



Spectral Analysis of Pressure Fluctuations Downstream of an Inverted Segment Gate in Navigation Locks

Mariane Kempka¹, Mauricio Dai Prá², Luiz A. M. Endres³ & Marcelo G. Marques⁴

Resumo: Os sistemas de transporte de carga em vias navegáveis interiores têm baixo custo e baixa emissão de carbono em comparação com o transporte rodoviário e ferroviário, resultando em benefícios sociais, ambientais e econômicos. Contudo, em rios com a presença de barragens, a grande diferença de altura entre montante e jusante implica na necessidade da implantação de eclusas de navegação. A operação dessas estruturas pressupõe cuidados hidráulicos diversos, podendo-se destacar as altas velocidades no interior dos condutos, que podem resultar em processos erosivos produzidos por desgaste ou mesmo cavitação, além de excessivos esforços nas amarras das embarcações. Este estudo foi realizado com o objetivo de caracterizar o comportamento do fluxo a jusante de comportas de controle de vazão em condutos de enchimento/esvaziamento de câmaras de eclusas. A partir dos resultados de amostras temporais de pressões obtidas em modelo físico, foi conduzida uma análise espectral para diferentes aberturas de comportas e diferentes vazões. Essa análise auxilia na avaliação da possibilidade de ocorrência do fenômeno da ressonância, que amplifica as amplitudes das vibrações e pode levar a estrutura a falhar ou colapsar. A avaliação do escoamento neste trabalho identificou frequências dominantes menores que 5 Hz, com destaque especial para 0,25 Hz nos casos de maior abertura da comporta.

Abstract: Waterway transport offer low cost and low carbon emissions compared to road and rail transport, resulting in social, environmental, and economic benefits. However, in rivers with dams, the significant height difference between upstream and downstream necessitates the implementation of navigation locks. The operation of these structures requires various hydraulic precautions, notably the high speeds within the conduits, which can lead to erosive processes caused by wear or cavitation, as well as excessive strain on the vessel moorings. This study aims to characterize the flow behavior downstream of flow control gates in the filling/emptying conduits of lock chambers. Based on temporal pressure samples obtained from a physical model, a spectral analysis was conducted for different gate openings and flow rates. This analysis aids in evaluating the possibility of resonance phenomena, which amplify the amplitudes of vibrations and can cause structural failure or collapse. The flow assessment in this study identified dominant frequencies below 5 Hz, with a particular emphasis on 0.25 Hz in cases of greater gate opening.

Palavras-Chave:

Modelos físicos hidráulicos, Eclusas de navegação, Análise espectral, Pressões

Keywords:

Hydraulic physical model, Navigation locks, Spectral Analysis, Pressures

1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná (marianekempka@utfpr.edu.br)

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (mdaipra@gmail.com)

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (endres@ufrgs.br)

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (mmarques@iph.ufrgs.br)



INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte de carga em vias navegáveis interiores desempenham um papel fundamental no comércio de muitos países. Eles têm baixo custo e baixa emissão de carbono em comparação com o transporte rodoviário e ferroviário (Mei *et al.*, 2023a), além disso contribui para a redução do fluxo de caminhões nas rodovias, o que diminui os acidentes de trânsito, reduz os custos hospitalares e possibilita menores gastos com a manutenção das rodovias (Kempka, 2014). Por outro lado, Mei *et al.*, (2023), apontam como primeiro obstáculo, para o emprego deste modal, a grande diferença de altura entre montante e jusante quando barragens estão implementadas em um rio.

Para transpor os desníveis dos rios e as barragens são utilizadas as eclusas de navegação, que são estruturas hidráulicas cuja finalidade é transpor de nível as embarcações por meio de enchimento e esvaziamento da câmara.

Dentre as maiores dificuldades no projeto e na operação dessas obras hidráulicas estão as agitações da superfície da linha d'água no interior da câmara (importante fator de segurança para as embarcações); as altas quedas, que proporcionam altas velocidades no interior dos condutos e, conseqüentemente, a diminuição das pressões, favorecendo o fenômeno de erosão (desgaste) e/ou cavitação; quantificação dos esforços nas amarras que são utilizadas para evitar o choque nas paredes e entre as embarcações (Finger; Marques; Kroeff, 2012).

As oscilações periódicas nas pressões podem ser conduzidas pelo escoamento entre as câmaras e causar a agitação da linha d'água aumentando os esforços nas amarras bem como a possibilidade de choque das embarcações com a estrutura, sendo indesejáveis na operação de enchimento e esvaziamento das eclusas (Mei *et al.*, 2023). Além disso, como a vazão aduzida (afluente) para a câmara não é constante ao longo do tempo, sendo função do desnível (entre as câmaras - em caso de câmaras sucessivas ou entre câmara e canal de navegação) e o grau de abertura da comporta, formam-se oscilações que podem atingir grandes amplitudes aumentando os esforços nas amarras e representando, assim, um risco para as embarcações (Xu *et al.*, 2018; Liu; Hu; Xue, 2021).

Natale & Savi (2000) expõem que a operação do sistema de enchimento e esvaziamento da câmara de eclusas de navegação gera uma onda longa transitória que se propaga tanto para o canal de aproximação como para a câmara. Liu; Hu; Xue, 2021 complementam que uma estrutura complexa de campo de fluxo e turbulência instável são geradas no sistema de enchimento-esvaziamento. Somado ao aumento na altura de elevação, a intensidade da turbulência do fluxo nas tubulações é grande sob a condição de alta vazão e velocidade.

ANA (2012) também expõe a necessidade do controle das operações de enchimento e esvaziamento pois as ondas estacionárias geradas pela variação de vazão, inerentes ao regime de escoamento não permanente, bem como aquelas formadas pelos turbilhões, são uninodais, o que faz com que as inclinações da linha d'água sejam máximas e, conseqüentemente, máximos os esforços nas embarcações devidos à componente horizontal dos seus pesos.

As frequências naturais, ou frequências ressonantes, são aquelas nas quais um sistema tende a vibrar, com maiores amplitudes, quando perturbado, sem a influência de forças externas contínuas. Cada sistema físico possui suas próprias frequências naturais, determinadas por suas propriedades físicas como massa, rigidez e forma. Conhecer essas frequências é essencial para garantir a segurança e eficiência de estruturas como barragens e eclusas.

Uma das formas de diminuir os esforços e, portanto, as velocidades implicam no aumento do coeficiente de resistência do sistema de enchimento-esvaziamento, reduzindo a taxa de fluxo de água. No entanto, isso aumenta o tempo de enchimento e reduz a eficiência da navegação (Mei *et al.*, 2023).

Souza (2014) assinala que os escoamentos reais que apresentam interações com paredes, separação e instabilidades produzem estruturas de grande escala, o que significa baixas frequências. Além disso, a maioria dos estudos mostra grande energia espectral em baixas frequências, ou seja, 0 a 20 Hz. A exemplo: Lencastre (1961) encontrou frequências entre 1 e 4 Hz, Ramos (1988) entre 0 e 3 Hz. Puertas e Dolz (2005) indicam uma faixa de frequências dominantes entre 0 e 2 Hz.

França (2022) abordou um procedimento analítico simplificado para determinar as frequências naturais sob vibrações livres em um sistema barragem-reservatório e eclusa-reservatório. O autor aponta que a pressão hidrodinâmica convectiva (*sloshing*) está associada a oscilações de baixa frequência e, para os parâmetros físicos, mecânicos e geométricos da eclusa de Tucuruí, o efeito *sloshing* permanece associado a uma vibração de baixa frequência, sendo que a primeira frequência fundamental de ressonância identificada foi de 7,07 Hz.

MÉTODOS

Os dados experimentais, utilizados neste trabalho, foram obtidos no modelo físico de laboratório, com características genéricas, de uma comporta utilizada em eclusa de navegação. O modelo, localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS, se comparado com o projeto de concepção das eclusas de Tucuruí e de Santo Antônio, admite a escala geométrica 1:16. Durante a execução dos ensaios foram registradas as pressões por meio de transdutores de pressão. As tomadas de pressão foram instaladas a jusante da comporta em conduto de seção quadrada com 25 cm de arestas, sendo os espaçamentos variáveis entre 5 e 20 cm, conforme pode ser visto na Figura 1. Para a obtenção dos dados a partir dos transdutores de pressão foram necessários 10 minutos de ensaio com frequência de registro de 256 Hz. Os valores foram registrados, inicialmente, em Volts posteriormente convertidos e armazenados em altura piezométrica (metros de coluna de água). Os detalhes acerca da metodologia dos ensaios em modelo podem ser conferidos em Kempka (2014).

As análises, neste trabalho, envolvem as vazões de 32 e 60 L/s com porcentagens de abertura da comporta de 10%, 20%, 30%, 40%, 60 e 80%.

Na figura 1 estão assinaladas as tomadas de pressão analisadas no presente trabalho: T9, T21, T4 e T6 localizadas na porção do conduto mais próxima da comporta, tomadas T17 e T19 na porção média e a última tomada T26, mais próxima de um reservatório localizado a jusante do conduto.

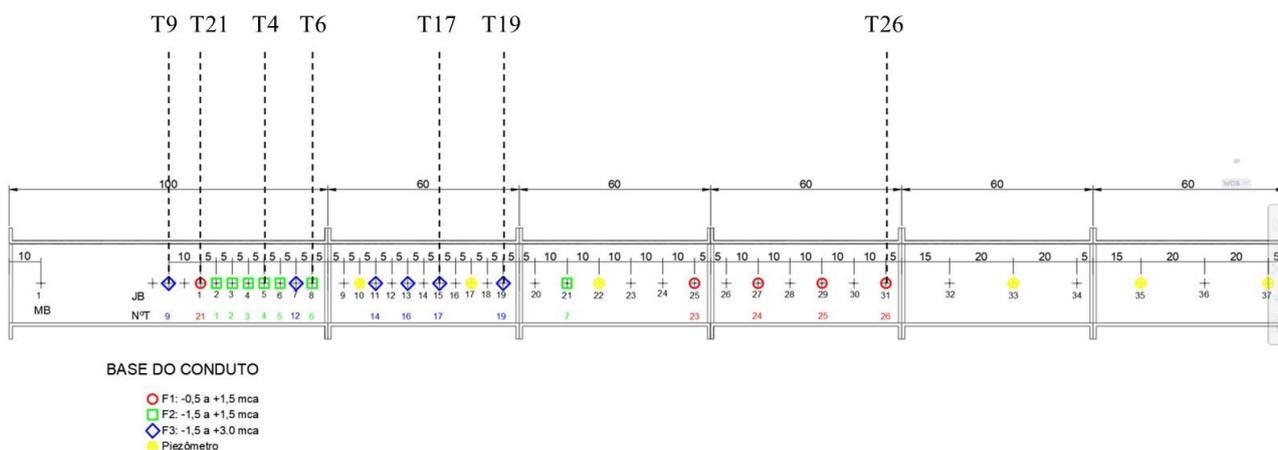


Figura 1 – Tomadas de pressão instaladas no modelo e as tomadas analisadas neste trabalho

A determinação dos diagramas de densidade espectral (m^2/Hz) foi realizada a partir das amostras temporais de pressão coletadas no eixo central da base do conduto, utilizando o pacote de processamento de sinais do software MATLAB, pela rotina PWELCH, utilizando a janela de Hanning, cada uma contendo 1024 pontos, com superposição de 50%.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a vazão de 32 L/s verifica-se que, para as tomadas próximas à comporta, a energia contida nos espectros (até 5 Hz) é bem distribuída, sem a presença de uma frequência dominante, especialmente até a abertura de 40% (Figura 3 *a, c, e e g*). A partir da porcentagem de abertura de 40% a energia nos espectros acima de 1 Hz diminui de forma persistente e aumentando a energia na faixa do espectro em torno de 0,2 Hz (Figura 3 *i e k*). Para as tomadas intermediárias (T17 e T19), as frequências menores que 2 Hz apresentam maior energia já para a menor abertura. Também, assim como para as tomadas mais a montante, é para a abertura de 40% que as frequências da ordem de 0,2 Hz passam a ser dominantes.

Outro aspecto identificado, diz respeito às tomadas T9 e T26. A energia é consideravelmente menor nas duas posições, sendo que T9 está localizada sob a comporta e a T26 está na posição mais a jusante da comporta. A tomada T9 apresenta o mesmo comportamento das tomadas próximas, mas a T26 apresenta um pico destacado em torno da frequência de 1,25 Hz, notado também, embora de forma sensível, nas tomadas T9 e T21, mais próximas da comporta, no caso de 10% de abertura.

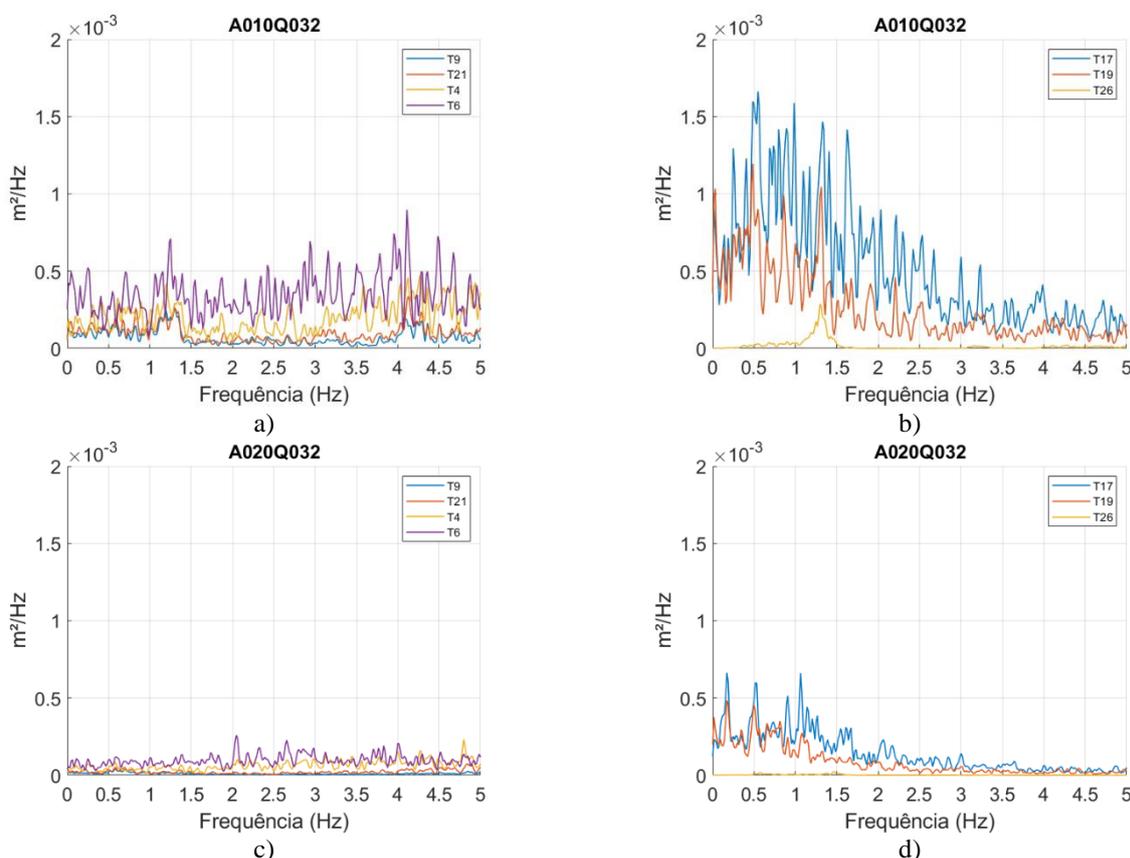


Figura 2 – Densidade espectral (m²/Hz) para a vazão de 32 L/s (Q032) e diferentes porcentagens de abertura da comporta: *a*) e *b*) A010 (10%); *c*) e *d*) A020 (20%);

continua



continuação

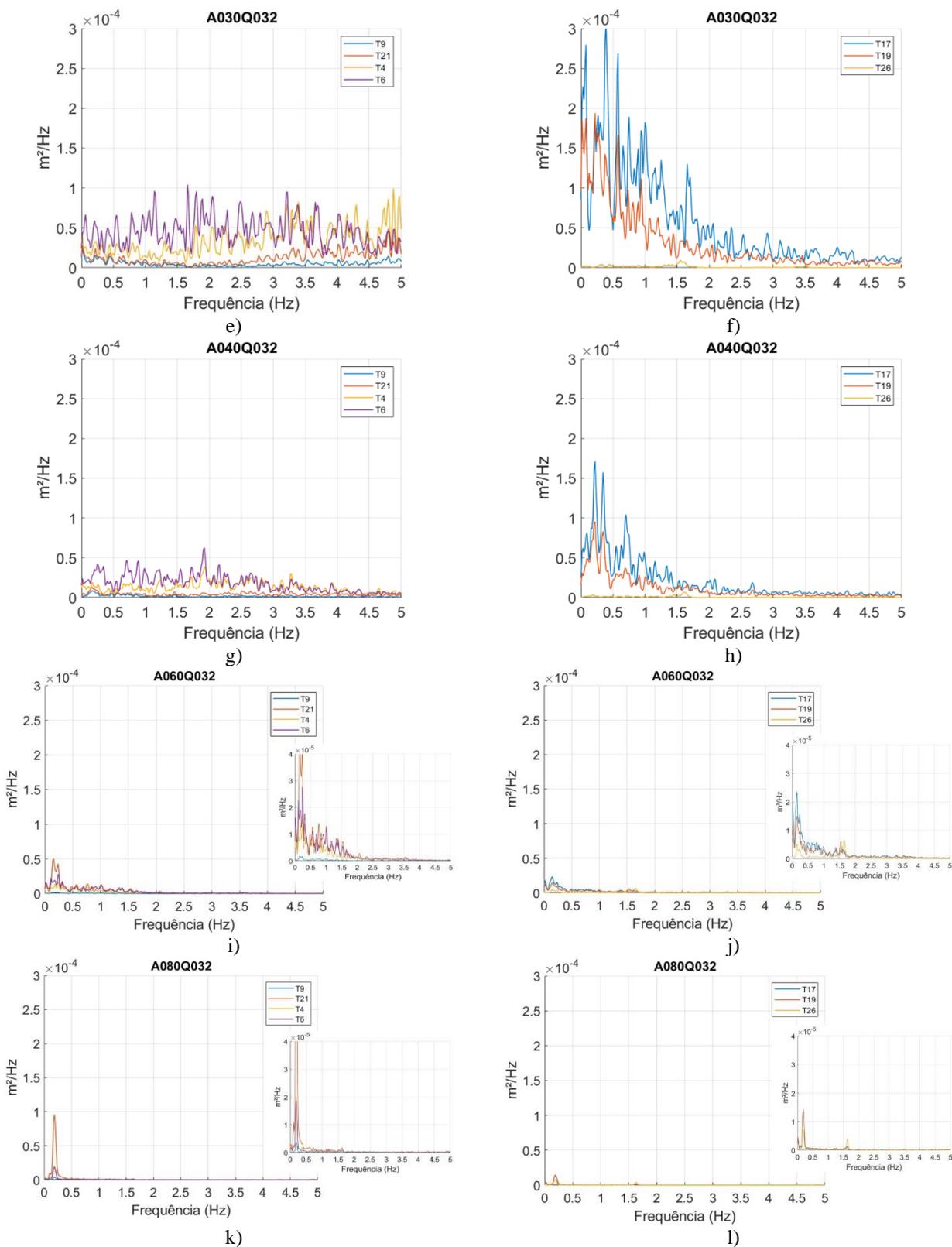


Figura 3 – Densidade espectral (m^2/Hz) para a vazão de 32 L/s (Q032) e diferentes porcentagens de abertura da comporta: e) e f) A030 (30%); g) e h) A040 (40%); i) e j) A060 (60%); k) e l) A080 (80%)



A partir da análise da vazão de 60 L/s, nas tomadas próximas à comporta a energia contida nos espectros (até 5Hz) é bem distribuída, sem a presença de uma frequência dominante até a abertura de 40% (Figura 5 a, c, e e g). A partir da abertura de 60% a energia nos espectros acima de 1 Hz diminui de forma persistente, com o aumento relativo da energia na faixa do espectro em torno de 0,2 Hz (Figura 5 i, k, m e o). Para as tomadas intermediárias (T17 e T19), as frequências menores que 2 Hz apresentam maior energia já para a menor abertura. Já para as tomadas mais a montante e para a vazão de 32 L/s, é para a abertura de 40% que as frequências da ordem de 0,2 Hz passam a ser dominantes. O pico local, em torno de 0,2 Hz, ocorre para a vazão de 60 L/s a partir de 60% de abertura.

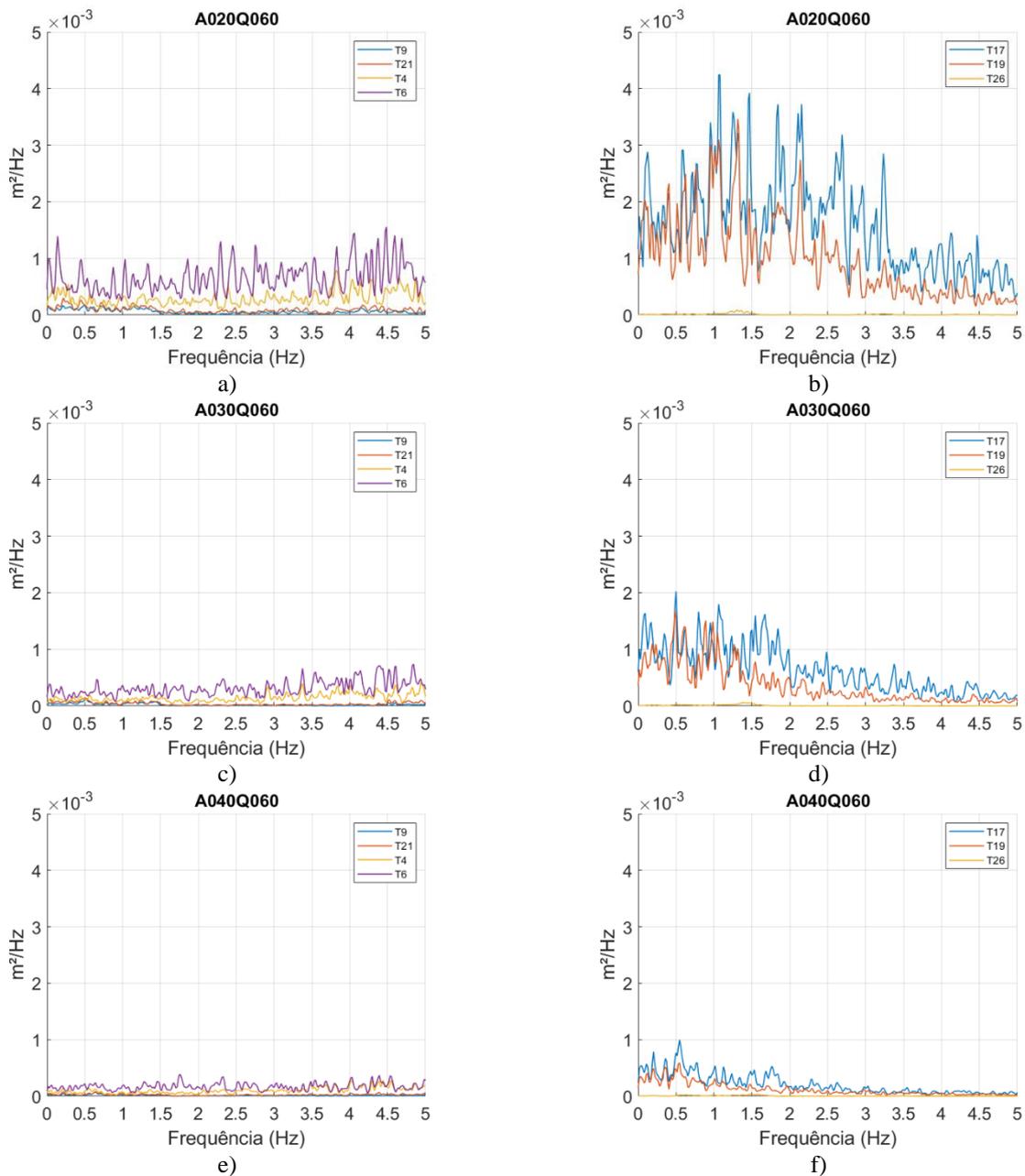


Figura 4 – Densidade espectral (m^2/Hz) para a vazão de 60 L/s (Q060) e diferentes percentagens de abertura da comporta: a) e b) A020 (20%); c) e d) A030 (30%); e) e f) A040 (40%);

continua

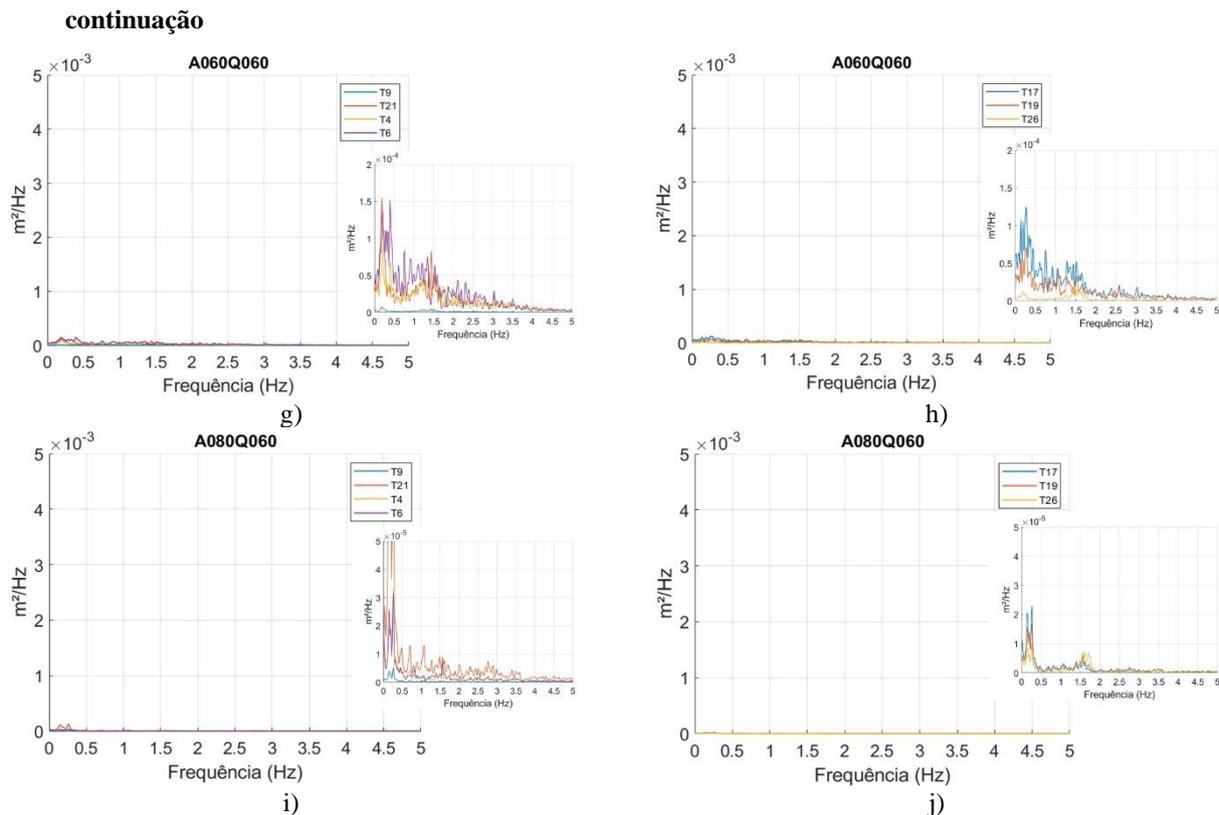


Figura 5 – Densidade espectral (m^2/Hz) para a vazão de 60 L/s (Q060) e diferentes porcentagens de abertura da comporta: g) e h) A060 (60%); i) e j) A080 (80%)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da distribuição de energia de flutuação das pressões em frequência permite identificar a existência de periodicidades com frequências dominantes, em torno das quais a máxima energia de pressão se concentra. Este tipo de análise é crucial quando o parâmetro em estudo apresenta periodicidades que não são facilmente visíveis a olho nu, devido à superposição de diversas componentes em frequências e às variações aleatórias inerentes ao fenômeno. Além disso, essa análise ajuda a avaliar a possibilidade de ocorrência do fenômeno da ressonância, que amplifica as vibrações e pode levar a estrutura a falhar ou colapsar.

A avaliação do escoamento neste trabalho identificou frequências dominantes menores que 5 Hz, com especial destaque a 0,25 Hz nos casos de maior abertura da comporta. França (2022) em seus estudos, em escala real, identificou frequências naturais associadas à interação fluido-estrutura em torno de 4,5 Hz (análise pautada na Eclusa de Tucuruí) e Espada (2010) encontrou frequências entre 2,70 Hz e 3,90 Hz.

Em virtude da distribuição da energia pode-se concluir que a flutuação das pressões é maior próximo da comporta, tomadas T9, T21, T4 e T6, e para menores aberturas até 30% para 32 L/s, Figura 2 a, c, e e g, e até 40% para 60 L/s, Figura 3 a, c e e. Esse resultado é corroborado por Palauro (2012): “as maiores flutuações ocorrem próximo à comporta, cerca de 40 cm (em modelo), devido à contração do escoamento e às altas velocidades.”



BIBLIOGRAFIAS

- Espada, M. I. R. (2010). *Desenvolvimento de modelos para análise dinâmica de estruturas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxiliares.* (Dissertação). Instituto Superior De Engenharia De Lisboa Departamento de Engenharia Civil. <https://core.ac.uk/download/pdf/47129921.pdf>
- Finger, G. R.; Marques, M. G.; Kroeff, P. S. (2012). *Medição dos Esforços nas Amarras das Embarcações em uma Eclusa de Navegação.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.4. 249-258. [10.21168/rbrh.v17n3.p241-250](https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p241-250)
- França, D. de O. J. (2022). *Estudo analítico-numérico e experimental de problemas de interação dinâmica fluido-estrutura com aplicação a barragens e eclusas de concreto.* Universidade De Brasília.
- Kempka, M. (2014). *Estimativa da distribuição longitudinal das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida.* (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento.
- Liu, J.; Hu, Y.; Li, Z.; Xue, S. (2021). *Risk Analysis and Optimization of Water Surface Deviation from Shafts in the Filling–Emptying System of a Mega-Scale Hydro-Floating Ship Lift* Water, 13 , 1377. <https://doi.org/10.3390/w13101377>
- Lencastre, A. *Descarregadores de lâmina livre: bases para o seu estudo e dimensionamento.* Lisboa: LNEC, Memória 174. 137 f. 1961.
- Mei, L., A, J., Li, Z., Zhang, S., & Ding, L. (2023). *Study of Navigable Flow Conditions in the Intermediate Channel of Decentralized Cascade Locks.* Water (Switzerland), 15(19). <https://doi.org/10.3390/w15193394>
- Natale, L., & Savi, F. (2000). *Minimization of filling and emptying time for navigation locks.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 126(6), 274–280. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2000\)126:6\(274\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:6(274))
- Palauro, C. (2012). *Análise das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação.* (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento.
- Puertas, J. Dolz, J. *Plunge pool pressures due to a falling rectangular jet.* Journal of Hydraulic Engineerig ASCE. Technical Notes. 404 - 407 p. 2005
- Ramos, C. M. *Hydrodynamic actions on hydraulic structures.* LNEC-65/53/315. Lisboa, 1988.
- Souza, F. J. de. *Turbulência em escoamentos com partículas.* IX Escola de Primavera de Transição e Turbulência, São Leopoldo. p.1-32, set. 2014.
- Xu, J.; Chen, Q.; Li, Y.; Zhou, J.; An, J.; Yan, X.; Guo, Y. (2018) *Study on the Hydrodynamic Resistance Moment of Horizontally-Framed Miter Gates.* Water. 10, 1345. <https://doi.org/10.3390/w10101345>