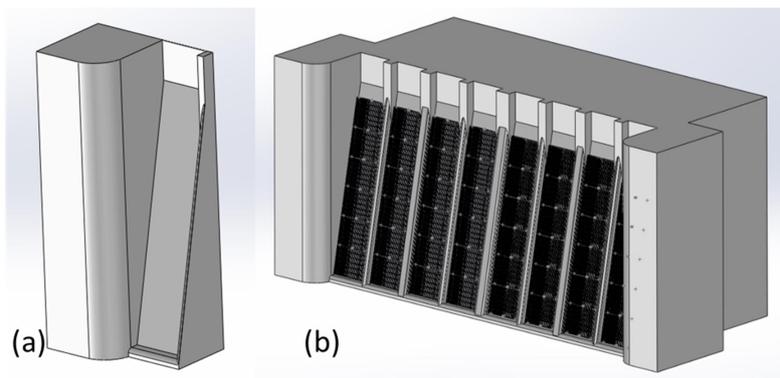


FIGURA 3 – (a) trecho da barragem corresponde à metade do vão da UG-04; (b) representação da barragem com painéis de grades instalados. Fonte: Lactec, 2015.

### 2.3 Simulações computacionais dos modelos originais

Os modelos de painéis de grades, após modelagem computacional, foram simulados computacionalmente quanto às características mecânicas/estruturais com base em análises modais, estruturais e fluidodinâmicas, para avaliar possíveis formações de vórtices, suas frequências e a possibilidade do fenômeno de *lock-in*, que ocorre quando a excitação mecânica é próxima à frequência natural da estrutura. Esta excitação, que é periódica, pode vir a causar fadiga estrutural e consequente redução da vida útil pela nucleação de trincas e ocorrência de falhas estruturais.

#### 2.3.1 Simulação para Análise Modal – Modelo Original

Para a análise das frequências naturais da estrutura, foram feitas simulações numéricas modais. Para a estrutural original, foram obtidas as frequências naturais de excitação da estrutura, quando instalada em meio à água e com os carregamentos mecânicos normais de operação (Figura 4). Para a condição mostrada, as frequências do 1º ao 20º modo variam entre 4,64 Hz e 23,59 Hz.



FIGURA 4 – Frequência naturais do painel de grade original, considerando as condições de contorno e carregamentos. Fonte: Lactec, 2018.

#### 2.3.2 Simulação Fluidodinâmica do escoamento da tomada d'água – Modelo Original

De posse de dados das frequências naturais da estrutura, foram feitas simulações computacionais CFD (*Computational Fluid Dynamics*) considerando o leito do reservatório e a estrutura da barragem, de modo a aproximar-se o máximo possível das condições reais, incluindo os desníveis e obstáculos do leito do reservatório, dados estes que foram obtidos de projeto e batimetria posterior à construção da barragem e formação do reservatório. Na Figura 5 é observada a simulação CFD para o campo de velocidades próximo à região de entrada d'água e as linhas de corrente do escoamento.

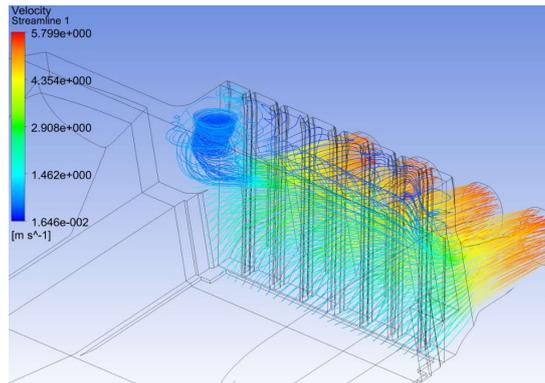


FIGURA 5 – Linhas de corrente e velocidade de escoamento no trecho tomada d'água da UHE GJR. Fonte: Lactec, 2018.

Para a simulação do comportamento da estrutura ao escoamento fluidodinâmico, utilizou-se da geometria simétrica da estrutura dos painéis de grades para a elaboração de simulações numéricas. Foi gerado um volume de controle simétrico, conforme Figura 6.

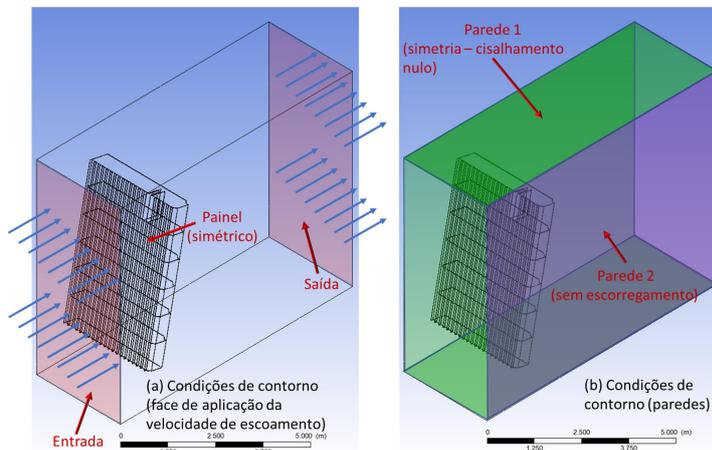


FIGURA 6 – Condições de contorno: (a) Faces de aplicação da velocidade de escoamento e pressão; (b) paredes. Fonte: Lactec, 2018.

Através da inserção da velocidade de escoamento estimada na simulação CFD obteve o campo de pressões, resolvendo-se o escoamento numericamente através do método de volumes finitos, cujas condições foram: formulação RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) transiente; acoplamento pressão velocidade SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*); esquemas *Upwind* (à montante) de Segunda Ordem. Através de tais condições, obteve-se o campo de pressões ao redor do painel de grade, conforme Figura 7.

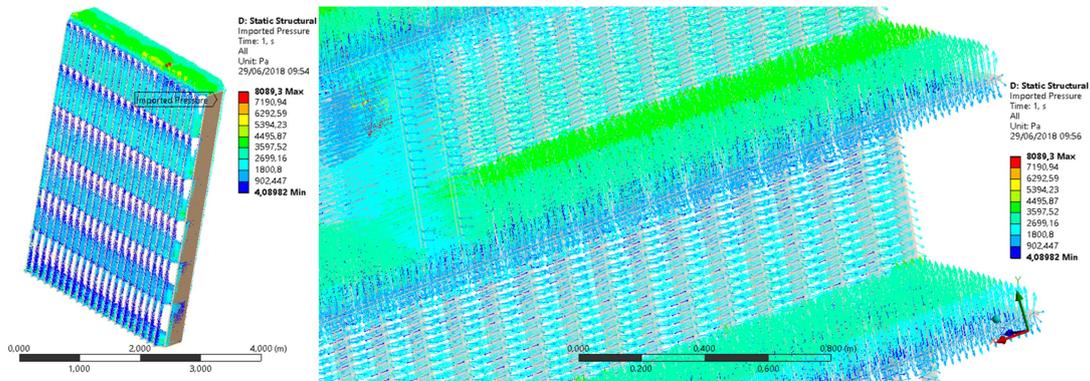


FIGURA 7 – Campo de pressão nas faces do painel de grade: à esquerda vista a montante e à direita vista a jusante do escoamento. Fonte: Lactec, 2018.

Além do campo de pressões, avaliou-se também a frequência de formação de vórtices, conforme Figura 8 (a), e quais os modos possíveis de serem excitados pelo carregamento cíclico gerado pela geometria dos painéis de grades originais. Através das simulações numéricas, obteve-se a frequência principal de formação de vórtices em 23,52 Hz, conforme Figura 8 (b). Próximo à esta frequência, é observada uma frequência natural de 22,27 Hz (considerando água como meio), cujo modo de vibrar é excitável com a formação de vórtices nas barras verticais. Até a frequência de 22,27 Hz, são observados outros 3 modos que podem ser excitados por vórtices nas barras verticais.

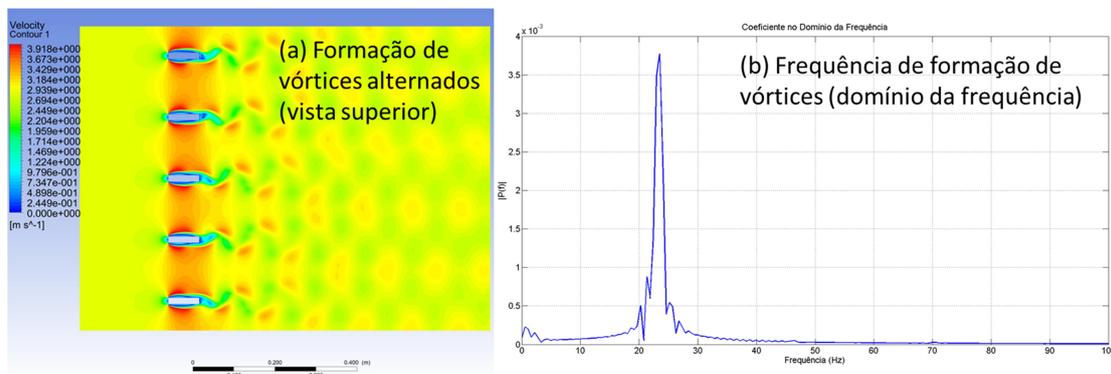


FIGURA 8 – Formação de vórtices alternados pelas barras verticais (a) e frequência de formação dos vórtices (b). Fonte: Lactec, 2018.

### 2.3.3 Simulação Estrutural – Modelo Original

A partir dos dados do campo de pressão nos painéis de grades de adução, e considerando os carregamentos mecânicos advindos do peso de outros painéis incidindo acima daquele analisado, e também considerando as condições de fixação à estrutura da barragem; foram elaboradas simulações estruturais para a obtenção das tensões mecânicas ao quais a estrutura poderia, idealmente, apresentar. Nessa análise, desconsideram-se as tensões internas e possíveis tensões residuais, causadas pelo processo de fabricação. A malha de simulação utilizada no software utilizada é tetraédrica e o método utilizado é o de elemento finitos. Foram realizados refinamentos pontuais da malha de simulação, para obtenção de resultados mais confiáveis em regiões de transição geométrica, conforme Figura 9.

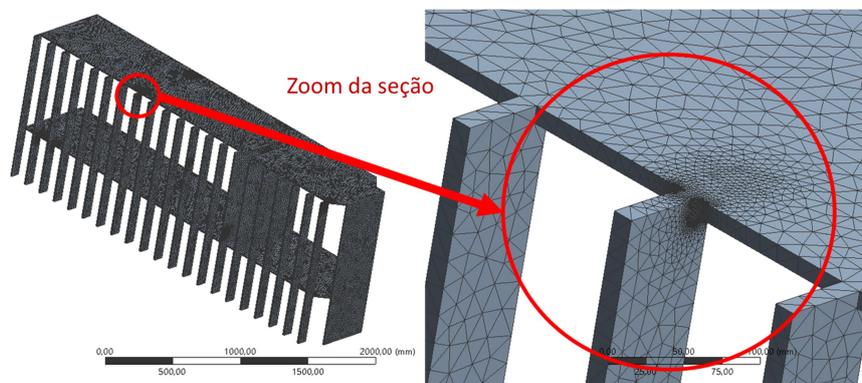


FIGURA 9 – Malha de simulação utilizada para a resolução das análises pelo MEF (método dos elementos finitos). Fonte: Lactec, 2018.

#### 2.3.3.1 Resultados da simulação estrutural

Como resultado da simulação estrutural, obtiveram-se os mapas de cores para as regiões de interesse do painel de grade, conforme Figura 10. As análises das tensões mecânicas atuantes no painel da tomada d'água mostraram que as maiores tensões ocorrem nas junções dos elementos verticais do painel com as chapas horizontais. Essas tensões atingem valores máximos de tensão equivalente de Von Mises de 34,156 MPa. Segundo o Eurocode 3 (1), a “categoria de detalhe” da junta soldada onde ocorre a maior tensão é de 71 MPa. Ou seja, para uma vida útil de  $2 \times 10^6$  ciclos a máxima tensão atuante na junta seria de 71 MPa. Seguindo a curva de vida em fadiga, para essa categoria, para uma vida de  $5 \times 10^6$  ciclos a máxima tensão aplicável seria de  $0,737 \times 71 \text{ MPa} = 52,3 \text{ MPa}$ . Essa condição corresponde, também, a uma vida infinita sob tensão alternada uniforme. Para a situação mais crítica, sob tensão alternada não uniforme, a máxima tensão aplicável em

$10^8$  ciclos, correspondendo também a uma vida infinita, será de  $0,549 \times 52,3 \text{ MPa} = 28,7 \text{ MPa}$ , segundo (1). Ou seja, desconsiderando quaisquer efeitos de tensões residuais, o modelo original de grades apresenta uma tensão máxima alternada de 33,156 MPa e para uma vida infinita à fadiga é necessário que haja uma tensão máxima admissível de 28,7 MPa.

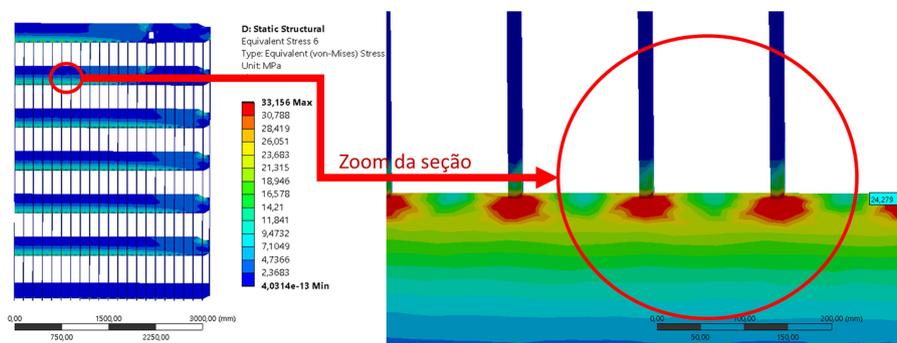


FIGURA 10 – Tensões mecânicas decorrentes do campo de pressões e das condições de carregamento para o modelo original. Fonte: Lactec, 2018.

### 3.0 - ADEQUAÇÃO DOS PAINÉIS DE GRADES ÀS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

De posse dos resultados numéricos obtidos para as frequências naturais de excitação da estrutura (na água) e das simulações CFD e estruturais, foram propostas mudanças ao projeto original, mantendo-se características geométricas originais para compatibilização com a estrutura de fixação na barragem.

#### 3.1 Modelo tridimensional do painel modificado

Utilizando-se dos dados obtidos por simulações numéricas, foram propostas modificações estruturais, mantendo-se algumas características básicas como dimensões, espessuras de perfis utilizadas, permitindo o possível reaproveitamento dos painéis já existentes, no caso de uma reforma e/ou readequação. O modelo escolhido como definitivo para a execução do projeto executivo é apresentado na Figura 11. Dentre as principais modificações realizadas, em relação ao modelo original, foi: introdução de um perfil variável em formato de “X” na posição à montante, aumentando a rigidez entre as barras verticais e horizontais (bandejas); reforços verticais intercalados (entre as bandejas); e aumento da área de engastamento das barras verticais.

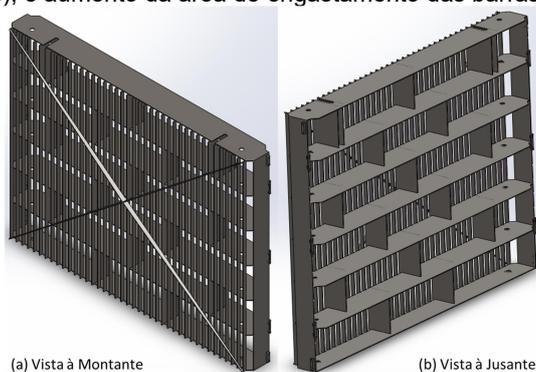


FIGURA 11 – Painel de Grade Modificado

#### 3.2 Simulações computacionais do modelo modificado

O modelo modificado também foi analisado através das análises modais, CFD e estruturais, visando o desacoplamento das frequências de formação de vórtices e frequências naturais possivelmente excitáveis, evitando o fenômeno de *lock-in*.

##### 3.2.1 Simulação para Análise Modal – Modelo Modificado

Pela nova composição da estrutura dos painéis, observam-se os resultados da simulação de análise modal pela Figura 12. As frequências naturais da estrutura modificada do painel de grade variam entre 15,25 Hz e 44,70 Hz. Verificando-se os modos de vibrar da estrutura, a frequência em que a formação de vórtices nas barras verticais

pode excitar a estrutura é de aproximadamente 23,52 Hz, enquanto que o primeiro modo excitável para esse tipo de carregamento cíclico é de cerca de 31,57 Hz.

### 3.2.2 Simulação Fluidodinâmica do escoamento da tomada d'água – Modelo Modificado

De forma semelhante ao realizado no modelo original, foram realizadas simulações fluidodinâmicas do escoamento ao redor dos painéis para a obtenção do campo de pressões do escoamento. Esse campo de pressões é o responsável pela excitação dos perfis em meio à movimentação do fluido adjacente. Os dados do campo de pressões foram então repassados como um dado de entrada para as simulações estruturais, além da obtenção de nova frequência de formação de vórtices. De forma semelhante ao modelo original, não foram observadas diferenças significativas na frequência de formação de vórtice, tal condição ocorre, pois, os perfis utilizados em ambos os modelos de painéis de grades são os mesmos, e dessa forma não será aqui apresentado o resultado.

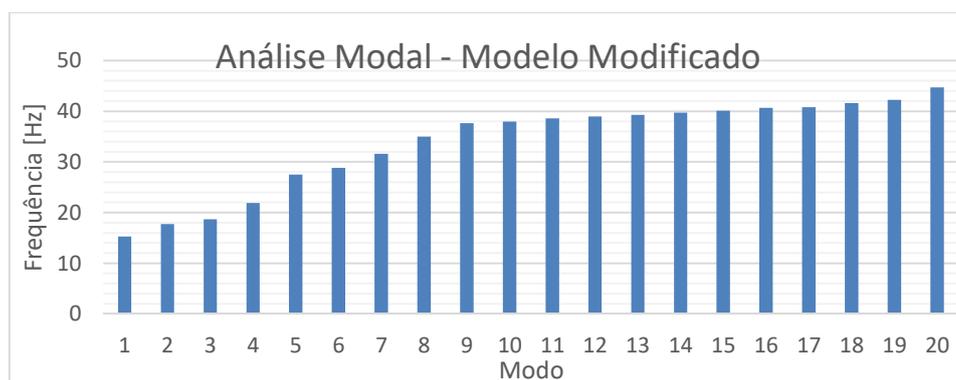


FIGURA 12 – Frequência naturais do painel de grade modificado, considerando as condições de contorno e carregamentos. Fonte: Lactec, 2018.

### 3.2.3 Simulação estrutural – Modelo Modificado

Para o modelo modificado, foram feitas simulações numéricas estruturais, considerando tanto os carregamentos estruturais devido à instalação na estrutura da barragem, como também os carregamentos mecânicos decorrentes do campo de pressões. Na Figura 13 são mostrados mapas de cores referentes às tensões mecânicas da estrutura modificada. O valor máximo obtido, segundo o critério de Von Mises, foi de 12,47 MPa, que está abaixo do valor de 28,7 MPa para vida infinita à fadiga.

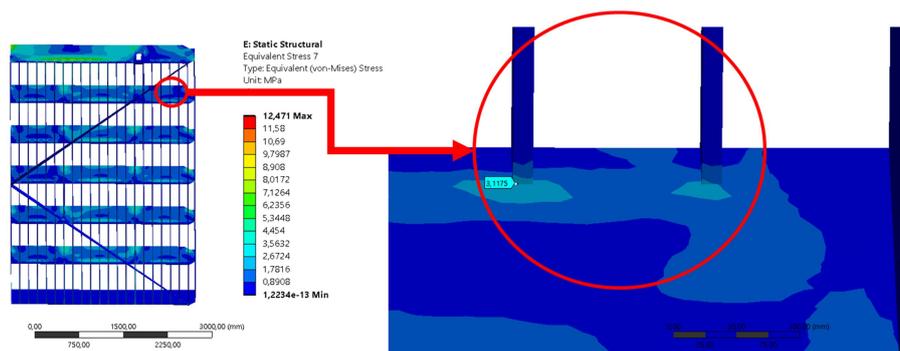


FIGURA 13 – Tensões mecânicas decorrentes do campo de pressões e das condições de carregamento para o modelo original. Fonte: Lactec, 2018.

## 4.0 - CONCLUSÃO

Através das simulações numéricas realizadas para tanto para o modelo original, quanto para o modelo modificado escolhido, pode-se comparar o comportamento mecânico esperado para a estrutura dos painéis, ressaltando os pontos de melhorias verificados. Para ambos os modelos, os perfis utilizados apresentam as mesmas características dimensionais básicas, e dessa forma, espera-se que a formação dos vórtices seja a mesma para ambos os casos. Contudo, a mudança no posicionamento da fixação das peças e da introdução de

elementos de suporte à estrutura, alteraram significativamente o comportamento estrutural mecânico entre os diferentes tipos de painéis de grades considerados.

Através do campo de velocidade esperado para a região de adução da UG-04 da UHE GJR, cujo valor é de cerca de 2,8 m/s, estima-se que a formação de vórtices nos componentes mais críticos – barras verticais – ocorra em uma frequência de aproximadamente 23,52 Hz. Ou seja, em caso de velocidades de escoamento menores, a frequência estimada é proporcional à redução da velocidade. Para o modelo original, estimam-se 4 (quatro) modos de vibrar dentro da faixa de 0 a 23,52 Hz, e que podem ser excitáveis pela formação alternada dos vórtices e gerar o fenômeno de *lock-in*. Por outro lado, o modelo modificado somente apresenta o primeiro modo de vibrar possível de ser excitado pela formação dos vórtices em uma frequência de 31,57 Hz. Isso faz com que para a velocidade de escoamento considerada, não seja esperado o fenômeno de *lock-in* para essa estrutura. A comparação entre os resultados das simulações modais é visualizada na Figura 14. Além da mudança quantitativa nas frequências naturais, também ocorreram mudanças nos quais os modos podem ser excitados.

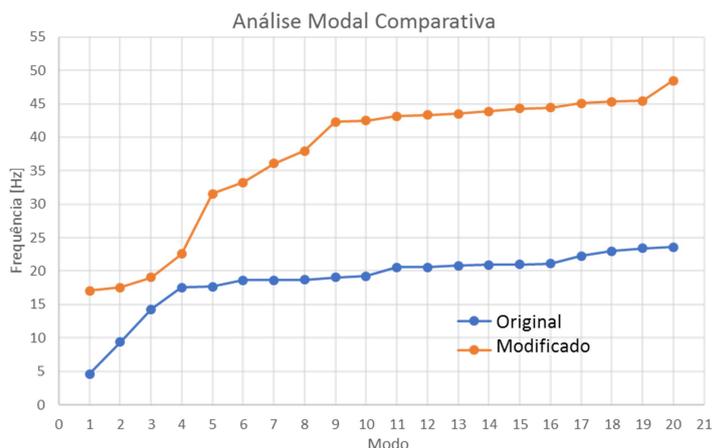


FIGURA 14 – Tensões mecânicas decorrentes do campo de pressões e das condições de carregamento para o modelo original. Fonte: Lactec, 2018.

Além das análises modais, também podem-se comparar os resultados de simulações numéricas estruturais. Nesse caso, o modelo de grade original apresentou, para as condições de carregamento usuais de operação e para o campo de pressão devido ao escoamento d'água, um valor máximo para o campo de tensões de cerca de 33,16 MPa na região da solda entre as barras verticais e os componentes horizontais (bandejas). Tal valor apresenta-se acima da tensão de 28,7 MPa que é esperado para uma vida infinita à fadiga. Já para o modelo de grade modificado, a tensão máxima obtida para as mesmas condições de carregamento de operação usual e campo de pressões do escoamento fluido, foi de 12,47 MPa, valor abaixo da tensão limite esperada para a vida infinita à fadiga.

Dessa forma, conclui-se que o modelo de painel de grade modificado se apresenta apto à operação quando operando nas condições estimadas, pelos resultados obtidos por simulações numéricas para a vazão e velocidade de escoamento previstos. O modelo original apresenta-se suscetível à excitação pelos vórtices gerados pelo escoamento fluido ao redor dos perfis do painel de grade, e também apresenta tensões mecânicas acima do limite para vida infinita a fadiga nas regiões próximas as soldas entre barras verticais e horizontais (bandejas), locais cuja falha vem historicamente sendo observada na operação da UG-04 da UHE GJR, conforme Figura 1.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) EUROPEAN STANDARD, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue, 2005.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodrigo Canestraro Quadros

Graduação em Engenharia Mecânica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2013

Mestrado em Engenharia Mecânica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2018

Experiência em simulações numéricas e fenômenos de transporte, atualmente pesquisador pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec).