

XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE  
HIDRÁULICA  MÉXICO 2021



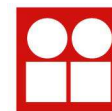
Compilación de  
Trabajos Completos:  
XXIX Congreso  
Latinoamericano de  
Hidráulica



ASOCIACIÓN  
MEXICANA  
DE  
HIDRÁULICA



Hosted by  
Spain Water  
and IWHR, China



INSTITUTO  
DE INGENIERIA  
**UNAM**

# COMPILACIÓN DE TRABAJOS COMPLETOS: XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

## **EDITORES:**

MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO  
ALEJANDRO MENDOZA RESÉNDIZ  
MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021  
EVENTO VIRTUAL | MÉXICO

Compilación de Trabajos  
Completos XXIX Congreso  
Latinoamericano de  
Hidráulica

EDITORES:

Moisés Berezowsky Verduzco  
Alejandro Mendoza Reséndiz  
Maritza Liliana Arganis Juárez

Compilación de Trabajos Completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica

Libro Digital: PDF, descarga y online  
ISBN 979-888722468-8

1. Ingeniería Hidráulica. 2. Mecánica de Fluidos Aplicada, 3. Hidrología e Hidrosfera

El presente contenido: texto y figuras de los trabajos completos, son propiedad exclusiva de los autores.

Editado y hecho en México

XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021  
EVENTO VIRTUAL

**ANÁLISE DE DANOS EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO ATRAVÉS DO  
DISPOSITIVO DE CAVITAÇÃO DO U.S. BUREAU OF RECLAMATION**

Gustavo Diefenbach<sup>1</sup>, Pedro Guido Mottes Bassegio<sup>1</sup>, Aline Saupe Abreu<sup>1</sup>, Carolina Kuhn Novakoski<sup>1</sup>, Rute Ferla<sup>1</sup>, Marcelo Giulian Marques<sup>1</sup>, Maurício Dai Prá<sup>1</sup>, Eder Daniel Teixeira<sup>2</sup>, Joshua Mortensen<sup>2</sup>, Catherine Lucero<sup>2</sup>, Alba Valéria Brandão Canellas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil, <sup>2</sup>United States Bureau of Reclamation- Estados Unidos da América, <sup>3</sup>Furnas Centrais Elétricas - Brasil. [gustavodiefenbach@gmail.com](mailto:gustavodiefenbach@gmail.com), [alsaupe@gmail.com](mailto:alsaupe@gmail.com), [ruteferla@hotmail.com](mailto:ruteferla@hotmail.com), [mmarques@iph.ufrgs.br](mailto:mmarques@iph.ufrgs.br), [mauricio.daipra@ufrgs.br](mailto:mauricio.daipra@ufrgs.br), [eder.teixeira@ufrgs.br](mailto:eder.teixeira@ufrgs.br), [jmortensen@usbr.gov](mailto:jmortensen@usbr.gov), [alba@furnas.com.br](mailto:alba@furnas.com.br).

## RESUMO

As superfícies hidráulicas de vertedouros e bacias de dissipação são constantemente submetidas a escoamentos de alta velocidades, que atreladas as variações significativas de pressão, acabam por favorecer a ocorrência de erosões e o fenômeno da cavitação nas superfícies em contato com o escoamento. Desta forma, neste artigo serão abordadas as análises realizadas no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), visando compreender o desgaste causado pelo fenômeno da cavitação em superfícies de concreto com diferentes fatores de água/cimento. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos através dos ensaios realizados expondo blocos de concreto de diferentes composições ao fenômeno da cavitação por meio de um dispositivo tipo Venturi, instalado no “*Hydraulic Laboratory of United States Bureau of Reclamation*” (USBR), em Denver - EUA. Foram coletados, para cada um dos blocos testados, imagens antes e após a exposição à cavitação e estimadas as perdas volumétricas, superficiais e de profundidade de cada dano identificado. Parte dos resultados obtidos foi comparada aos estudos realizados por Gal’perin et al. (1971). Os maiores desgastes foram registrados nos blocos de maiores relações água/cimento quando expostos a escoamentos de alta velocidade (cerca de 30m/s). Considerando os resultados preliminares deste trabalho tornou-se possível a estimativa de zonas de desgastes associadas a diferentes traços de concreto, de maneira a definir as áreas e volumes médios dos concretos removidos pela ação do fenômeno de cavitação em muitos dos materiais que normalmente compõem as superfícies de concreto de vertedouros e bacias de dissipação.

**PALAVRAS CHAVE:** cavitação, escoamento em altas velocidades, desgastes em concreto, superfícies hidráulicas.

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021  
VIRTUAL EVENT**

**DAMAGE ANALYSIS ON CONCRETE SURFACES THROUGH THE  
CAVITATION DEVICE FROM U.S. BUREAU OF RECLAMATION**

Gustavo Diefenbach<sup>1</sup>, Pedro Guido Mottes Bassegio<sup>1</sup>, Aline Saupe Abreu<sup>1</sup>, Carolina Kuhn Novakoski<sup>1</sup>, Rute Ferla<sup>1</sup>, Marcelo Giulian Marques<sup>1</sup>, Maurício Dai Prá<sup>1</sup>, Eder Daniel Teixeira<sup>2</sup>, Joshua Mortensen<sup>2</sup>, Catherine Lucero<sup>2</sup>, Alba Valéria Brandão Canellas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil, <sup>2</sup>United States Bureau of Reclamation- Estados Unidos da América, <sup>3</sup>Furnas Centrais Elétricas - Brasil. [gustavodiefenbach@gmail.com](mailto:gustavodiefenbach@gmail.com), [alsaupe@gmail.com](mailto:alsaupe@gmail.com), [ruteferla@hotmail.com](mailto:ruteferla@hotmail.com), [mmarques@iph.ufrgs.br](mailto:mmarques@iph.ufrgs.br), [mauricio.daipra@ufrgs.br](mailto:mauricio.daipra@ufrgs.br), [eder.teixeira@ufrgs.br](mailto:eder.teixeira@ufrgs.br), [jmortensen@usbr.gov](mailto:jmortensen@usbr.gov), [alba@furnas.com.br](mailto:alba@furnas.com.br).

**ABSTRACT**

The hydraulic surface of spillways and dissipation basins is constantly subjected to high-speed flows, which combine with significant pressure variation, can lead to erosion and cavitation on surfaces in contact with the flow. Thus, this article will approach the analysis made at the Laboratory of Hydraulic Works (LOH) of the Institute of Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), aiming to analyze the surface damage caused by the cavitation's phenomenon on concrete surfaces with different water/cement factor. The data used in the study were obtained through a test that expose different concretes to the cavitation, using a machine based on a Venturi-type device. The machine is installed in the Hydraulic Laboratory of the United States Bureau of Reclamation (USBR), Denver - USA. For all the blocks, images were collected before and after the expose to cavitation and estimated volumetric, superficial and depth losses of each damage. The average strengths of the concrete the flow in the device were compared to the work developed by Gal'perin et. al. (1971). The most significant damage was recorded in blocks with higher water/cement factors when exposed to high-speed flow (around 30m/s). The preliminary result of this work make it possible to estimate damage zones associated with different concrete features, in order to define the average areas and volumes of concrete removed by the action of the cavitation phenomenon in many of the materials that are normally used in the concrete surface of spillways and dissipation basins.

**KEY-WORDS:** cavitation, flow at high speeds, wear on concrete, hydraulic surfaces.

## INTRODUÇÃO

O desgaste causado escoamento em estruturas hidráulicas de concreto, tais como, vertedouros e bacias de dissipação, é amplamente estudado pela comunidade científica e uma das principais causas atribuídas a este desgaste é o fenômeno da cavitação. Esse fenômeno ocorre em regiões do escoamento onde se formam bolhas de vapor de água, através do aumento da velocidade e da redução da pressão, que quando colapsam produzem uma onda de energia (na forma de pressão) capaz de remover partículas da estrutura. A erosão localizada acaba por produzir uma superfície ainda mais rugosa que, por consequência, intensifica as condições para a ocorrência do próprio fenômeno da cavitação (Pinto, 1988, p.81).

Desta forma, esse trabalho tem como objetivo analisar o desgaste volumétrico através das áreas superficiais médias e das profundidades médias dos desgastes, gerados em blocos de concreto com diferentes composições, quando submetidos a escoamentos em alta velocidade sem a incorporação de ar ao escoamento. As propriedades de resistência média a compressão dos concretos analisados e a velocidade média do escoamento no dispositivo de cavitação foram então, comparadas com os resultados obtidos por Gal'perin et al. (1971). Através dos desgastes do concreto e suas respectivas relações água/cimento determinou-se, preliminarmente, a perda de área das superfícies geradas pelo escoamento sem a inserção de ar no sistema.

## REFERENCIAL TEORICO

Estruturas hidráulicas de concreto possuem irregularidades provenientes da própria característica do acabamento da superfície. Essas irregularidades associadas a escoamentos em altas velocidades favorecem a ocorrência de pressões inferiores à pressão de vapor, dessa forma, criando um ambiente propício para a incidência de cavitação, e por consequência, maior risco em relação ao desgaste superficial.

De acordo com Tullis (1982) e Falvey (1990), a ocorrência de cavitação vaporosa tem como principais condicionantes:

- I. bolhas de ar microscópicas ou impurezas na água, que servem como base para a vaporização do líquido;
- II. o decréscimo da pressão, em alguma região do líquido, a valores próximos ou inferiores à pressão de vapor e;
- III. o subsequente aumento da pressão nas proximidades da cavidade, de forma a provocar a sua implosão.

Dessa forma, Falvey (1990) descreve a dinâmica do fenômeno da cavitação como sendo o colapso das bolhas de vapor ocorrido entre os estágios de decréscimo do diâmetro da cavidade até sua posterior implosão. A onda de choque produzida pelo fenômeno quando gerada próxima à superfície sólida das estruturas hidráulicas poderá provocar a erosão ou o arrancamento de partículas sólidas do concreto utilizado. Diferentes autores, dentre eles USBR (1963), Peterka (1953), Quintela e Ramos (1980), Gikas (1981), Alfa Filho, Genovez e Paulon (2000) avaliaram o efeito do fenômeno de cavitação e os desgastes provocados em estruturas de concreto por meio da utilização de dispositivos tipo Venturi e jatos cavitantes.

Peterka (1953) utilizando uma máquina de cavitação, desenvolvida pelo *Bureau of Reclamation Hydraulic Laboratory*, 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 6.32 mm de altura e 305 mm de largura. As velocidades médias do escoamento atingem valores da ordem de 28 a 30 m/s. Para a vazão de aproximadamente 60l/s, as pressões obtidas foram de 41.48 m.c.a. a montante da seção

contraída e de 11.59 m.c.a. a jusante. A instalação experimental utilizada no estudo de Peterka (1953) é apresentada na Figura 1 a seguir.

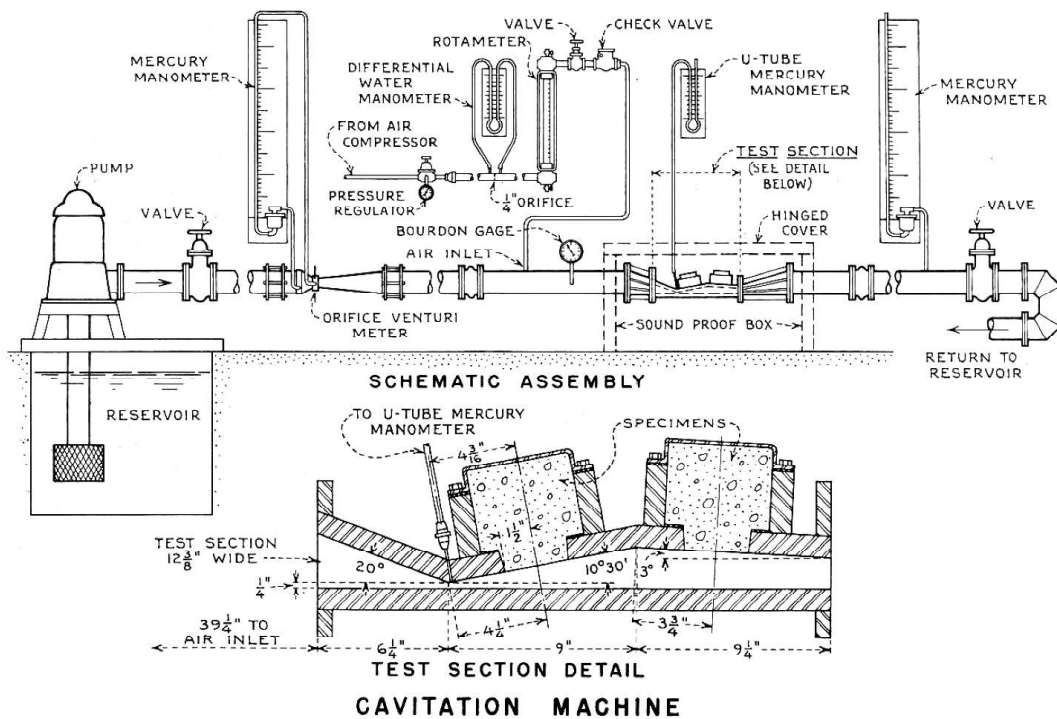


Figura 1 – Circuito hidráulico da instalação da máquina de cavitação. (Fonte: PETERKA, 1953)

O efeito destrutivo causado pela implosão das bolhas em dispositivos tipo Venturi foi constatado pela equipe do Bureau of Reclamation. Os desgastes gerados pelo fenômeno de cavitação não são concentrados somente nos corpos de concreto utilizados, mas também em toda a superfície metálica da máquina de cavitação (USBR, 1963).

Estudos realizados por Gal'perin et al. (1971), utilizando uma máquina similar à utilizada pelo USBR (1963), buscaram encontrar uma relação entre a velocidade média do escoamento e a resistência à compressão de blocos de concreto com a finalidade de identificar regiões de ocorrência e de não ocorrência de cavitação. Em sua pesquisa foram verificadas diferentes concentrações de ar presentes no escoamento e velocidades médias do escoamento sobre o concreto avaliado, como pode ser observado na Figura 2.

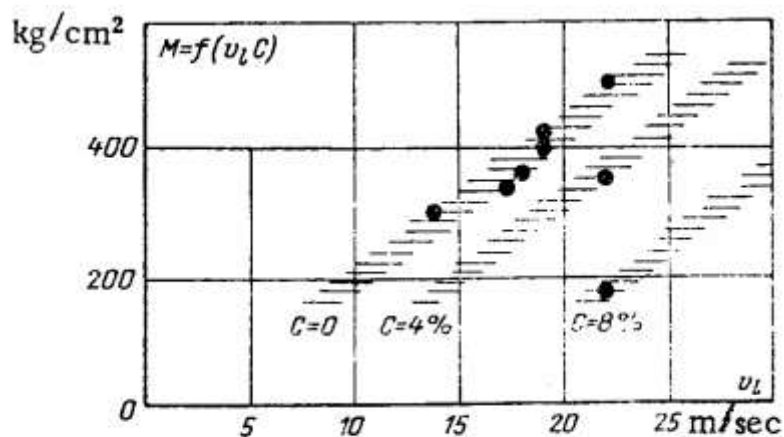


Figura 2 – Relação entre as velocidades, a resistência a compressão e a aeração do escoamento. (Fonte: Gal'perin et al., 1971)

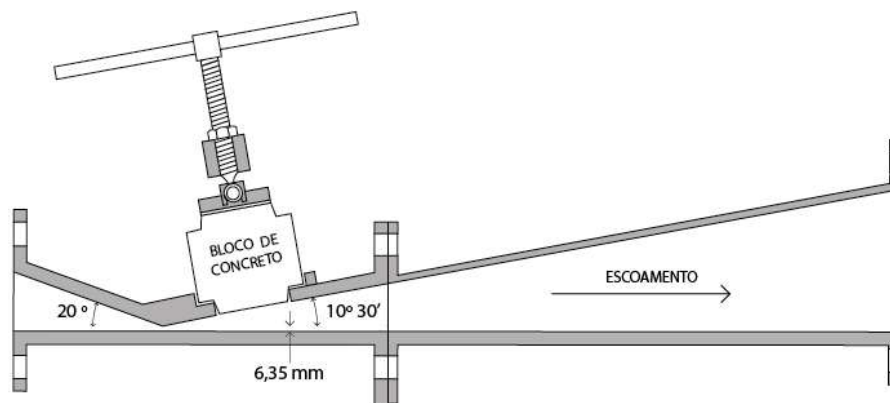
As concentrações de ar presentes no escoamento são definidas por Gal'perin (1953) através da Equação [1], que quantifica as relações das vazões de ar e água como sendo:

$$C (\%) = \frac{Q_{ar}}{Q_{\acute{a}gua}} \cdot 100\% \quad [1]$$

Onde:  $C$  é a concentração de ar (%);  $Q_{ar}$  vazão de ar inserida ao escoamento (l/s), e;  $Q_{\acute{a}gua}$  a vazão de água utilizada no experimento (l/s).

## METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no “*Hydraulic Laboratory do United States Bureau of Reclamation*” em Denver nos EUA, onde a máquina de cavitação está instalada (Figura 3). Foram confeccionados 5 (cinco) blocos de concreto com os respectivos fatores de água/cimento (a/c): 0.35 + *Superfluidiser (SF)*; 0.35; 0.50; 0.65 e 0.70. Paralelamente aos ensaios com os blocos de concreto no dispositivo do USBR, foram realizados ensaios de ruptura por esforços de compressão de corpos cilíndricos compostos dos mesmos traços do concreto expostos ao fenômeno da cavitação com o objetivo de determinar a resistência média de cada fator a/c considerado nesse estudo.



**Figura 3** – Representação da máquina de cavitação. (Fonte: USBR, 1963).

Os ensaios para a determinação da curva de resistência média à compressão em relação ao tempo de cura dos concretos foram elaborados de acordo com a norma ASTM C 39 e executados pelo *Concrete Laboratory* do USBR.

Na máquina de cavitação, cada um dos blocos de concreto foi posicionado com uma de suas faces exposta ao escoamento. Fotografias do bloco foram realizadas antes e após o ensaio, objetivando registrar os dados ocorrido. Para cada um dos ensaios, o bloco foi exposto à cavitação em circuito hidráulico fechado e nas condições já descritas por Peterka (1953) e USBR (1963), durante 4 (quatro) horas de funcionamento da máquina.

Para estimar o volume perdido de concreto após a exposição ao efeito do escoamento em alta velocidade foram realizadas pesagens hidrostáticas de acordo com a metodologia sugerida pela norma ASTM C 642. A balança utilizada para realizar as medidas tem precisão de 0,1g. A aquisição da massa do bloco foi realizada de duas formas (bloco seco e bloco submerso) em dois momentos distintos (antes da exposição à cavitação e após as 4 horas do ensaio). Em seguida, os cálculos para obtenção dos volumes perdidos foram definidos pela Equação [2].

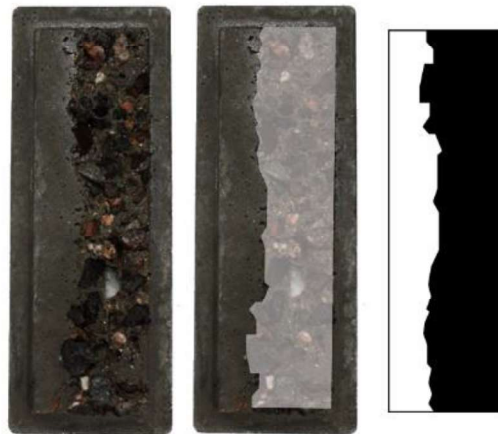
$$Volume = \frac{ms - mss}{\rho_{\acute{a}gua}} \quad [2]$$

Sendo:  $ms$  a massa seco do bloco (g);  $mss$  a massa do bloco submerso (g);  $\rho_{\acute{a}gua}$ : a massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

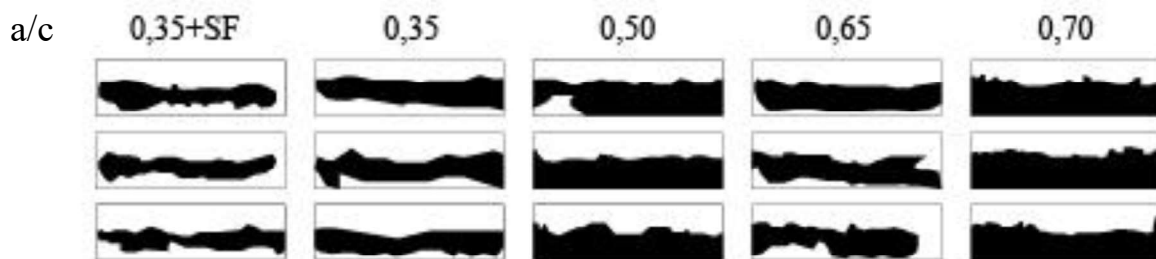
As áreas superficiais danificadas dos blocos foram estimadas por meio de imagens com auxílio do software *AutoCAD*®. Nele foram hachurados todos os desgastes superficiais, representados pela



Figura 4 e Figura 5, e obtidos os seus respectivos valores de áreas. Tendo por base, então, os volumes perdidos e as áreas danificadas os valores de profundidades médias de erosão em cada bloco de concreto analisado foram determinados.



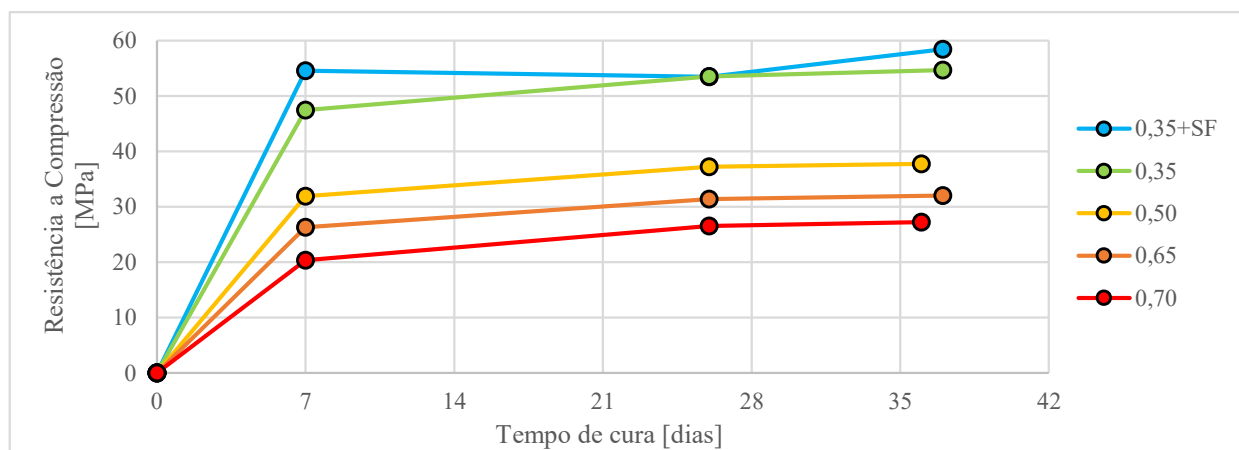
**Figura 4** – Estimativa dos desgastes superficiais representados por meio das áreas dos danos oriundos pelo fenômeno de cavitação, bloco com fator  $a/c = 0,70$ .



**Figura 5** – Desgastes superficiais hachurados dos respectivos blocos abordados pelo trabalho.

## RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios de ruptura à compressão enviados pela equipe técnica do *Bureau of Reclamation Concrete Laboratory* são expressos na Figura 6, onde são apresentadas as resistências médias a compressão para os concretos com diferentes relações água/cimento. Dessa forma, pode-se observar que o maior ganho de resistência à compressão foi obtido nos primeiros 7 dias de cura independentemente do concreto avaliado. Após 21 dias não foram registrados aumentos significativos das resistências, confirmando comportamento já amplamente consolidado.



**Figura 6** – Resistência média a compressão em relação ao tempo de cura dos corpos cilíndricos.

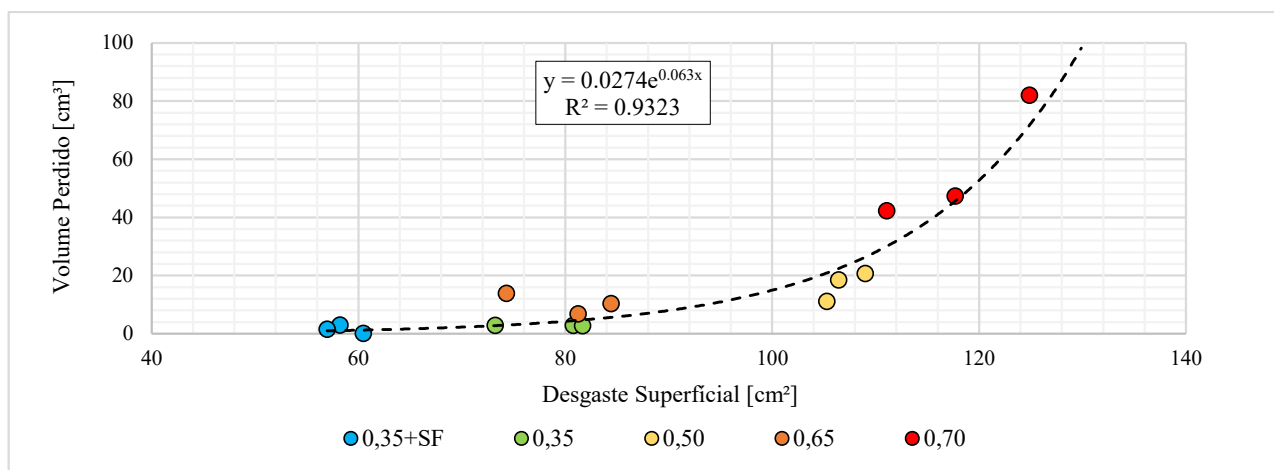
Na Tabela 1 são apresentadas as perdas volumétricas, superficiais (área) e de profundidade média do dano para cada um dos blocos de concreto após a ação do fenômeno de cavitação.

**Tabela 1** – Perda volumétricas, superficiais e profundidade em médias.

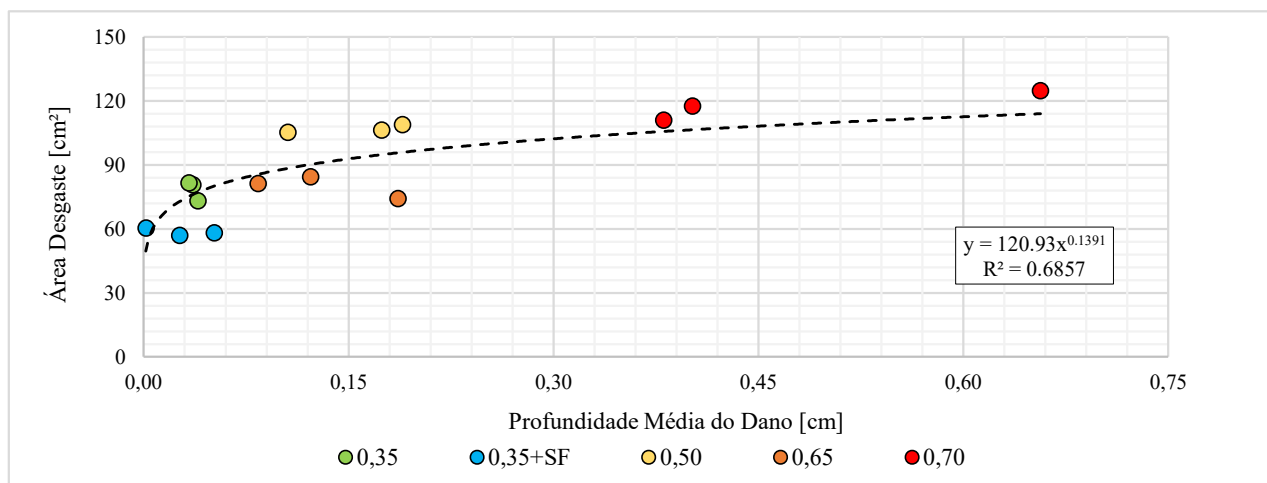
a/c	Volume Médio Perdido [cm <sup>3</sup> ]	Área Média de Desgaste [cm <sup>2</sup> ]	Profundidade Média do Desgaste [cm]
0.35+SF	1.536	58.540	0.027
0.35	2.839	78.543	0.036
0.50	16.767	106.899	0.156
0.65	10.321	79.980	0.131
0.70	57.181	117.873	0.480

De acordo com a Tabela 1, as maiores perdas registradas ocorreram nos blocos com fator água/cimento de 0.70, sendo as menores perdas definidas aos blocos de menor a/c com a presença de aditivo *Superfluidiser* (0.35+SF). O aditivo tem como função aumentar a trabalhabilidade do concreto fresco sem aumentar a sua resistência. Porém, nesse estudo foi responsável por reduzir ainda mais as perdas de material quando exposto ao efeito do escoamento de alta velocidade, principalmente quando comparado ao bloco de mesma relação a/c (0.35) sem *Superfluidiser*, comportamento anômalo ao esperado.

Em seguida é apresentada, pela Figura 7, as relações entre as perdas volumétricas e superficiais de cada um dos blocos. A relação entre as áreas médias dos desgastes e as profundidades médias extraídas das irregularidades da superfície é apresentada pela Figura 8.

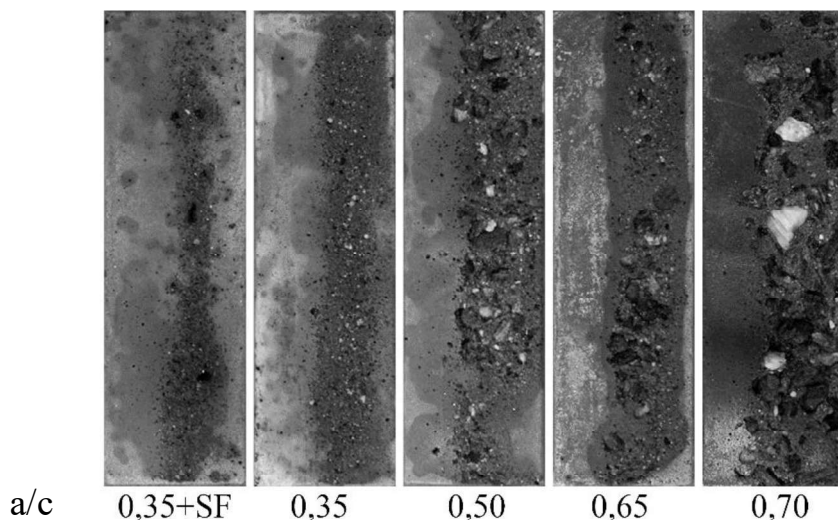


**Figura 7** – Relação entre perdas volumétrica e superficiais dos blocos.



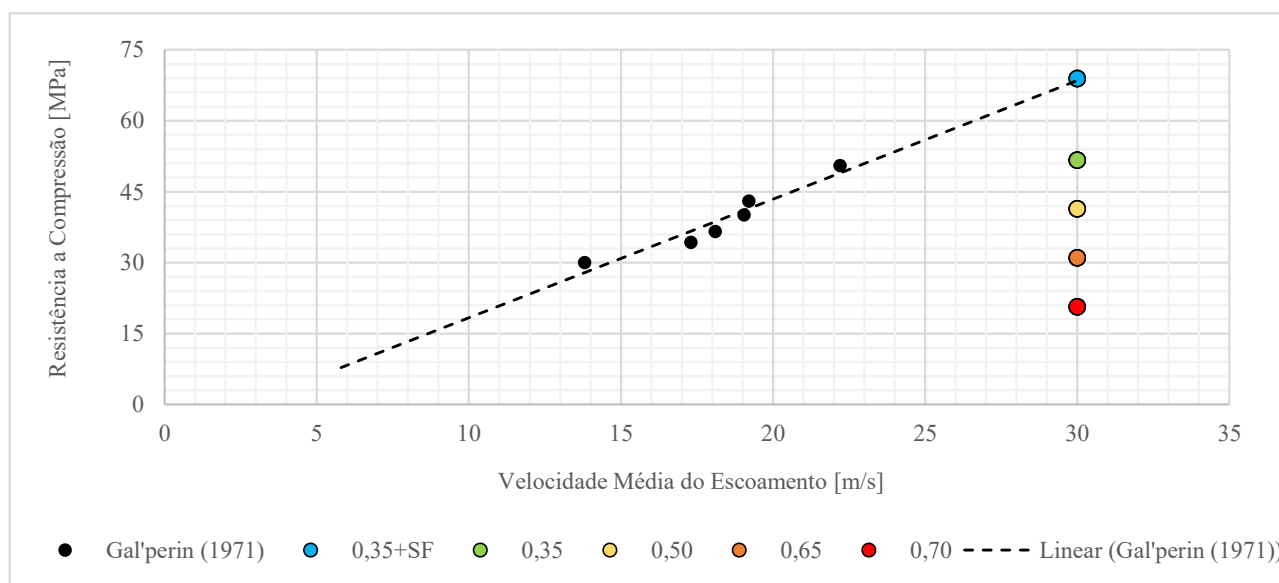
**Figura 8** – Relação entre profundidade média dos danos e perdas superficiais dos blocos.

Nas Figuras 7 e 8 pode-se observar um comportamento semelhante quando são avaliados blocos de mesma relação água/cimento. Porém, para os blocos de  $a/c = 0,50$  foram registradas maiores áreas médias de desgaste do que os resultados extraídos para a relação  $0,65$ . As maiores profundidades foram estimadas para os blocos de menor resistência à compressão, expresso nos registros fotográficos realizados (Figura 9).



**Figura 9** – Desgaste dos blocos após a exposição a cavitação.

Os resultados referentes às resistências médias à compressão são exibidos na Figura 10 em comparativo com os dados de Gal'perin et al. (1971) sem a inserção de ar no escoamento.



**Figura 10** – Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios realizados e os expressos por Gal'perin et al. (1971).

Conforme apresentado na Figura 10, o bloco que melhor representaria a tendência dos dados de Gal'perin et al. (1971), seria o concreto de relação  $a/c$  de  $0,35+SF$ , extrapolando a faixa de resistência original avaliada pelos autores, para as mesmas condições de escoamento sem presença de ar no sistema. Possivelmente, pode-se inferir que os demais blocos de concreto avaliados devem compreender uma região a ser definida pela propensão a ocorrência de cavitação dos autores, a qual deverá ainda ser complementada com futuros ensaios considerando diferentes velocidades de escoamento.

## CONCLUSÃO

Considerando as áreas estimadas pelas imagens e os volumes definidos pelas perdas de massa após os ensaios, foi possível observar uma tendência em relação aos seus comportamentos, sendo que os blocos com os menores fatores de água/cimento ( $0,35+SF$  e  $0,35$ ) foram caracterizados pelas menores perdas médias causadas pela ação da cavitação. Já nos blocos com os maiores fatores de água/cimento foram identificadas maiores profundidades médias de desgaste. No entanto, de acordo com o gráfico de Gal'perin et al. (1971), apenas o bloco com maior resistência a compressão ( $0,35+SF$ ) acompanharia o comportamento de seus dados, e conseqüentemente, representaria a única resistência média à compressão que não sofreria danos pelo escoamento.

Para que sejam melhores definidas as regiões de não ocorrência de erosão por cavitação, torna-se necessário definir qual é a perda mínima (massa, volume ou área) a ser considerada irrisória para que, assim, seja definida uma região representativa considerando os dados obtidos nesta análise preliminar. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de realização de ensaios com diferentes concentrações de ar e velocidades de escoamento para melhor compreender a ação do fenômeno sobre diferentes composições de concreto. O equacionamento obtido na Figura 8, poderá ser utilizado, como etapa subsequente a este trabalho, com o objetivo de através da determinação das áreas dos desgastes encontrados em estruturas hidráulicas, em escala de protótipo, torna-se possível estimar um indicativo das profundidades médias das irregularidades, que poderão ou não, ser responsáveis pela intensificação do fenômeno de cavitação em estruturas hidráulicas submetidas à altas velocidades (da ordem de 30 m/s).

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao LOH/IPH/UFRGS, à Foz do Chapecó Energia e à Furnas Centrais Elétricas, pelo apoio à pesquisa e ao *Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation* (USBR) pela contribuição neste projeto. Estendemos os agradecimentos ao apoio financeiro parcial da CAPES – Brasil e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

**ASTM C642-13.** Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org).

**ASTM C39 / C39M-21.** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, [www.astm.org](http://www.astm.org).

**Bureau of Reclamation** (1963) Design and Construction of New Cavitation Machine.

**Dalfre Filho, J.G.; Genovez, A.I.B; Paulon, W.A.** (2000) Desgaste nas superfícies hidráulicas e a resistência a abrasão do concreto. *Ingenieria Estructural*. Buenos Aires, aiiio 8, n.20, p.18- 22, agosto 2000.

**Falvey, Henry T.** (1990) Cavitation in chutes and spillways. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

**Gal'perin, R.S., Kuz'min, K.K., Novikova, I.S., Oskolkov, A.G., Semenov, V.M. and Tsedrov, G.N.** (1971) Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it. *Hydrotechnical Construction*, 5(8), pp.726-732.

**Gikas, I.** (1981) 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.

**Peterka, A.J.** (1953) August. The effect of entrained air on cavitation pitting. In Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention (pp. 507-518). ASCE.

**Pinto, Nelson L. de S.** (1983) Noções básicas sobre cavitação e aeração em fluxos de alta velocidade: notas de aula. Revista Latino Americana de Hidráulica, n., Maio de 1988. Associação internacional de pesquisas hidráulicas (AIPH), 1988.

**Quintela, A., Ramos, C. M.** (1980) Proteção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas.

**Tullis, J. P.** (1982) Cavitação em sistemas hidráulicos. Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação.