

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DO DESGASTE EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO QUANDO EXPOSTAS AO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES METODOLOGIAS DE QUANTIFICAÇÃO DOS DANOS

Flavia Lorena Medeiros Pereira¹ ; Aline Saupe Abreu² ; Maurício Dai Prá³ ; Guilherme Santanna Castiglio⁴ ; Luiz Augusto Magalhães Endres⁵ ; Eder Daniel Teixeira⁶ ; Marcelo Giulian Marques⁷ ; Daniela Guzzon Sanagiotto⁸ ; Leandro de Sousa Mayer⁹ ; Edgar Fernando Trierweiler Neto¹⁰ ; Rafael Manica¹¹ & Cristian Valenti Schenk¹²

Resumo: O concreto consiste no material estrutural de maior emprego em superfícies hidráulicas de vertedouros e bacias de dissipação. Estas estruturas são constantemente submetidas a escoamentos em alta velocidades, que juntamente com as variações significativas de pressão, acabam por favorecer a ocorrência do fenômeno da cavitação nas superfícies em contato com o escoamento. Desta forma, neste artigo serão analisados os desgastes volumétricos gerados em blocos de concreto, quando submetidos a escoamentos em alta velocidade sem a inserção de ar, utilizando diferentes metodologias de quantificação dos danos. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos através de ensaios realizados expondo blocos de concreto de diferentes composições ao fenômeno da cavitação por meio de um dispositivo de cavitação (funcionamento tipo Venturi), instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH/IPH/UFRGS). Foram analisadas, para cada um dos blocos testados, as perdas volumétricas obtidas a partir de três metodologias distintas e realizado o comparativo entre elas, adotando-se os resultados do método Escâner 3D como mais precisos. Parte dos resultados obtidos foi comparado aos estudos realizados por USBR (2020). As maiores perdas volumétricas foram registradas nos blocos de concreto moldados com maiores relações água/cimento e verificou-se a relação entre a perda volumétrica e a resistência à compressão do concreto.

1) Graduanda em Engenharia Hídrica, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: flaviamp@outlook.com

2) Doutoranda do Programa e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: alsaupe@gmail.com

3) Professor Adjunto, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mauricio.daipra@ufrgs.br

4) Doutorando do Programa e Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: guilhermecastiglio@gmail.com

5) Professor titular, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: endres@ufrgs.br

6) Professor Adjunto, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: eder.teixeira@ufrgs.br

7) Professor Doutor, Departamento de Obras Hidráulicas, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mmarques@iph.ufrgs.br

8) Professora Adjunta, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: dsanagiotto@ufrgs.br

9) Graduando em Engenharia de Energia, Laboratório de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: leandro_oliveira18.10.95@hotmail.com

10) Engenheiro, Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica, Eletrobras FURNAS, Estrada do Pau da Fome 819, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: edtrier@furnas.com.br

11) Professor Associado, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: manica@iph.ufrgs.br

12) Técnico em Hidrologia, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. E-mail: cristianvschenk@gmail.com

Palavras-Chave – Cavitação, superfícies hidráulicas de concreto, escoamentos em altas velocidades.

Abstract: Concrete is the structural material most used in hydraulic surfaces of spillways and dissipation basins. These structures are constantly subjected to high-speed flows, which together with significant pressure variations, favor the occurrence of the cavitation phenomenon on the surfaces in contact with the flow. Thus, this article will analyze the volumetric wear generated in concrete blocks, when subjected to high-speed flows without the insertion of air, using different methodologies for quantifying damage. The data used in this study were obtained through tests carried out exposing concrete blocks of different compositions to the cavitation phenomenon by means of a cavitation device (Venturi-type operation), installed at the Hydraulic Works Laboratory (LOH/IPH/UFRGS). The volumetric losses obtained from three different methodologies were analyzed for each of the blocks tested and a comparison was made between them. The results of the 3D Scanner method were considered to be more accurate. Part of the results obtained was compared to studies carried out by USBR (2020). The highest volumetric losses were recorded in cast concrete blocks with higher water/cement ratios and the relationship between volumetric loss and compressive strength of concrete was verified.

Key Words: cavitation, concrete hydraulic surfaces, high velocity flows

INTRODUÇÃO

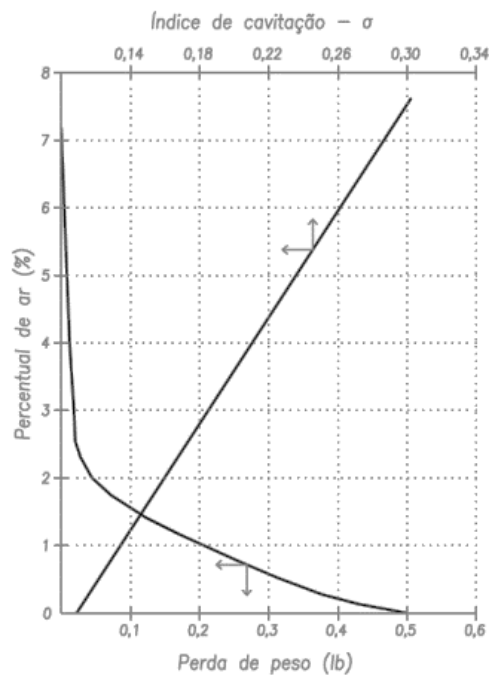
Estruturas hidráulicas de concreto, como vertedouros e bacias de dissipação, estão sujeitas a elevados esforços hidrodinâmicos que contribuem para a ocorrência do fenômeno da cavitação. O fenômeno da cavitação é caracterizado pela formação e colapso de bolhas de vapor em um fluxo, a partir do aumento de velocidade e da queda brusca de pressão. Estas bolhas de vapor tendem a implodir com o aumento da pressão. Caso o colapso ocorra próximo ao concreto, pequenos pedaços podem ser removidos, o que, ao longo do tempo, pode resultar em sérios danos ao material atingindo (PETERKA, 1953; GRAHAM, 1998).

Diversos autores avaliaram os efeitos e danos do fenômeno da cavitação em estruturas de concreto através de dispositivos do tipo Venturi, dentre eles Peterka (1953) e USBR (1963) possuem grande destaque.

Peterka (1953) realizou ensaios em uma máquina de cavitação do tipo Venturi, desenvolvida pelo *Bureau of Reclamation Hydraulic Laboratory*, no qual ocorre uma redução das pressões devido ao aumento da velocidade ao passar por uma seção contraída de dimensões 6,32 mm de altura e 305 mm de largura, propiciando a formação e posterior implosão de bolhas de vapor. Os resultados obtidos para a velocidade média do escoamento variaram de 28 a 30 m/s. Para uma vazão de aproximadamente 60 l/s observaram-se pressões médias de 41,48 m.c.a a montante da seção contraída e de 11,59 m.c.a. a jusante. Alguns dos resultados de Peterka (1953) estão apresentados na Figura 1 onde relaciona o percentual de ar no escoamento com a perda de massa.

Estudos realizados por USBR (2020) utilizando um dispositivo de cavitação buscaram encontrar uma relação entre as propriedades do concreto e as condições hidráulicas específicas de seu dispositivo de cavitação com a finalidade de que, ao projetar uma estrutura hidráulica, seja escolhido o concreto de melhor desempenho e custo-benefício. Em sua pesquisa foi observada a existência de correlações entre os danos por cavitação e a resistência do concreto, avaliando a presença de diferentes concentrações de ar no fluxo, responsável por reduzir a agressividade da cavitação nos corpos de prova estudados.

Figura 1 – Resultados dos ensaios realizados por Peterka (1953). Fonte: Ferla (2022).



Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar o desgaste volumétrico gerado em blocos de concreto com diferentes composições, quando submetidos a escoamentos em alta velocidade sem a inserção de ar no escoamento, através de diferentes metodologias de quantificação dos dados. As resistências médias à compressão dos concretos analisados e o volume erodido por relação água/cimento foram comparadas com os resultados obtidos por USBR (2020).

MATERIAIS

Os ensaios foram realizados em um dispositivo de cavitação localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. A máquina de cavitação trata-se de um dispositivo do tipo Venturi, similar ao desenvolvido pela USBR (1963), construída segundo estudo apresentado por Peterka (1953). Para os ensaios, foram utilizados blocos de concretos com relações água/cimento (a/c) de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65.

Os blocos de concreto foram fixados na máquina de cavitação com uma de suas faces exposta ao escoamento. Para cada um dos ensaios, o bloco foi exposto à cavitação sem inserção de ar no escoamento, em circuito hidráulico fechado e nas condições descritas por Peterka (1953) e USBR (1963), durante 2 horas de funcionamento. Posteriormente foi realizada a pesagem e registro fotográfico dos danos gerados no bloco.

A resistência a compressão dos concretos utilizados nos ensaios de cavitação foi obtida a partir da ruptura de corpos de prova cilíndricos, conforme NBR5739.

MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS

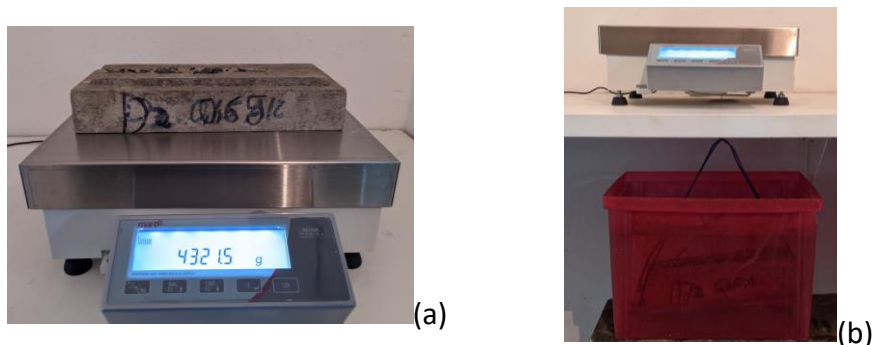
Para estimar o volume de concreto perdido pelos blocos após exposição ao fenômeno da cavitação foram utilizadas diferentes metodologias a fim de comparar os valores obtidos das perdas de volume para as relações água/cimento (a/c) verificadas. Foram realizadas três análises com distintos equipamentos para essa comparação. As metodologias adotadas foram: Pesagem Hidrostática, Mesa de Coordenadas Automatizada (Perfilador) e Escâner 3D.

As pesagens hidrostáticas (Figura 2) dos blocos com desgastes foram realizadas em uma balança da marca Marte Científica modelo AD10K com precisão de 0,1g. Para a obtenção do volume perdido foram consideradas duas pesagens, antes da exposição à cavitação e depois de 2 (duas) horas de ensaio, ambas as pesagens foram realizadas submergindo o bloco totalmente em água (pesagem hidrostática) e não submergindo-o (pesagem convencional). Em ambas as situações o bloco encontrava-se saturado. Em seguida, foram efetuados os cálculos definidos pela Equação 1 para a estimativa dos volumes erodidos a partir das relações de peso seco, submerso e a massa específica da água.

$$Volume = \frac{ms - mss}{\rho} \quad (1)$$

Em que: ms é a massa do bloco não submerso (g); mss é a massa do bloco submerso (g); ρ é a massa específica da água (g/cm^3).

Figura 2 – Pesagens hidrostáticas para bloco não submerso (a) e submerso (b)



A análise dos dados obtidos através do Perfilador (Figura 3) consistiu na determinação do volume de concreto perdido por meio da extração de pontos coordenados das alterações superficiais apresentadas pelos corpos de prova a partir de uma referência “topográfica” inalterada. Ou seja, o volume perdido foi estimado através de seções batimétricas obtidas pela Mesa de Coordenadas Automatizada, que por meio de deslocamentos contínuos nos eixos “x” e “y” (plano paralelo à superfície do bloco) e de leituras precisas realizadas por um nível a laser, marca Opto e modelo MD250 ADV (de precisão 0,1 mm) o qual obtinha-se as cotas “z”. Esse equipamento foi projetado exclusivamente pela equipe de professores e técnicos do NECOD, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade do IPH/UFRGS (Manica, 2002), tendo sido disponibilizado seu uso para o estudo em questão.

A metodologia baseada nas informações extraídas pelo Escâner 3D consistiu na análise das curvas de nível dos blocos erodidos após os ensaios no aparato experimental. Os danos superficiais dos corpos de prova foram digitalizados com o uso do Escâner 3D da marca Artec, modelo EVA de propriedade da Eletrobras FURNAS, que ao realizar sobreposições sucessivas de imagens fotográficas do objeto escaneado construiu um modelo digital em 3 (três) dimensões dos corpos de prova utilizados (Figura 4).

Os sólidos formados pela composição das imagens capturadas pela câmera do escâner 3D eram processados a partir do software do próprio equipamento (*Artec Studio 16 Professional*). Os arquivos obtidos possuíam extensão *.dwg* compatíveis com o software *AutoCad®*, o que permitia a extração

de curvas de nível com espaçamento de 0,5 mm da superfície erodida, conforme o apresentado na Figura 5.

Figura 3 – Mesa de Coordenadas Automatizada

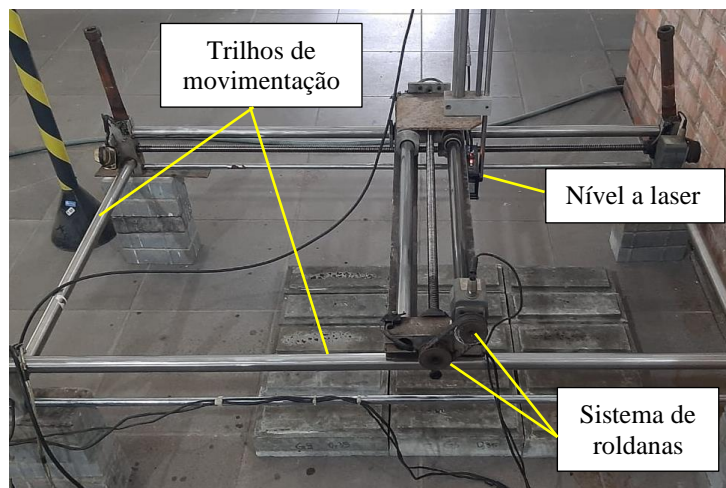


Figura 4 – Escaneamento dos blocos de concreto



Figura 5 – Sólidos e curvas de nível geradas pelo software



RESULTADOS

Considerando os blocos de concreto de relação a/c de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65, após exposição ao fenômeno da cavitação, sem a inserção de ar no sistema, foram então, definidos os volumes erodidos pelas três metodologias citadas anteriormente. Os resultados obtidos são expressos a seguir na Tabela 1, assim como suas resistências médias à compressão.

Tabela 1 – Resultados de volume erodido pelas três metodologias

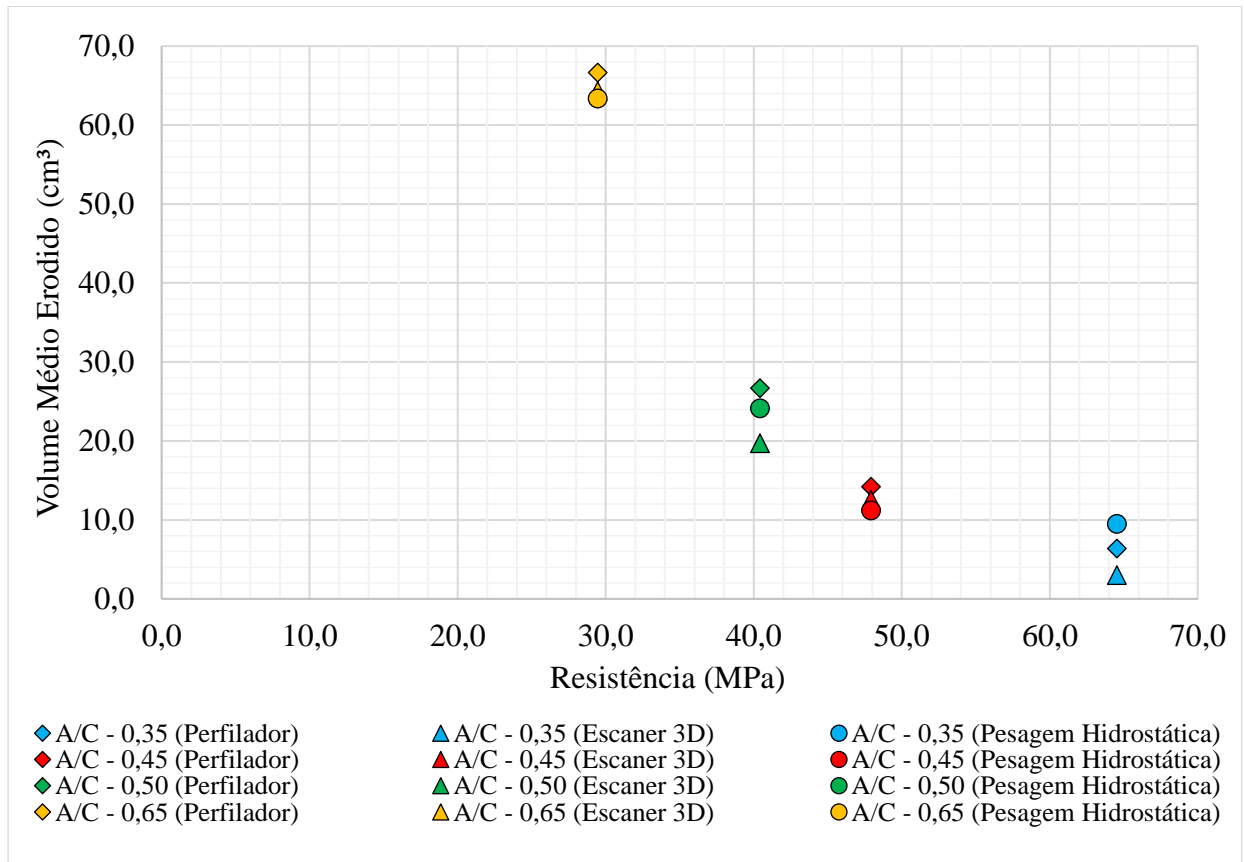
Relação água/cimento	Resistência média à compressão (MPa)	Volume erodido (cm ³)		
		Escâner 3D	Pesagem Hidrostática	Perfilador
0,35	65,54	4,42	27,60	5,37
		3,06	9,30	3,87
		0,27	0,00	4,66
		4,22	1,00	11,66
0,45	47,93	6,23	5,20	8,67
		22,44	17,70	21,35
		8,98	10,70	12,63
0,50	40,42	28,14	41,60	39,42
		13,98	9,70	16,28
		17,06	21,10	24,30
0,65	29,45	75,43	67,10	79,00
		61,19	72,90	62,84
		56,22	50,10	58,08

Conforme apresentado na Tabela 1, as maiores perdas volumétricas foram registradas para a relação a/c de 0,65 enquanto as menores para a relação a/c de 0,35, independente da metodologia analisada.

A Figura 6 apresenta o comparativo entre os resultados dos volumes de concreto erodidos, estimados a partir das três diferentes metodologias de análise (Pesagem Hidrostática, Perfilador e Escaner 3D) e as resistências médias à compressão dos ensaios de ruptura por compressão.

Por meio da Figura 6, nota-se que, mesmo tratando-se de diferentes metodologias, é possível identificar que os resultados de volume erodido possuem comportamento semelhante quando avaliada a mesma relação a/c. Além disso, é notável que as maiores perdas foram registradas para a relação a/c de 0,65 e as menores para a relação a/c de 0,35, tendo um comportamento decrescente em função do aumento da resistência média dos concretos analisados.

Figura 6 – Relação entre as estimativas dos volumes médios erodidos, para cada metodologia e a resistência média à compressão dos concretos utilizados.



Com base nos resultados obtidos nas análises de volume erodido para cada metodologia, foi possível avaliar a eficiência dos equipamentos utilizados. Para fins de comparação o método do Escâner 3D foi adotado como o mais preciso entre os três analisados, devido à alta precisão das digitalizações dos objetos, e a partir dele, foram feitas comparações com as outras metodologias. A Figura 7 relaciona o volume erodido calculado a partir das curvas de nível obtidas pelo Escâner 3D com os do perfilador, observa-se que, de maneira geral, ambos os métodos apresentam resultados coerentes, com o perfilador indicando perdas volumétricas superiores, mas com variabilidade admitida como aceitável.

A Figura 8 apresenta a comparação entre o volume erodido do Escâner 3D com os das Pesagens Hidrostáticas, nota-se que para todas as relações a/c os dados apresentam maior dispersão quando comparados com os resultados expressos na Figura 7, tais diferenças podem estar relacionadas com incertezas relacionadas ao processo de pesagem hidrostática, à determinação da massa específica dos corpos de prova de concreto, dentre outros fatores até o momento não identificados.

Figura 7 – Relação entre os valores de volume erodido das curvas de nível e perfilador

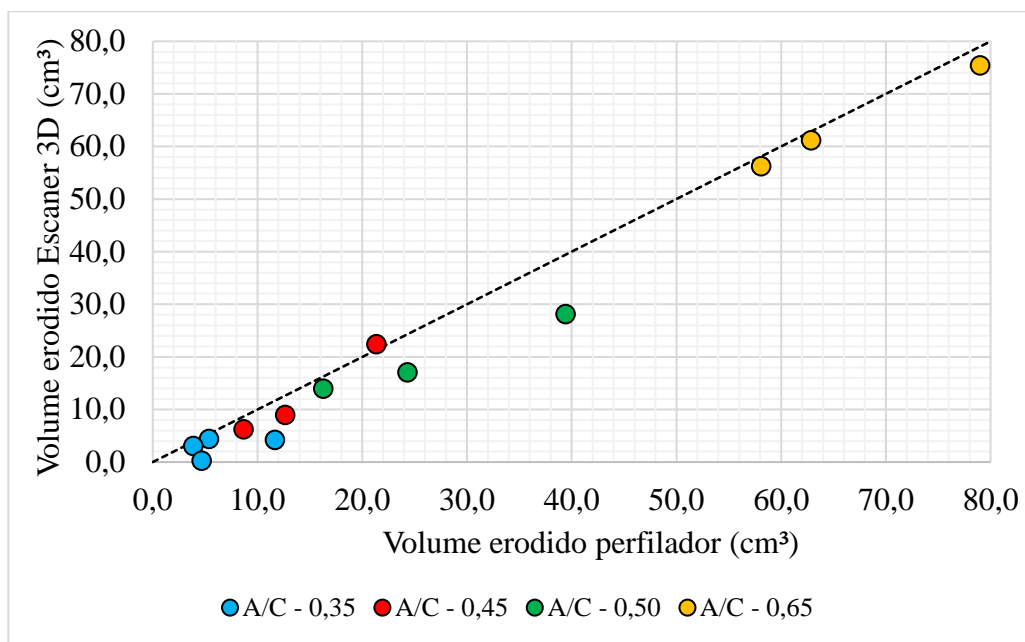
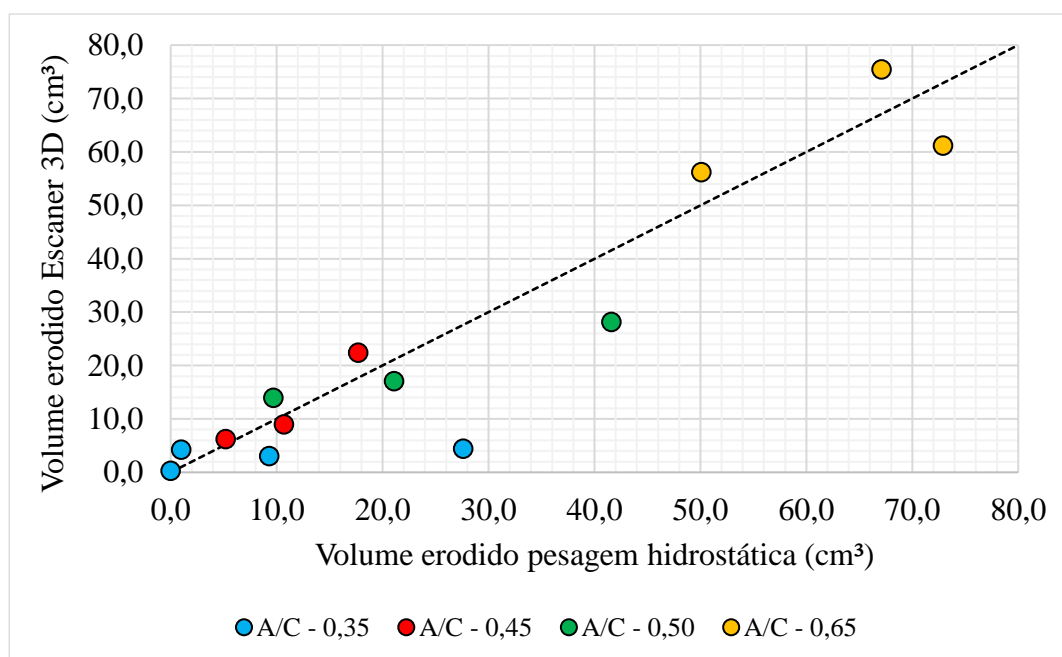
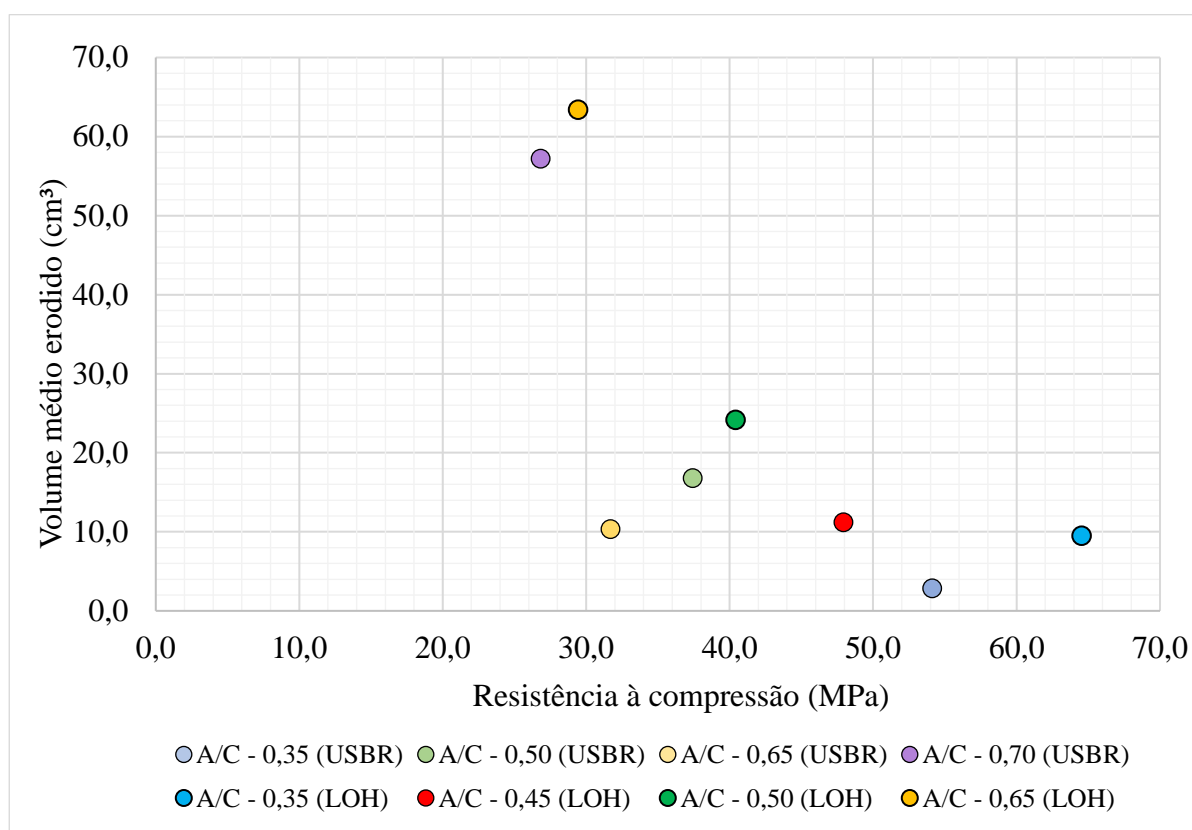


Figura 8 – Relação entre os valores de volume erodido das curvas de nível e da balança hidrostática



Os resultados referentes à resistência média à compressão por volume erodido, obtidos a partir das pesagens hidrostáticas, são exibidos na Figura 9 em comparativo com os dados de USBR (2020). Cabe salientar que ambos os dispositivos (USBR, 2020 e o utilizado neste estudo) são idênticos em termos áreas do bloco sujeitas ao escoamento e geometria.

Figura 9 – Comparativo entre os resultados e os valores obtidos por USBR (2020)



Conforme apresentado na Figura 9, há uma relação entre a resistência à compressão e o volume médio perdido dos blocos, onde, os blocos com maior relação a/c possuem menores resistências a compressão e conseqüentemente sofrem mais danos erosivos. Esse comportamento foi observado para todos os dados.

Ao analisar a relação entre os volumes perdidos em ambos os conjuntos de dados, observa-se um comportamento similar. As diferenças entre os dados da USBR e LOH para as mesmas relações água/cimento podem estar relacionadas ao tempo de cura do concreto ou a problemas na moldagem dos corpos de prova, uma vez que esses fatores impactam diretamente o valor da resistência à compressão. Acrescenta-se, ainda, que o valor médio erodido dos blocos da relação a/c 0,65 obtidos pelo USBR (2020), foge por completo da tendência de comportamento esperado, já que à medida que a resistência à compressão dos blocos de concreto aumenta, a perda volumétrica tende a diminuir.

CONCLUSÕES

A partir dos blocos de concreto ensaiados foram quantificados e comparados os volumes erodidos pelas três metodologias utilizadas. Foram realizadas comparações com os resultados obtidos pela USBR (2020) para relações água/cimento semelhantes.

Os resultados de volume erodido permitiram identificar uma relação entre a perda volumétrica e a resistência à compressão do concreto, onde com o aumento da relação água/cimento as perdas volumétricas devido à ação da cavitação tendem a ser maiores. O volume médio erodido segue uma tendência bem definida, tanto se forem considerados os dados dos experimentos de USBR (2020) e quanto para os blocos ensaiados neste estudo. Além disso, nota-se que mesmo utilizando diferentes metodologias para quantificar o volume erodido, os blocos com maiores perdas foram registrados

para a relação a/c de 0,65 e as menores para a relação a/c de 0,35, observando um comportamento decrescente em função do aumento da resistência média dos concretos analisados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Foz do Chapecó Energia e à Eletrobras-FURNAS pelo apoio à pesquisa que está sendo desenvolvida de maneira cooperada com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no âmbito do programa de P&D ANEEL através do projeto de P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas e ao Laboratory of Hydraulic do United States Bureau of Reclamation(USBR) pela contribuição neste projeto.

REFERÊNCIAS

BUREAU OF RECLAMATION (1963). *Design and construction of new cavitation machine*.

BUREAU OF RECLAMATION (2020). *Collaborative Studies to Reduce flow-induced damage on concrete hydraulic surfaces*.

FERLA, R. *Vertedouro em degraus com aeração induzida: análise do escoamento com sistema aerador em diferentes posições*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2022.

GRAHAM, J. R. (1998). *Erosion of Concrete in Hydraulic Structures*.

MANICA, R. *Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada*. Tese (Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2002.

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, Minneapolis, Set. 1953.