



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GGH

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRAULICA - GGH

**ANÁLISE DE FALHAS ESTRUTURAIS EM GRADES DE TOMADA D'ÁGUA,
DIMENSIONADAS A PARTIR DA NR 11213**

**Luciano Fedalto(*)
LACTEC**

**Denis A. L. Kulevicz
A1 Engenharia**

**Paulo Roberto Chiquito
LACTEC**

RESUMO

Problemas de ordem estrutural são corriqueiros em grade de tomada d'água. O surgimento de trincas nas grades após algum tempo de operação são comuns. A origem dessas trincas foi avaliada pela autoexcitação devido à turbulência gerada pelo fluxo passante da água, gerando frequências de vibração que coincidem com frequências naturais, gerando trincas e conseqüentemente, problemas de integridade estrutural. Verificou-se através de ensaios numéricos e experimentais, que o comportamento dinâmico da grade deve ser considerado em projeto. Visto que a norma NBR-11213 "Grade de tomada d'água para instalação hidráulica – Cálculo", que rege os projetos de grades de tomada d'água, avalia suas partes separadamente para o comportamento dinâmico de grades, deixando a de lado estudos dinâmicos abrangendo a grade completa.

PALAVRAS-CHAVE

Hidroelétrica, Grade de Tomada d'água, Vibração, Extensômetria

1.0 - INTRODUÇÃO

Historicamente o problema de trincas em grades de tomadas d'água de usinas hidrelétricas é um fator de custos em manutenções. As origens destas trincas muitas vezes se devem em ao acúmulo de sedimentos e sujeira nas grades (tais como troncos e matéria orgânica), ocasionando a sobrecarga da mesma. No entanto, quando a ocorrência de trincas é recorrente em curtos intervalos de tempo, e mesmo sem o acúmulo de grandes quantidades de sujeira, outro fenômeno é a causa da falha estrutural. A norma NBR-11213 prediz que o dimensionamento das grades suporte uma sobrecarga de sujeira na grade (carga estática) e as barras evitem vibrações devidas a autoexcitação (carga dinâmica ou cíclica). Assim, as grades de tomadas d'água se tornaram cada vez mais esbeltas e leves, como menor quantidade de material utilizado e conseqüente custo de fabricação, além da menor perda de carga. No entanto, este dimensionamento não contempla a dinâmica de toda a estrutura sujeitas ao fluxo e a vibrações, muitas em baixas frequências. Avaliando a morfologia das trincas das grades revela-se a ocorrência de trincas características de fadiga, levando-se a suspeita de vibração das grades.

Por duas vezes uma das seções da grade foram instrumentadas com extensômetros em pontos que primeiramente partiram de uma análise modal prévia e para a segunda instrumentação de novas análises e dos resultados do primeiro ensaio. Diversas faixas de potência foram colocadas no hidrogerador que proporcionaram diferentes tipos de carregamentos na grade. Os dados de deformação medidos informaram as amplitudes e frequências causadas pela vibração da grade, revelando os modos de vibração da estrutura para cada faixa operativa da máquina. Estas

freqüências corresponderam a modos de vibração da estrutura como um todo, não somente componentes da grade, como as barras ou chapas.

Em paralelo a isso se realizou um estudo da análise modal numérica da estrutura de forma a se determinar os modos de vibração da grade e suas freqüências, em especial em baixas freqüências, e simulações numéricas com Ansys e CFX, constataram-se a ocorrência de freqüências de vórtices devido ao escoamento, próximas às que foram medidas nas grades, o que caracterizou uma auto-excitação da grade, ou seja, as freqüências dos vórtices coincidem com algumas freqüências naturais da estrutura como um todo.

Visto que a realização das simulações numéricas tem evoluído, tanto na confiabilidade de resultados como em tempo de processamento, pode-se definir uma nova metodologia de dimensionamento, considerando a estrutura total da grade, melhorando assim a qualidade dos projetos de grades e reduzindo problemas estruturais e custos com manutenções.

2.0 - ENSAIOS

O estudo partiu da hipótese da auto-excitação da grade devido ao fluxo d'água através da estrutura. A auto-excitação de uma estrutura é definida pela vibração de uma estrutura em uma freqüência natural, com excitação proveniente de fluxo de um fluido em torno da estrutura. A vibração é alimentada pela turbulência do fluxo, que é retroalimentada pela vibração, num círculo vicioso semelhante à ressonância.

Uma análise da estrutura acoplada ao fluido é a análise ideal do sistema, porém com elevada complexidade operacional e computacional. Desta forma, optou-se apenas pela análise do comportamento da grade sujeita ao fluxo apenas em termos de resposta em deformação (strain) no sistema fluido-estrutural, obtiveram-se assim as freqüências de maiores amplitudes. Pelo modelamento computacional em separado dos sistemas estrutura e fluido, visando-se verificar os pontos de excitação pelo fluido e os modos de vibração da estrutura.

A vibração da grade em determinados modos vibracionais, de modo semelhante à ressonância, pode vir a gerar grandes deformações cíclicas da estrutura. Essas deformações correspondem a tensões cíclicas, podendo gerar fadiga ao material, iniciando a formação e/ou propagação de trincas. Desta forma, este fenômeno pode ser considerado como possível causa das falhas registradas na grade.

Assim, foram realizadas medições de deformações nas grades monitoradas pela técnica de extensometria, análise modal numérica, análise numérica do comportamento do fluido passando através da grade, e resposta em freqüência na grade fora d'água.

2.1 Ensaio de deformação nas grades

A resposta em termos de deformação da grade pôde ser medida através de extensômetros, instalados em diversos pontos previamente discutidos. Objetivou-se através destas medições determinarem as principais freqüências de resposta da grade, correlacionadas ao modo vibracional da grade e suas ressonâncias. Uma vez que os extensômetros medem a deformação da estrutura – micro-strain ou $\mu\epsilon$ -, foram escolhidos pontos próximos ao engastes onde foram registradas trincas, nas grades recuperadas das trincas. Foram escolhidos os pontos junto à chapa vertical com o perfil horizontal, borda de entrada e saída e junto a barra de reforço horizontal. Foram instalados dois extensômetros mutuamente ortogonais em cada ponto, de modo a se registrar as diferentes modos de deformação da grade (figura 1).

O conjunto completo da grade é composto de 5 grades separadas. Foram realizados dois ensaios em períodos distintos. A primeira instrumentação foi realizada em duas grades diferentes, montadas uma sobre a outra na tomada d'água, nas posições 2 e 3. Foi registrada uma maior incidência de trincas na grade montada na posição 2, sendo, portanto esperado um nível de resposta em termos de amplitude maior para esta grade, quando comparada a grade na posição 3. No segundo ensaio foi instrumentada apenas a grade da posição 2, visto os resultados do primeiro ensaio.

Em ambos os ensaios as medições foram realizadas em diferentes condições operacionais da unidade geradora. As deformações registradas através um sistema de aquisição de sinais HBM MGC plus, a uma taxa de aquisição de 400Hz. Os sinais registrados foram posteriormente analisados através de transformadas de rápidas de Fourier, e análise de amplitude, obtendo-se as principais freqüências de resposta e as respectivas deformações.

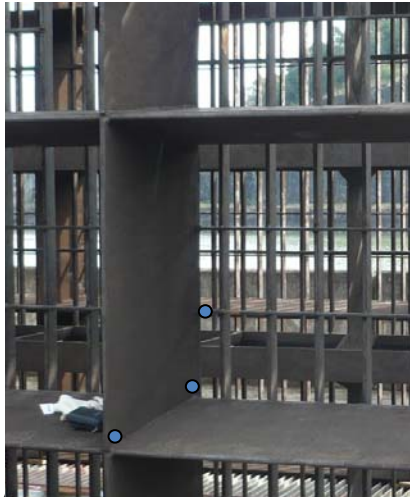


Figura 1 – Alguns pontos de instalação dos extensômetros

No primeiro ensaio foram realizados os carregamentos nas faixas de 80%, 85%, 90%, 95% e 100% da carga nominal da máquina. Foram encontradas as frequências de respostas de 39Hz, 43Hz e 48Hz. a amplitude máxima encontrada foi de $34\mu\epsilon$. Verifica-se também que esta faixa de frequência entre 38Hz e 43Hz ocorre principalmente na grade 2 e na chapa vertical, na condição de flexão. Houve registro desta frequência e deformação nos outros pontos, em especial flexão horizontal da barra horizontal, porém em amplitudes mais baixas.

No segundo ensaio foram realizados os ensaios nas faixas de 20%, 40%, 60%, 80%, 90% e 100% da carga nominal da máquina. Foram encontradas frequências de resposta em faixas semelhantes, porém as amplitudes de deformação próximas a $200\mu\epsilon$ em diversos pontos instrumentados, quando a grade foi excitada em 40% e 60% da carga nominal da máquina. Isso comprova a hipótese da teoria de auto-excitação da grade.

2.2 Modelamento do escoamento através da grade

O fluxo de água através da grade causa turbulências que podem iniciar um processo de vibração auto-excitada. Através das medições realizadas, conseguiu-se restringir a frequência desta excitação à faixa de 39Hz a 48Hz. Verificou-se também um nível de resposta maior na grade 2 comparativamente a grade 3, em discordância com os elevados níveis de danos registrados nas grades.

Foi realizada a simulação numérica computacional do escoamento através do canal da tomada d'água, objetivando-se a avaliação das velocidades dos escoamentos através das grades, de modo a verificar a ideia de maior velocidade na grade 2. Foi utilizado o software ANSYS CFX, através do método de volumes finitos.

Na figura 2 é mostrado o perfil de velocidades do escoamento, podendo-se verificar a maior velocidade do escoamento na grade 3 e metade superior da grade 2, em concordância com os danos nas grades, porém em discordância com as medições de amplitude.

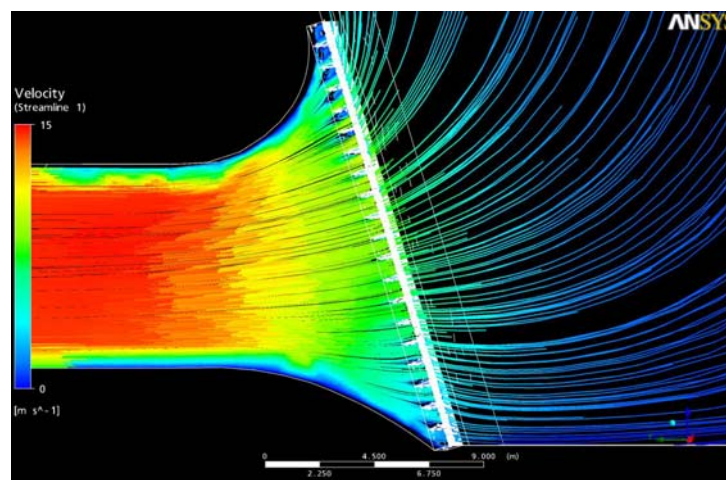


Figura 2 - Fluxo através das grades – perfil de velocidade

A partir desta simulação, pode-se verificar uma variação do ângulo de ataque do fluxo através da grade, sendo que na área de interesse varia de -4° a 10° . Desta forma, uma nova simulação foi realizada, considerando-se a velocidade máxima calculada – 8m/s. Esta simulação foi concentrada em duas “gavetas” da grade, como perfil hidrodinâmico como referência de ângulo de ataque. A simulação contemplou diferentes ângulos de ataque, na faixa verificada anteriormente.

O objetivo desta nova simulação foi verificar a turbulências geradas e as regiões de incidência destas na grade, na faixa de frequências medidas, de 20Hz a 50Hz. O resultado da com ângulo de 0° é apresentado na figura 3.

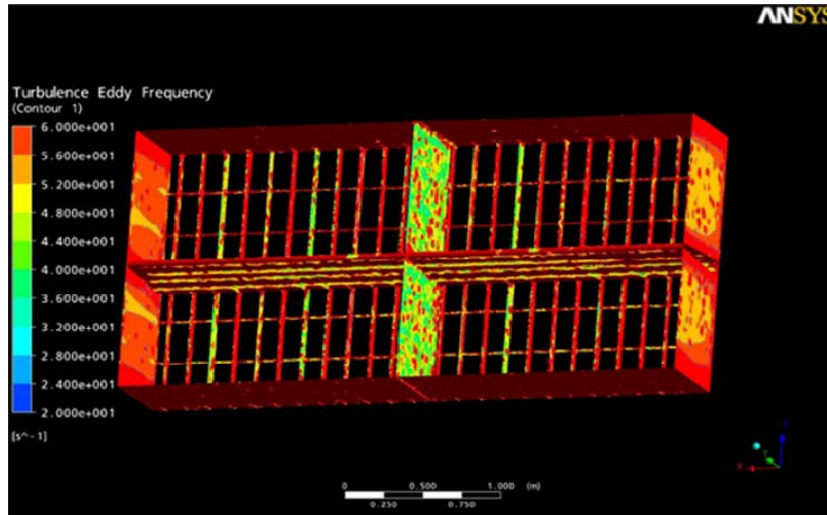


Figura 3 – escoamento através da grade – ângulo de ataque de 0°

Nota-se a incidência de turbulências na faixa das frequências registradas na área da chapa vertical, coincidentemente os componentes com maior deformação.

2.3 Medição de resposta em frequência

As frequências identificadas na condição submersa correspondem a frequências de resposta mais altas fora d'água, devido à ausência de água. Sabe-se empiricamente que a redução de frequência de uma estrutura submersa corresponde aproximadamente a 70% da frequência medida fora d'água.

Portanto, as frequências medidas correspondem a 55Hz, 60Hz e 68Hz na estrutura seca. Medições de funções de respostas em frequência (FRF) na estrutura fora d'água, através de excitação impulsiva, medem as frequências naturais da estrutura – sem identificação da forma de vibração (modo) – podendo-se verificar a coincidência das frequências de resposta medidas com frequências naturais – e, portanto, indicativo de ressonância.

Devido ao tamanho e massa da estrutura, a excitação através de martelo (impulso) somente excita componentes da grade, não sendo esperada a percepção de respostas da grade inteira.

A análise das FRF mostra a presença de frequências na faixa de interesse de 20Hz a 60Hz. No entanto, devido a baixa amplitude registrada, e a repetição das mesmas frequências em outros componentes da grade, estas frequências não pertencem somente ao componente, mas ao comportamento da grade como uma estrutura única. Conclui-se, portanto, que a resposta da grade ao fluxo, ocorre como uma estrutura única e, portanto, com correções a serem realizadas na grade inteira. Exclui-se assim a possibilidade de alteração somente de um componente em termos de resposta à vibração.

2.4 Análise modal

Através da análise modal é possível verificar as frequências naturais de vibração de uma estrutura, bem como forma de vibração, ou modo vibracional, da estrutura excitada em sua frequência natural.

Esta análise objetiva correlacionar às frequências naturais com as frequências de resposta medidas em ensaio, avaliando-se os seus modos e propondo-se alterações da estrutura de forma a não haver mais frequências naturais na faixa de excitação.

A técnica utilizada para a análise modal foi a de elementos finitos, sendo utilizado o software Autodesk Inventor para a modelagem e análise, com ferramenta ANSYS. Devido a dificuldades da simulação de interação fluido-estrutural de uma estrutura submersa, foi considerada a análise da estrutura ao ar livre (vácuo), sendo considerado o valor de 70% das frequências calculadas como a frequência da estrutura submersa. Portanto, a faixa de frequências procuradas nos modos a seco está entre 55Hz e 68Hz.

2.4.1 Modelo da estrutura atual

A estrutura da grade atual, considerando restrições horizontais e transversais nos pontos de apoio lateral e restrições verticais nas chapas superiores e inferiores da grade.

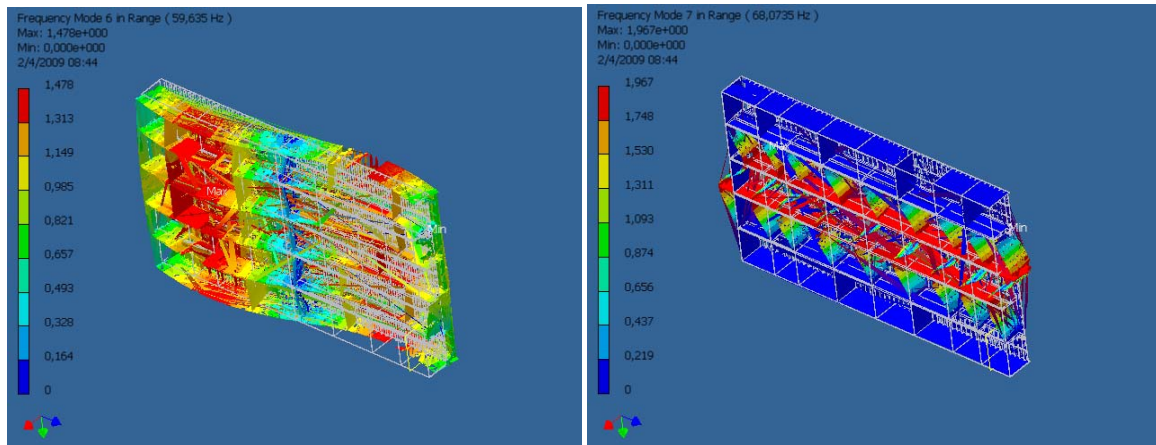


Figura 4 – 6° modo de vibração: 59,6Hz e 7° modo de vibração: 68,1Hz

2.4.2 Modelos propostos

Uma das soluções para o problema estrutural encontrado é a alteração da frequência natural da mesma. Assim, é possível realizar dois tipos de modificações estruturais: redução de massa e aumento de rigidez. Estas modificações causam a elevação da frequência natural da estrutura, sendo que no caso da grade é a melhor alternativa, visto que as frequências encontradas na análise modal estão na faixa superior da faixa de frequências de interesse. A redução de massa da estrutura se torna impossível, uma vez que esta foi dimensionada para suportar as cargas e solicitações da sua função. O aumento da rigidez torna-se a melhor alternativa, com o acréscimo de reforços em pontos específicos, visando a redução do deslocamento do modo a ser alterado.

Alterações nas grades foram propostas e simuladas numericamente com intuito de alterar a rigidez da grade, afastando as frequências naturais da grade das frequências de excitação da passagem do fluido através da grade em alguns modos de vibração específicos, principalmente o 6° modo que é o modo que possivelmente estaria gerando as trincas. Os reforços da estrutura com barras transversais e diagonais se mostram eficazes no aumento de rigidez da grade nas simulações realizadas.

3.0 - CONCLUSÃO

A nesse estudo de caso, a autoexcitação da grade configurou-se como uma das causas da nucleação das trincas, e/ou pela sua propagação, sendo a alteração do projeto da grade uma alternativa para a solução dos problemas de falha atualmente detectadas.

A análise do memorial de cálculo, bem como de medições de FRFs da estrutura, demonstra um correto dimensionamento dos componentes da grade, com base na norma ABNT para dimensionamento de grades de tomadas d'água – não sendo encontrada nenhuma frequência natural dos componentes na faixa de interesse ao ar livre. Mantendo a grade dentro da norma, embora, na prática ela apresente falhas estruturais.

Visto que a norma não prevê explicitamente a análise dinâmica da grade como um todo, uma alteração na norma pode ser interessante. Ressalta-se que atentar para análise da auto-excitação como um ponto de projeto de novas estruturas de grades pode vir a reduzir problemas estruturais futuros e com isso custo de manutenção.

Está sendo concluído o projeto de reforços das grades para futura implementação e posterior análise da melhoria.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. HIBBELER R.C "Resistência dos Matérias" - 5º edição São Paulo - SP - 2004
- [2] ROBERT L. NORTON. "Projeto de maquinas ' Uma abordagem integrada' " - 2º Edição Bookman Companhia Editora. São Paulo S.P - 2004;
- [3] BECKWITH, T.G., MARANGONI, R.D., LIENHARD, J. H., ADDISON-WESLEY Mechanical Measurements, , 1993;
- [4]DOEBELIN E.O, "Measurement Systems: Application and Design" McGraw-Hill, 1990;
- [5]Micro Measurement Guide, Micromesurement, www.measurementsgroup.com;
- [6]"Effective Machinery Measurements Using Dynamic Signal Analyzers", Hewlett-Packard;
- [7] Kulevicz Denis A.L, "Análise, avaliação e recuperação das grades de tomada d'água– Relatório Final", LACTEC, 2009.
- [8] NBR 11213 "Grade de tomada d'água para instalação hidráulica – Cálculo", ABNT, Jan – 2001.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Luciano Fedalto

Nasceu na cidade de Curitiba estado do Paraná em 21 de fevereiro de 1979.

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (2001) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2004) . Atualmente é Pesquisador Pleno do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica. Atuando principalmente nos seguintes temas: Fadiga, elementos finitos, material composto.

Denis Alexandre Lehner Kulevicz

Nasceu na cidade de Curitiba estado do Paraná em 12 de outubro de 1977.

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (2000) . Atualmente é Engenheiro da A1 Engenharia. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica , com ênfase em Mecânica dos Sólidos.

Paulo Roberto Chiquito

Nasceu na cidade de Ponta Grossa estado do Paraná em 11 de dezembro de 1983.

Atualmente é Engenheiro Mecânico, formado e mestrando da UFPR (Universidade Federal do Paraná). Pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em: Análise de Tensões, Projetos em Medições Mecânicas, Ensaios não Destrutivos, Prognóstico de Danos, Análise de Incertezas, Vibração e Acústica e Ensaios de Mecânica Aplicada.