



Diagnóstico da vibração excessiva da comporta vagão da UHE Batalha durante o enchimento do conduto forçado através de CFD.

Gilberto Antunes Rennó Junior

grenno@furnas.com.br

Furnas Centrais Elétricas

Rua Real Grandeza 219 Bloco B Sala 502, 22281-900, Botafogo, Rio de Janeiro, Brasil.

***Abstract.** Durante os testes de comissionamento da UHE Batalha, verificou-se que durante a fase final do enchimento por "cracking" do conduto forçado, a comporta vagão da tomada d'água apresentava vibração excessiva. Esta oscilação exagerada causa problemas operacionais, além de trazer riscos aos equipamentos envolvidos na operação.*

Uma das possíveis causas encontradas na literatura para a vibração da comporta é a geometria na região em que há escoamento. Para comprovar a influência da geometria dos painéis no escoamento, realizou-se uma simulação numérica transiente utilizando fluidodinâmica computacional (CFD). O estudo demonstrou que há forças oscilantes, de amplitude de até cinco toneladas, na transição entre o instante que há superfície livre a jusante da comporta e o momento em que ela se encontra totalmente afogada.

Uma segunda simulação CFD foi realizada, com a geometria de borda inferior da comporta mais adequada. Apesar de não eliminar completamente a vibração durante o enchimento, a simulação numérica indica que a modificação proposta reduz em aproximadamente 55% o pico da amplitude da vibração e em média 63% as forças oscilantes.

Keywords: comporta, vibração, CFD, cracking

1 INTRODUÇÃO

Verifica-se que a comporta vagão da tomada d'água de UHE Batalha apresenta problemas de vibração excessiva no final do enchimento do conduto, na operação conhecida como “cracking”. Esta oscilação exagerada causa problemas operacionais, além de trazer riscos aos equipamentos envolvidos na operação. Inicialmente verificou-se se os problemas de vibração ocorriam por falta de aeração. Por este motivo, inicialmente serão apresentados os cálculos de aeração mínima necessária e, em seguida, será apresentado o diagnóstico do problema utilizando a ferramenta CFD.

2 AERAÇÃO

A Tabela 1 mostra as áreas disponíveis nos poços de aeração da tomada d'água da UHE Batalha.

Tabela 1 – Áreas dos poços de aeração disponíveis nos túneis da tomada d'água

Local	Áreas de aeração disponível	
	Margem direita	Margem Esquerda
Poço de Montante	$1,4 \times 5,3 = 7,42 \text{ m}^2$	$1,4 \times 5,3 = 7,42 \text{ m}^2$
Poço de Jusante	$1,5 \times 4,0 = 6,00 \text{ m}^2$	$1,5 \times 4,0 = 6,00 \text{ m}^2$
Total	$13,42 \text{ m}^2$	$13,42 \text{ m}^2$

2.1 Área de aeração mínima necessária por túnel

De acordo com (Sarkaria et al, 1959), o diâmetro do tubo de aeração mínimo necessário é dada pela Equação 1.

$$d = 0,291 \left(\frac{P^2 L}{H_n^2} \right)^{0,273} \quad (1)$$

Sendo:

P - a potência da máquina – 26 (MW)

L – o comprimento do poço de ventilação – 26 (m)

H_n – a queda líquida nominal da turbina – 36,90 (m.c.a)

Portanto, o diâmetro do tubo de ventilação necessário neste caso é:

$$d = 0,291 \left(\frac{26^2 \times 26}{36,9^2} \right)^{0,273} = 0,585 \text{ m} \quad (2)$$

2.2 Área mínima necessária utilizando vários critérios do coeficiente β e o número de Froude.

2.2.1 Número de Froude do escoamento

Inicialmente, é necessário avaliar o número de Froude do escoamento, dado pela Equação 3.

$$F_c = \sqrt{\frac{2H}{h_c}} = \sqrt{\frac{25,5 \times 2}{2,5}} = 4,517 \quad (3)$$

Sendo:

$H = 25,50$ m – Altura de queda no orifício de descarga

$h_c = 2,50$ m – Altura do orifício de descarga a soleira

2.3 Vazão de água pela abertura entre os painéis da comporta

A vazão do escoamento livre que passa pela abertura dos painéis da comporta na fase inicial do enchimento é calculada pela Equação 4.

$$Q = C_d A \sqrt{2yH} = \frac{1}{\sqrt{1+0,5}} 0,24 \sqrt{2 \times 9,81 \times 25,5} = 4,40 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Sendo:

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{1+K}} = \text{Coeficiente de descarga}$$

$$A = 4,00 \times 0,06 = 0,24 \text{ m}^2$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$H = 25,5 \text{ m}$$

$$K = 0,5 - \text{Coeficiente de perda de carga localizada}^1 [\text{Westaway, 1981}]$$

2.4 Demanda de ar pelo critério de Campbell and Guyton

Este critério estabelece que a relação entre as vazões de ar e água seja dada pela Equação 5:

$$\beta = 0,04(F_c - 1)^{0,85} = 0,04(4,517 - 1)^{0,85} = 0,16 \quad (5)$$

Portanto:

$$Q_{ar} = \beta Q_{\text{água}} = 0,16 \times 4,40 = 0,704 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.4 Demanda de ar pelo critério adotado pelo US Army Corps of Engineers

Este critério estabelece que a relação entre as vazões de ar e água seja dada pela Equação 6:

$$\beta = 0,03(F_c - 1)^{1,06} = 0,03(4,517 - 1)^{1,06} = 0,123 \quad (6)$$

Portanto:

$$Q_{Ar} = \beta Q_{\text{Água}} = 0,123 \times 4,40 = 0,541 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.5 Demanda de ar pelo critério Levin

Este critério estabelece que a relação entre as vazões de ar e água seja dada pela Equação 7:

$$\beta = K(F_c - 1) \begin{cases} 0,040(4,517 - 1) = 0,141 \\ 0,025(4,517 - 1) = 0,088 \end{cases} \quad (7)$$

O valor de K varia de 0,025 a 0,04, dependendo da geometria da seção. Para o caso mais crítico (K=0,04), encontra-se:

$$Q_{ar} = \beta Q_{\text{água}} = 0,141 \times 4,40 = 0,620 \text{ m}^3/\text{s}$$

A Tabela 2 apresenta o resumo da demanda de ar conforme os vários critérios apresentados.

Tabela 2 – Resumo da demanda de ar

Critério	Área da seção mínima necessária por túnel	Método Fator “β”	
		β	$Q_{ar} = \text{m}^3/\text{s}$
Sarkaria et al, 1959	0,269 m ²	-	
US Army Corps of Engineers, 1964	-	0,123	0,541
Levin, 1965	-	0,141	0,620
Campbell and Guyton, 1953	-	0,160	0,704

2.6 Distribuição de vazões pelos poços de ventilação

Pelo exposto na Tabela 2, verifica-se que a área da seção de aeração mínima necessária pelo critério de (Sarkaria et al, 1959) é de 0,269 m². Na tomada d’água de UHE Batalha existem dois poços de aeração: um poço da comporta com área de 7,42 m², e outro a jusante, de 6,00 m² de área, totalizando 13,42 m², ou seja, aproximadamente 50 vezes maior do que o mínimo necessário conforme indicado na Tabela 2.

2.7 Vazão de ar adotada

Os outros critérios indicados na Tabela 2 indicam vazões de ar mínima necessária em vez de área mínima necessária conforme o critério de (Sarkaria e al, 1959).

Assim, prezando pela segurança, será adotado o maior valor de vazão de ar necessária, ou seja 0,704 m³/s, correspondente a β = 0,16.

2.8 Distribuição de vazões

Será assumida, arbitrariamente, a distribuição de vazões apresentada na Figura 1. Além disso, será considerado que o ar é incompressível, uma vez que as perdas de carga são pequenas e, por isto, as pressões de ar desviam pouco da pressão atmosférica. Isso significa que $1\text{ m}^3/\text{s}$ de ar = $1\text{ m}^3/\text{s}$ de água.

Deste modo, a vazão de ar Q''_{ar} será:

$$Q_{\text{ar}}'' = (1 + \beta)Q_{\text{água}} = (1 + 1,16)4,40 = 5,104\text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

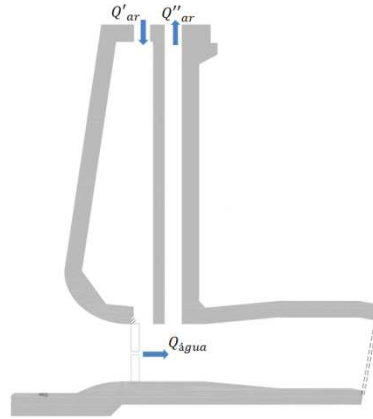


Figura 1 – Distribuição de vazões de ar pelos poços de aeração

De modo conservador, considera-se que esta vazão flui apenas através do túnel de jusante ($A=6,00\text{ m}^2$) para o exterior. Este túnel é o de menor área e de maior vazão, portanto, o de maior velocidade, logo o de maior perda de carga.

2.9 Perdas de carga no túnel de jusante

Para uma vazão de $5,104\text{ m}^3/\text{s}$ e área da seção de $6,00\text{ m}^2$, se obtêm uma velocidade de ar no poço de aeração de $0,851\text{ m/s}$.

O diâmetro equivalente da seção do túnel é dado por:

$$R_H = \frac{A}{p} = \frac{4,00 \times 1,50}{2[4,00 + 1,50]} = 0,545\text{ m} \quad (9)$$

$$D_e = 4R_H = 4 \times 0,545 = 2,182\text{ m} \quad (10)$$

O número de Reynolds do escoamento é dado por:

$$Re = \frac{VD_e}{\nu} = \frac{0,851 \times 2,182}{1,60 \times 10^{-5}} = 1,8 \times 10^5 \quad (11)$$

Sendo:

$$\nu = 1,60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} @ 30^\circ\text{C}$$

Portanto, o escoamento é turbulento.

O fator de atrito, f , é função da rugosidade do material e do diâmetro hidráulico.

$$\frac{\varepsilon}{D_e} = \frac{3 \times 10^{-3}}{2,182} = 1,4 \times 10^{-3} \quad (12)$$

Sendo:

$$\varepsilon = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Logo, $f \sim 0,016$.

A perda de carga por atrito na superfície do poço será:

$$h_t = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0,016 \frac{26,0}{2,182} \frac{0,851^2}{2 \times 9,81} = 0,00011 \text{ m Ar} \quad (13)$$

A Perda de carga na grelha da saída da EL. 804,00, considerando 80% de obstrução será:

$$A = 0,80 \times 6,0 = 4,80 \text{ m} \quad (14)$$

$$V = \frac{Q_{ar}}{A} = \frac{5,104}{4,80} = 1,063 \text{ m/s}$$

$$K = 1,5$$

$$h_t = K \frac{V^2}{2g} = 1,5 \frac{1,063^2}{2 \times 9,81} = 0,08644 \text{ m Ar}$$

A perda de carga na entrada do poço, na EL. 778,00 é:

$$h_t = K \frac{V^2}{2y} = 0,5 \frac{0,851^2}{2 \times 9,81} = 0,01846 \text{ m Ar} \quad (15)$$

A Tabela 3 mostra o resumo das perdas de carga e a perda de carga total para o esquema de fluxo de ar indicado na Figura 1.

Tabela 3 – Resumo das perdas de carga

Atrito de superfície no poço de aeração	0,00011 m Ar
Atrito na grelha de saída	0,08844 m Ar
Atrito na entrada do poço de aeração	0,01846 m Ar
Total	0,10701 m Ar

Logo, a perda da carga total para a vazão de ar de $5,104 \text{ m}^3/\text{s}$ escoando-se pelo poço de jusante é $0,10701 \text{ m ar} = 13,8 \times 10^{-5}$ metros de coluna d'água e, portanto, desprezível.

Conclui-se que a área dos dois poços de ventilação totalizam $13,40 \text{ m}^2$, o que é dezenas de vezes maior do que o especificado pelo critério de (Sarkaria et Al, 1959). A velocidade média do ar é de $0,43 \text{ m/s}$, sendo que o recomendado (US Army Corps of Engineers, 1964) é de no máximo 45 m/s .

Dado o exposto, conclui-se que a aeração fornecida pela estrutura da tomada d'água é suficiente para a operação de enchimento do conduto forçado e, portanto, esta não é a causa para a vibração excessiva da comporta.

3 TEORIA SOBRE VIBRAÇÕES DE COMPORTAS

Após concluir que a aeração nas comportas é adequada, estudou-se na literatura as possíveis causas de vibrações induzidas pelo escoamento em comportas hidráulicas. Verificou-se que, na existência de escoamento por debaixo da comporta, a parte inferior do equipamento, incluindo o paramento e a vedação inferior, esta exposta a forças hidrodinâmicas que podem excitar vibrações nas direções verticais e horizontais, sendo o principal parâmetro responsável pela geração das forças hidrodinâmicas a geometria da borda inferior da comporta. Ao contrário do tradicional, a operação de cracking da comporta vagão da UHE Batalha ocorre através de uma abertura entre os dois painéis da comporta.

De acordo com (Naudascher, 2012) durante o escoamento de água por debaixo da comporta, a parte inferior do equipamento, assim como o paramento e a vedação inferior estão expostos a forças hidrodinâmicas que podem excitar vibrações nas direções verticais e horizontais.

O principal parâmetro responsável pela geração das forças hidrodinâmicas é a geometria da borda inferior da comporta, pois esta afeta significativamente as respostas de vibrações, além da abertura em que a comporta está submetida. A excitação é induzida pela instabilidade da colisão decorrente da camada fina de cisalhamento com o fundo da comporta.

Os dois pré-requisitos para este tipo de excitação são: escoamento submerso pela parte inferior da comporta e a separação da camada limite que colide intermitentemente nas bordas do equipamento.

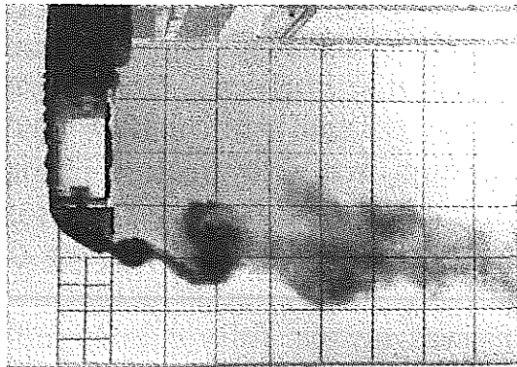


Figura 2(a) – superfície de jusante afogada
(Nguyen, 1990)

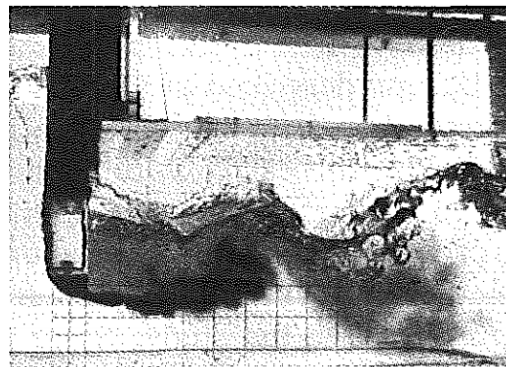


Figura 2(b) – superfície de jusante livre
(Nguyen, 1990)

A reação da comporta difere dependendo se há superfície livre a jusante ou não. Quando a comporta se encontra completamente afogada a jusante (Figura 2(a)), as vibrações são sensíveis a amplificações produzidas pela ressonância do fluido com o sistema. Após passar pela abertura da comporta, os vórtices colidentes que foram formados na borda da comporta formam vórtices maiores pela sucessão de emparelhamento dos vórtices, causando forças maiores no equipamento.

No caso de jusante com superfície livre (Figura 2(b)), os vórtices formados na separação da camada limite nas bordas da comporta excitam ondas gravitacionais associadas à oscilação de pressão que alimentam vibrações no fundo da comporta e amplificam a geração de vórtices, formando ondas de grandes amplitudes.

De modo a proteger a comporta contra uma vibração induzida pelo escoamento na direção vertical, incluindo vibração auto-excitada, deve-se prover amortecimento suficiente ou selecionar um formato para a região inferior da comporta adequado para todas as condições operacionais da comporta.

Os projetos da região inferior da comporta que previnem vibrações induzidas pelo escoamento são aqueles nos quais a camada limite do escoamento não sofre separação, ou nos quais a religação da camada limite se mantém estável para todas as condições operacionais.

Membros enrijecedores estruturais em comportas são frequentemente dispostos muito baixos, acarretando em religação do escoamento intermitente no bordo do enrijecedor, causando vibrações excessivas (Lewin, 2001). A Figura 3(a) ilustra a seção de uma comporta de Pershore Mill que apresenta a parte inferior plana, onde a religação do escoamento e vibração são previsíveis. Este formato é instável porque a camada limite encontra-se próxima da parte inferior da comporta. A Figura 3(b) mostra a seção inferior de uma comporta de túnel de desvio, a qual apresentou problemas de religação do escoamento e vibrações, devido ao enrijecedor estar localizado em posição muito baixa. A Figura 3(c) mostra a seção inferior da comporta com o enrijecedor também situado em posição relativamente baixa, gerando vibrações.

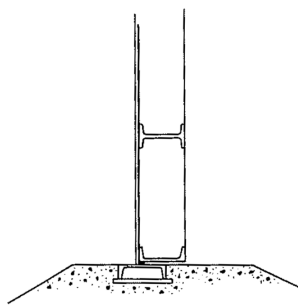


Figura 3(a) – Seção inferior da comporta de Pershore Mill que apresenta vibrações. (Lewin, 2001)

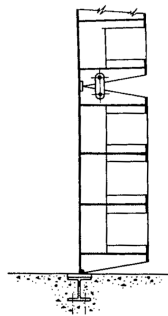


Figura 3(b) – Projeto inadequado da seção inferior da comporta de túnel de desvio. (Lewin, 2001)

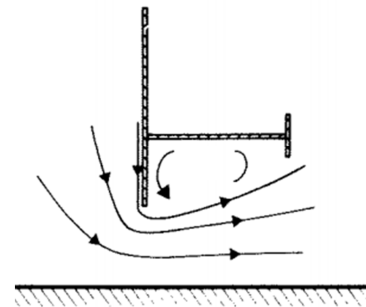


Figura 3(c) – Seção inferior com reforço situado em posição baixa, gerando vibrações. (Kolkman, 1979)

4 DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA UTILIZANDO CFD

Para melhor compreender a causa do problema de vibração excessiva da comporta vagão da tomada d'água de UHE Batalha, realizou-se uma simulação numérica utilizando fluidodinâmica computacional (CFD).

O software utilizado foi o Ansys Workbench 14.5, módulo CFX, utilizando a licença e os equipamentos adquiridos por Furnas para os laboratórios de Aparecida de Goiânia – GO (GST).

Para isto foi gerada uma geometria 3D da comporta e da tomada d'água, de acordo com os desenhos fornecidos pelo CONBAT, como pode ser visualizado na Figura 4 e 5.

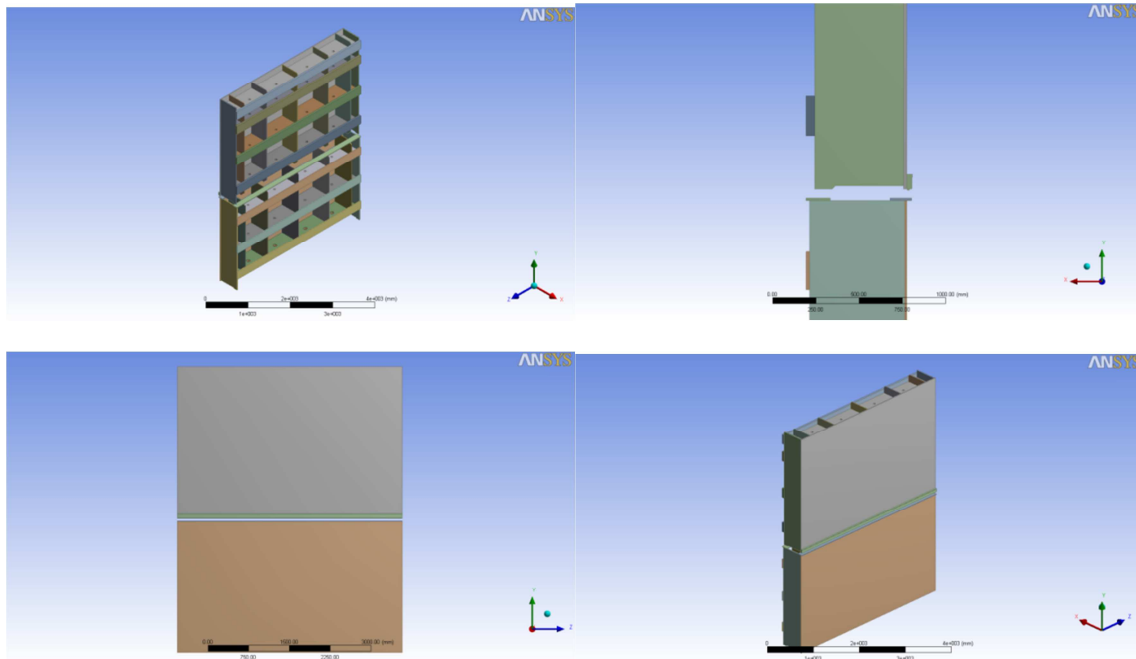


Figura 4 – Geometria 3D da comporta.

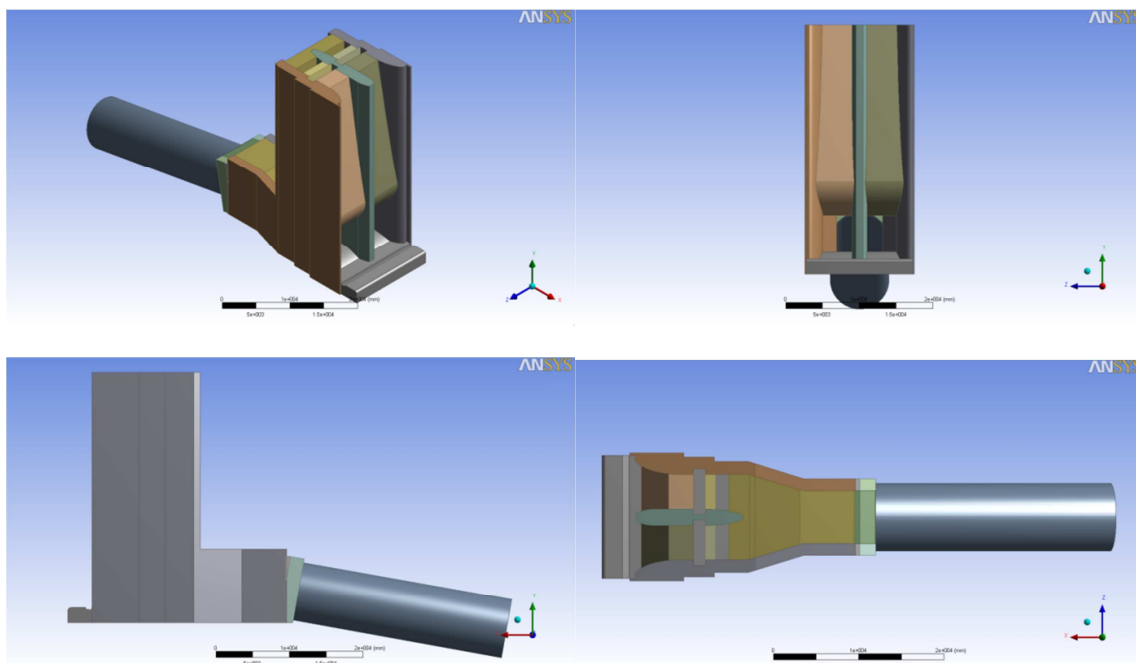


Figura 5 – Geometria 3D da tomada d'água.

Com a geometria da comporta e da tomada d'água foi gerada a geometria do fluido. Retirou-se a abertura da esquerda, pois esta respectiva comporta se encontra fechada no momento do enchimento, simplificando o problema e obtendo-se ganho no tempo computacional. A Figura 6 mostra a geometria do domínio fluido.

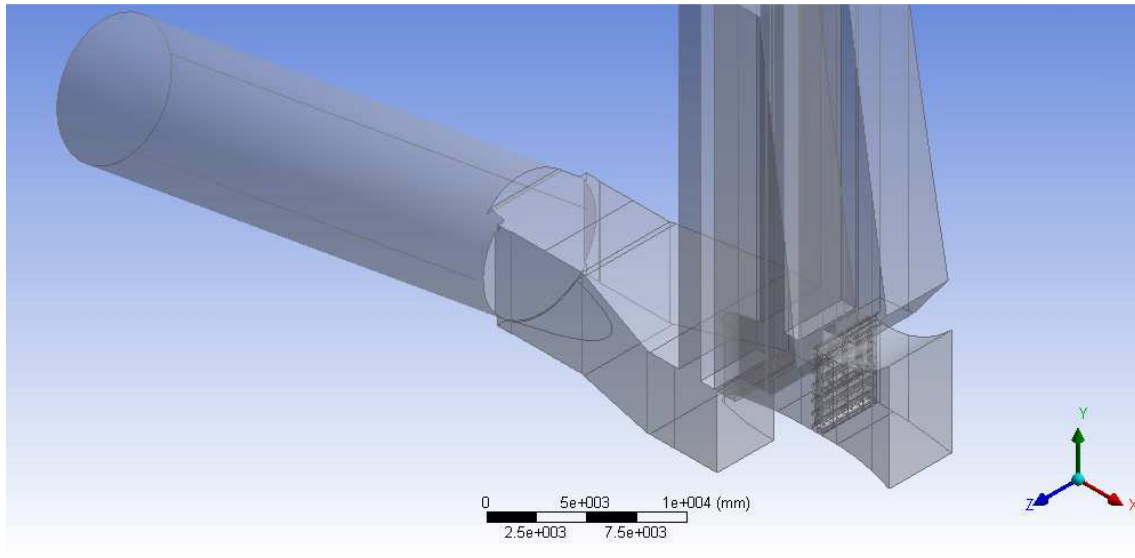


Figura 6 – Domínio fluido

Após a definição da geometria, foi gerada a malha para solução do problema. Esta é constituída de 3.090.473 elementos, sendo a região próxima da comporta mais refinada, conforme mostra a Figura 7.

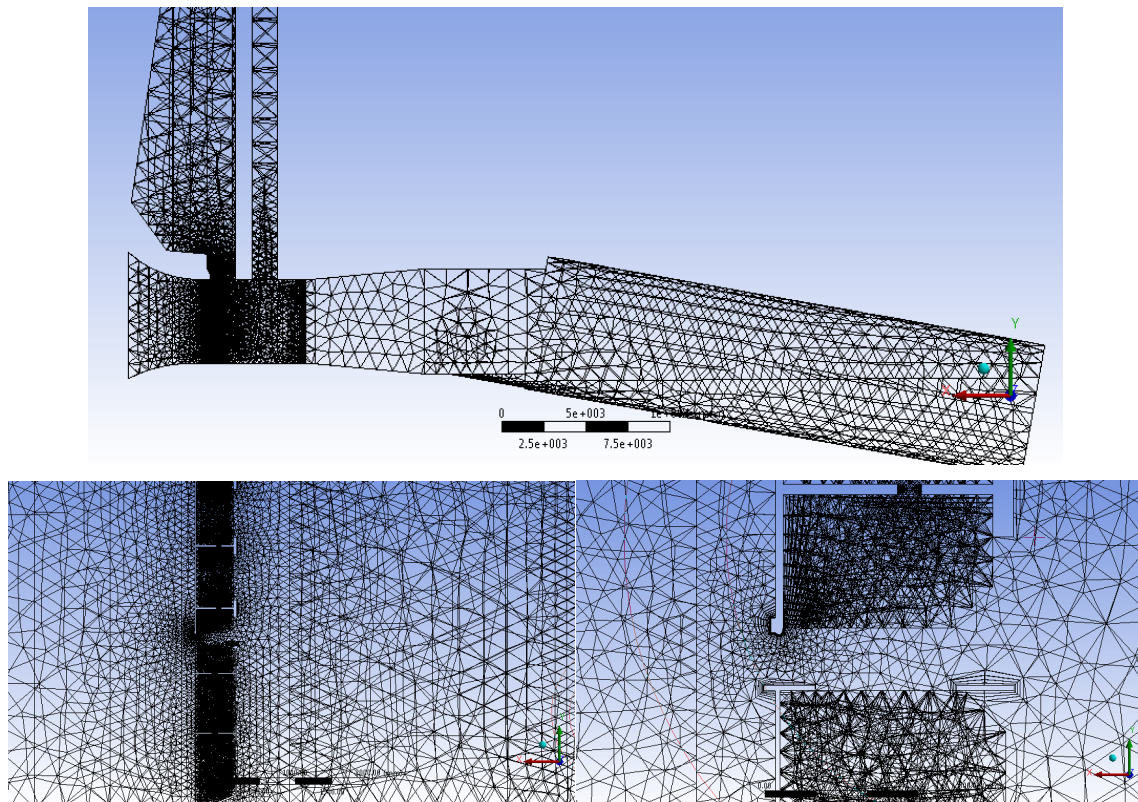


Figura 7 – Malha

Após a geração da malha, define-se os dados de entrada do problema. Este foi definido como transiente e multifase (ar e água). Adicionalmente, definiu-se a condição de entrada da tomada d'água como pressão hidrostática, com valor máximo de 28 m.c.a na soleira (Figura 8), e as saídas do tubo de aerção como aberturas. Os outros elementos foram definidos como parede.

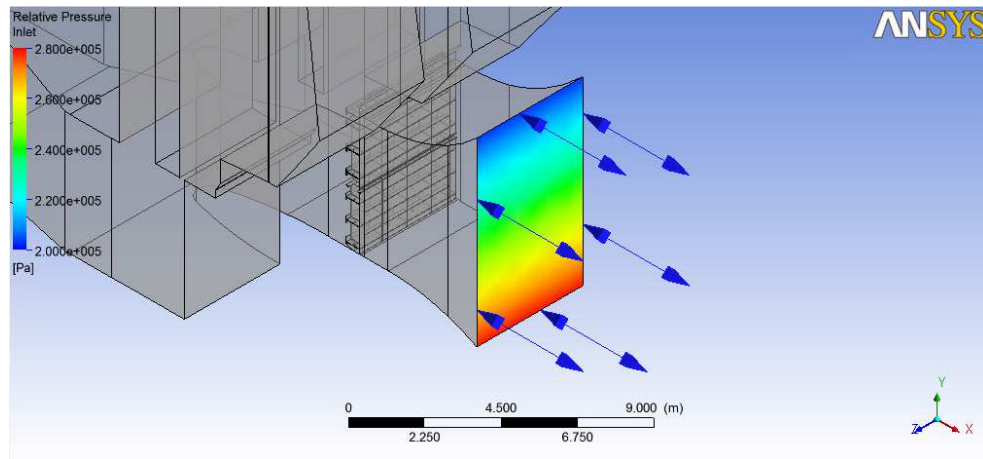


Figura 8 – Entrada pressão hidrostática

5 RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 9 mostra a variação de força na direção Y recebida pelas comportas ao longo do tempo devido ao escoamento da água. O Timestep foi definido como 0,08 segundos.

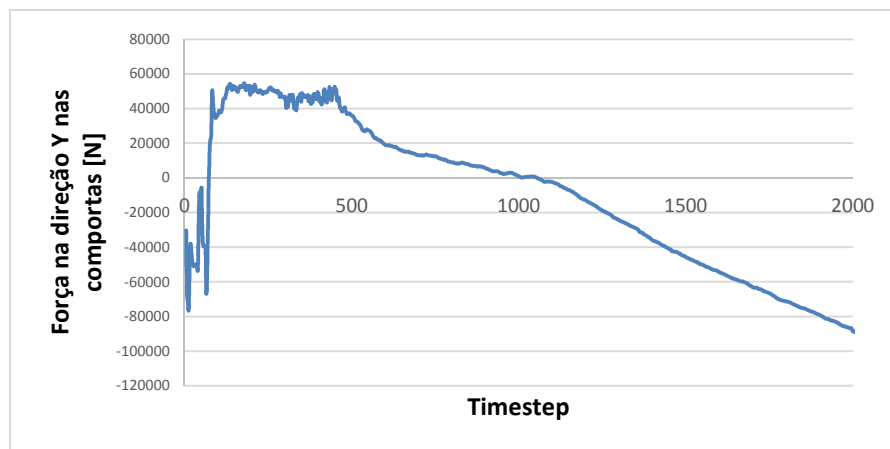


Figura 9 – Força nas comportas na direção vertical

Para ilustração, a Figura 10 particulariza a situação do enchimento para os Timesteps 80, 430 e 1050. Estes tempos foram escolhidos pois o timestep 80 representa o primeiro momento em que surgem forças positivas na direção Y, o timestep 430 o momento no qual inicia o decaimento desta força e o timestep 1050, o momento em que a força se anula. A região em azul da Figura representa a superfície livre da água.

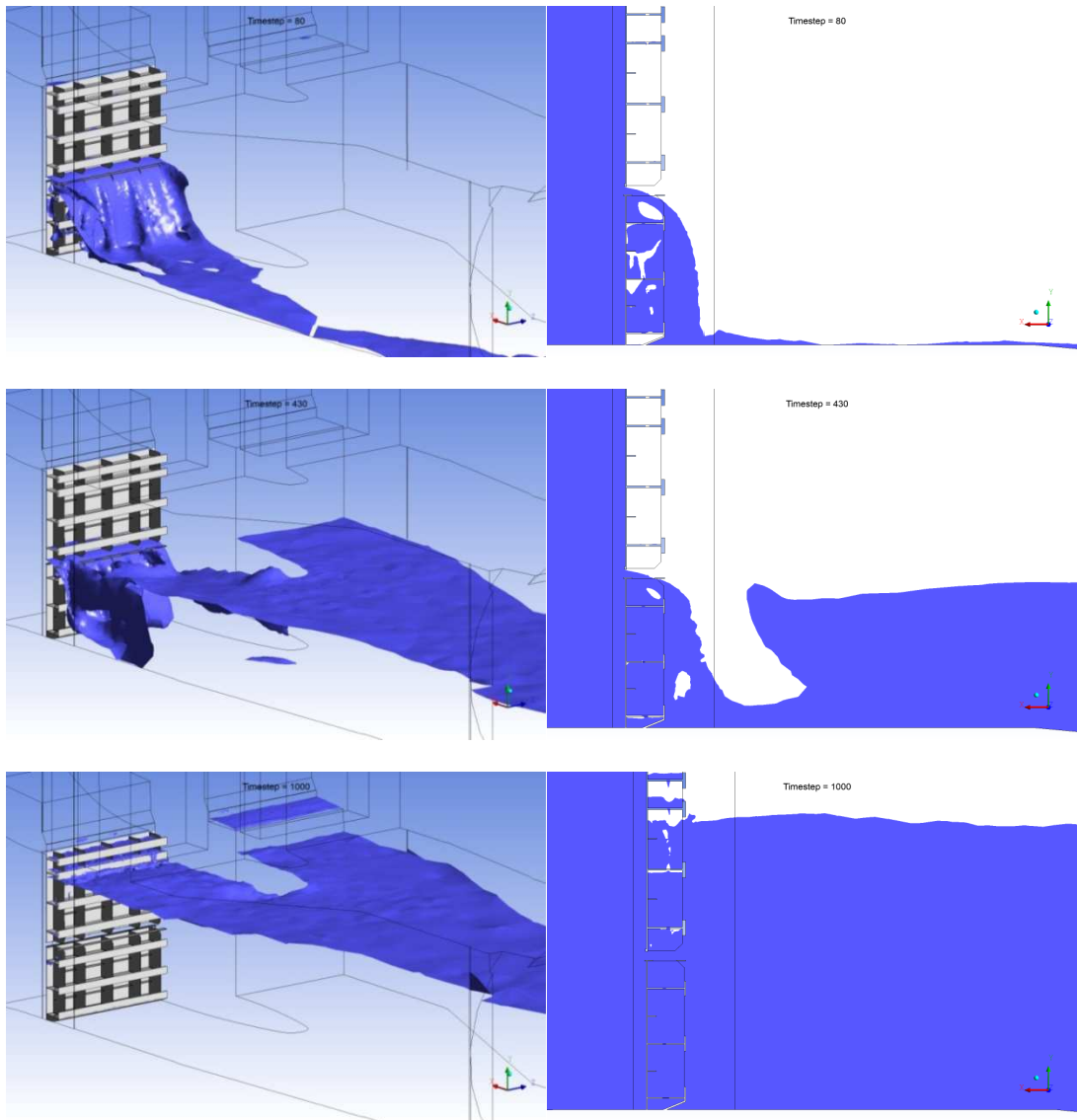


Figura 10 – Superfície livre da água para os Timesteps 80, 430 e 1000.

As elevadas forças na direção vertical no sentido de levantar a comporta podem ser explicadas pela formação de vórtices quando existe superfície livre a jusante. Isto fica demonstrado na simulação numérica, principalmente entre os timesteps 80 e 430.

A Figura 11 mostra os timesteps 110 e 400 que caracterizam a situação descrita, evidenciando a formação de vórtices nas gavetas do painel inferior da comporta e vórtices e bolhas de ar na superfície livre a jusante.

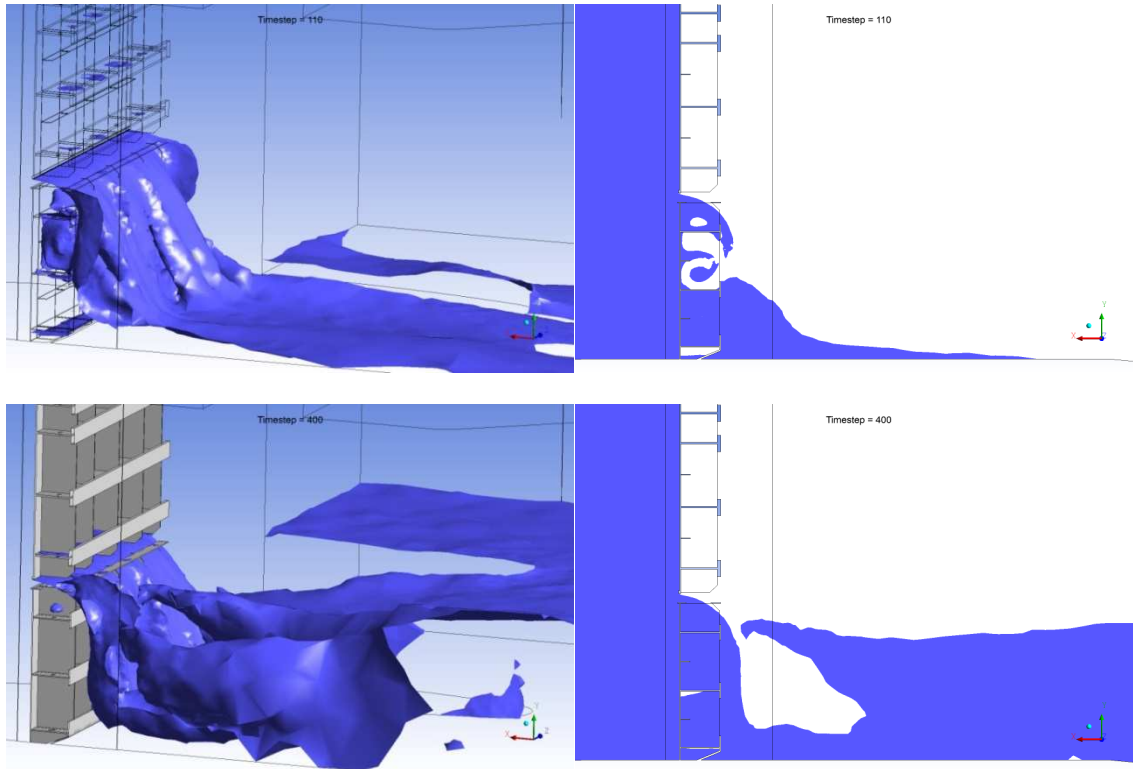


Figura 11 - Timestep 110 e 400.

A Figura 12 mostra a superfície livre da água e as linhas de corrente do escoamento, evidenciando os vórtices.

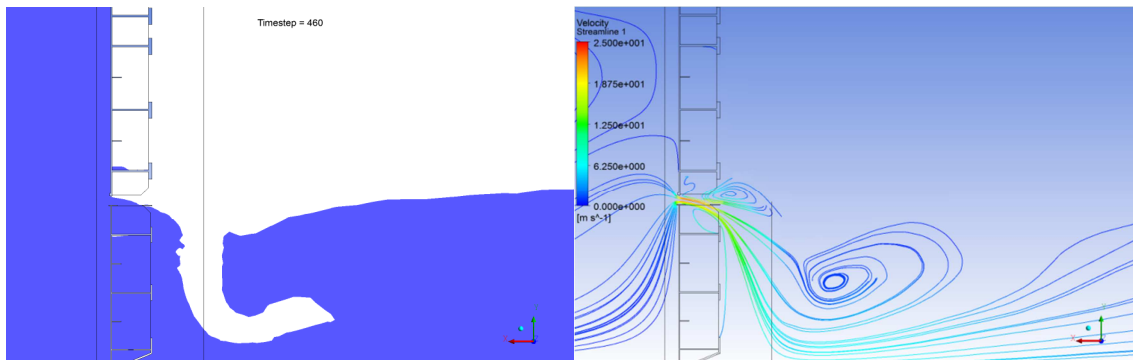


Figura 12 - Linhas de corrente – Timestep 460

Além disso, calculou-se a velocidade média do ar na saída dos túneis de aeração. A Figura 13 mostra a velocidade em função do tempo.

Verifica-se que velocidade média máxima do ar na saída dos túneis de aeração é próxima de 1m/s.

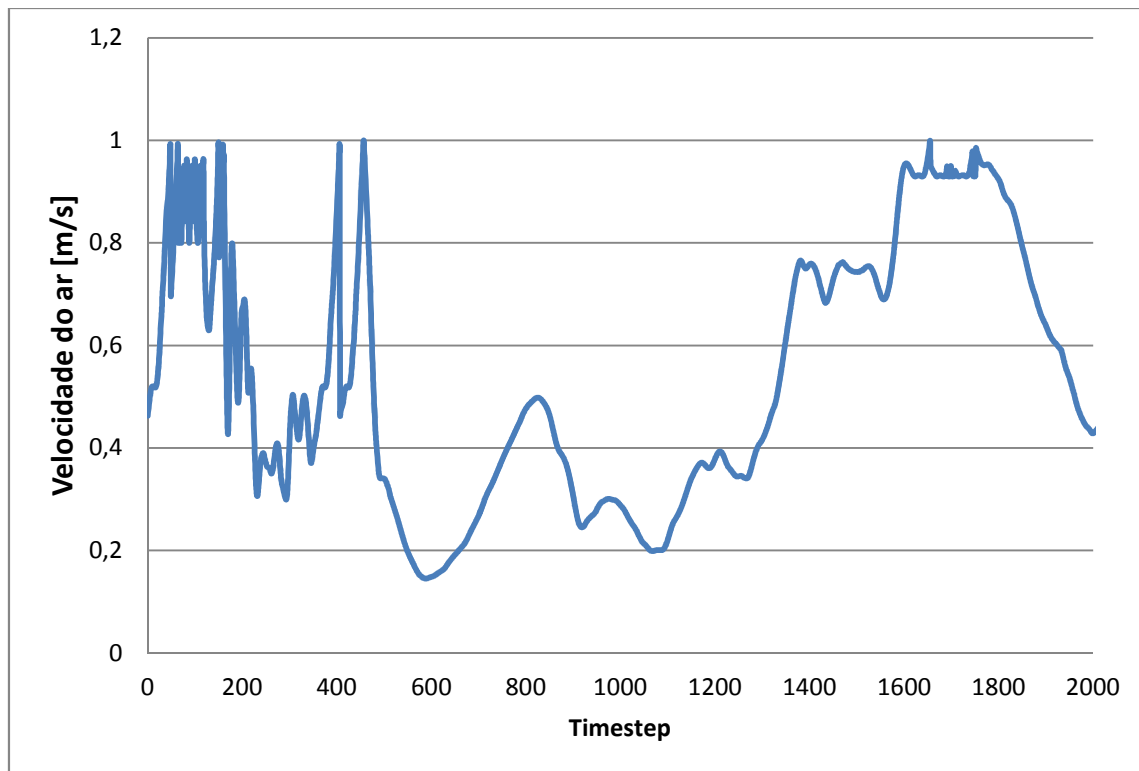


Figura 13 – Velocidade média do ar na saída dos tubos de aeração

6 MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PARA MITIGAÇÃO DO PROBLEMA

De modo a suavizar as vibrações induzidas pelo escoamento, foi proposto modificar a região inferior do painel superior e a região superior do painel inferior da comporta vagão da tomada d'água.

No painel superior, foi inserida uma chapa na região inferior do painel, entre o paramento e a última viga horizontal, de modo a mitigar a separação do escoamento devido à expansão brusca.

Na região superior do painel inferior foi estendida a chapa de apoio da vedação direcionando o escoamento da água para jusante da comporta, evitando que a água caia diretamente nas gavetas do equipamento.

Este conjunto atua como um difusor, evitando que haja uma brusca diferença de pressão e velocidades entre montante e jusante da comporta, direcionando o escoamento de maneira mais uniforme a jusante da comporta.

A Figura 14 (a) mostra a comporta de acordo com o projeto fabricado, e a Figura 14 (b) mostra a comporta com as modificações propostas.

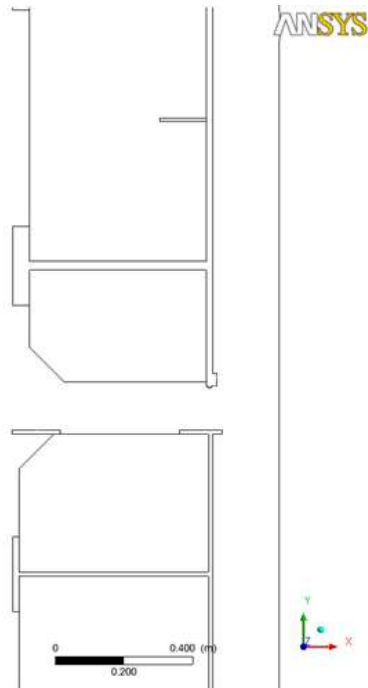


Figura 14(a) – comporta de acordo com o projeto executivo

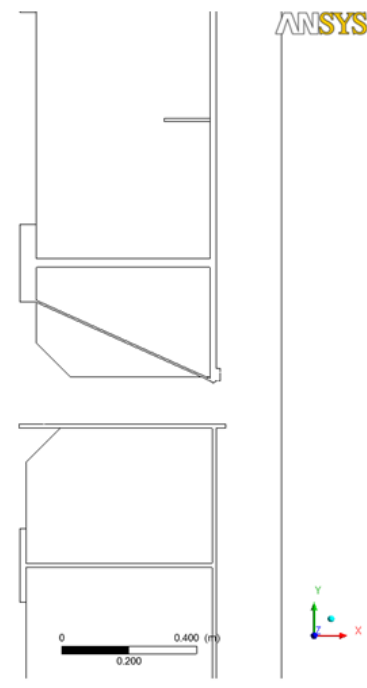


Figura 14(b) – comporta com as modificações propostas

A modificação proposta é razoavelmente simples de ser executada, pois consiste apenas na soldagem de duas chapas finas para o direcionamento do escoamento, uma vez que estas não têm função estrutural. Na chapa a ser soldada no painel superior, é necessário que sejam realizados alguns furos, para evitar o acúmulo de água na gaveta inferior, o que ocasionaria em aumento do peso do equipamento a ser içado pelo pórtico da tomada d'água.

Verifica-se que, apesar de não eliminar completamente as vibrações nas comportas, a modificação proposta reduziu significativamente as forças na direção Y do equipamento, de aproximadamente quatro toneladas para uma tonelada, conforme ilustrado na Figura 15.

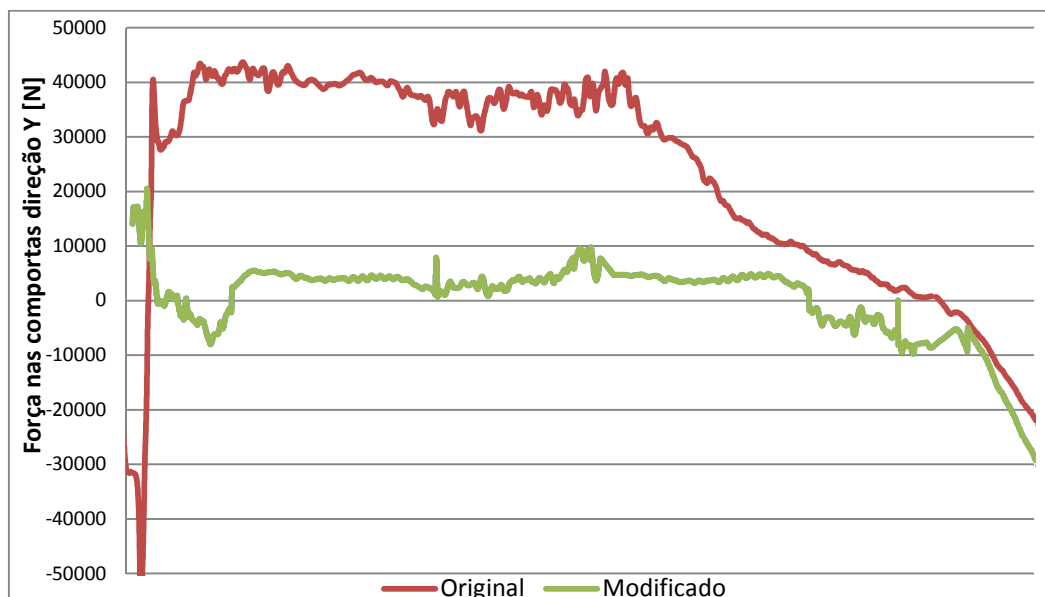


Figura 15 – Comparação entre as forças exercidas nas comportas na direção Y, entre o projeto original e a modificação proposta.

7 CONCLUSÕES

Verifica-se que a área da seção transversal dos dois poços de aeração de cada túnel é de 13,42 m², valor este que excede em dezenas de vezes os valores mínimos recomendados na literatura técnica sobre o assunto (Erbisti, 2004). Igualmente, as perdas de carga nos poços verticais de aeração decorrentes da circulação dos fluxos mínimos necessários para aeração das comportas por ocasião do enchimento dos condutos são de ordem de mmH₂O o que é desprezível, ou seja, não há vácuo ou sobre pressão nos condutos por ocasião do enchimento ou esvaziamento. Portanto, o projeto civil associado está perfeito.

De acordo com a literatura, os painéis da comporta da tomada d'água de UHE Batalha apresentam o bordo inferior com geometria que causa instabilidade na religação da camada limite, gerando vibrações excessivas no equipamento.

A simulação numérica demonstra que há vibrações induzidas pelo escoamento, quando existe superfície livre a jusante da comporta, da ordem de quatro toneladas na direção vertical, no sentido de levantar a comporta.

Verifica-se que a modificação proposta, apesar de não eliminar completamente as vibrações, reduz consideravelmente a amplitude das oscilações, além de ser de razoável execução.

A simulação numérica indica que a modificação proposta reduziu em aproximadamente 55% o pico da amplitude da vibração e em média 63% as forças oscilantes.

REFERÊNCIAS

Army, UnitedStates. "Corps of Engineers." Hydraulic Design Criteria – Air Demand – Regulated Outlet Works, Sheet 050-1, 1964.

Campbell, F. B., and B. Guyton. "Air demand in gated outlet works." Proceedings@ sMinnesota International Hydraulic Convention. ASCE, 1953.

Erbisti, Paulo CF. Design of hydraulic gates. Taylor & Francis, 2004.

Kolkman, Paul A. "Development of vibration-free gate design: learning from experience and theory." Presented at Symp. on Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Karlsruhe, West Germany, 3-6 Sep. 1979. Vol. 1. 1979.

Levin, L. "Calcul hydraulique des conduits d'aération des vidanges de fond et dispositifs déversants." La Houille Blanche 2 (1965): 121-127.

Lewin, Jack, ed. Hydraulic gates and valves: in free surface flow and submerged outlets. Thomas Telford, 2001.

Naudascher, Eduard, and Donald Rockwell. Flow-induced vibrations: an engineering guide. Courier Dover Publications, 2012.

Sarkaria, G.S and Hom, O.S: Quick Design of Air Vents for Power Intakes, Proceedings of ASCE, Journal of the Power Division, PO6 (Dec. 1959)

Thang, Nguyen D. "Gate vibrations due to unstable flow separation." *Journal of Hydraulic Engineering* 116.3 (1990): 342-361.

Westaway, C. R., and A. W. Loomis. "Cameron hydraulic data." *Ingersol–Rand*, 16th edition, 2nd Printing, Sections 1 (1981).