

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE LIMPEZA ANTI-MEXILHÃO PARA A LIMPEZA AUTOMATIZADA DE GRADES

LEANDRO ALCINEI PALADIM BERNARDES(1); FERNANDO MATTAVO DE ALMEIDA(1); EUGENIO CLARET RIBEIRO(2); GIULLIANO BATELOCHI GALLO(2); PEDRO GAYER DE ARAUJO(2); TIAGO DOS SANTOS(3) VOITH HYDRO(1); CTG BRASIL(2); RIO PARANA ENERGIA S.A(3)

RESUMO

No presente artigo é discutido o desenvolvimento de um dispositivo removível, que, instalado em máquinas Limpa-Grades, vem a ser uma solução para a incrustação de Mexilhão-Dourado nas grades das Tomadas D'Água de Usinas Hidrelétricas. O dispositivo considera a geometria de grades existentes da UHE Rosana, com barras verticais e prateleiras horizontais. Para lidar com esta geometria, um arranjo com garras emborrachadas e molas a gás foi dimensionado, permitindo a abertura do dispositivo ao tocar uma viga horizontal e retornar após a sua ultrapassagem. Para garantir seu funcionamento, um ensaio de modelo foi realizado em fábrica concluindo a remoção efetiva dos Mexilhões-Dourados sem provocar danos estruturais.

PALAVRAS-CHAVE: USINAS HIDRELÉTRICAS, MANUTENÇÃO, MEXILHÃO-DOURADO, GRADES DE TOMADA D'ÁGUA, MÁQUINA LIMPA-GRADES

1.0 INTRODUÇÃO

O Mexilhão-Dourado (*Limnoperna fortunei*) é uma espécie originária dos rios da China. Sua ocorrência na América do Sul é atribuída ao seu transporte acidental na água de lastro de navios mercantes. Problemas associados à sua infestação não se restringem somente a Usinas Hidrelétricas. Problemas como entupimento de tubulações e filtros, corrosão de tubulações e danos a bombas são observados mesmo em sua região de origem (1).

Ademais, no setor hidrelétrico, a presença de infestação de Mexilhões Dourados em Grades na Tomada D'água pode provocar perdas de carga adicionais não previstas no equipamento, resultando em menor eficiência da unidade geradora. Ensaio de modelo com diferentes níveis de incrustação mostram um aumento substancial na perda de carga da grade (2).

A UHE Rosana, localizada no rio Paranapanema, é afetada diretamente pela infestação de mexilhões-dourados. A sua tomada d'água conta com uma máquina, acionada por cabos, desenvolvida para a limpeza das grades. No entanto, a limpeza, desobstrução da grade mediante a eliminação da presença de mexilhões, não é possível com o arranjo existente, necessitando períodos manutenção com máquina parada para que a grade obstruída seja removida e limpa a posteriori.

Destaca-se, além disso, que devido a cheias sazonais à montante da UHE Rosana, há o acúmulo de ilhas de vegetação na tomada d'água da usina. Desta maneira, uma das demandas da usina é que a máquina destinada à limpeza de grades também fosse capaz de auxiliar na remoção da vegetação acumulada na superfície da água.

Desta maneira, o presente artigo discute as tecnologias disponíveis para a remoção de mexilhões dourados das grades de tomadas d'água de hidrelétricas e apresenta o projeto e ensaios realizados de um dispositivo desenvolvido, removível, concebido para que uma mesma máquina combine a capacidade de remoção da vegetação da superfície do reservatório e seja apta para lidar com a obstrução advinda da incrustação de mexilhões-dourados, aumentando assim o intervalo entre manutenções que necessitem a parada da máquina.

2.0 MÁQUINA LIMPA-GRADES

A máquina limpa-grades existente na UHE Rosana, mostrada na Figura 1, é acionada por um sistema de cabos, descendo pelo peso próprio do rastelo. Ela é concebida para remoção de detritos presentes na parte frontal da grade. De certa forma, ela é capaz de remover os mexilhões incrustados nessa região, porém é incapaz de remover os mexilhões que se localizam na interna das barras verticais.

Frequentemente, também se observa a obstrução da grade por pedaços de tronco. É comum o travamento do rastelo durante o movimento de descida quando o seu peso próprio não é suficiente para remover ou romper os troncos presos na estrutura da grade.



Figura 1 - Máquina Limpa-Grades Existente

Para atender as demandas da operação e manutenção da UHE Rosana, além do projeto do dispositivo de limpeza anti-mexilhão, foi necessário conceber uma nova máquina, capaz de alcançar a cota da soleira, 32 metros abaixo do piso da tomada d'água e que contasse com um acionamento hidráulico para poder lidar com os troncos presos nas grades da tomada d'água e que pudesse também operar na limpeza da superfície do reservatório. Na Figura 2 podemos observar o modelo tridimensional da máquina projetada, contando com um braço telescópico acionado por um servomotor telescópico de 5 estágios. No braço telescópico é instalado uma garra, com a geometria semelhante ao rastelo já existente e adaptável para a instalação de um dispositivo de limpeza anti-mexilhão, objeto de maior discussão no capítulo seguinte.

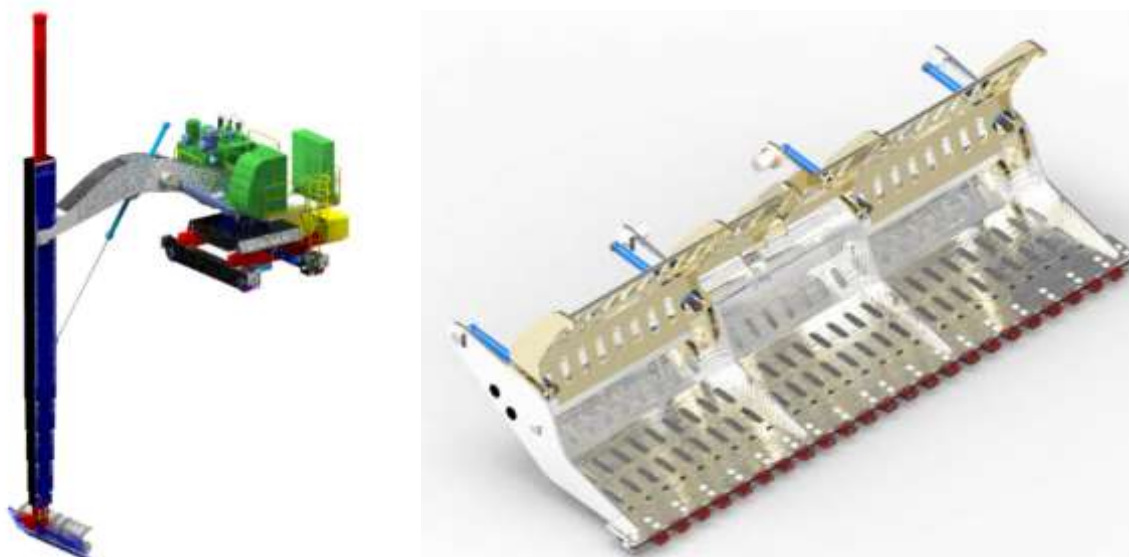


Figura 2 – Nova Máquina Limpa-Grades

3.0 DISPOSITIVO DE LIMPEZA ANTI-MEXILHÃO

3.1 Dispositivo existente

Atualmente diversas tecnologias tentam lidar com a incrustação de mexilhões-dourados em grades de tomada d'água. Dentre elas, destaca-se a utilização de tintas anti-mexilhão como a INTERSLEEK e a Jotun Sealion Repulse e a utilização de sistemas de raspagem conforme os apresentados na Figura 3. O sistema de corte proposto (3) é pensado considerando que a incrustação de mexilhões pode levar ao acúmulo de vegetação na região da grade, de modo a travar sistemas tradicionais de raspagem. Todavia problemas como resistência mecânica do sistema de pintura empregado (soft coating), custo e durabilidade destas, esforço excessivos do dispositivo sobre a grade e limpeza ineficiente entre os vãos verticais, tem sido indicado pelos departamentos de operação e manutenção como pontos ainda deficientes na solução deste problema técnico.



Figura 3 – Dispositivos Existentes para a Remoção de Mexilhões Dourados

Na tomada d'água da UHE Rosana, há dois dispositivos que são acoplados à máquina Limpa-Grades existente. Na Figura 4 observa-se tanto o dispositivo responsável pela raspagem das grades quanto o dispositivo utilizado para a remoção de toras que flutuam na superfície do reservatório.

O dispositivo desce guiado pela grade e com a garra aberta até atingir a cota da soleira da máquina. Após atingir este nível, a garra fecha e permanece nesta posição durante todo o movimento de subida. Destaca-se que o dispositivo enfrenta diversos problemas relacionados ao seu travamento principalmente por conta de galhos que se prendem a estrutura da grade dificultando assim o processo de descida. Ademais, a limpeza não atinge um grau satisfatório demandando tempos de máquina parada para que se efetue a retirada e limpeza das grades obstruídas.

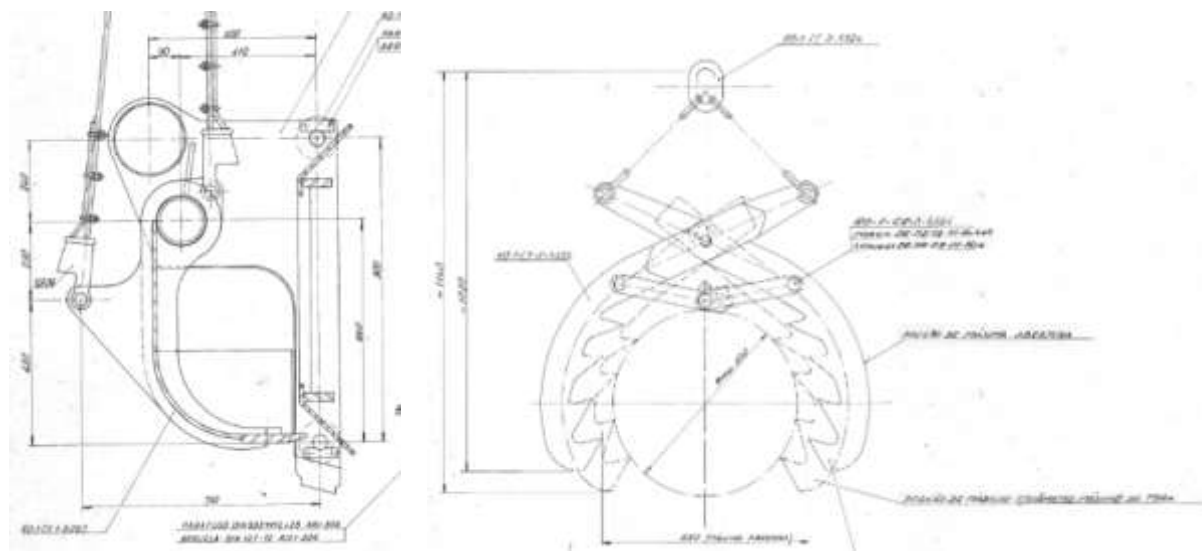


Figura 4 - Dispositivo de limpeza de grades existente na UHE Rosana

3.2 Dispositivo desenvolvido

A Figura 5 mostra o dispositivo de limpeza desenvolvido para a remoção de mexilhão-dourado incrustado nas grades da UHE Rosana. O dispositivo consiste em garras de elastômero montadas em um dispositivo acoplado a garra-rastelo da máquina maior, que executará outros serviços/operações relacionados à manutenção da tomada d'água.

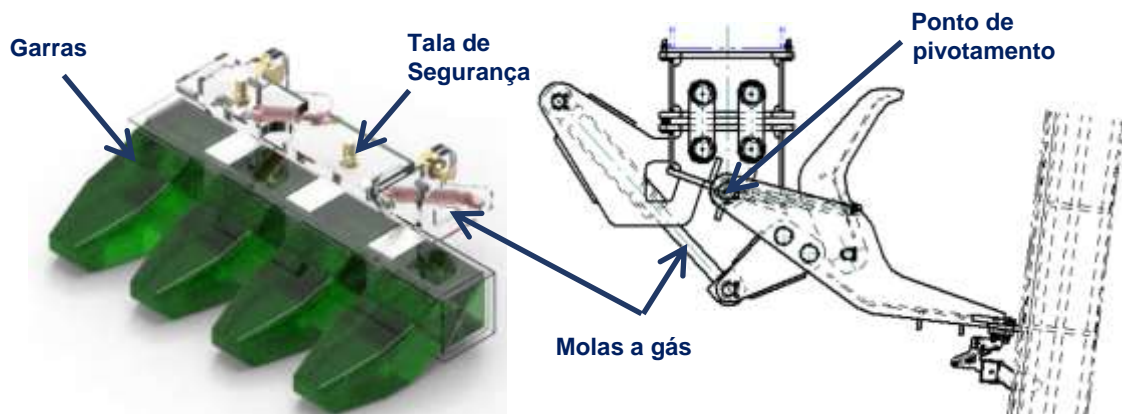


Figura 5 - Arranjo do Dispositivo para Limpeza Anti-Mexilhão

As garras em elastômero são projetadas para permitir seu posicionamento no vão entre as barras verticais das grades. A sua disposição pode ser observada na Figura 6. A folga existente é dimensionada de modo a evitar colisões devido às tolerâncias de fabricação de ambos os componentes, mas ao mesmo tempo garantir que a limpeza seja realizada de maneira eficaz.

As garras de limpeza são montadas em dispositivo que pode ser manuseado facilmente por dois operadores, permitindo a substituição das mesmas quando verificado o desgaste natural devido a operação. Esta estrutura é conectada à máquina através de uma articulação e de um conjunto de molas a gás. Essas molas são dimensionadas para que o dispositivo seja rígido o suficiente para remover os mexilhões, mas ao mesmo tempo que apresente a capacidade bascular durante a passagem do mecanismo pelas prateleiras (vigas horizontais) das grades.



Figura 6 - Dispositivo utilizado para ensaio de modelo

3.3 Modelagem física do dispositivo desenvolvido

A mecânica do dispositivo de limpeza anti-mexilhão consiste em um mecanismo combinando alavancas com mola a gás que permite a rotação da garra em torno de um ponto de pivotamento e seu posterior retorno após o dispositivo ultrapassar a viga horizontal da grade. A premissa de seu funcionamento considera a grade com rigidez muito superior aos mexilhões dourados, de maneira que o dispositivo seja rígido o suficiente para a sua remoção sem que a mola a gás abra, porém flexível o suficiente para a ultrapassagem das prateleiras sem causar dano estrutural às grades existentes.

A Figura 7 apresenta as forças envolvidas e as dimensões principais para o cálculo do dispositivo. Através da disposição geométrica, é possível determinar as coordenadas do ponto de pivotamento do mecanismo, do ponto inicial e final da mola a gás e dos pontos de contato entre a garra e a grade. Com as coordenadas da mola a gás podemos determinar o comprimento da mola em função do ângulo de rotação do dispositivo. E a partir da igualdade entre o momento exercido pela mola a gás em relação ao ponto de pivotamento e o momento exercido pela reação da grade, determinamos a força produzida pelo conjunto que é representado pela seguinte equação:

$$F_{G,TOT} = n_K \cdot k \cdot \Delta L_K \cdot \frac{[x_0^k \sin(\theta_k) - z_0^k \cos(\theta_k)] \cdot \sqrt{1 + \mu^2}}{[\cos(\alpha) + \mu \sin(\alpha)] \cdot B - [\sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha)] \cdot z_{G,c}} \quad (1)$$

Onde:

n_K	Número de molas	μ	Coefficiente de atrito da garra com a grade
k	Rigidez de cada mola a gás	α	Ângulo entre superfície da garra e a direção horizontal
ΔL_K	Variação de comprimento da mola	B	Distância horizontal entre ponto de pivotamento da garra e ponto de contato com a grade
(x_0^k, z_0^k)	Coordenada inicial da mola a gás	$z_{G,c}$	Distância vertical entre ponto de pivotamento da garra e ponto de contato com a grade
θ_k	Ângulo entre a mola a gás e a horizontal		

O gráfico abaixo mostra os resultados de força vertical exercida em função do ângulo de rotação do dispositivo para diversos coeficientes de atrito. Nota-se que a utilização de teflon na superfície da garra diminui a força máxima exercida em torno de 20%. Isso facilita a abertura da garra durante o contato entre sua superfície e as prateleiras da grade.

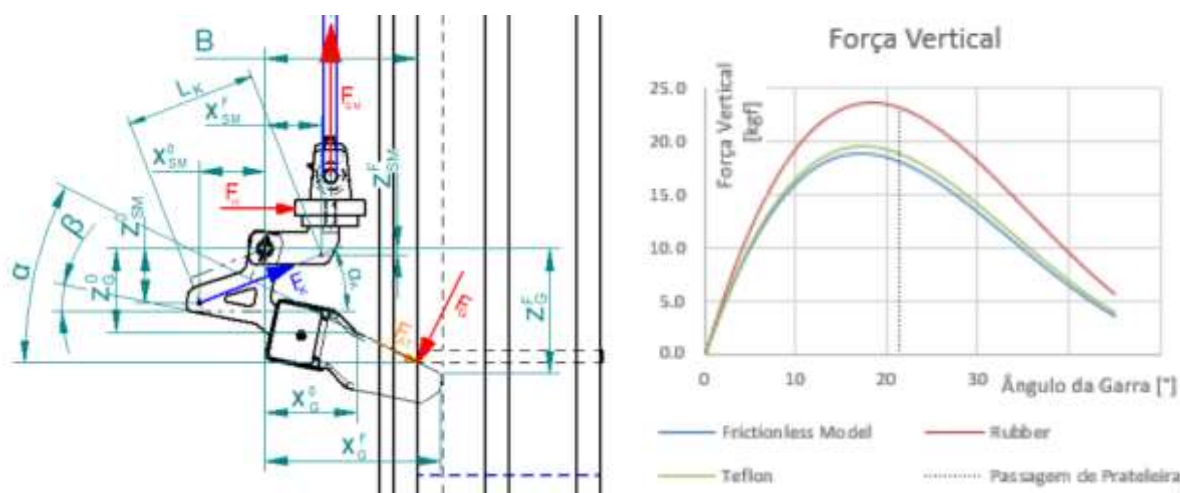


Figura 7 - Modelagem Física do Dispositivo de Limpeza de Grades Anti-Mexilhão

4.0 ENSAIO DE MODELO DO DISPOSITIVO DE LIMPEZA

Para investigar a funcionalidade/exequibilidade do dispositivo projetado, um ensaio em fábrica contando com seção típica da grade da Tomada D'água da UHE Rosana em escala real, foi realizado. Como simulacro da condição de incrustação dos mexilhões-dourados, um composto de argila expandida com cola sintética, mostrado na Figura 8, foi utilizado e para garantir que o conjunto apresentasse a resistência adequada, a cola foi aplicada cerca de 18 horas antes da realização dos ensaios. Esse composto foi preparado sobre placas metálicas e essas placas foram soldadas à estrutura, de modo a permitir sua rápida substituição a cada novo ensaio executado. Foram testadas quatro variações para o material elastômero nos ensaios: As borrachas NBR60 e 90 com e sem Teflon em sua superfície.



Figura 8 - Aglomerado de argila expandida com cola sintética

A Figura 9 mostra a sequência realizada em cada ensaio. O dispositivo é posicionado abaixo da prateleira horizontal. Após isso um servomotor, no papel de garra-rastelo, acoplado ao dispositivo, é acionado iniciando o movimento de subida do dispositivo tal qual como previsto no projeto executivo. As garras, graças ao mecanismo articulado, puderam ultrapassar a viga horizontal da grade e terminar seu movimento de subida repetindo o ciclo ao encostar na próxima viga acima. Durante o percurso, as garras entram em contato com o composto que simula a incrustação de mexilhões-dourados. Desta maneira, foi possível verificar na prática a capacidade do mecanismo de lidar com o obstáculo geométrico da grade além de executar a operação de limpeza dos vãos verticais da grade. Importante notar que exatamente entre estes vão que a colônia de mexilhões se instalaram e promovem preponderantemente a obstrução da grade à vazão de água que deve ser turbinada gerando energia elétrica.



Figura 9 - Ensaio Realizado em Fábrica

Além da inspeção visual do resultado da limpeza dos mexilhões, tendo em vista a condição de contorno de não adicionar grandes esforços (não previstos no projeto original) a grade existente na Tomada D'água, foram instalados extensômetros na grade, conforme Figura, bem como avaliada a pressão na câmara inferior do servomotor. Para definição do posicionamento dos extensômetros, foi realizada uma análise através do Método dos Elementos Finitos, para determinação dos pontos de maior tensão. Resultado são mostrados nas seções seguintes deste trabalho.

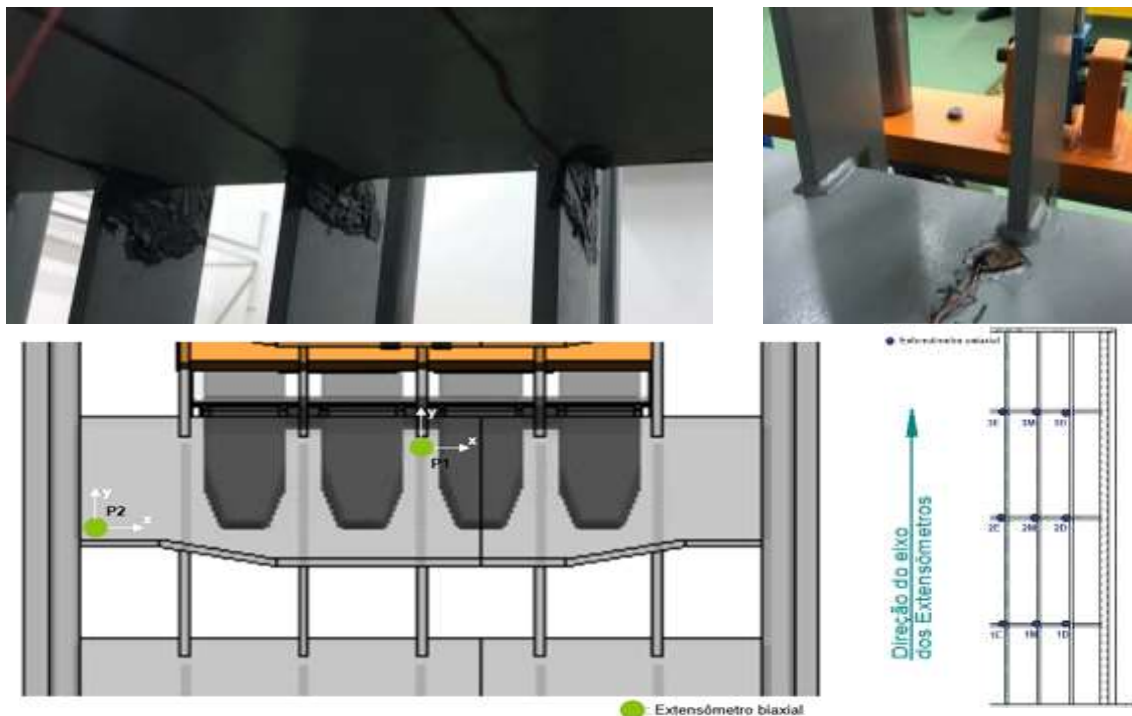


Figura 10 – Extensômetros instalados no protótipo de grade

4.1 Resultado da inspeção visual

Na Figura 11 podemos observar o resultado de uma passagem do dispositivo de limpeza através do composto de argila expandida e cola sintética. As imagens superiores mostram o conjunto antes da passagem do dispositivo e as imagens inferiores após a passagem.

Para todos os materiais utilizados notamos o sucesso da ultrapassagem da prateleira horizontal, como previsto em projeto, demonstrando assim a capacidade do dispositivo de lidar com a geometria das grades da tomada d'água.

Todavia quanto a remoção do aglomerado, foi notada a remoção parcial dos detritos, sobretudo desprendimento na região de contato com a garra. Houve a permanência de argila expandida na região próxima as barras verticais da grade. Porém, foi notado o enfraquecimento da ligação entre as esferas de argila, comportamento este em concordância com o verificado na realidade na colônia existente, isto é, maior adesão do mexilhão ao metal, do que a adesão mexilhão sobre mexilhão quando a colônia cresce. Em discussões com a engenharia de operação e manutenção da CTG, que possui experiência na limpeza destas grades, e testemunhou os ensaios, existiu o consenso que uma segunda passagem do dispositivo permitiria a limpeza completa das grades.

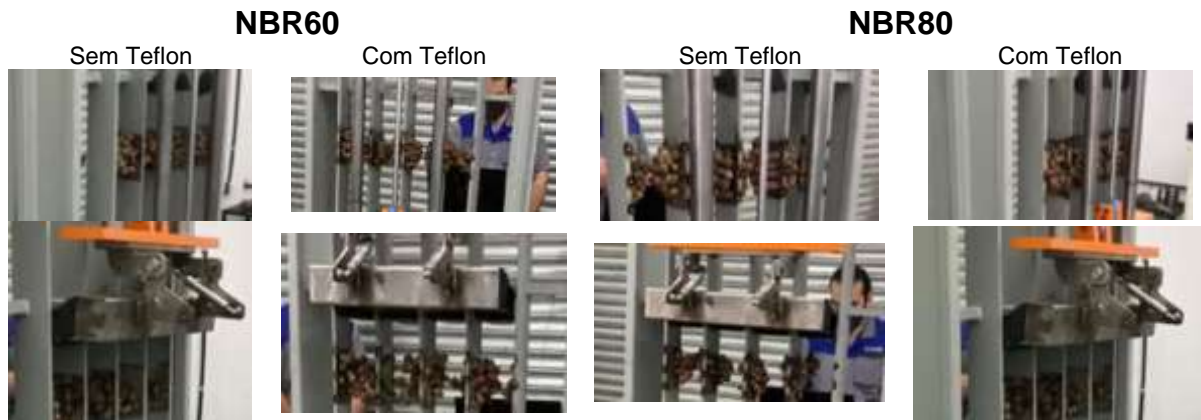


Figura 11 - Resultado da limpeza após a realização dos ensaios

4.2 Resultado das medições

Tabela 1 - Tensões medidas na grade durante o ensaio de modelo

Parâmetro	NBR60		NBR80		Unidade
	Sem Teflon	Com Teflon	Sem Teflon	Com Teflon	
Tensão em P1	2.3	1.9	2.1	2.0	MPa
Tensão em P2	5.96	5.49	8.25	7.40	MPa

(*) ver figura 9 para localização de P1 e P2

A tabela acima mostra os resultados de tensão medidas via extensômetros na grade durante o ensaio em fábrica. O maior resultado de tensão foi encontrado durante a passagem do dispositivo pelas prateleiras. Isso acontece uma vez que é onde a mola a gás apresenta a maior abertura e consequentemente a maior força de reação. Para a configuração geométrica ensaiada, a maior tensão encontrada foi menor que 10 MPa, o que seria um incremento de tensão seguro para qualquer aço de aplicação industrial considerando que o processo planejado de limpeza se configura como uma quantidade baixa de ciclos a ser adicionada a vida útil do equipamento em questão.

Além disso, foi observado que a utilização de NBR60 proporciona menores níveis de tensões nas prateleiras. Especula-se que a menor tensão de contato proporcionada por um material com menor módulo de elasticidade reduza a tensão de contato entre as superfícies. A aplicação de Teflon reduz ligeiramente as tensões na prateleira sendo este efeito esperado de acordo com a modelagem física previamente apresentada.

A CTG participou em conjunto com a Voith dos ensaios realizados em fábrica. A experiência de seu pessoal permitiu aferir que a força exercida pelo dispositivo durante o processo de limpeza é compatível com a demandada para a remoção da colônia de mexilhões. Desta maneira, aferiu-se empiricamente que o dispositivo projetado é adequado à limpeza das grades das tomadas d'água.

5.0 CONCLUSÃO

Buscando aliar a experiência do time de O&M da CTG UHE Rosana e a experiência na elaboração de projetos destes equipamentos pela Voith Hidro conduziu-se o desenho e ensaio de modelo em escala real para verificar que o conceito empregado para a construção de um novo dispositivo de limpeza anti-mexilhão que conseguisse lidar com os obstáculos impostos pela geometria da grade da tomada d'água da UHE Rosana, além de remover o aglomerado de argila expandida colado junto a estrutura da grade, simulacro de uma colônia de mexilhões dourados, mostrou a eficácia do projeto proposto.

Adicionalmente, a modelagem física do dispositivo permitiu correlacionar a força exercida pelo dispositivo com a sua geometria e a rigidez das molas a gás selecionadas para regular a abertura e fechamento do mecanismo do dispositivo de limpeza anti-mexilhões. O ensaio permitiu realizar um ajuste fino entre a força necessária para a remoção dos mexilhões e o carregamento admissível suportado pela estrutura. Também nos permitiu, por meio de observação, melhorar o perfil geométrico das garras limpantes e selecionar o melhor elastômero com dureza adequada para a operação.

As próximas etapas deste programa preveem a construção do protótipo e operação do mesmo na UHE Rosana, buscando desta maneira, um impacto positivo para a manutenção da usina, aumentando o intervalo de paradas para a remoção do mexilhão dourado incrustado na estrutura, hoje anual, para um novo intervalo da ordem de 5 anos, além de permitir um controle mais efetivo das condições de obstrução/entupimento das grades da tomada d'água, gerando como resultado positivo um incremento na geração líquida de energia elétrica que antes seria desperdiçado como perda de carga na grade da unidade geradora.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DINIZ, D. M. Verificação da Influência da infestação do mexilhão dourado nas grades de tomadas 'água. Belo Horizonte.
- (2) OLIVEIRA, M.D. Ocorrência e Impactos do Mexilhão Dourado (*Limnoperna fortunei*, Dunker 1857) no Pantanal Mato-Grossense. Circular Técnica 38 (Embrapa), 1-6.
- (3) CARDOSO, F.D. Estudo Conceitual e projeto do raspador do Sistema Limpa-Grades da Usina Hidrelétrica de Jupia. São Carlos.

DADOS BIOGRÁFICOS



Vinte e dois anos de vida profissional na Voith Hydro dedicados ao desenvolvimento de produtos de energia hidrelétrica desde a sua concepção e suporte técnico durante as fases de negociação/avaliação da viabilidade, projeto, fabricação, montagem e comissionamento em campo. Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da USP com mestrado em Dinâmica dos Fluidos pela mesma instituição. MBA em Finanças pela UFSCAR. Participação em mais de 30 projetos ao longo desse período. Projetos nacionais e internacionais (América Latina, USA, Europa, China e Índia).

(2) FERNANDO MATTAVO DE ALMEIDA Graduado em Engenharia Naval e Oceânica pela USP e Mestre em Ciências pela USP. Atua como Engenheiro na Voith Hydro Ltda desde 2015 e possui experiência em Cálculo Estrutural e Projeto Mecânico.

(3) EUGENIO CLARET RIBEIRO Engenheiro mecânico formado pela UNIFEI, com vários anos de experiência em manutenção de usinas hidrelétrica, iniciando na CESP, posteriormente DUKE ENERGY e atualmente na CTG Brasil.

(4) GIULLIANO BATELOCHI GALLO Graduado em Engenharia Mecânica e Pós Graduado (Mestrado) em Projetos e Materiais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP – Guaratinguetá) e MBA em Gestão Administrativa pela FGV. Atualmente atua na CTG Brasil como Gerente de O&M das UHEs Jupiá, Salto e Garibaldi, possuindo mais de 12 anos de experiência no segmento de Geração de Energia.

(5) PEDRO GAYER DE ARAUJO Engenheiro eletricitista graduado pela UFF - Universidade Federal Fluminense e com formação em Gestão de Projetos pela FIA - Fundação Instituto de Administração, atua com o programa de Pesquisa & Desenvolvimento regulado pela ANEEL desde 2016. Atualmente trabalha na área de P&D I da CTG Brasil, multinacional que opera no Brasil focado 100% em geração de energia limpa.

(6) TIAGO DOS SANTOS Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade Politécnica de Jundiaí - FPJ, Especializado em Método dos Elementos Finitos (MEF) pela ESSS. Já atuou como Engenheiro Projetista em Turbinas e Gerente de Projetos em grandes fornecedores de equipamentos para Usinas Hidrelétricas. Atualmente, atua como Coordenador de Engenharia Mecânica na CTG Brasil nas atividades de manutenção e modernização das 14 UHEs da companhia.