

ESTIMATIVAS EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DE CARGA EM SISTEMA FLUVIAL DE CONTENÇÃO DE DETRITOS

Rynaldo Zanotele Hemerly de Almeida, rynaldo@ipt.br

Luiz Eduardo Lopes, luizel@ipt.br

João Carlos Sávio Cordeiro, cordeiro@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, 532, São Paulo-SP

Resumo: Durante períodos de cheia, diversos rios arrastam uma enorme quantidade de detritos, notadamente troncos de árvores, que podem se dirigir à tomada de água de turbinas de usinas hidrelétricas. Para evitar danos operacionais às turbinas são normalmente utilizados sistemas de contenção de detritos (log boom). No caso especial do Rio Madeira, a Hidrelétrica Santo Antônio enfrenta condições atípicas de volume de material e velocidade de correnteza, que resultaram na falha estrutural de componentes de alguns sistemas desse tipo. Para solucionar este problema, estão sendo desenvolvidos procedimentos experimental (extensometria) e computacional (simulação multicorpos) para a estimativa de cargas atuantes no sistema. Neste trabalho é apresentado esse desenvolvimento, bem como resultados preliminares promissores.

Palavras-chave: log boom, hidrelétrica, extensometria, simulação multicorpos

1. INTRODUÇÃO

A contenção de detritos é uma necessidade em diversos rios do mundo, seja pela preservação de estruturas de pontes seja para evitar o acúmulo de detritos na tomada de água de turbinas hidrelétricas. Existem soluções variadas conforme as particularidades das aplicações e das condições ambientais (Tyler, 2011; Wahl, 1992; Abdelnour *et al.*, 2015 e Hamid *et al.*, 2015). Na Usina Hidrelétrica Santo Antônio instalada no Rio Madeira (RO, Brasil), é estimada a chegada de até 9.000 troncos de árvores por dia durante picos de cheia. Além do considerável volume de material, as velocidades de correnteza do rio são da ordem de 2 m/s sob condições normais de operação e podem chegar a 3 m/s em condições extremas de vazão. Em (Wahl, 1992), por exemplo, as velocidades de correnteza são classificadas nas categorias “leve”, “pesada” e “severa”, sendo que a última faixa corresponde a 1,4 m/s, velocidade essa inferior àquelas encontradas no Rio Madeira.

Após ocorrências de falhas estruturais em componentes de sistemas de contenção, do tipo *log boom*, instalados a montante da Hidrelétrica Santo Antônio, decidiu-se por um projeto de pesquisa para analisar o problema de maneira integrada. Inicialmente foi feita revisão da literatura sobre o assunto. Apesar de existirem trabalhos relacionados à estimativa de forças de arrasto sobre módulos de sistemas de contenção (Abdelnour *et al.*, 2015 e Hamid *et al.*, 2015), pouco se discute sobre os esforços entre módulos, provavelmente devido às menores velocidades e cargas envolvidas naqueles casos. Assim, neste trabalho é dado foco à obtenção de uma ferramenta de estimativa de carga entre módulos ao longo de todo o sistema. Optou-se por utilizar a modelagem multicorpos como ferramenta computacional e a instrumentação por extensometria para estimativa de forças baseadas na medição de deformações estruturais em campo. As cargas estimadas podem ser utilizadas posteriormente como entrada para simulações estruturais.

Nas seções a seguir são descritos: o sistema de contenção analisado; o procedimento experimental utilizado para medição de deformações em campo; a estimativa de cargas baseadas nas medições de deformação; o procedimento computacional para estimativa de cargas utilizando-se modelo multicorpos; e os correspondentes resultados.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTENÇÃO EM ANÁLISE

Os sistemas de contenção de detritos do tipo *log boom* são normalmente compostos por módulos com flutuadores interconectados entre si e têm o objetivo de conter detritos que se deslocam próximos à superfície da água. Para aumentar a abrangência da contenção, os módulos podem ser dotados de grades na sua parte inferior. No caso específico do sistema em análise, cada módulo é composto por um chassi com três flutuadores, uma tala intermediária e uma grade, como ilustra a Fig. 1. Nota-se que a grade é composta por perfis “I” horizontais, cujas abas servem de

anteparo para os detritos. Na Fig. 2 é possível observar um trecho do sistema em operação e uma vista aérea do conjunto.

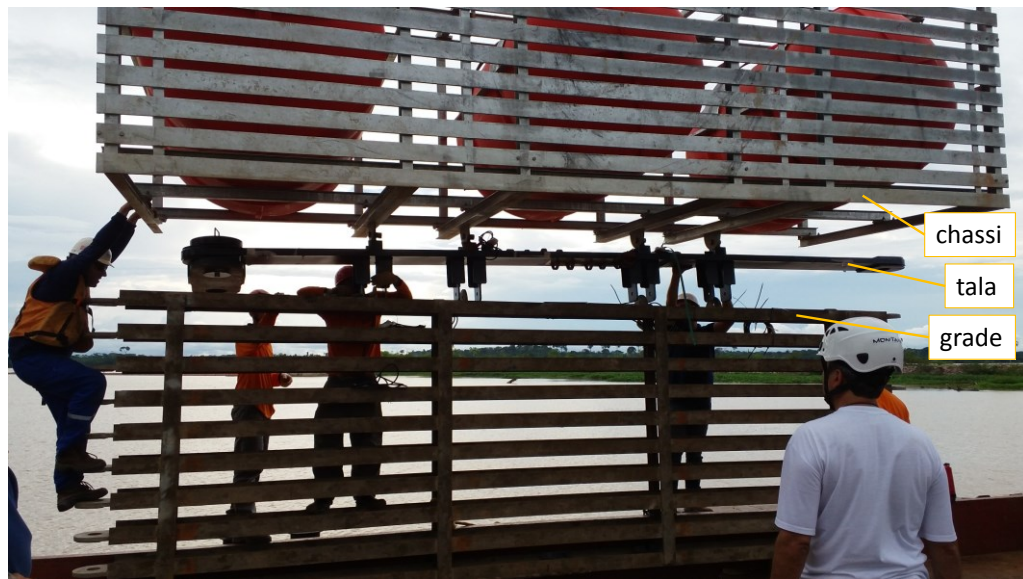


Figura 1. Módulo do sistema de contenção de detritos.



Figura 2. Sistema em operação: (a) Trecho no período de cheia; (b) Vista aérea antes do período de cheia (Fonte: maps.google.com).

A interconexão entre módulos ocorre, em paralelo, entre talas vizinhas e entre grades vizinhas, com a utilização de pinos instalados nos olhais desses componentes. Neste caso em estudo, não há ligação direta entre chassis vizinhos. A linha formada pela sequência de módulos é então ancorada em pilares por suas duas extremidades, utilizando-se conjuntos de oito tirantes formados por elos especialmente desenvolvidos para a aplicação. Na Fig. 3 pode-se observar a chegada dos tirantes superiores ao pilar e o detalhe de um elo.

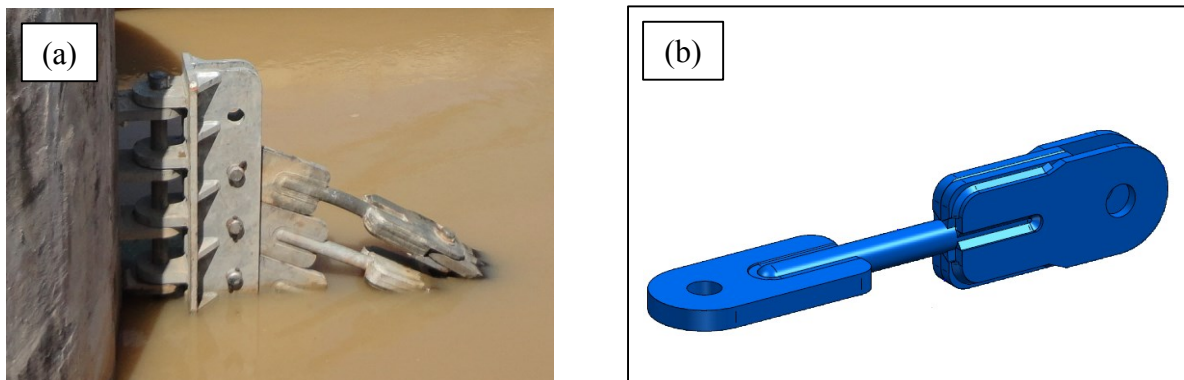


Figura 3. Tirantes de ancoragem: (a) Chegada ao pilar; (b) Ilustração de um elo de tirante.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ciclo de cheia do Rio Madeira é anual, ocorrendo alta de vazão entre os meses de janeiro e junho, período no qual não é possível realizar operações de instalação de componentes ou instrumentos e as operações de manutenção ficam limitadas. Assim, qualquer instrumentação deve ser instalada durante o período de baixa vazão e ter autonomia energética e funcional para operar ininterruptamente durante todo o período de cheia. Por isso, foram utilizados sistemas autônomos de coleta de dados integrados a sistemas de alimentação por energia solar, constituídos de painéis solares, gerenciadores de energia e baterias para manter a estação de monitoramento operante em regime contínuo. Na Fig. 2(a) é possível observar um dos painéis solares utilizados, instalado sobre um chassi do sistema.

Com o objetivo de se estimar os carregamentos impostos a um módulo, respeitando-se a restrição de prazo para o início da cheia de 2017, foi feita uma primeira campanha de instrumentação abrangendo um módulo, instalado na posição 62 de um total de 89 módulos, e dois tirantes de ancoragem da linha a um dos pilares.

Foram utilizados extensômetros elétricos (*strain gages*) à prova d'água e foram aplicadas resinas especiais para proteção das regiões instrumentadas. Estas regiões receberam também carenagens metálicas para proteger os sensores de possíveis impactos de troncos, sem afetar os carregamentos nas regiões monitoradas.

Em relação à grade do módulo instrumentado, foram instalados *strain gages* nas faces da alma e nas faces internas das abas dos perfis 1 (superior), 5 e 10 (inferior), alinhados com a direção longitudinal e configurados em um quarto de ponte. Na Fig. 4. são indicadas as posições de instalação dos *strain gages*. A letra “X” corresponde aos números 1, 5 ou 10, conforme o perfil. Nota-se que houve redundância de medições, minimizando possíveis perdas por conta do ambiente agressivo ao qual a instrumentação foi exposta.

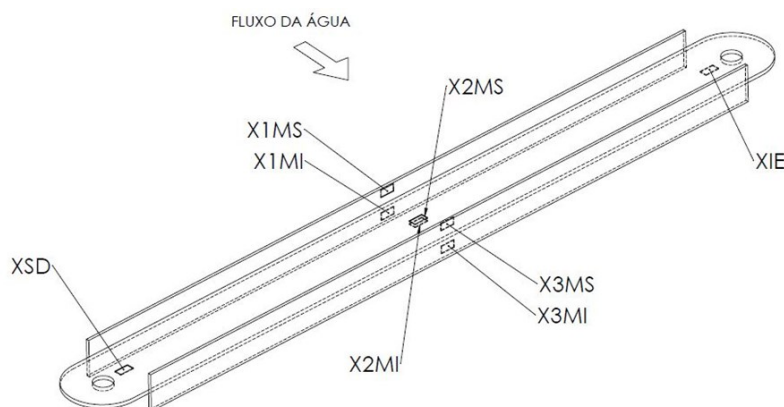


Figura 4. Localização dos *strain gages* em um perfil da grade.

Na tala do mesmo módulo, foram instalados dois *strain gages* na configuração de um quarto de ponte, correspondentes em posicionamento aos *gages* X2MS e X2MI dos perfis. Nos tirantes, foram instrumentados um elo do primeiro tirante (superior) e um do segundo tirante. Nesses casos foram aplicados quatro *strain gages* em configuração de ponte completa. Os elos instrumentados foram calibrados em força nas dependências do IPT.

Devido às condições ambientais adversas e apesar do cuidado no projeto e na execução, houve falha de diversos sensores. Assim, foi necessário preliminarmente selecionar os sensores cujas medições pudessem ser tomadas como válidas. Além disso, a cheia de 2017 foi relativamente menos intensa, atingindo-se vazões máximas da ordem de 30.000 m³/s, enquanto as cheias mais intensas atingem vazões da ordem de 50.000 m³/s. Por isso, as deformações obtidas na tala intermediária, que possui maior rigidez, ficaram abaixo da faixa esperada e as medições nesse componente foram descartadas na análise aqui apresentada.

Nota-se ainda que a instrumentação dos perfis da grade foi concebida com o propósito de se levantar esforços de tração e flexão. Neste trabalho é apresentado o processamento das medições apenas para estimativa da força de tração na direção longitudinal dos perfis e, em sequência, do módulo. A força de tração total à qual um módulo é submetido foi estimada da seguinte forma:

1. Estimativa da força de tração em cada perfil instrumentado em função das leituras dos *strain gages* considerados válidos, utilizando-se os valores nominais de área da seção transversal e módulo de elasticidade do material;
2. Estimativa de força de tração na grade como igual ao número total de perfis da grade vezes a média das forças estimadas para os três perfis instrumentados;
3. Estimativa de força de tração na tala intermediária fazendo-se uma proporção entre áreas expostas ao fluxo da grade e do chassi, e correspondentes coeficientes de arrasto estimados por simulação CFD (Katsuno, Castro, Dantas, 2017);
4. Estimativa da força de tração total somando-se as forças de tração na grade e na tala, obtidas nos passos 2 e 3, respectivamente.

Em relação aos tirantes, a medição de força sobre o primeiro tirante apresentou problemas e a estimativa da carga total nessa região da linha foi realizada com base na medição de força de tração do segundo tirante. Conforme se pode observar na Fig. 5, há uma peça de interface entre os módulos das extremidades da linha e os tirantes de ancoragem aos pilares. Devido à proximidade e alinhamento entre os dois tirantes superiores e a tala, assumiu-se que esses dois tirantes suportam, cada um, metade da carga da tala. Assim, a partir dos resultados de força sobre o segundo tirante obtidos experimentalmente, foi possível estimar a carga total da linha nessa região.

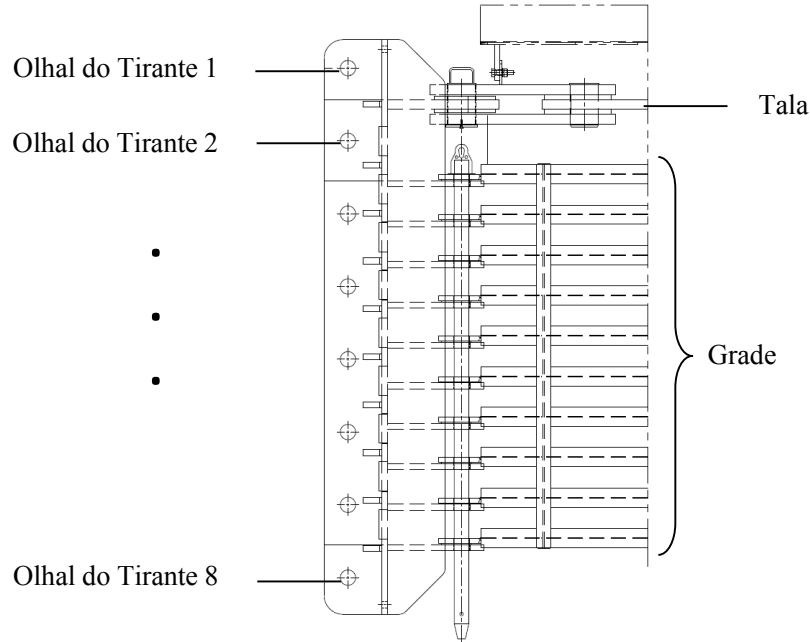


Figura 5. Interface entre módulo da extremidade da linha e tirantes de ancoragem.

4. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Utilizando-se o software SIMPACK de modelagem e simulação multicorpos foi criado um modelo bidimensional, com referência ao plano da superfície da água, em que cada módulo do sistema de contenção de detritos foi representado como uma única barra, articulada com suas vizinhas com juntas de rotação. A partir de uma posição inicial arbitrária, foram feitas simulações dinâmicas com objetivo de se encontrar a posição de equilíbrio do sistema de contenção e as correspondentes forças estáticas resultantes. Assim, foi necessário definir um campo de velocidades como entrada do modelo, indicando-se a intensidade e a orientação da velocidade da correnteza ao longo do rio. Em função dos parâmetros de arrasto obtidos por simulação CFD e das posições/orientações das grades, são calculadas, a cada passo de integração da simulação, uma componente normal e uma componente tangencial de força de arrasto para cada módulo. Nas Figs. 6 e 7 pode-se observar o modelo da linha e uma ilustração das forças de arrasto modeladas. Tais forças foram calculadas com os parâmetros de arrasto listados na Tab. 1 e com as Eqs. (1) a (7), em que F_n é a componente normal, F_t é a componente tangencial, ρ é a densidade da água, V_c é a velocidade local da correnteza, A_{ch} é a área frontal do chassi de flutuadores, A_{gr} é a área frontal da grade, e os coeficientes de arrasto do chassi e da grade possuem índice “ch” e “gr”, respectivamente.

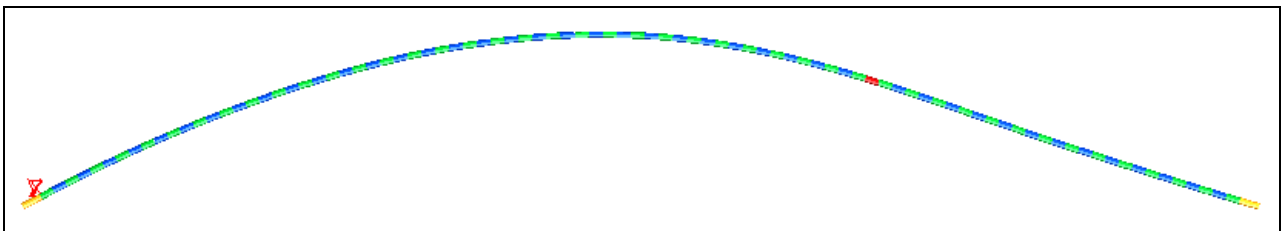


Figura 6. Modelo multicorpos do sistema de contenção de detritos.

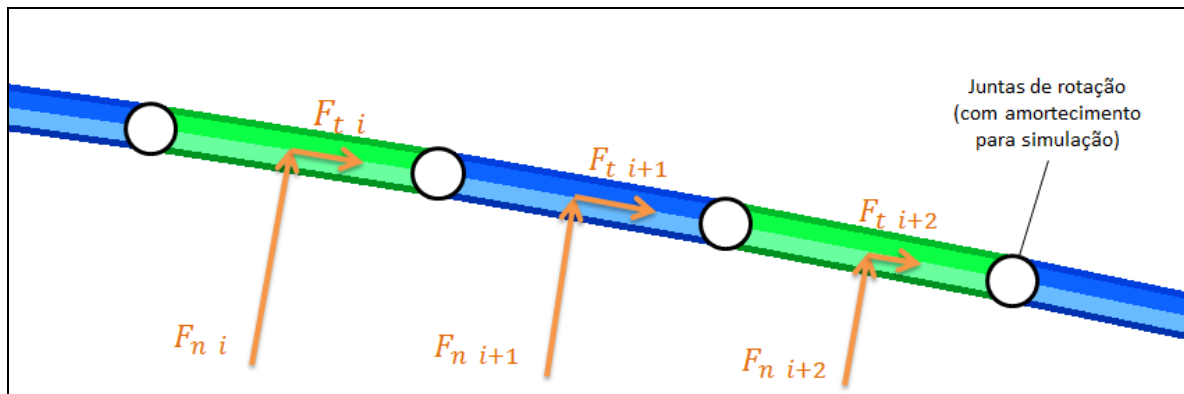


Figura 7. Ilustração das forças de arrasto sobre cada módulo.

Tabela 1. Parâmetros para cálculo de forças de arrasto.

Parâmetro	Unidade	Valor
ρ	kg/m ³	1015
A_{ch}	m ²	10,325
A_{gr}	m ²	12,4
C_{ch_n0}	-	0,53983
C_{ch_n1}	-	1,0012
C_{ch_n2}	-	1,8331
C_{gr_n0}	-	1,5032
C_{gr_n1}	-	0,9888
C_{gr_n2}	-	1,8397
C_{ch_t0}	-	0,1183
C_{ch_t1}	-	1,8535
C_{ch_t2}	-	1,2171
C_{gr_t0}	-	0,10654
C_{gr_t1}	-	1,6352
C_{gr_t2}	-	1,4678

$$F_n = \frac{1}{2} \rho V_c^2 (A_{ch} C_{ch_n} + A_{gr} C_{gr_n}) \quad (1)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho V_c^2 (A_{ch} C_{ch_t} + A_{gr} C_{gr_t}) \quad (2)$$

$$C_{ch_n} = \sin(\cos(c_{ch_n1}\beta)) C_{ch_n0} |\cos(c_{ch_n1}\beta)|^{c_{ch_n2}} \quad (3)$$

$$C_{gr_n} = \sin(\cos(c_{gr_n1}\beta)) C_{gr_n0} |\cos(c_{gr_n1}\beta)|^{c_{gr_n2}} \quad (4)$$

$$C_{ch_t} = \sin(\cos(c_{ch_t1}\beta)) C_{ch_t0} |\sin(c_{ch_t1}\beta)|^{c_{ch_t2}} \quad (5)$$

$$C_{gr_t} = \sin(\cos(c_{gr_t1}\beta)) C_{gr_t0} |\sin(c_{gr_t1}\beta)|^{c_{gr_t2}} \quad (6)$$

$$\text{senal}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Como o interesse se restringe à condição de equilíbrio, foram artificialmente introduzidos amortecedores viscosos nas juntas de rotação do modelo, cujos parâmetros foram ajustados de forma a se reduzir o tempo de simulação (não havendo assim representatividade na condição transiente).

O campo de velocidades foi definido com base em medições de campo. Porém, devido à alta dispersão dos valores medidos, as curvas de velocidade foram simplificadas como ilustra a Fig. 8.

Ressalta-se que ainda não foi contemplado na simulação o efeito de acúmulo de detritos sobre as forças de arrasto. Em casos extremos como no uso de log booms em rios utilizados para transporte de madeira, a componente de arrasto por tensões de atrito pode ser da mesma ordem de grandeza que a por diferença de pressão (Green, Garfitt, Young, 1994). Porém, estudos em andamento indicam que não se trata da condição na aplicação em análise.

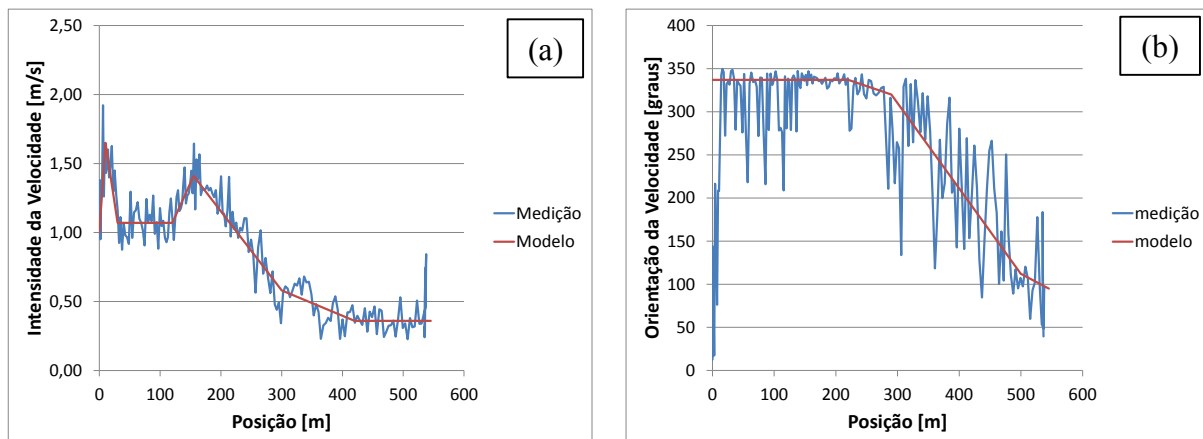


Figura 8. Velocimetria medida em campo (11/02/2017) e correspondente simplificação para entrada no modelo multicorpos: (a) Intensidade; (b) Orientação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizando-se as medições, cálculos e simulações conforme os procedimentos acima descritos, foram obtidos os valores listados na Tab. 2, rerepresentados na forma gráfica na Fig. 9.

A linha tracejada da Fig. 9 indica a região que representaria perfeita correlação entre simulação e instrumentação. Nota-se que houve razoável correspondência entre os resultados baseados em extensometria e em simulação multicorpos. Ocorreu certa dispersão em função das dispersões de valores de entrada das simulações, notadamente das orientações do campo de velocidades de correnteza.

Conforme esperado, houve em geral o aumento de força de tração na linha, tanto próximo ao pilar quanto no módulo instrumentado, em função do aumento da vazão (e velocidade de correnteza). Apenas na simulação na condição de maior vazão essa relação não se manteve. Porém, acredita-se que isso não seja uma tendência real, mas consequência da dispersão nos valores de orientação de velocidade de correnteza e da alta sensibilidade do modelo a esse parâmetro. De fato, os valores obtidos por instrumentação indicam aumento de força.

Nota-se ainda que as forças sobre o módulo são maiores que as obtidas nos tirantes de ancoragem ao pilar, tanto por instrumentação quanto por simulação. Assim, a simulação mostra-se uma ferramenta bastante útil por ser capaz de informar a força ao longo de toda a linha e permitir a identificação da região crítica, algo que seria inviável de se realizar por instrumentação de baixo custo.

Tabela 2. Resultados de estimativas de forças baseadas em medições experimentais e obtidas por simulação multicorpos.

Data	Vazão [m ³ /s]	Tirante		Módulo	
		Experimental [kN]	Simulação [kN]	Experimental [kN]	Simulação [kN]
11/02/2017	20537	434	273	581	339
20/02/2017	26560	561	667	615	817
27/02/2017	30181	663	596	740	749

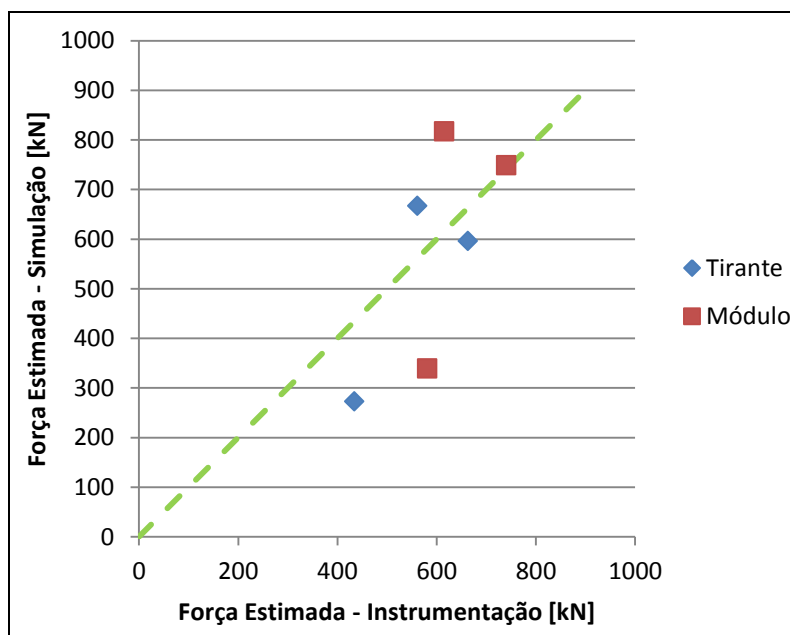


Figura 9. Comparação entre resultados de estimativas de forças baseadas em medições experimentais e obtidas por simulação multicorpos.

6. CONCLUSÃO

O procedimento de medição de deformações por extensometria à prova d'água se mostrou promissor para monitoramento estrutural do sistema de contenção de detritos. No momento, uma instrumentação mais robusta, com ampliação do uso de redundâncias, está sendo instalada para ser funcional durante o período de cheia de 2018 do Rio Madeira. Com isso será reduzida a necessidade de estimativas pois será possível obter medições de forças de tração em um número maior de componentes do sistema.

A utilização do software de modelagem e simulação multicorpos resultou em valores de carga próximos aos obtidos por estimativa baseada em instrumentação. Há possibilidades de aprimoramento como a melhoria da definição do campo de velocidades de correnteza e a inclusão do efeito de acúmulo de detritos. Porém, já com os resultados obtidos, acredita-se que se trata de uma ferramenta importante para a previsão de condições críticas ou para o projeto de novas linhas do sistema de contenção.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Santo Antônio Energia pelo suporte operacional e financeiro deste projeto, especialmente aos engenheiros José Luiz de Borges Garcia Filho, Ana Luiza Braga e Leonardo de Castro Morais. Projeto PD-06683-0116/2016 do Fundo de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

8. REFERÊNCIAS

- Abdelnour, E., Abdelnour, R., Comfort, G., Tran, P., 2015, "Design and installation of two permanent booms at La Romaine-2 to resist ice, retain debris and serve as safety booms", Proceedings of the 18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Quebec, Canada.
- Green, S., Garfitt, J. R., Young, G. G., 1994, "Log boom drag measurement at sea", Marine Technology, Vol. 31, No. 2 pp. 145-148.
- Hamid, H. A., Rahman, M. M., Munisamy, K. M., Abustan, I., 2015, "Development of floating slender structure system for unprotected water intake in Tenom Pangi hydro power station, Proceedings of the 3rd National Graduate Conference, Putrajaya, Malaysia.
- Katsuno, E. T., Castro, F. S., Dantas, J. L. D., 2017, "Debris containment grid CFD validation with towing tank tests", Proceedings of the 30th American Towing Tank Conference, West Bethesda, USA.
- Tyler, R. N., 2011, "River debris: causes impacts, and mitigation techniques", Alaska Center for Energy and Power.
- Wahl, T. L., 1992, "Investigation of debris and safety boom alternatives for bureau of reclamation use", U.S. Department of the Interior.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL LOAD ESTIMATES ON A FLUVIAL DEBRIS RETENTION SYSTEM

Rynaldo Z. H. de Almeida, rynaldo@ipt.br

Luiz E. Lopes, luizel@ipt.br

João C. S. Cordeiro, cordeiro@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, 532, São Paulo - SP

Abstract. During high-flow season, many rivers carry a great quantity of debris, mainly tree trunks, that may be transported to water intake of hydroelectric plant turbines. In order to avoid operational damage to the turbines, debris retention systems (log booms) are usually employed. In the special case of the Madeira River, the Santo Antônio Hydroelectric Plant deals with atypical conditions of material volume and flow velocity, that resulted in structural failure of systems of this kind. To solve this problem, experimental procedures (extensometry) and computational procedures (multi-body simulation) are under development for estimating actuating loads on the system. This work presents this development, as well as promising preliminary results.

Keywords: log boom, hydroelectric plant, extensometry, multi-body simulation