



Profundidade de Erosão em Blocos de Concreto Submetidos ao Fenômeno da Cavitação

Mauricio Dai Prá¹, Aline Saupe Abreu², Eder Daniel Teixeira³, Edgar Fernando Trierweiler Neto⁴,
Luiz Augusto Magalhães Endres⁵, Marcelo Giulian Marques⁶, Daniela Guzzon Sanagiotto⁷,
Mariane Kempka⁸, Carolina Kuhn Novakoski⁹

Resumo: O estudo da problemática que envolve os danos ocasionados pelo fenômeno da cavitação vai muito além da caracterização das condições hidráulicas de operação das estruturas de segurança das barragens através das vazões máximas de projeto. As alterações superficiais e danos de maior magnitude nos revestimentos de concreto depende tanto das características hidrodinâmicas do escoamento quanto dos parâmetros considerados na tecnologia do material empregado. O presente trabalho visa identificar as profundidades máximas de erosão ($h_{máx.}$) em blocos de concreto expostos ao fenômeno de cavitação, pela análise dos danos apresentados em diferentes traços de concreto e sujeitos a distintas demandas relativas de ar no escoamento (β). Os ensaios foram realizados expondo blocos de concreto com relação água/cimento (a/c) de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 ao escoamento com ocorrência do fenômeno da cavitação durante 2h através de um dispositivo tipo *Venturi*, implementado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH/UFRGS). A partir dos resultados experimentais foi possível definir funções de correlação entre $h_{máx.}$ e a resistência à compressão ($f_{cm,j}$) dos blocos de concreto ensaiados, para β de 0 até 2,0%. A razão de $h_{máx.méd.}$ pelo tempo de exposição à cavitação ($h_{máx.méd.}/t$) salientaram acentuada redução da perda de material com $\beta = 1,0\%$, principalmente para os blocos de concreto com fator a/c de 0,50 e 0,65. Para $\beta > 1,0\%$, as $h_{máx.méd.}/t$ aproximam-se das menores profundidades observadas, uma vez que os efeitos da cavitação são amortecidos pela maior presença de ar no escoamento.

Abstract: The study of the problem involving damage caused by the cavitation phenomenon goes far beyond the characterization of the hydraulic operating conditions of dam safety structures through maximum design flows. Surface changes and damage of greater magnitude in concrete coatings depend both on the hydrodynamic characteristics of the flow and on the parameters considered in the technology of the material applied. The present work aims to identify the maximum erosion depths ($h_{máx.}$) in concrete blocks exposed to the cavitation phenomenon, by analyzing the damage presented in different concrete mixes and subject to different relative air demands in the flow (β). The tests were carried out exposing concrete blocks with a water/cement ratio (w/c) of 0,35; 0,45; 0,50 and 0,65 to the cavitation for 2 hours through a Venturi-type device, implemented at the Hydraulic Works Laboratory (LOH/UFRGS). From the experimental results it was possible to define correlation functions between $h_{máx.}$ and the compressive strength ($f_{cm,j}$) of the concretes tested, for β of 0 to 2,0%. The ratio of $h_{máx.med.}$ by the time of exposure to cavitation ($h_{máx.med.}/t$), highlighted the marked reduction in material loss, with $\beta = 1.0\%$ mainly for concretes with w/c factors of 0,50 and 0,65. For $\beta > 1.0\%$, the $h_{máx.med.}/t$ are close to the lowest observed depths, since the effects of cavitation are dampened by the major presence of air in the flow.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – mauricio.daipra@ufrgs.br

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – alsaupe@gmail.com

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – eder.teixeira@ufrgs.br

4) Eletrobras – edtrier@eletrobras.com

5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – endres@ufrgs.br

6) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – mmarques@iph.ufrgs.br

7) Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – dsanagiotto@ufrgs.br

8) Coordenação de Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – marianekempka@utfpr.edu.br

9) Coordenação Acadêmica - Universidade Federal de Santa Maria – carolina.novakoski@ufsm.br



Palavras-Chave: Cavitação, Erosão em concreto, Escoamentos Aerados, Venturi

Keywords: Cavitation, Concrete erosion, Aerated flow, Venturi

INTRODUÇÃO

Em estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias o fenômeno de cavitação é amplamente estudado uma vez que os esforços hidrodinâmicos, oriundos de escoamentos turbulentos e caracterizados por fluxos de alta velocidade e elevada complexidade, podem vir a gerar danos cumulativos e irreversíveis às superfícies de concreto.

As principais causas dos processos de desgastes do concreto identificados por Mehta e Monteiro (2014) e citados por Kormann (2002) são a abrasão, erosão e a cavitação, sendo: i) Abrasão: definida como o atrito seco das partículas diretamente na superfície de concreto, frequentemente observado em pavimentos e pisos; ii) Erosão: o processo de desgaste oriundo do choque de partículas sólidas em suspensão na água com a superfície de concreto, principal causa de danos em estruturas hidráulicas; iii) Cavitação: a deterioração do concreto gerada a partir da energia liberada pela implosão de bolhas de vapor formadas em fluxos de água de grandes velocidades.

Mehta e Monteiro (2014) subdividem ainda os desgastes físicos do concreto em desgastes superficiais, onde encontram-se os fenômenos de abrasão, erosão e cavitação, e desgastes internos à massa do concreto - por fissuração - gerados pela pressão de cristalização de sais nos poros, pelos gradientes de temperatura, umidade e/ou carregamentos estruturais.

Estudos e pesquisas que buscam obter relações entre cavitação, propriedades do concreto e concentrações de ar no escoamento, que generalizem uma solução de uso adequada das superfícies hidráulicas, são escassos. Assim, torna-se necessário estudos que possibilitem a parametrização de fatores hidráulicos com as características mecânicas e químicas do concreto com vistas à prevenção e mitigação do fenômeno da cavitação.

A alta complexidade e as particularidades da cavitação em escoamento, torna inviável, em condições naturais de sua ocorrência, o seu estudo em campo. Colgate (1977) define que os estudos em laboratório podem ser realizados de três maneiras distintas através de: i) modelos reduzidos, ii) modelos ou aparelhos específicos de teste e iii) dispositivos ou máquinas de cavitação.

Peterka (1953) utilizando uma máquina de cavitação, realizou ensaios com um dispositivo tipo Venturi, no qual as pressões são reduzidas localmente, propiciando a formação e posterior implosão de bolhas de vapor obtidas pelo aumento da velocidade do escoamento ao ultrapassar uma seção restrita de 6,35 mm de altura e 305,0 mm de largura. As velocidades médias do escoamento atingem valores da ordem de 28,0 a 30,0 m/s. Para a vazão de aproximadamente 60l/s, as pressões médias obtidas foram de 41,5 m.c.a. a montante da seção contraída e de 11,6 m.c.a. a jusante. Os testes realizados pelo autor avaliaram qualitativamente e quantitativamente os danos causados pela cavitação em blocos de concreto, expostos pelo período de 2 (duas) horas ao fenômeno, com e sem a inserção de ar no escoamento. Considerando os resultados obtidos experimentalmente, O autor concluiu que perda de massa dos corpos de prova é afetada por diferentes concentrações de ar no escoamento. Acima das concentrações de ar de 2% há redução considerável de perda de massa dos blocos de concreto pela ação da erosão por cavitação. Em concentrações superiores aos 7% não foram verificadas perdas de massa ou efeitos visíveis da cavitação.

Estudos realizados por Gal'perin *et al.* (1971), utilizando uma máquina similar à utilizada por Peterka (1953), buscaram encontrar uma relação entre a velocidade média do escoamento e a resistência à compressão de blocos de concreto. Gikas (1981) salienta ainda a importância de



estabelecer correlações entre a resistência à cavitação e as propriedades físicas de dureza, tensão de ruptura e coeficiente de elasticidade dos materiais. Parâmetros como tensão de escoamento e a definição da energia de deformação também deveriam ser estudados em estruturas semelhantes, com o intuito de estabelecer critérios mais abrangentes do que as relações de perda de peso por unidade de tempo, sendo este último somente representativo em condições em que a erosão for avaliada até sua fase estável de perda de material.

Considerando um dispositivo tipo Venturi, Dong *et al.* (2007) desenvolveram suas pesquisas sobre o efeito da aeração no escoamento e os danos gerados a corpos de prova em concreto pela ação da cavitação. Foram utilizadas velocidades de fluxo que variaram de 20,0 a 50,0 m/s, pressões médias e suas variações, perdas de massa, formas das ondas de pressão e a interação do fenômeno com a presença de irregularidades no interior do dispositivo, com a inserção de diferentes concentrações de ar e sedimentos no sistema cavitante.

Russel e Sheehan (1974) após a realização de ensaios considerando diferentes corpos de prova e uma velocidade de escoamento de 46,0 m/s, concluíram que concentrações de cerca de 5% de ar são suficientes para eliminar a erosão por cavitação de todos os concretos testados.

Houlston e Vickers (1978); Conn *et al.* (1984), Dalfré (2002), desenvolveram suas análises referentes ao estudo do fenômeno da cavitação através de dispositivos tipo jato cavitante, como aparato experimental responsável por gerar danos superficiais pontuais aos diferentes tipos de amostras de concreto utilizados. Houlston e Vickers (1978) avaliaram os desgastes produzidos por bocais de diferentes diâmetros (0,4; 0,8; 1,6 e 3,2 mm) em suas análises. A eficiência da erosão e penetração dos jatos foram constatadas pelos efeitos dos danos gerados nas superfícies, tanto pelo jato quanto pelas gotículas produzidas.

Dalfré (2002; 2006) desenvolveu um aparato experimental baseado no princípio de ação dos jatos cavitantes combinando o efeito do escoamento de alta velocidade a bocais de geometria cônica, caracterizados por um ângulo de abertura de 20° e diâmetros de abertura de 1 a 7mm. Para detectar a erosão causada pela cavitação foram avaliados 4 (quatro) amostras de concreto com diferentes composições. A intensidade e evolução dos danos gerados nos corpos de prova foram estimados através da medida de “pits” (quantidade de erosões localizadas sobre a superfície de concreto) por unidade de área, considerando os tempos de 10, 20, 30 e 50 min de ensaios. O autor ressalta que os piores danos foram encontrados nas amostras de menor resistência à compressão, porém os resultados referentes aos desgastes nas superfícies de concreto em seus estudos são somente indicativos da eficiência da instalação, não servindo assim, de indicativo do tipo de concreto ser empregado em estruturas hidráulicas

Nesse contexto, esse artigo busca contribuir nessa temática, trazendo resultados de experimentos realizados em uma máquina de cavitação do tipo venturi, onde se investigou a profundidade de erosão em blocos de concreto de diferentes traços quando submetidos à cavitação e sujeitos à diferentes concentrações de ar no escoamento.

MÉTODOS

As investigações experimentais foram realizadas em um dispositivo de cavitação tipo Venturi, similar ao utilizado por Peterka (1953), implementado no Laboratório Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS).

A seção contraída, onde são formadas as cavidades de vapor, possui 6,75 mm de altura e 311,5 mm de largura, proporcionando velocidades médias da ordem de 30,0 m/s considerando uma vazão de água de 60,0 l/s. O dispositivo foi fabricado em aço inoxidável com o objetivo de garantir resistência contra a ação do fenômeno da cavitação (Figura 1).



Foram moldadas 156 unidades de blocos de concreto (prismáticos), nas dimensões de 304,0 mm de comprimento, 114,0 mm de largura e 84,0 mm de altura com relações água/cimento de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65. As amostras foram expostas ao escoamento cavitante pelo período máximo de 2 horas. No escoamento foram variadas as demandas relativas de ar ($\beta=Q_{ar}/Q_{\acute{a}gua}$): 0; 0,25; 0,50; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8%. Destaca-se que foi previsto o mínimo de 3 (três) repetições de ensaio para cada traço de concreto. Foram avaliados os desgastes (perdas de massa e de volume) nas superfícies de concreto expostas ao escoamento cavitante por um período médio de 2h causados pelo escoamento com a inserção das demandas relativas de ar.

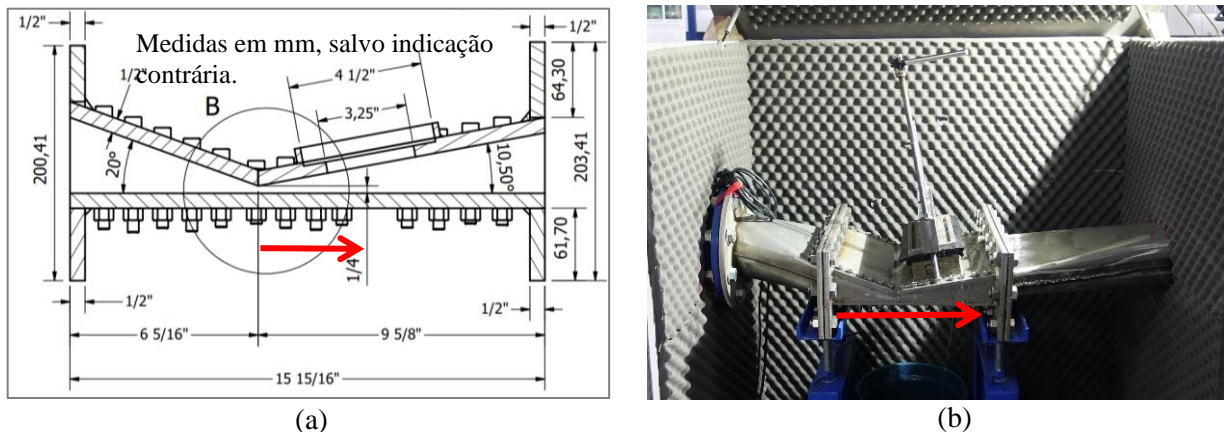


Figura 1: Desenho esquemático com as dimensões características da máquina de cavitação (a) e; imagem do dispositivo construído e instalado no LOH/UFRGS (b). A seta indica o sentido do escoamento.

A determinação da resistência média a compressão (f_{cm}) das amostras, 193 corpos de prova cilíndricos (CPs), foi realizada em prensa hidráulica, de acordo com os critérios da NBR 5739: 2018. A fabricação, moldagem e cura dos blocos e corpos de prova de concreto foram desenvolvidas nas instalações experimentais do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME/UFRGS. A dosagem dos concretos utilizados nos blocos está na Tabela 1. Os blocos de menor resistência a compressão são aqueles com as maiores as maiores relações de a/c (0,50 e 0,65), justificado, essencialmente, pela utilização de baixos teores de cimento nessas misturas.

Tabela 1: Dosagem dos concretos a serem utilizados nos ensaios do dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Componentes	Material (kg/m ³) Descrição/Litologia	Relação (a/c)			
		0,35	0,45	0,50	0,65
Cimento	CP-V	492,4	418,9	385,6	296,6
Agregado Graúdo	Basalto fragmentado (Brita 1)	950,4	972,4	964,1	968,8
Agregado Miúdo	Areia de origem Fluvial (MF ^I = 2,64mm)	767,1	826,4	825,8	905,3
Água		172,0	188,2	192,2	193,4
Aditivo 1(mL/100 kg cimento)	Policarboxilato ^{II}	325,0	113,0	195,0	98,0

^I Módulo de Finura

^{II} Aumento da trabalhabilidade sem segregação do concreto

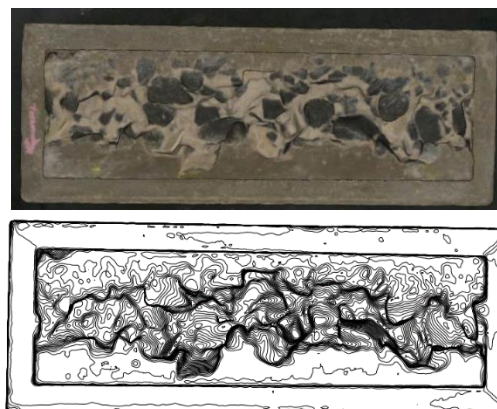
Os volumes e profundidades das erosões formadas nos blocos de concreto após exposição ao fenômeno da cavitação foram quantificados a partir do uso de um Escâner 3D da marca Artec, modelo EVA, cedido ao LOH pela Eletrobras para extração das superfícies dos blocos erodidos, através de sobreposições sucessivas de imagens fotográficas do objeto escaneado (Figura 2). A partir das imagens foi possível a construção de um modelo digital 3D dos corpos de prova, com curvas de nível, espaçadas de 0,5 mm, da superfície erodida, permitindo a estimativa dos volumes e das áreas dos danos.



(a) Bloco e Escâner 3D – EVA.



(b) Escaneamento dos blocos.



(c) Superfície 3D formada pela sobreposição de imagens e curvas de nível.

Figura 2: Processo de escaneamento com o equipamento EVA e superfícies e informações extraídas dos blocos de concreto após o uso do software Artec Studio 16 Professional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados extraídos pelo uso do Escâner “3D” possibilitaram a realização da análise dos danos identificados nos corpos de prova do LOH/UFRGS, para todas as relações água/cimento e demandas relativas de ar ensaiadas. As informações obtidas com as curvas de nível permitiram a determinação das curvas cota x volume (Figura 3) das erosões formadas pela remoção do material exposto à ação do escoamento, possibilitando a determinação das profundidades médias máximas de erosão.

Conforme se observa na Figura 3, a adoção de crescentes demandas relativas de ar nos ensaios com os blocos de relação a/c 0,65 ($\beta = 0,50; 1,0$ e $2,0\%$) fez com que os formatos das fossas de erosão e os volumes removidos assumissem comportamentos cada vez mais semelhantes aos danos registrados para os corpos de prova de a/c 0,45 e 0,35. Entende-se que as divergências verificadas entre as fossas erodidas, considerando o mesmo tipo de concreto e demanda relativa de ar, podem ser justificadas por eventuais remoções dos agregados graúdos, que pontualmente representaram um volume ou área maior de dano do que os demais componentes do concreto.

Notadamente, os blocos de a/c de 0,45 para β de 0 e 0,25% apresentaram danos de maior intensidade do que os corpos de prova de menor resistência, representados pela relação 0,65 e $\beta = 0,50$ e 1,0%. A incorporação de ar no escoamento resulta na proteção até dos concretos mais frágeis, considerando a resistência.

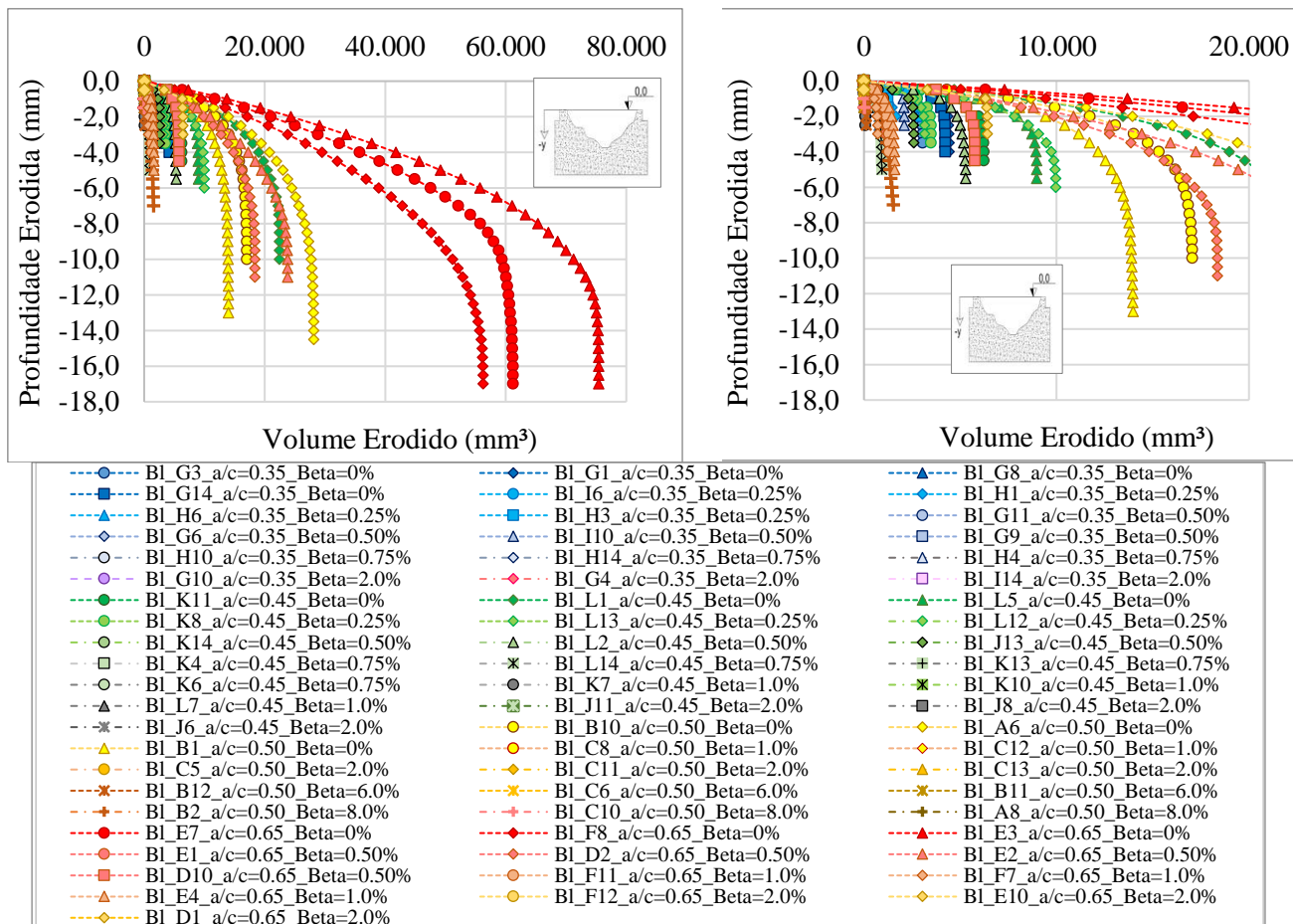


Figura 3: Curvas cota x volume dos danos gerados nas superfícies dos blocos de concreto através do Escâner “3D”, após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Ao serem analisadas as fossas de erosão, descritas pela curva cota x volume (Figura 3), tornou-se possível a obtenção das profundidades máximas ($h_{m\acute{a}x}$) de cada bloco ensaiado.

A Figura 4 expressa o comportamento entre as $h_{m\acute{a}x}$ e as resistências médias à compressão dos blocos de concreto. Observou-se que a adoção de $\beta \geq 1,0\%$ reduz em até 20% as profundidades erodidas nas superfícies de concreto, quando comparadas aos danos formados pelo escoamento sem a inserção de qualquer demanda relativa de ar ($\beta = 0\%$).

As funções de ajuste estabelecidas pelas $h_{m\acute{a}x}$, atribuídas aos danos formados pelo fenômeno da cavitação em escoamentos com a presença de β de 0,25% e 0,50% de ar, expressaram comportamentos semelhantes entre si. Entretanto, a existência de dispersões consideráveis entre as profundidades máximas observadas, que originaram as correlações descritas na Figura 4, devem ser consideradas durante a aplicabilidade dessas funções como ferramenta de análise na previsão das $h_{m\acute{a}x}$ em outros concretos que não apresentam os $f_{cm,j}$ limitantes de 64,5; 47,9; 40,4 e 32,7 MPa.

A partir das informações de $h_{m\acute{a}x}$ e do tempo de exposição dos blocos ao fenômeno da cavitação proporcionou na formação das fossas erodidas, foram analisadas as relações entre os valores médios das profundidades máximas ($h_{m\acute{a}x.méd.}$), a duração dos ensaios (t) e as proporções água/cimento investigadas (Figura 5).

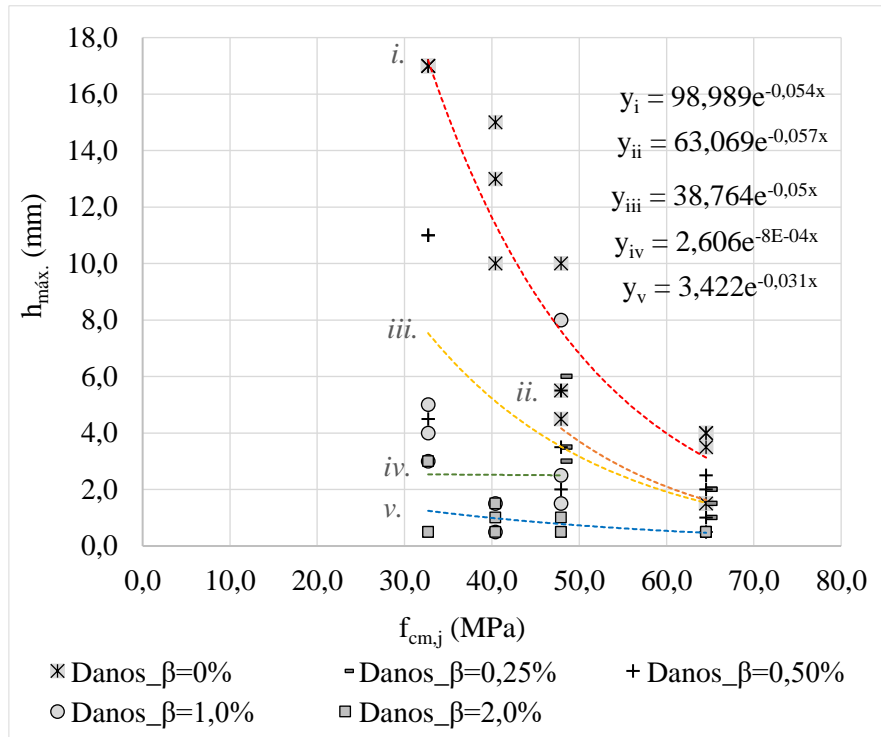


Figura 4: Profundidades máximas ($h_{máx.}$) das fossas de erosão verificadas nos blocos de concreto expostos à cavitação, para distintas β .

A Figura 5 evidencia a evolução das $h_{máx.méd.}/t$ com o acréscimo de diferentes demandas relativas de ar ao escoamento. Verifica-se, também, que a taxa de evolução das profundidades de erosão reduz bruscamente para os maiores fatores a/c (0,50 e 0,65) e com o acréscimo de $\beta = 1,0\%$. Acima desse limite, as $h_{máx.méd.}/t$ aproximam para os distintos fatores a/c, dispensando a análise deste parâmetro, visto que os efeitos da cavitação passam a ser praticamente anulados pela presença acentuada de ar no escoamento.

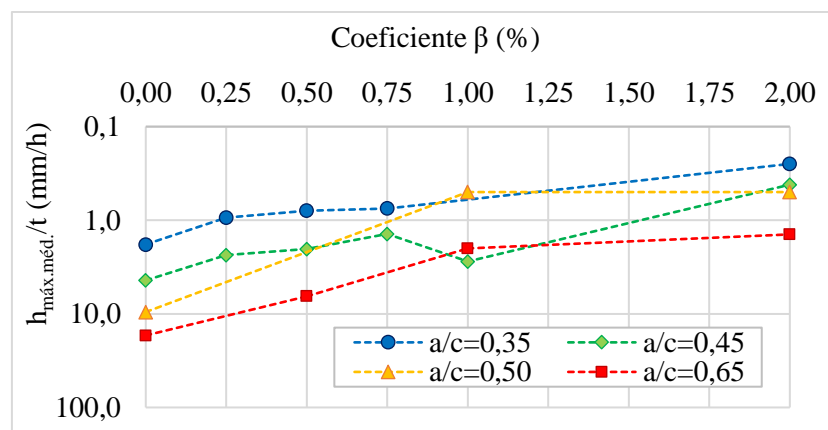


Figura 5: Valores médios das profundidades máximas dos danos em função do tempo de exposição ao fenômeno da cavitação ($h_{máx.méd.}/t$), considerando a inserção de distintas β .

CONCLUSÃO

Através das informações de profundidades máximas dos danos, definidas pelas curvas cota x volume (Figura 3), foi possível definir funções de correlação entre $h_{máx.}$ e as $f_{cm,j}$ dos concretos ensaiados, para β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0% (Figura 4). Estas funções permitiram estabelecer estimativas das $h_{máx.}$ a serem atingidas pelas fossas de erosão, após 2 horas de exposição à cavitação,



fornecendo novas evidências de quais demandas relativas de ar devem ser adotadas para que os danos sejam condicionados a $h_{máx.}$ seguras do ponto de vista da integridade dos revestimentos de concreto em estruturas hidráulicas (superfícies hidráulicas).

Os resultados obtidos de $h_{máx.méd./t}$ (Figura 5) salientaram a acentuada redução da perda de material, através do acréscimo de $\beta = 1,0\%$ principalmente para os fatores a/c de 0,50 e 0,65. Para coeficientes β acima desse valor, as $h_{máx.méd./t}$ aproximam-se das menores profundidades observadas, uma vez que os efeitos danosos da cavitação são amortecidos pela presença de ar no sistema.

Vale salientar que, as relações apresentadas na Figura 4 e na Figura 5, foram desenvolvidas para as condições específicas de escoamento cavitante gerado pelo dispositivo de cavitação do LOH e para os parâmetros característicos específicos dos traços dos concretos investigados, não sendo indicada suas aplicações em situações distintas às consideradas nesse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras e à Foz do Chapecó Energia, no âmbito do programa de P&D ANEEL (pelo apoio ao projeto “Estudo de concretos para Superfícies Hidráulicas”), à DESEK (na pessoa do Dr. Selmo Chapira Kuppermann) e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- COLGATE, D. Cavitation damage in hydraulic structures. *Wear of Materials* 1977. ASME, New York, N. Y. 1977, 433-438, 1977.
- CONN *et al.* Some unusual applications for cavitating water jets. In: *International Symposium on Jet Cutting Technology*, 7^o, 1984, Ottawa. *Jet Cutting Technology*. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, June, 1984. p.1-12.
- DALFRÉ FILHO, J. G.; GENOVEZ, A. I. B.; LUVIZOTTO, E. J. Equipamento para Simulação da Erosão por Cavitação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 11, ed.1, 2006.
- DALFRÉ FILHO, J.G. Desenvolvimento de Equipamento para avaliação de erosão por cavitação. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas. Fevereiro de 2002, 97p
- DONG, Z.; CHEN, L.; JU, W. (2007). Cavitation characteristics of high velocity flow with and without aeration on the order of 50 m/s. *Journal of Hydrodynamics*, v. 19, n. 4. p. 429-433.
- DONG, Z.; SU, P. (2006). Cavitation control by aeration and its compressible characteristics. *Journal of Hydrodynamics*, v. 18, n. 4, p.499-504, fev. 2006.
- GAL'PERIN, R. S. *et al.* Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it. *Hydrotechnical Construction*, v. 5, n. 8, p. 726-732, 1971.
- GIKAS, I. Cavitação-Efeitos sobre superfícies de resina de epóxi e concretos comuns e especiais. *Boletim técnico DAEE*, São Paulo, 4(1), p.89-121, jan.-abril 1981
- HOULSTON, R.; VICKERS, G.W. Surface cleaning using water jet cavitation and droplet erosion. In: *International Symposium on Jet Cutting Technology*, 4, 1978.
- KORMANN, Aline Christiane Morales. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. 2002. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná. 196p.
- MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*. Fourth Edition, 2014.
- PETERKA, A. J. (1953). The effect of entrained air on cavitation pitting. *International Association for Hydraulic Research and Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Minneapolis, Set. 1953. p. 507-518.
- RUSSEL, S. O.; SHEEHAN, G. J. Effect of entrained air on cavitation damage. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 1, p.97-107, 1974.