

# Caracterização de carregamentos de campo sobre sistema fluvial de contenção de detritos

*Characterization of field loads on a fluvial-debris retention system*

Rynaldo Zanotele Hemerly de Almeida<sup>a\*</sup>, João Carlos Sávio Cordeiro<sup>a</sup>, Luiz Eduardo Lopes<sup>b</sup>

a Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: rynaldo@ipt.br

Palavras-chave:  
contenção de detritos;  
extensometria; usina hidrelétrica.

Keywords:  
*log boom; extensometry;  
hydroelectric plant.*

## Resumo

Durante períodos de cheia, diversos rios arrastam grande quantidade de detritos, notadamente troncos de árvores, que podem se dirigir a estruturas como pilares de pontes e, especialmente, tomadas de água de turbinas de usinas hidrelétricas. Para evitar danos operacionais às turbinas são normalmente utilizados sistemas de contenção de detritos (*log booms*). No caso especial do Rio Madeira, a Hidrelétrica Santo Antônio enfrenta condições atípicas de volume de material e velocidade de correnteza (alcançando até 9000 troncos por dia e 3 m/s), que resultaram na falha estrutural de componentes de alguns sistemas desse tipo. Para solucionar este problema, foram desenvolvidos procedimentos experimentais, baseados em extensometria, para a caracterização de cargas atuantes no sistema. Neste trabalho, são apresentados esses procedimentos, bem como os resultados obtidos, destacando-se os de distribuição de carga entre elementos estruturais, que foram significativamente diferentes dos admitidos originalmente para o projeto do sistema.

## Abstract

*During high-flow season, many rivers carry a great quantity of debris, mainly tree trunks, that may be transported to structures as bridges columns and water intakes 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 Madeira River, Santo Antônio Hydroelectric Plant deals with atypical conditions of debris volume and flow velocity (reaching up to 9000 tree trunks per day and 3 m/s) which resulted in structural failure of systems components. To solve this problem, experimental procedures based on extensometry were developed to assess the loads on the log booms. This work presents the developed procedures as well as the obtained results, especially on the load distributions among structural elements, which were significantly different from the ones originally assumed for the design of the retention system.*

## 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 (Porto Velho-RO, Brasil), é estimada a chegada de até 9.000 troncos de árvores por dia durante picos de cheia, que podem se estender de fevereiro a maio de cada ano. 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, conforme estimativa da Santo Antônio Energia, que impedem que sejam executadas operações de limpeza do sistema de contenção nesses períodos. 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 dos sistemas de contenção, do tipo *log boom*, instalados a montante da Hidrelétrica Santo Antônio, decidiu-se pela revisão conceitual desse sistema, por meio de um projeto de pesquisa, analisando o problema de maneira integrada pelo Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas e pelo Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT.

Construtivamente, os sistemas de contenção são formados por módulos flutuantes, dotados de um anteparo (grade, placa, tela, etc.), interconectados mecanicamente, formando uma denominada linha. As duas extremidades da linha são normalmente ancoradas a estruturas civis de concreto armado. Ao entrar em operação, os módulos são carregados por forças de arrasto decorrentes de suas interações hidrodinâmicas com a correnteza do rio (incluindo efeitos de acúmulo de detritos), fazendo com que a linha assumira uma forma análoga a de uma catenária, porém, disposta segundo o plano horizontal da linha d'água. Assim, as forças de arrasto ficam em equilíbrio mecânico com as forças de tração entre módulos (principais esforços solicitantes estruturais). No caso da Hidrelétrica Santo Antônio, as

forças de tração foram altas o suficiente para a ruptura dos componentes estruturais primários dos módulos de *log boom*, porém, em condições estimadas como admissíveis, segundo as hipóteses do projeto original.

Durante revisão da literatura, notou-se que 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. Neste trabalho, é apresentado o segmento do projeto de pesquisa que teve foco na caracterização das forças de tração entre módulos do sistema de contenção, notadamente na distribuição de carga entre elementos estruturais, com o objetivo de confrontá-las com as hipóteses adotadas no projeto original do sistema. Em continuidade aos testes exploratórios apresentados em (ALMEIDA, CORDEIRO, LOPES, 2018), optou-se por utilizar instrumentação e medição em campo, uma vez que métodos analíticos ou numéricos poderiam levar a incertezas consideráveis em função da indeterminação de parâmetros relacionados à fabricação e instalação do sistema em campo, além das condições ambientais variadas.

No âmbito mais geral do projeto de pesquisa, os valores de força de tração obtidos em campo serviam também como referência para a validação de modelos numéricos fluido-dinâmicos (KATSUNO, CASTRO, DANTAS, 2017) e multicorpos (ALMEIDA, CORDEIRO, LOPES, 2018), utilizados posteriormente para previsão do comportamento da linha em condições variadas de operação da usina, bem como de demais linhas de *log boom* existentes ou a serem projetadas.

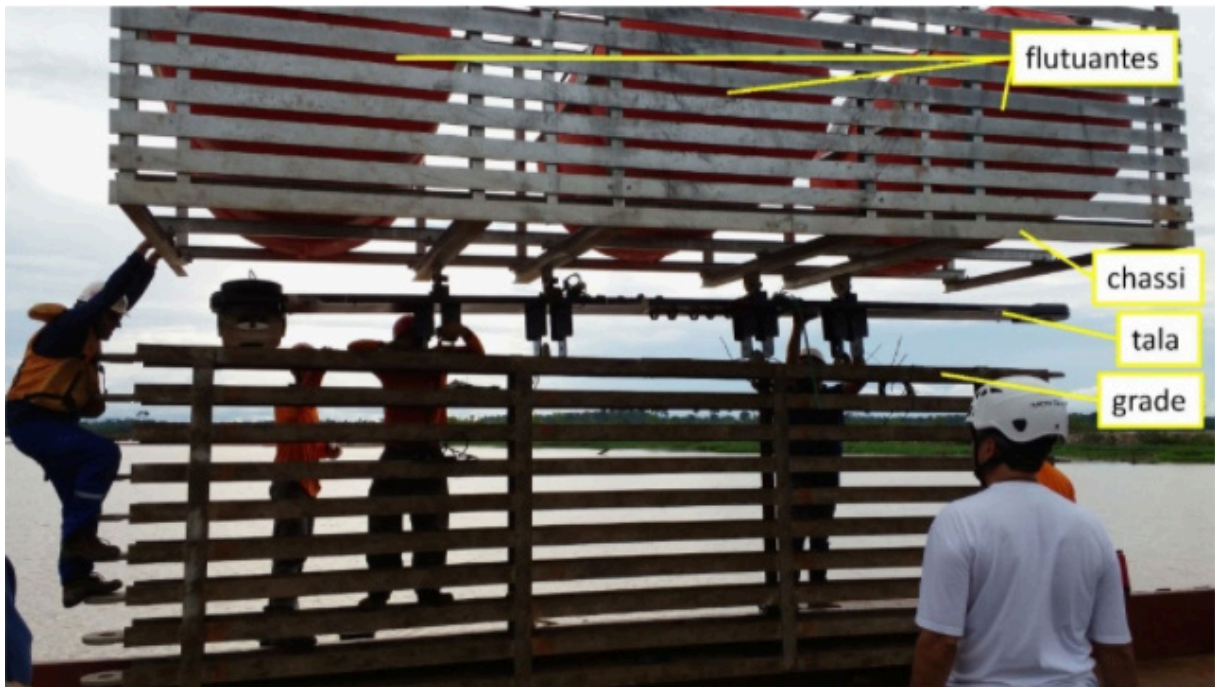
Nas seções a seguir, são descritos o sistema de contenção analisado, os procedimentos utilizados para obtenção de dados de campo, o processamento dos dados para cálculo das forças de tração e os correspondentes resultados.

## 2 Descrição do sistema de contenção de detritos

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 **Figura 1**. A grade é composta por dez perfis "I" horizontais, cujas abas servem de anteparo para os detritos.

Na **Figura 2**, é possível observar um trecho do sistema em operação, revelando o volume de material retido, e uma vista aérea do conjunto, abrangendo uma linha completa de *log boom* e seus dois pontos de ancoragem (estruturas robustas de concreto armado), denominados Bloco 11 e Pilar 12.

Figura 1 – Módulo do sistema de contenção de detritos



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 2 – Trecho do sistema em operação no período de cheia (a) e vista aérea sem detritos acumulados (b)

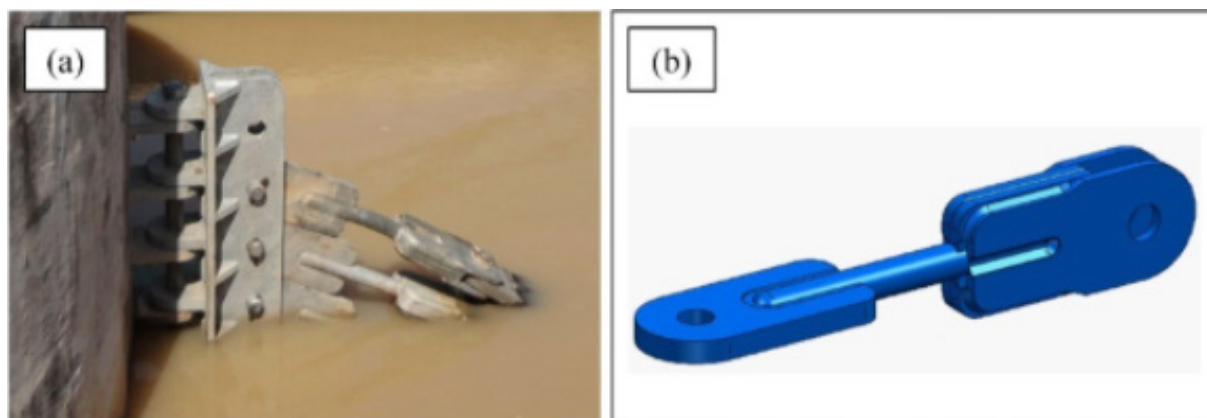


Fonte: (a) Elaborado pelos autores; (b) Google Earth

A interconexão entre módulos é realizada por meio de pinos instalados nos olhais das talas e das grades. Neste caso em estudo, não há ligação direta entre chassis vizinhos. Assim, os elementos estruturais primários do módulo são sua tala e os perfis de sua grade. Nota-se que a tala foi inserida como tentativa emergencial da Santo Antônio Energia para solução do problema de ruptura e não existia no projeto original do sistema.

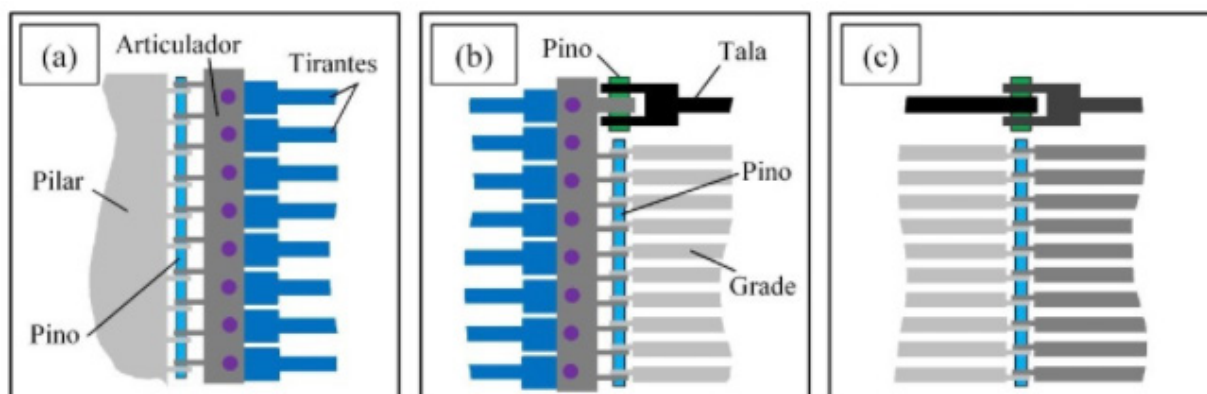
A linha formada pela sequência de módulos é então ancorada em pilares por suas duas extremidades, utilizando-se conjuntos de oito tirantes providos de elos especialmente desenvolvidos para a aplicação. Na Figura 3, pode-se observar a chegada dos tirantes superiores ao denominado Pilar 12 e o detalhe geométrico do projeto de um elo. Na Figura 4, são ilustradas, esquematicamente, as interfaces entre pilar, tirantes e módulos. Nas extremidades dos conjuntos de tirantes, são utilizadas peças denominadas articuladores, nos quais os tirantes são conectados por pinos horizontais. Todas as outras conexões são realizadas por pinos verticais, passantes por olhais dos componentes.

Figura 3 – Tirantes de ancoragem: (a) chegada ao pilar; (b) ilustração de um elo de tirante



Fonte: (a) elaborado pelos autores; (b) fornecido pela Santo Antônio Energia

Figura 4 – Esquemas de interfaces: (a) pilar-tirantes; (b) tirantes-módulo; (c) módulo-módulo



Fonte: elaborado pelos autores



### 3 Procedimento experimental

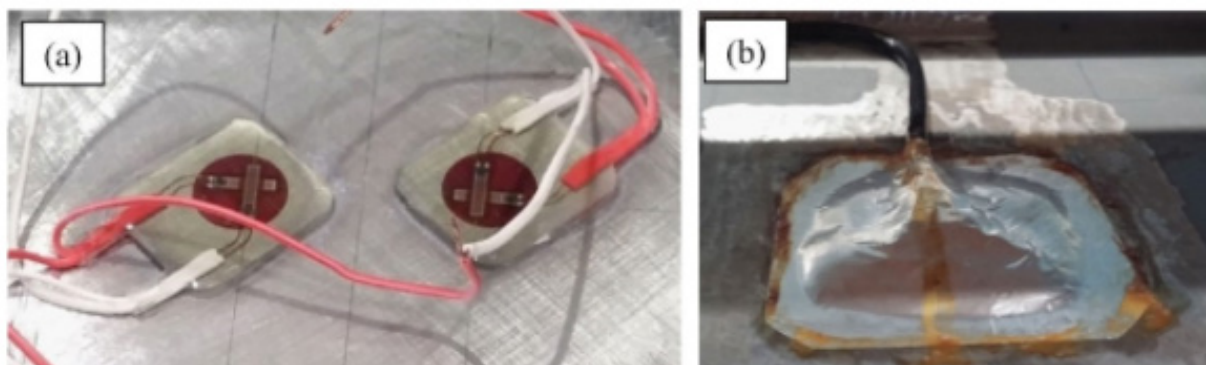
O ciclo de cheia do Rio Madeira é anual, ocorrendo alta de vazão entre os meses de janeiro e junho, período no qual não é possível realizar operações de instalação de componentes ou instrumentos e as operações de manutenção ficam limitadas. Assim, qualquer instrumentação deve ser instalada durante o 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 Figura 2(a), parte inferior, é possível observar um dos painéis solares utilizados, instalado sobre um chassi do sistema.

Para quantificar os esforços solicitantes principais sobre os elementos estruturais do sistema, que neste caso são forças de tração alinhadas com os eixos longitudinais desses elementos, foram utilizados extensômetros elétricos (*strain gages*) à prova d'água. Os sinais desses sensores foram adquiridos utilizando-se *data loggers* operando na frequência de amostragem de 100 Hz. Os dados foram gravados em cartões SD de 16 GB de capacidade. Para a alimentação, foram utilizados painéis solares de 250 W, em conjunto com um controlador de carga e um banco de baterias de 120 Ah (suficiente para fornecer energia elétrica para o sistema mesmo em uma eventual sequência de dias nublados). A cada dois meses, aproximadamente, foi necessário realizar a troca dos cartões de memória.

Foram instrumentados: a tala e cada um dos dez perfis das grades de dois módulos (posteriormente instalados nas posições 60 e 61 de um total de 89 módulos); e todos os 16 tirantes de ancoragem (oito em cada extremidade) da linha de *log boom* de interesse. Em função das condições ambientais adversas, notadamente possibilidade de dano por impacto de detritos de grande porte e abrasão pela argila em suspensão na água do Rio Madeira, cada elemento foi instrumentado com redundância, obtendo-se, nominalmente, duas medições por elemento.

Os extensômetros foram montados em ponte completa (HOFFMANN, 1989) para atenuar efeitos térmicos e aumentar a sensibilidade da medição. Foram aplicados filmes e resinas especiais para proteção das regiões instrumentadas contra a ação da água e de detritos. Nas talas e perfis das grades, foram aplicados, sequencialmente sobre os extensômetros, filme de PTFE, borracha butílica, neoprene, folha de alumínio, borracha nitrílica e resina epóxi, além de proteções metálicas para evitar impactos de troncos sobre os sensores (posicionadas estrategicamente para não alterar o estado de deformações nas regiões monitoradas). Na Figura 5, é possível observar o detalhe dos extensômetros à prova d'água colados à alma de um perfil e o resultado parcial da proteção (folha de alumínio).

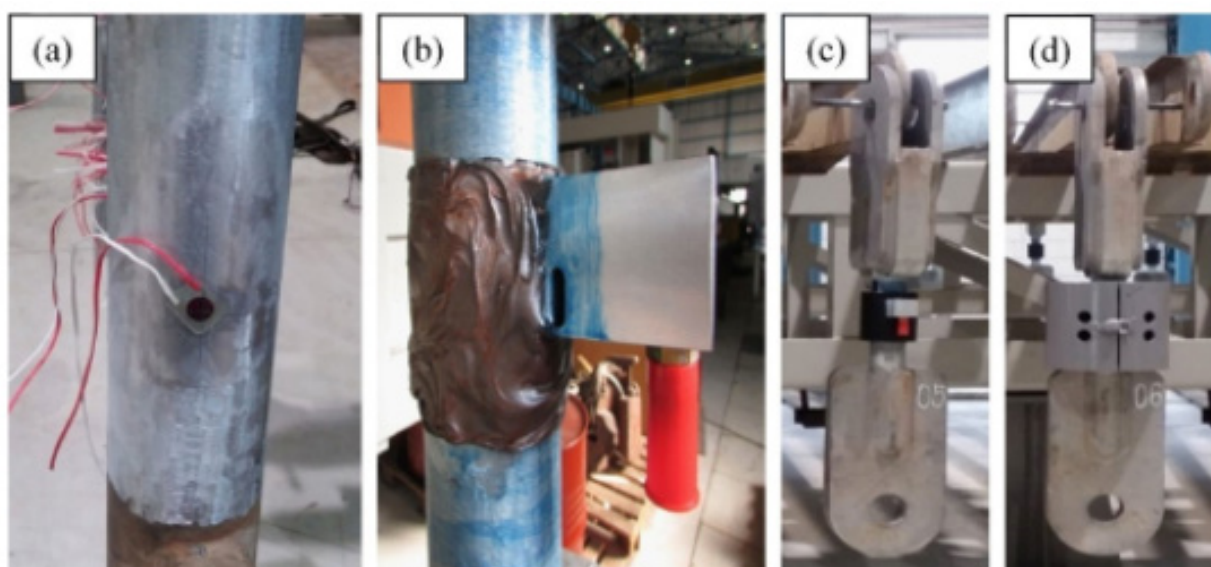
Figura 5 – Detalhe de extensômetros à prova d'água (a) e aspecto após camada protetora de alumínio (b)



Fonte: elaborado pelos autores

Nos elos dos tirantes, foi utilizado um procedimento diferente, pois foi possível a utilização de um bloco metálico com um conector à prova d'água para fazer a interface do sensor com o cabeamento. Após a colagem dos extensômetros às barras centrais dos elos, foi aplicada uma camada de resina epóxi para proteção contra água e uma camada de resina mais flexível para melhorar a resistência a impactos leves e à própria manipulação do elemento. Também foram instaladas proteções metálicas para evitar impactos de troncos sobre os sensores. Na Figura 6, podem ser observadas as várias etapas de instrumentação e proteção dos elos. Antes de serem despachados para a instalação em campo,

Figura 6 – Etapas da instrumentação dos elos dos tirantes: (a) colagem do extensômetro à prova d'água, (b) aplicação da resina epóxi, (c) aplicação da resina flexível, (d) montagem da proteção metálica



Fonte: elaborado pelos autores

os elos dos tirantes foram tracionados com forças de referência e os sinais de saída dos sensores registrados. Dessa forma, foi possível estabelecer uma relação direta entre as saídas dos sensores e as forças de tração. Ou seja, cada elo instrumentado funcionou como uma célula de carga, com faixa de medição aproximada de 0 kN a 500 kN.

Já os valores de força de tração das talas e perfis da grade, foram calculados utilizando-se os valores de deformação obtidos por meio dos sensores e as propriedades nominais geométricas das seções transversais dos elementos estruturais e da elasticidade de seus materiais, conforme descrito na **Equação 1**.

$$F = \varepsilon EA \quad (1)$$

Onde:

$F$  = força de tração no elemento

$\varepsilon$  = deformação medida por extensometria

$E$  = módulo de elasticidade do material

$A$  = área da seção transversal do elemento

Apesar do cuidado no projeto e na execução, houve falha de alguns sensores devido às condições ambientais adversas (17 % dos sensores em um período de cinco meses) e severidade na movimentação dos materiais durante a instalação (25 % dos sensores neste evento). Assim, foi necessário, preliminarmente, selecionar os sensores íntegros, cujas medições pudessem ser tomadas como válidas, com base na consistência de seus valores. As forças de tração sob cada elemento estrutural foram obtidas pela medição de um sensor considerado íntegro ou, quando seus dois sensores haviam permanecido íntegros, pela média das duas medições. Especialmente nos tirantes na sétima posição (segundo mais profundo), nas duas extremidades da linha de *log boom*, houve falha dos sensores, e suas forças de tração foram estimadas pelas médias das forças dos dois tirantes vizinhos.

Em resumo, após o processamento das medições, foram obtidos ao todo 38 valores de forças de tração dos seguintes elementos:

- 8 tirantes de ancoragem da linha ao Pilar 12;
- 1 tala do módulo instrumentado 1;
- 10 perfis da grade do módulo instrumentado 1;
- 1 tala do módulo instrumentado 2;
- 10 perfis da grade do módulo instrumentado 2;
- 8 perfis de ancoragem da linha ao Bloco 11.

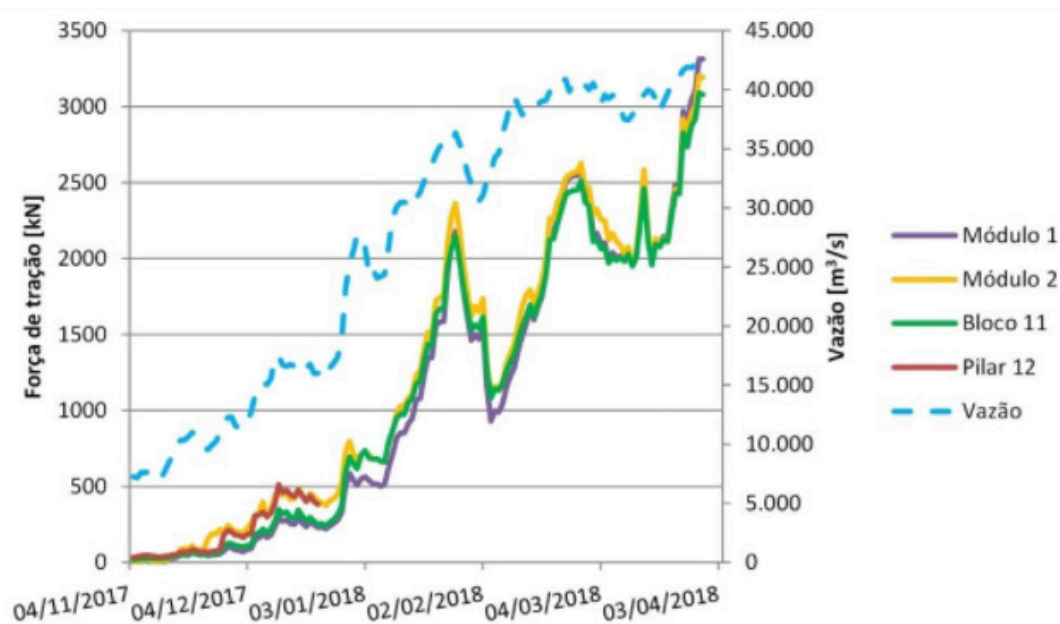
Além da quantificação das forças de tração sobre cada elemento, os valores de força também foram somados de forma a se obter a força de tração resultante em cada uma das quatro seções instrumentadas da linha.



## 4 Resultados e discussão

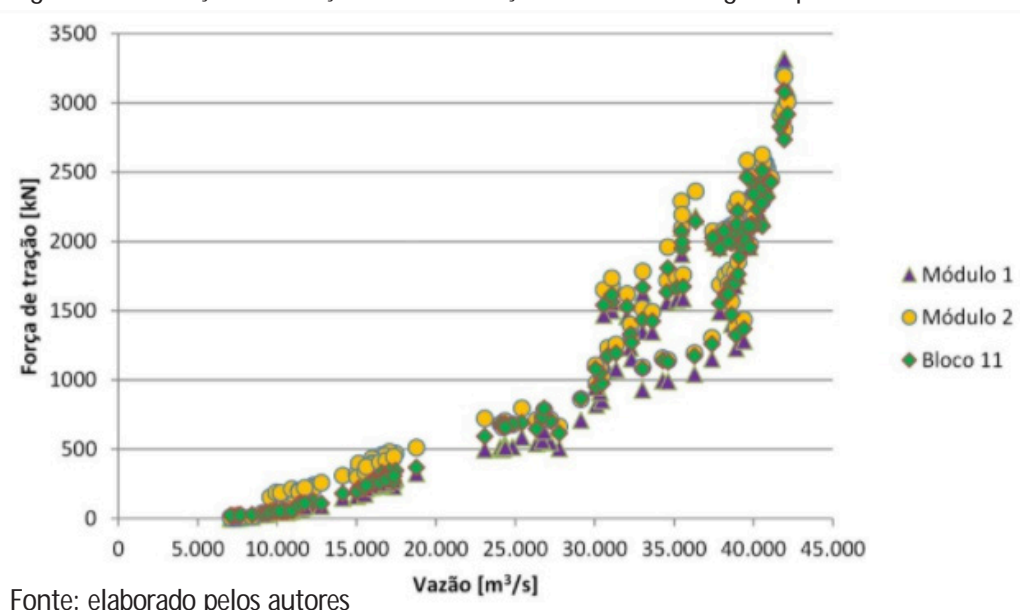
Na Figura 7, são apresentados os resultados obtidos, ao longo de cinco meses de coleta, para a soma das forças de tração sobre cada módulo instrumentado e sobre os tirantes de ancoragem da linha ao Bloco 11 e ao Pilar 12. Esses mesmos dados de força estão reapresentados na Figura 8 em função da vazão do Rio Madeira (os valores de vazão são médias diárias informadas ao IPT pela Santo Antônio Energia).

Figura 7 – Evolução das forças totais de tração da linha ao longo do período de cheia de 2018



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 8 – Evolução das forças totais de tração da linha ao longo do período de cheia de 2018



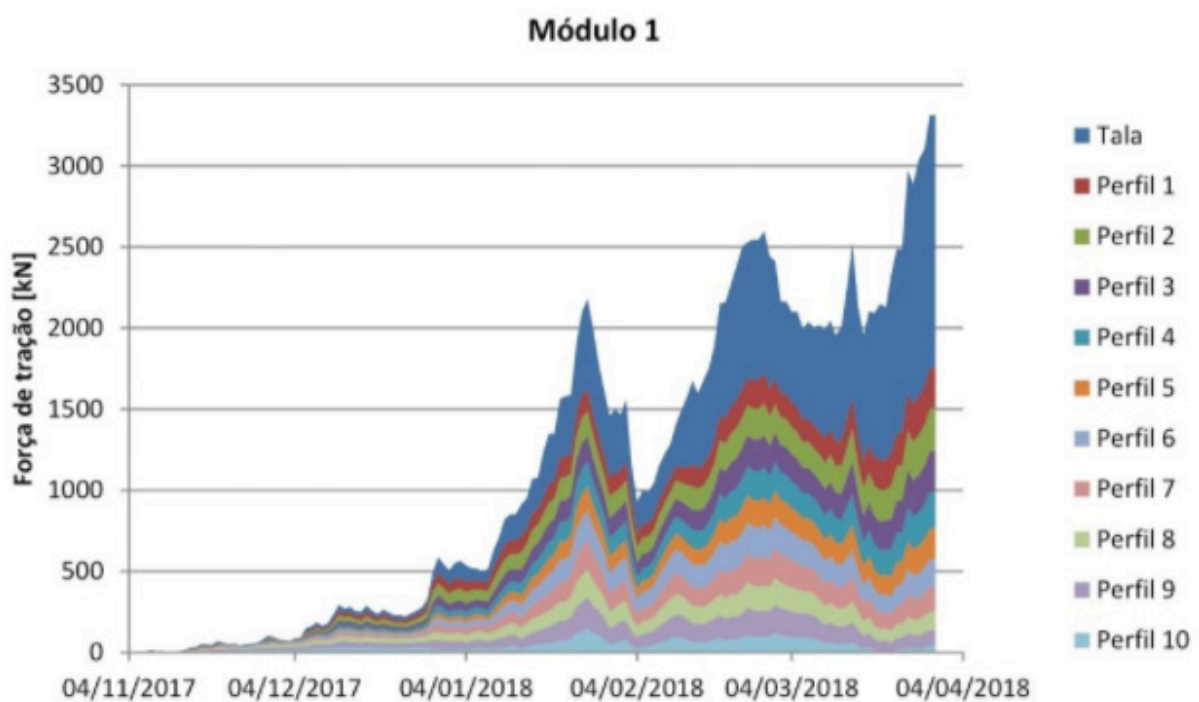
Fonte: elaborado pelos autores

Observa-se que há correlação entre as forças totais de tração na linha e a vazão do Rio Madeira. Devido à proximidade entre os módulos instrumentados e os tirantes de ancoragem ao Bloco 11, os valores de carga obtidos nessas seções da linha são semelhantes. Durante o pico de vazão da ordem de 42.000 m<sup>3</sup>/s, as forças resultantes de tração na linha chegaram a aproximadamente 3.300 kN. Particularmente nos tirantes do Pilar 12, devido a uma ocorrência de campo (desprendimento de um flutuador e danificação dos cabos do sistema), foram obtidas medições apenas durante o período de baixa vazão.

Nota-se que a força de tração na linha de *log boom* possui relação aproximadamente quadrática com a vazão do rio, o que é coerente com a relação quadrática esperada entre força de arrasto e velocidade da correnteza. Entre 30.000 m<sup>3</sup>/s e 40.000 m<sup>3</sup>/s, há maior dispersão dos resultados de força de tração que pode ser consequência da dinâmica de escoamento local (incluindo efeitos do acúmulo de troncos) ou da dinâmica do escoamento do rio.

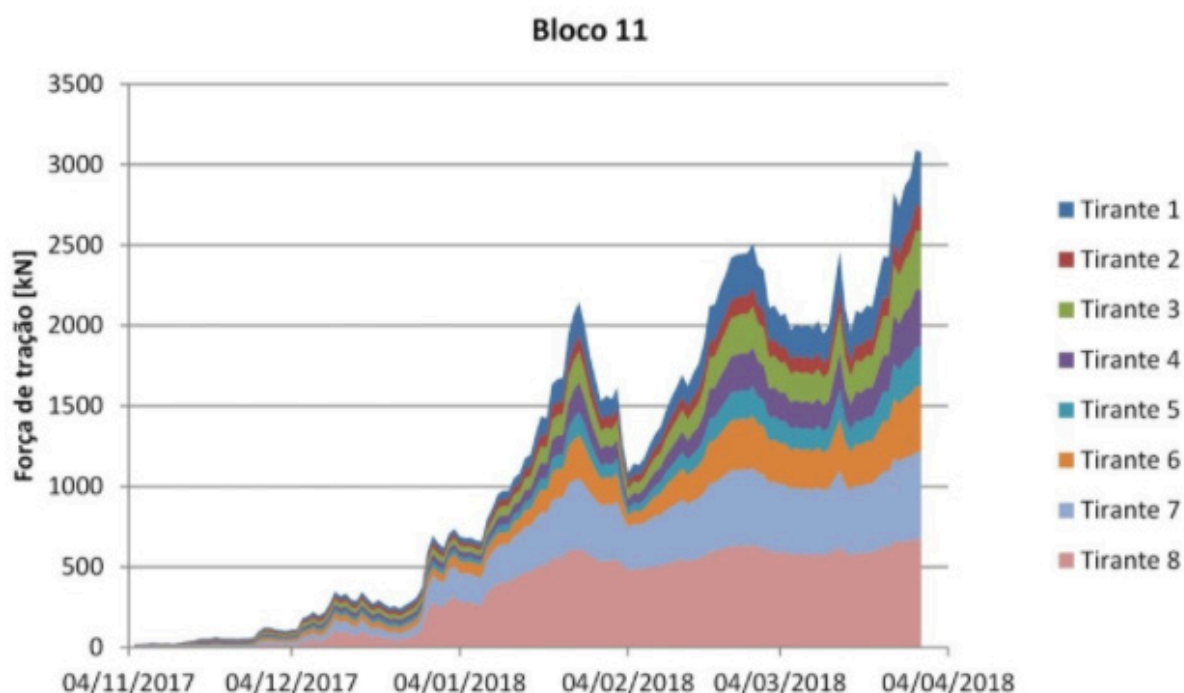
Quanto à distribuição de carga, podem ser observadas nas Figuras 9 e 10 as forças de tração obtidas em cada elemento de um dos módulos e nos tirantes de ancoragem da linha ao Bloco 11.

Figura 9 – Distribuição da carga de tração entre a tala e perfis da grade de um módulo instrumentado



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 10 – Distribuição da carga de tração entre os tirantes de ancoragem ao Bloco 11



Fonte: elaborado pelos autores

Observa-se que há certa uniformidade de carregamento sobre os perfis da grade, mas, principalmente, que a força de tração sobre a tala é maior que as forças de tração sobre os perfis, alcançando valores de 30 % a 40 % da carga total da linha para altas vazões. Essa característica indica que as talas suportam as forças de arrasto atuantes sobre os chassis do *log boom*, enquanto as grades suportam as forças de arrasto geradas sobre elas próprias. Como informado na seção de descrição do sistema de *log boom*, originalmente, os módulos não tinham a tala de reforço. Assim, o primeiro perfil suportava a força de arrasto do chassi. A concentração de carga sobre esse perfil na configuração original sem tala deve ter sido a causa da ruptura anterior de outra linha de *log boom*, pois, por projeto, havia sido assumido um carregamento uniforme com 10 % da carga total sobre cada um dos dez perfis da grade enquanto, na realidade, o primeiro perfil estava suportando aproximadamente 40 % da carga total (estimativa baseada na parcela de carga da tala na configuração avaliada em campo).

Em relação aos tirantes, houve maior carregamento no Tirante 8 (inferior). Lembra-se que a carga no Tirante 7, em particular, foi estimada pela média entre as cargas dos Tirantes 6 e 8. O Tirante 2 foi menos solicitado, enquanto os demais tirantes tiveram carregamentos mais próximos entre si. Não é possível identificar uma tendência de distribuição segundo um perfil bem definido (uniforme, linear, quadrático, etc.). Considerando-se os piores casos, foram identificadas concentrações de carga de 20 % a 25 % sobre um tirante, aproximadamente o dobro do esperado numa distribuição de carga uniforme sobre oito tirantes (na qual o carregamento em cada tirante seria igual a 12,5 % da carga total).

## 5 Conclusões

A instrumentação proposta foi implementada com sucesso, permitindo a caracterização das forças sobre o sistema de contenção de detritos em análise, tanto em relação à carga total da linha, quanto à distribuição de carga entre seus elementos estruturais primários. Os métodos de proteção de sensores e o sistema de geração de energia projetado para acionamento do sistema de aquisição de sinais funcionaram adequadamente. Foram identificadas concentrações de carga sobre alguns elementos, que explicam ocorrências anteriores de ruptura de componentes do sistema. Essas características serviram de base para posterior a definição de novos critérios de dimensionamento de linhas de *log boom* e adequação das linhas existentes na Hidrelétrica Santo Antônio. Desde então, não foram registradas novas ocorrências da mesma natureza.

## 6 Agradecimentos

Agradecemos à Santo Antônio Energia pelo suporte operacional e financeiro deste projeto (PD-06683-0116/2016 do Fundo de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL).

## 7 Referências

ABDELDOUR, E., ABDELNOUR, R., COMFORT, G., TRAN, P. Design and installation of two permanent booms at La Romaine-2 to resist ice, retain debris and serve as safety booms. In: WORKSHOP ON THE HYDRAULICS OF ICE COVERED RIVERS, 18th, 2015, Quebec. *Proceedings...* Quebec: CGU HS CRIPE, 2015.

ALMEIDA, R. Z. H.; CORDEIRO, J. C. S.; LOPES, L. E. Estimativas experimental e computacional de carga em sistema fluvial de contenção de detritos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, X., 2018, Salvador. *Proceedings...* Rio de Janeiro, ABCM, 2018.

GREEN, S., GARFITT, J. R., YOUNG, G. G. Log boom drag measurement at sea. *Marine Technology*, v. 31, n. 2, p. 145-148, 1994.

HAMID, H. A., RAHMAN, M. M., MUNISAMY, K. M., ABUSTAN, I. Development of floating slender structure system for unprotected water intake in Tenom Pangli hydro power station. In: NATIONAL GRADUATE CONFERENCE, 3rd. 2015, Putrajaya. *Proceedings...* Putrajaya, Universiti Tenaga Nasional, 2015.

HOFFMANN, K., *An Introduction to measurement using strain gages*, Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1989.

KATSUNO, E. T., CASTRO, F. S., DANTAS, J. L. D. Debris containment grid CFD validation with towing tank tests. In: AMERICAN TOWING TANK CONFERENCE, 30th, 2017. West Bethesda. *Proceedings...* West Bethesda: 2017.

TYLER, R. N., *River debris: causes impacts, and mitigation techniques*. Fairbanks: Alaska Center for Energy and Power, 2011.

WAHL, T. L., *Investigation of debris and safety boom alternatives for bureau of reclamation use*. Denver: U.S. Department of the Interior, 1992.

DOI 10.34033/2526-5830-v4n14-6

