

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**AVALIAÇÃO DO COMPRIMENTO MÁXIMO DE ATUAÇÃO DE
ESFORÇOS HIDRÁULICOS LÍMITES A JUSANTE DE COMPORTAS EM
CONDUTOS**

Bruna Moreira Sell¹, Priscila dos Santos Priebe², Aline Saupe Abreu³, Mauricio Dai Prá⁴

*¹Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Pelotas, Brasil,
brunamoreirasell@gmail.com*

²Programa de Pós-Graduação em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, priscilaspriebe@gmail.com

*³Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Pelotas, Brasil,
alsaupe@gmail.com*

*⁴Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Pelotas, Brasil,
mdaipra@gmail.com*

RESUMO:

As eclusas de navegação são estruturas utilizadas para transposição de desníveis. A compensação da diferença de carga hidráulica, enchimento e/ou esvaziamento da câmara, se dá por meio de um sistema de tubulações, enquanto que a operação das eclusas é feita por meio de comportas. Como na região a jusante das comportas ocorre uma zona de instabilidade de pressões, o presente estudo avaliou esta região, na base e no teto de um conduto retangular, exposta ao risco de erosão do concreto, causadas pelas mínimas cargas de pressões médias. A pesquisa propôs uma metodologia adimensional para analisar as condições de operação que podem desencadear o processo erosivo no concreto, assim como estimar o comprimento máximo do conduto no qual os esforços críticos são atuantes. Por meio dos resultados obtidos foi possível concluir que um adimensional de operação pode ser aplicado para estimar este comprimento máximo a jusante de comportas, tanto na base quanto no teto dos condutos.

ABSTRACT:

The navigation locks are structures used to transpositions the levels. The compensation of the difference of hydraulic loads, filling and/or emptying of the lock chamber, is performed through piping system, while the operation of the locks is done by sluices gates. How in the downstream region occurs a zone of pressure instability, this study evaluated this region, at the lower and upper part of the rectangular conduit, exposed to the risk of erosion of the concrete, caused by the minimum average pressure loads. The purposes of this research was to develop a dimensionless analysis for identify the operation conditions which the erosive process may be triggered in the concrete structures, as well as estimate the maximum distance were the critical forces acting. Through the acquired results, it was possible to conclude that the operation dimensionless can be applied to assess the maximum distance in the region downstream from sluice gates, both in the lower and the upper parts of the conduits.

PALAVRAS CHAVES: comportas hidráulicas; pressões mínimas; análise adimensional

INTRODUÇÃO

Assegurar os múltiplos usos das águas é uma tarefa árdua, desafiadora e complexa. A grande quantidade de barramentos existentes, destinados a reservar volumes de água para as mais distintas finalidades, como o abastecimento urbano, irrigação e a geração de energia, implicam em grandes diferenças de nível que impedem a navegação em determinados trechos e intensificam este desafio.

Dentre os mecanismos utilizados na transposição de nível hidroviário destacam-se as eclusas, que são estruturas hidráulicas que permitem a compensação de desnível, sejam estes causados por barreiras topográficas naturais ou artificiais. Os sistemas clássicos para o enchimento/esvaziamento de câmaras de eclusas são compostos por condutos e operados por comportas, para o controle da vazão.

O mesmo sistema hidráulico é observado na operação de descarregadores de fundo; estruturas hidráulicas tipicamente construídas junto ao corpo de barragens e cuja finalidade é escoar a água para jusante a fim de garantir uma vazão mínima, descarregar sedimentos acumulados e escoar as vazões de cheia, total ou parcialmente (Kanashiro, 2011).

Em ambos os casos, além dos sistemas hidráulicos respeitarem o mesmo princípio de funcionamento, o material de revestimento geralmente empregado é o concreto. Durante a operação destas estruturas, Priebe (2016) aponta que na região a jusante das comportas, devido as altas velocidades do escoamento e as baixas pressões, problemas de cavitação podem ocorrer. O fenômeno de cavitação pode desencadear processos de erosão, os quais podem reduzir a vida útil da obra, e por esta razão, as áreas superficiais das estruturas hidráulicas de concreto devem ser resistentes (Dafré Filho, 2004).

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma análise adimensional para identificar o trecho a jusante de comportas em condutos retangulares de concreto, expostos a condições de operação que podem desenvolver processos erosivos pelo efeito de abrasão e/ou cavitação.

METODOLOGIA

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de Priebe (2016) e Oliveira (2016). O estudo foi conduzido em ensaios realizados em um modelo experimental, alocado no Laboratório de Hidráulica e Hidroenergia do curso de graduação em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas.

O modelo físico simula o escoamento em um conduto de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação de média/alta queda e possui escala geométrica de 1:32, cujo protótipo tem um conduto de seção transversal quadrada com 4 metros de lado. Como mostra a figura 1, integram os componentes do modelo reduzido: dois reservatórios interligados, um conjunto moto-bomba, um sistema de condutos com diversas peças especiais que permitem conduzir e acompanhar as características hidráulicas do escoamento, uma comporta do tipo segmento invertida e uma chaminé de equilíbrio.

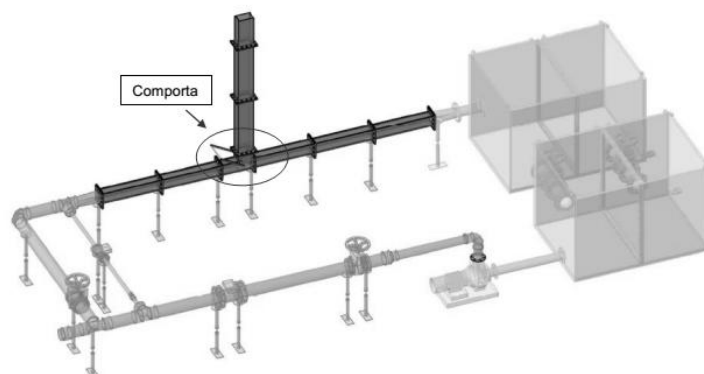


Figura 1. - Modelo reduzido. Fonte: Oliveira (2016).

As simulações experimentais foram realizadas sob diferentes condições de vazão, compreendidas entre 2,5L/s e 31,8L/s, e de grau de abertura de comporta, variando entre 10% e 90%. Durante as campanhas de ensaio foram registradas, em cada simulação, as cargas de pressão média observadas em piezômetros, bem como a distância dos pontos de tomada de pressão em relação ao batente da comporta. A região de interesse foi o trecho a jusante da comporta, com dados coletados na base e no teto do conduto.

Após a coleta dos dados no modelo físico, foram traçados gráficos para representar o comportamento das distribuições longitudinais das cargas de pressão média, na base e no teto do conduto, a jusante da comporta, para as diferentes vazões ensaiadas e aberturas da comporta. Foi gerado um gráfico para cada abertura, com as vazões ensaiadas em cada simulação e as pressões médias registradas.

A fim de identificar as condições de ensaio que poderiam desenvolver risco de erosão, o presente estudo adotou a recomendação de Lemos (1981) do qual aponta que, para evitar a cavitação em estruturas de concreto, a limitação das cargas de pressão locais médias não podem exceder o valor de $-6 \text{ mH}_2\text{O}$. Por se tratar de uma análise em um modelo físico com escala reduzida, o valor limite de $-6 \text{ mH}_2\text{O}$ foi então convertido, resultando em $-0,1875 \text{ mH}_2\text{O}$ e inserido aos gráficos plotados. A figura 2 mostra, a título de exemplificação, o modo dos gráficos gerados.

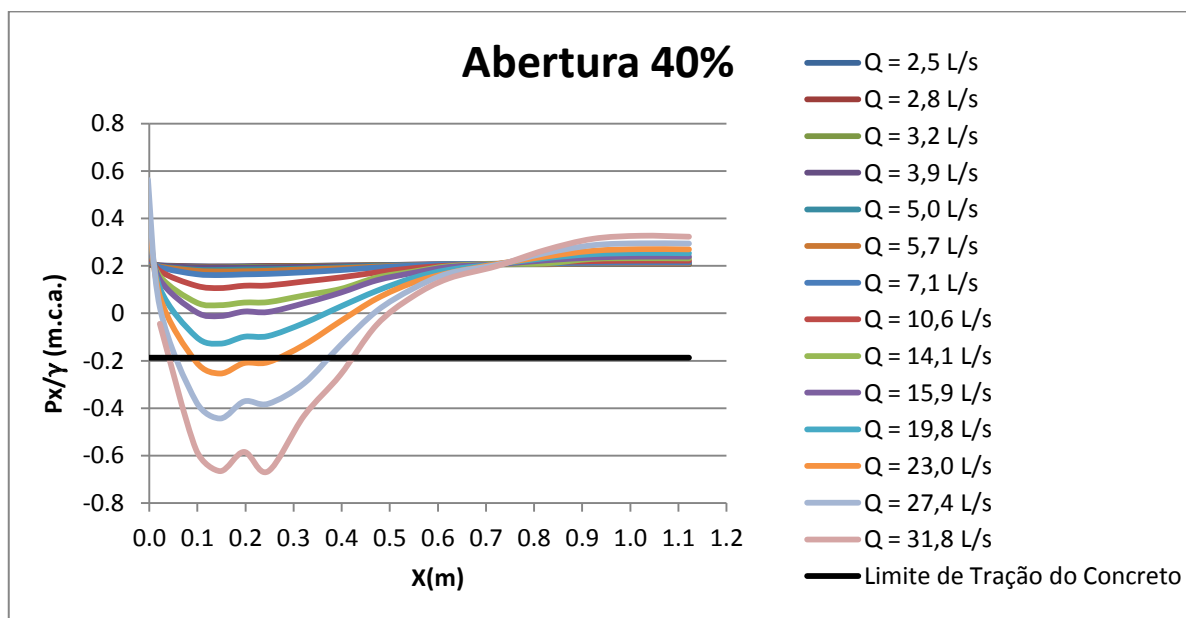


Figura 2. - Comportamento longitudinal das pressões médias obtidas na base do conduto, para a condição de abertura de 40% da comporta.

Desta maneira, foi possível apontar quais as condições de ensaio, em que combinadas a vazão e o grau de abertura da comporta, a carga de pressão média registrada encontrou-se abaixo daquela indicada como limite, implicando em propensão aos esforços erosivos em estruturas de concreto.

Para as condições de ensaio onde as cargas de pressão média registradas foram inferiores à recomendada por Lemos (1981), foi identificada visualmente a posição limite; definida como a porção mais distante do trecho a jusante da comporta como sendo zona de risco a erosão, e, conseqüentemente, como área a ser protegida em condições de projeto. A figura 3 apresenta o ponto limite para a condição de abertura de 40% e vazão de 31,8 L/s, em que no eixo das abscissas têm-se a distância no trecho a jusante da comporta e no eixo das ordenadas a carga de pressão média.

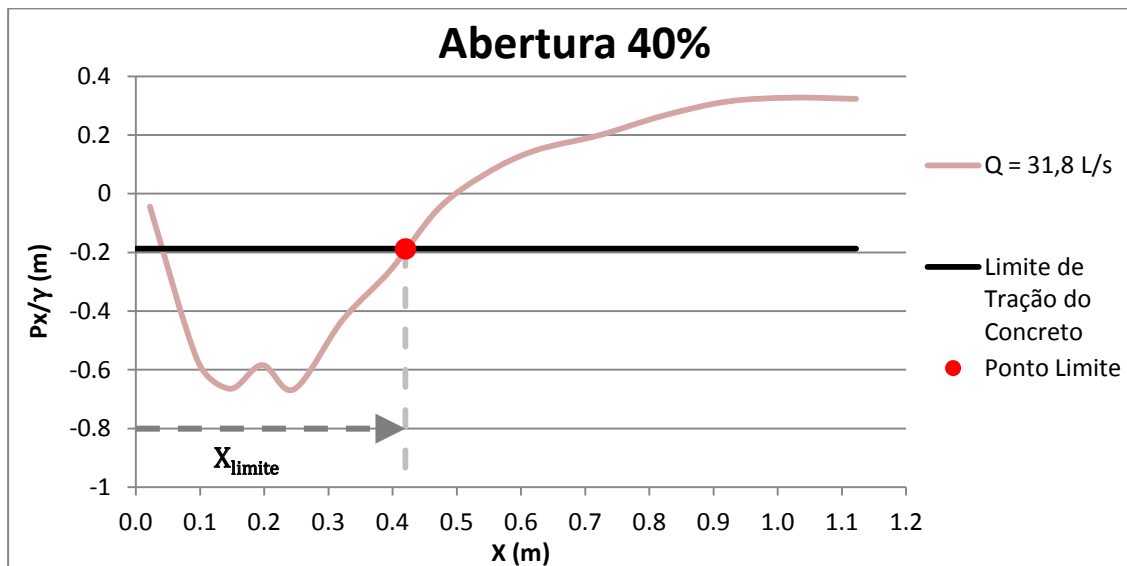


Figura 3. - Identificação do ponto limite, para a condição de ensaio de abertura de 40% da comporta com a vazão de 31,8L/s, na base do conduto.

Assim, gerou-se uma nova série de dados para as aberturas que, em determinadas vazões ensaiadas, apresentaram valores de carga de pressão inferior à - 0,1875 mH₂O. Foram registradas as vazões ensaiadas para cada abertura que se enquadravam nesta situação, assim como o valor da posição (X_{limite}). A esta nova série de dados foi realizada a análise dimensional, seguindo metodologia do Teorema Pi de Buckingham (White, 2002).

Foram analisados diferentes parâmetros hidráulicos e, por meio destes, formados conjuntos adimensionais que expressassem condições de operação com potencial risco de erosão ao concreto, principal material de revestimento destes condutos. A escolha das variáveis adotadas na análise adimensional deste estudo priorizou aquelas que possam ser facilmente adquiridas e que, de modo concomitante, exercessem influência direta no escoamento e na carga de pressão média. Os parâmetros analisados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. – Parâmetros hidráulicos utilizados para a análise adimensional

Parâmetro Hidráulico	Símbolos
Velocidade do Escoamento na Abertura da Comporta	$V_{abertura\ comporta}$
Velocidade do Escoamento Conduto Pleno	$V_{conduto\ pleno}$
Vazão	Q
Carga de Pressão do Limite de Tração do Concreto	P/γ_{limite}
Perda de Carga	h_f
Altura da Abertura da Comporta	$H_{abertura\ comporta}$
Altura do Conduto Pleno	$H_{conduto\ pleno}$
Massa Específica da Água	ρ
Viscosidade Dinâmica da Água	μ
Aceleração da Gravidade	g

O parâmetro velocidade do escoamento na abertura da comporta ($V_{abertura\ comporta}$) foi obtido a partir da equação da continuidade (equação 1), em que a área do conduto retangular foi calculada por meio do emprego da equação 2.

$$V_{abertura\ comporta} = \frac{Q}{A} \quad [1]$$

Onde:

$V_{abertura\ comporta}$ - velocidade na abertura da comporta (m/s);

Q - vazão (m³/s);

A - área do conduto (m²).

$$A = H_{\text{conduto pleno}} \cdot H_{\text{abertura da comporta}} \quad [2]$$

Onde:

A - área do conduto (m²);

H_{conduto pleno} - altura do conduto pleno (m);

H_{abertura da comporta} - altura da abertura da comporta (m).

A altura da abertura da comporta (H_{abertura da comporta}) foi calculada por meio de uma ponderação entre a altura do conduto pleno (H_{conduto pleno}), equivalente à 0,125m no modelo reduzido estudado, e os diferentes graus de abertura da comporta.

De modo análogo, a velocidade do escoamento no conduto pleno (V_{conduto pleno}) foi obtida por meio da equação 1. Porém, com a área calculada de acordo com a equação 3.

$$A = H_{\text{conduto pleno}}^2 \quad [3]$$

O parâmetro perda de carga (h_f) foi obtido através da diferença entre as cargas de pressão médias coletadas experimentalmente a montante e a jusante da comporta. Optou-se por trabalhar com este parâmetro dada a facilidade de obtê-lo por meio do emprego da equação 4, visto que as variáveis englobadas nesta equação são de fácil aquisição e controle, assim como a variável K_{comporta}, que pode ser obtida em tabelas e gráficos encontrados na literatura apenas com a informação do tipo de comporta estudada, área total do conduto e área de abertura.

$$h_f = \frac{K_{\text{comporta}} \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad [4]$$

Onde:

h_f – perda de carga (m);

K_{comporta} - coeficiente da comporta;

V - velocidade do escoamento (m/s).

Os demais parâmetros analisados no presente estudo, como a carga de pressão do limite de tração do concreto, massa específica, viscosidade dinâmica e aceleração da gravidade são constantes, sendo utilizado, respectivamente, -6 mH₂O, 998,2 kg.m⁻³, 10⁻⁶ m².s⁻¹, 9,8066 m.s⁻².

Seguindo as pressuposições do Teorema Pi, dentre as variáveis utilizadas neste estudo, apontadas na tabela 1, fixou-se, respectivamente, as variáveis perda de carga, massa específica e vazão, para desta maneira formar os grupos adimensionais. Onde:

$$\Pi = h_f^a \cdot \rho^b \cdot Q^c \quad [5]$$

De modo a eleger o melhor grupo que representasse as condições de operação, obtido pela análise adimensional, como ferramenta de decisão, foram analisados conjuntamente o coeficiente de determinação (R²) e o erro médio quadrático (RMSE). Recorreu-se a análise conjunta, visto que o R² é indicado para as condições cujo ajuste característico é do tipo linear, fato não observado nos grupos formados. Em contrapartida, o RMSE apesar mostrar as diferenças individuais entre a previsão do modelo e as observações, apresenta limitações no seu uso por ser sensível a escala de valores das grandezas em análise. Pelas razões apresentadas, o presente estudo adotou como critério de decisão o R², a fim de eleger o grupo adimensional que melhor descrevesse as condições de operação e o RMSE como ferramenta complementar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo foram definidos dois conjuntos adimensionais, um de posição e outro de operação. O conjunto adimensional de posição, proposto e adotado neste estudo, resulta da razão entre a posição limite e a altura da abertura da comporta (equação 6).

$$\Pi_{\text{posição}} = \frac{X_{\text{limite}}}{H_{\text{abertura da comporta}}} \quad [6]$$

Buscou-se analisar adimensionalmente a posição longitudinal, visto que desta forma é possível determinar a incógnita de principal interesse prático para pesquisadores, projetistas e operadores de estruturas hidráulicas, que é a posição limite.

Após definir o adimensional de posição, foram propostos conjuntos adimensionais a partir das variáveis definidas na Tabela 1. Cada conjunto Π_i foi confrontado com o adimensional de posição, através de uma representação gráfica, onde extraiu-se a curva de ajuste, os coeficientes R^2 e RMSE, para desta forma, apontar o melhor conjunto adimensional que representasse as condições de operação.

Após análise de cada conjunto adimensional foi adotado o adimensional de operação ($\Pi_{\text{operação}}$), apresentado na equação 7.

$$\Pi_{\text{operação}} = \frac{h_f \cdot v}{Q} \quad [7]$$

A figura 4 apresenta o comportamento do adimensional de operação ($\Pi_{\text{operação}}$) em relação ao adimensional de posição ($\Pi_{\text{posição}}$), para os dados obtidos na base do conduto, onde as pressões médias foram inferiores ao limite proposto por Lemos (1981). Enquanto que, a figura 5 mostra o comportamento para os dados obtidos no teto do conduto.

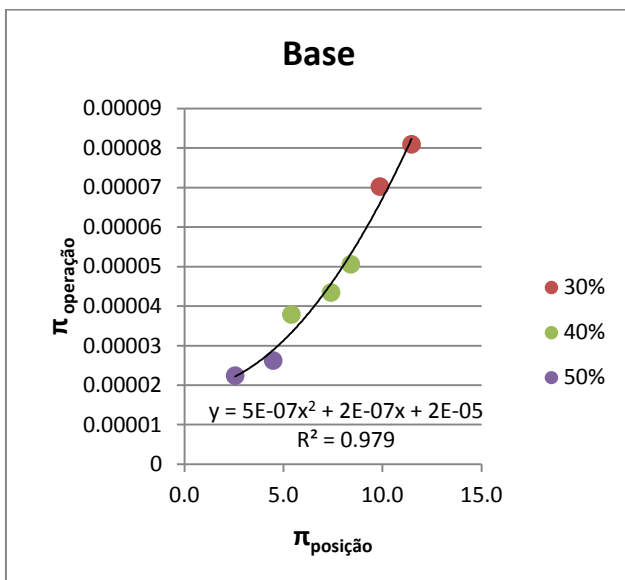


Figura 4 - Comportamento do conjunto adimensional adotado e do adimensional de posição para os dados da base, para distintas aberturas.

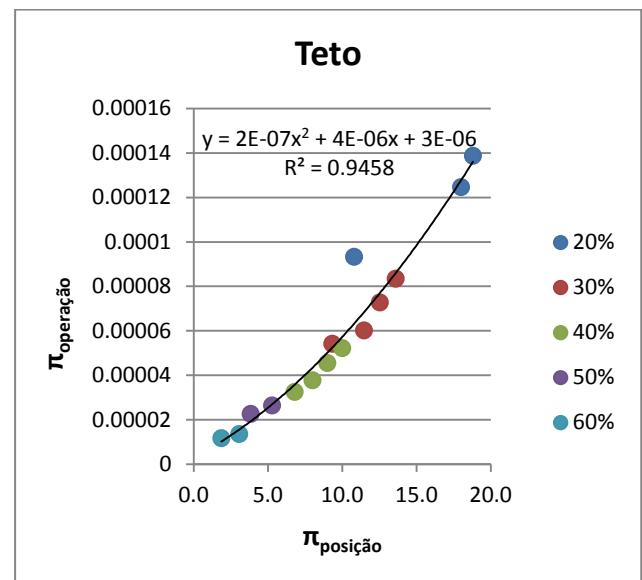


Figura 5 - Comportamento do conjunto adimensional adotado e do adimensional de posição para os dados do teto, para distintas aberturas.

Ao observar a figura 4 identifica-se uma tendência clara, quanto ao comportamento do adimensional de operação em relação ao adimensional de posição, com ascensão crescente e ajuste descrito por uma equação do tipo polinomial de segundo grau. Nota-se que os dados não destoam da linha de ajuste, fato expresso pelo coeficiente de determinação, com $R^2=0,979$.

A interpretação da figura 5 torna possível apontar que o agrupamento dos dados dos adimensionais de operação e posição, obtidos no teto do conduto, remete a um ajuste com inclinação ascendente, também descrito por uma equação polinomial de segundo grau. Apesar de se identificar um ponto discrepante do ajuste característico, para a abertura de 20%, o parâmetro estatístico é considerado muito bom, de $R^2=0,9458$.

Posteriormente, foi elaborada a avaliação conjunta dos adimensionais com os dados obtidos para a base e para o teto do conduto, conforme mostra a figura 6.

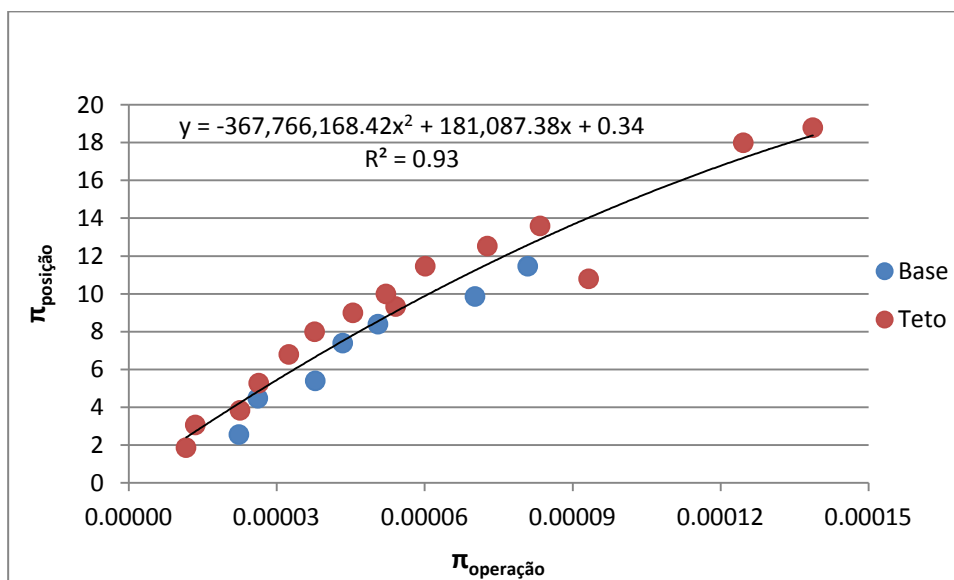


Figura 6. – Avaliação do conjunto adimensional de operação e do conjunto adimensional de posição, para os dados obtidos na base e no teto do conduto.

Observa-se que na figura 6, o eixo das coordenadas foi invertido, se comparado às figuras anteriores. A razão de inverter o eixo foi devido ao fato de que o parâmetro $\Pi_{\text{operação}}$ é conhecido, e assim definido como variável preditora; enquanto que, o parâmetro $\Pi_{\text{posição}}$, do qual determinará a estimativa da posição limite, é definido como a variável resposta. Deste modo, no eixo das abscissas encontra-se a variável independente ($\Pi_{\text{operação}}$) e no eixo das ordenadas a variável dependente ($\Pi_{\text{posição}}$).

Ao analisar o comportamento conjunto dos dados obtidos no teto e na base do conduto, para os adimensionais formados, é possível identificar que embora existam pontos que se encontram fora da linha de tendência, os dados tendem a um ajuste comum. Tal afirmativa é reforçada com o valor de R^2 encontrado, de 0,93.

O adimensional de operação proposto neste estudo pode ser aplicado para descrever o comportamento do escoamento no trecho a jusante da comporta, tanto na base quanto no teto do conduto retangular, desde que $\Pi_{\text{posição}}$ varie de 0 a 20, e o $\Pi_{\text{operação}}$ de 0 a 0,00015. Com essa proposta é possível inferir, através do $\Pi_{\text{posição}}$, o comprimento limite dos esforços atuantes, com pressões inferiores a -6 mH₂O, que podem desencadear danos ao concreto.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o método adimensional proposto permite averiguar as condições de operação que podem comprometer a integridade de estruturas hidráulicas revestidas de concreto, operadas por um sistema de condutos retangulares e comportas, e identificar o trecho onde os esforços atuantes podem degradar o material de revestimento. O adimensional de operação proposto pode ser aplicado tanto na base quanto no teto de condutos retangulares. Por meio do emprego do adimensional de posição é possível apontar o comprimento

do trecho a jusante das comportas, exposto a processos erosivos, do qual deve ser protegido com materiais mais resistentes, em condições de projeto.

REFERÊNCIAS

Filho, L. G.; Genovez, A. I. B. (2004). “Métodos para Avaliação do Desgaste em Amostras de Concreto Submetidas à Abrasão e à Cavitação”. *Ingeniería Del Agua*, Vol. 11, No. 4, Dez. 2004, p. 389-396.

Kanashiro, W. H. (2011). *Curso Segurança de Barragens: Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais, Unidade 6: Noções de Hidráulica*. Foz do Iguaçu: Convênio entre Agência Nacional de Águas e Parque Tecnológico de Itaipu, 2011. 75 p.

Lemos, F. O. (1981). *Crítérios para o Dimensionamento Hidráulico de Barragens Descarregadoras*. Ministério da Habitação e Obras Públicas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Memória nº 556, Lisboa, 1981.

Oliveira, F. F. M. (2016). “Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Conduitos de Eclusas”. 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

Priebe, P. S. (2016). “Caracterização das pressões induzidas pelo escoamento a jusante de comportas em condutos retangulares”. 2016. 172f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

White, F.M. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.