

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **DETERMINAÇÃO DO TRECHO CRÍTICO EM CONDUTOS RETANGULARES A JUSANTE DE COMPORTAS DEVIDO AOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO NO CONCRETO**

*Douglas da Silveira de Lima<sup>1</sup>; Bruna Moreira Sell<sup>2</sup>; Priscila dos Santos Priebe<sup>3</sup>; Mariane Kempka<sup>4</sup>; Aline Saupe Abreu<sup>5</sup>, Mauricio Dai Prá<sup>6</sup>*

**RESUMO** – O Brasil apresenta alto número de rios navegáveis, tendo muitos rios extensos, de grande largura, com profundidades elevadas e declividades acentuadas. Essas declividades são interessantes para gerar energia elétrica através da instalação de usinas hidrelétricas, porém as mesmas acabam reduzindo ou até mesmo impossibilitando totalmente a navegabilidade do rio em que estão instaladas. Sabendo que as eclusas são o meio mais comum para transposição destes desníveis, seu projeto e operação são de grande importância para evitar danos em sua estrutura. A região a jusante da comporta de aquedutos de eclusas é uma área com intensa turbulência e com grande instabilidade de pressões, sendo um dos trechos mais críticos no projeto. Neste trecho há grande riscos de erosão no concreto, sendo um parâmetro de projeto avaliar a extensão do trecho mais solicitado para reforço de concreto e rotinas de manutenção em uma região dimensionada e caracterizada.

**ABSTRACT**– Brazil has a high number of navigable rivers, with many long, wide, with high depths and steep slopes. These slopes are interesting to generate electricity through the building of hydroelectric plants, but they end up reducing or even totally preventing the navigability of the river in which they are installed. Knowing that navigation locks are the most common means of transposing these differences, its project and operation are very important to avoid damage to its structure. The region downstream of the navigation locks aqueducts is an area with a lot of turbulence and huge instability of pressures, being one of the most critical parts of the project. In this section there are great risks of erosion in the concrete, being of great importance to evaluate the extension of the critic section to reinforce concrete and maintenance routines.

**Palavras-Chave** – eclusas de navegação; erosão em concreto.

### **INTRODUÇÃO**

O funcionamento de eclusas de navegação está baseado no princípio de vasos comunicantes, com o enchimento ou esvaziamento de uma câmara, até que se alcance o nível desejado a fim de proporcionar a transposição de nível. O processo de enchimento ou esvaziamento de eclusas é característico do tipo de eclusa. Segundo USACE (1995) para efeitos de projeto pode-se dividir as

<sup>1</sup>IPH/UFRGS - douglasdasilveiradelima@gmail.com; <sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas - brunamoreirasell@gmail.com; <sup>3</sup>IPH/UFRGS - priscilaspriebe@gmail.com; <sup>4</sup>UTFPR - marianekempka@utfpr.edu.br; <sup>5</sup>IPH/UFRGS - alsaupe@gmail.com; <sup>6</sup>IPH/UFRGS - mauricio.daipra@ufrgs.br.

eclusas em três grandes grupos, sendo eles: baixa queda, com desnível de até 10 metros; média queda, com variações de nível de 10 a 15 metros; e alta queda, com desnível superior a 15 metros.

De acordo com Kempka (2011) no Brasil existe uma tendência, nas barragens, de se construir eclusas de alta queda, uma vez que essas eclusas normalmente são construídas devido aos aproveitamentos hidrelétricos e muitas vezes são construídas mais de uma eclusa. Segundo Santos (1998) apud Kempka (2011) as eclusas classificadas como de alta queda (USACE, 1995) possuem diversas limitações entre as quais se destacam:

- a) volume das eclusagens, que em hidrovias de rios com vazões pequenas pode ser importante [...];
- b) pico das vazões de enchimento/esvaziamento, que são altos, implicando cuidados especiais em todo projeto [...];
- c) problemas de cavitação a jusante das válvulas comuns na alta queda e extremamente preocupantes, a medida que podem danificar o conduto a jusante das válvulas, provocando interrupções para manutenção;
- d) problemas com a tranqüilidade do plano da água interno à câmara e conseqüentemente minimização de esforços nas embarcações; a alta queda implica alta energia cinética no nível de distribuição interna, no início do enchimento, o que leva a problemas de turbulência local; a alta queda também maximiza desequilíbrios na distribuição de velocidades nos condutos, o que se traduz por diversidade de vazões aduzidas em partes diversas da câmara, implicando em formação de ondas estacionárias, ou estacionárias/evolutivas, com graves conseqüências nos esforços em cabos de amarras das embarcações, em particular nos comboios, eventualmente resultando em enorme grau de insegurança.

Normalmente para realizar o enchimento ou esvaziamento de eclusas são utilizadas comportas. O uso de comportas ou válvulas para controlar a vazão em estruturas hidráulicas é bastante comum, no entanto, em comportas de eclusas, sua operação deve ser realizada com grande cautela, em virtude da ocorrência de escoamentos turbulentos, os quais produzem esforços hidrodinâmicos intensos que podem ser prejudiciais e causar danos à estrutura dos condutos ou causar danos na própria comporta.

USACE (2006) afirma que os modelos experimentais com escala reduzida têm otimizado consideravelmente a eficiência dos sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas. Partindo desse preceito a utilização de modelos reduzidos para prever futuros fenômenos em estruturas reais, com características semelhantes, é uma ferramenta a ser utilizada para evitar danos não previstos ou reduzir seus impactos.

## OBJETIVO

O concreto utilizado em obras hidráulicas possui uma baixa capacidade de resistência aos esforços de tração. Segundo Pinheiro (2007) o valor da carga de pressão limite a tração do concreto é de -6 m.c.a. Tendo como base o valor limite de resistência à tração especificado pelo autor buscou-se um método adimensional para delimitar a área com maior risco de erosão no concreto devido aos esforços de tração atuantes na estrutura causados pela operação da comporta, ou seja, para a comporta em diferentes aberturas e vazões.

## METODOLOGIA

Os dados para o presente estudo foram coletados de dois diferentes modelos reduzidos genéricos de eclusas, com comportas tipo segmento invertida. Tomando como base um conduto de seção quadrada de 4m de lado, é possível atribuir escalas aos modelos: o primeiro encontra-se no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS com escala 1:16 (figura 1), o segundo modelo encontra-se no Laboratório de Hidráulica e Hidroenergia – LHH/UFPel com escala 1:32 (figura 2).



Figura 1 – Modelo reduzido instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas. Fonte: Kempka (2011)



Figura 2 – Modelo reduzido instalado na Universidade Federal de Pelotas. Fonte: Abreu (2014)

Os valores de perda de carga foram obtidos com a instalação de piezômetros instalados a montante e a jusante da comporta. Já os valores de pressões ao longo do conduto foram obtidos com a instalação de transdutores de pressão a jusante da comporta, sendo possível assim determinar pressões para diferentes probabilidades de ocorrência.

Com o propósito de encontrar os pontos mais críticos na base e no topo do conduto, os dados foram transformados para a escala do protótipo, buscando-se adimensionalizar as variáveis que exercem influência direta na vazão e nas pressões, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Adimensionalização dos parâmetros hidráulicos

Parametro Hidráulico	Simbologia	Grandezas
Velocidade da Abertura da Comporta	$V_{abertura\ compor\ ta}$	$LT^{-1}$
Velocidade do Conduto Pleno	$V_{conduto\ pleno}$	$LT^{-1}$
Vazão	$Q$	$L^3T^{-1}$
Carga de Pressão do Limite de Tração do Concreto	$P/\gamma_{limite}$	$L$
Perda da Carga	$hf$	$L$
Altura da Abertura da Comporta	$H_{abertura\ compor\ ta}$	$L$
Altura do Conduto	$H_{conduto\ pleno}$	$L$
Massa Específica	$\rho$	$ML^{-3}$
Viscosidade Cinemática	$\nu$	$L^2T^{-1}$
Aceleração da Gravidade	$g$	$LT^{-2}$

Optou-se, neste estudo, por utilizar as pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ), obtidas com os transdutores de pressão. Tratam-se de pressões com baixo índice de ocorrência e que possuem maior potencial de atingir o limite de resistência à tração do concreto. Assim, a partir das pressões registradas e considerando a pressão limite de -6m.c.a., obtém-se o  $X_{limite}$ , que é a posição a jusante da comporta até onde poderão ocorrer danos no concreto. A determinação dos pontos limítrofes foi realizada conforme exemplo na figura 3.

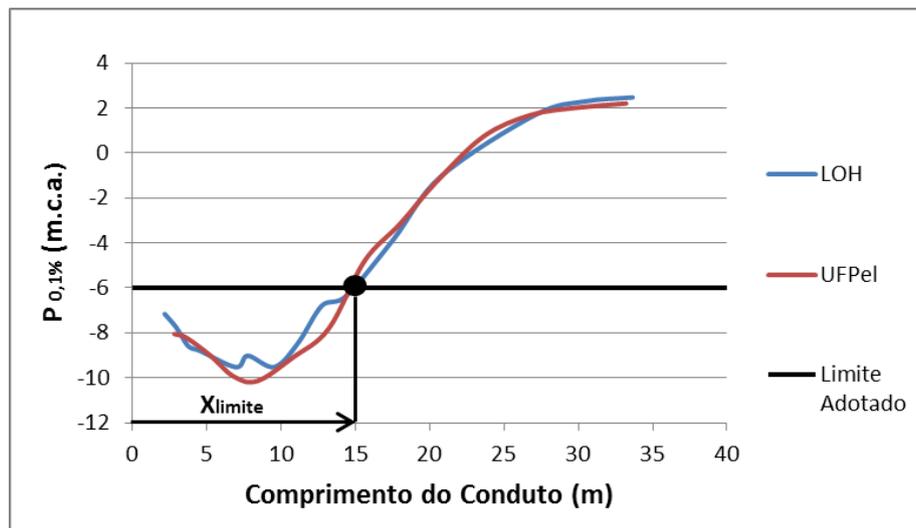


Figura 3 – Determinação do  $X_{limite}$  no teto do conduto com dados transformados para a escala de protótipo, para abertura da comporta de 20% e vazão de 61,4 m<sup>3</sup>/s.

Com o  $X_{limite}$  identificado para cada condição de ensaio, foi determinado um adimensional de posição, denominado  $\Pi_{posi\c{c}ão}$ , composto pela relação entre  $X_{limite}$  e a altura da área abaixo da comporta para uma dada abertura ( $H_{abertura}$  da comporta).

$$\Pi_{\text{posição}} = \frac{X_{\text{limite}}}{H_{\text{abertura da comporta}}} \quad (1)$$

Foi empregado também um parâmetro adimensional proposto por Sell (2017), composto pela relação entre perda de carga ( $hf$ ) produzida pela comporta, a vazão ( $Q$ ) e a viscosidade cinemática da água ( $\nu$ ), gerando um adimensional de operação, denominado de  $\Pi_{\text{operação}}$ .

$$\Pi_{\text{operação}} = \frac{hf \cdot \nu}{Q} \quad (2)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os dados foram transformados para a escala protótipo, e os adimensionais encontrados para o teto e para a base do conduto estão, respectivamente, na figura 4 e na figura 5. Os gráficos apresentam os resultados com os dados obtidos no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH-UFRGS) e Universidade Federal de Pelotas (UFPe), onde no eixo das ordenadas apresenta-se o adimensional de posição ( $\Pi_{\text{posição}}$ ) e no eixo das abcissas o adimensional de operação ( $\Pi_{\text{operação}}$ ).

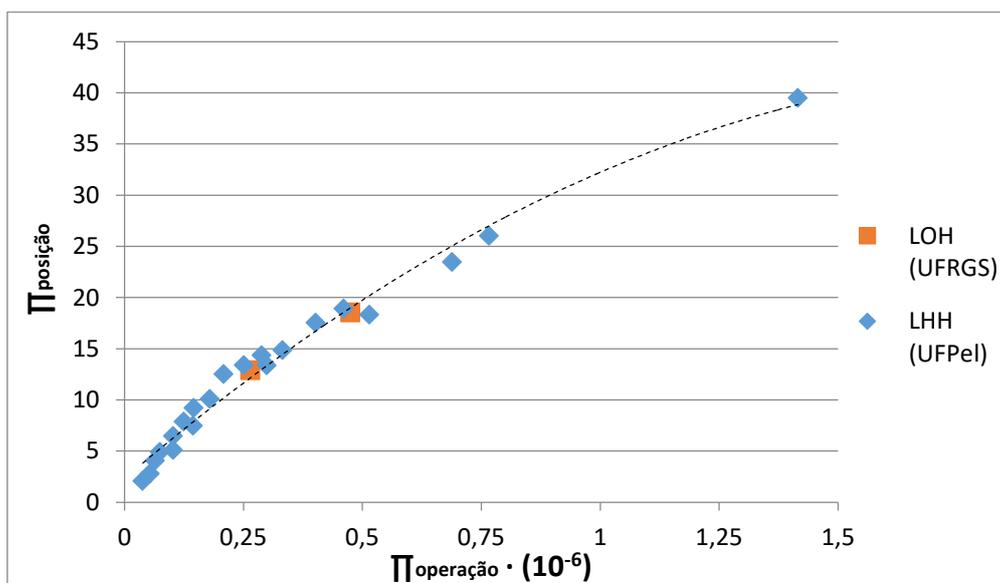


Figura 4 – Ajuste dos pontos no teto do conduto com valores de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% inferiores ao limite máximo de tração do concreto.

Em LOH (UFRGS) o  $X_{\text{limite}}$  de resistência à tração proposto para probabilidade de não excedência de 0,1% foi atingido em apenas dois pontos. Em virtude de se tratar de um modelo com escala maior, as vazões transformadas para a escala de protótipo não foram tão elevadas quanto às atingidas no modelo instalado na UFPe. Nota-se pela análise dos gráficos que o parâmetro adimensional  $\Pi_{\text{operação}}$  proposto tem a mesma tendência em ambos os gráficos e os valores do parâmetro, mesmo com alguns efeitos de escala secundários não considerados, mostraram-se muito semelhantes.

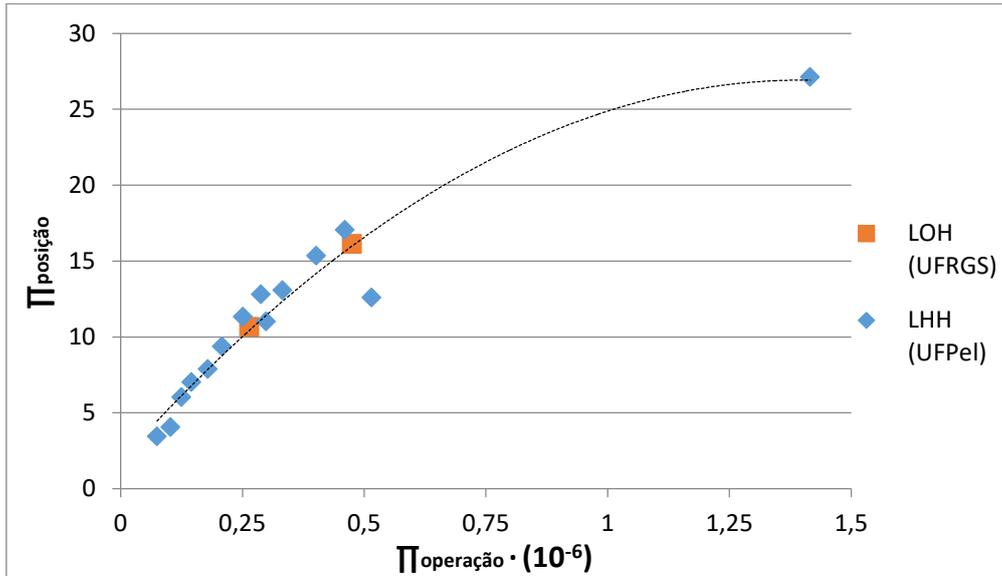


Figura 5 – Ajuste dos pontos na base do conduto com valores de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% inferiores ao limite máximo de tração do concreto.

É importante salientar que apenas nos ensaios com maior vazão para uma dada abertura ocorreram condições que atingiram o limite de resistência à tração do concreto, porém para grandes vazões este limite pode ser atingido até mesmo em aberturas próximas da condição de abertura total.

Para efeitos de análise os adimensionais obtidos para probabilidade de não excedência de 0,1% foram comparados com os adimensionais obtidos para a média de pressões encontradas nos pontos. Neste caso foram somente analisados os dados no ensaio realizado na UFPEL, por este possuir mais pontos de análise. Tal análise é apresentada nas figuras 6 e 7.

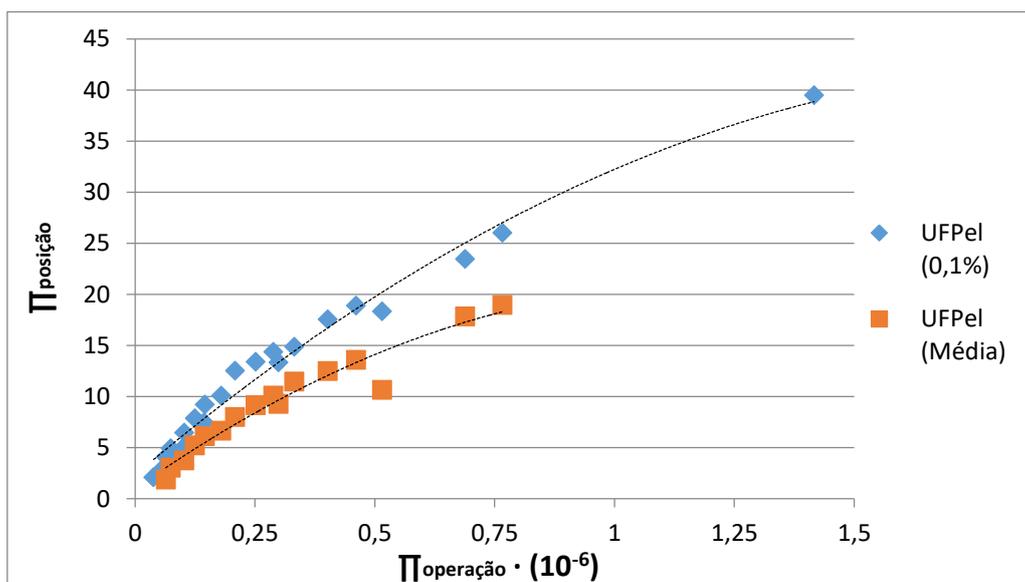


Figura 6 – Ajuste dos pontos no teto do conduto com valores de pressão inferiores ao limite máximo de tração do concreto para probabilidade de não excedência de 0,1% e para a média.

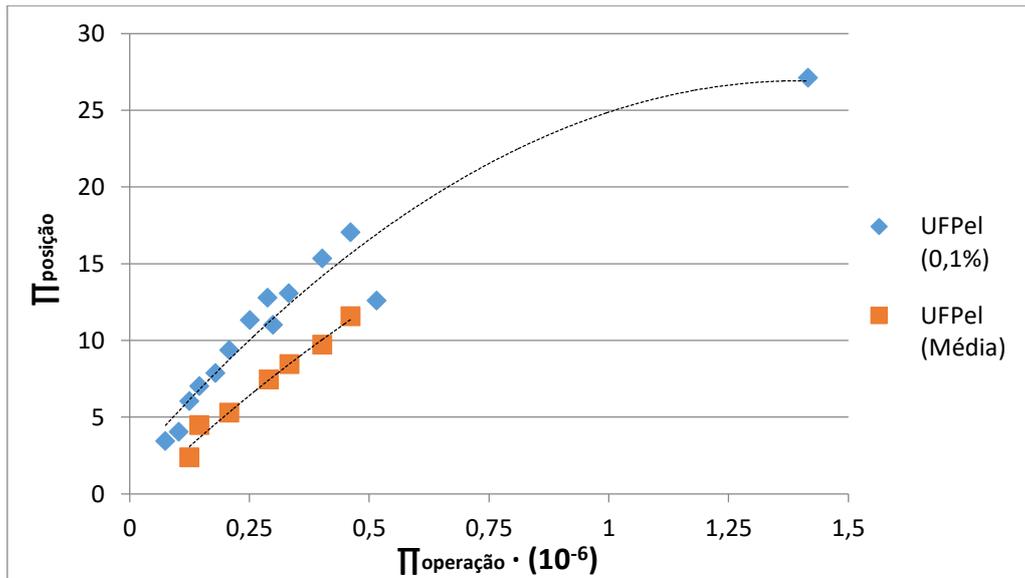


Figura 7 – Ajuste dos pontos na base do conduto com valores de pressão inferiores ao limite máximo de tração do concreto para probabilidade de não excedência de 0,1% e para a média.

A comparação evidencia que para as probabilidades de não excedência de 0,1% os limites são atingidos mais vezes, por se tratar de pressões que induzem esforços de tração mais extremas. Também fica evidente que o  $X_{\text{limite}}$  (figura 3) para probabilidade de não excedência de 0,1% é maior, ou seja, o trecho crítico abordado para uma dada vazão e abertura de comporta é maior.

## CONCLUSÃO

Por meio do presente estudo é possível concluir que o método adimensional proposto por Sell (2017) permite averiguar os trechos de operação mais solicitados por tração, e que podem comprometer a estrutura. Concluiu-se também que o adimensional proposto pode ser empregado tanto para pressões médias quanto para pressões com uma dada probabilidade de ocorrência.

Para o limite de resistência à tração do concreto indicado por Pinheiro (2007), as curvas e equações adimensionais obtidas pelos gráficos deste estudo podem ser de grande utilidade para projetos de condutos com vazão controlada por comportas. Cabe salientar que, se considerada outra resistência, o método adimensional deve ser reaplicado e outras curvas devem ser obtidas.

Uma solução a ser proposta seria a aplicação de um material com maior limite máximo de resistência à tração no trecho crítico. Este material pode ser um concreto com propriedades que aumentem sua resistência à tração ou revestimento do concreto no trecho crítico com outro material.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e ao Laboratório Hidráulica e Hidroenergia da Universidade Federal de Pelotas por viabilizarem este estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, A. S. (2014). “*Processo de cavitação em estruturas hidráulicas: escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertido*” Trabalho de Diplomação em Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- KEMPKA, M. (2011). “*Determinação das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida: aplicação em eclusas de navegação*”. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- PINHEIRO, A. N. (2007). “*Descarregadores de Cheias em Canal de Encosta – Dimensionamento e Implantação*”. Instituto Superior Técnico - Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais. 2007.
- República Federativa do Brasil (2015). (“*LEI Nº 13.081, DE 2 DE JANEIRO DE 2015*”). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2015/Lei/L13081.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13081.htm)>.
- SELL, B.M.; Dai Prá, M.; Priebe, P.M. (2017). “*Comprimento Limite de Conduitos Retangulares a Jusante de Comportas Sujeitos a Esforços Limites de Tração*”. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017.
- USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. “*Hydraulic Design of Navigation Locks*”. EM 1110-2-1604. 2006. Disponível em: <[http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-1604.pdf](http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1604.pdf)>.
- USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. “*Planning and Design of Navigation Locks*”. EM 1110-2-2602. 1995. Disponível em: <[https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-2602.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2602.pdf)>.
- WHITE, F.M. *Mecânicas dos Fluidos*. 4 ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, c2002.