

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA PERDA DE MASSA EM DIFERENTES CORPOS DE PROVA EM CONCRETO APÓS EXPOSIÇÃO AO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

Leandro de Sousa Oliveira¹; Aline Saupe Abreu²; Mauricio Dai Prá³; Eder Daniel Teixeira⁴; Luiz Augusto Magalhães Endres⁵; Daniela Guzzon Sanagiotto⁶; Marcelo Giulian Marques⁷; Edgar Fernando Trierweiler Neto⁸; Guilherme Santanna Castiglio⁹; Pedro Guido Mottes Bassegio¹⁰

Resumo: A cavitação é um fenômeno que ocorre quando a pressão de água é reduzida abaixo da pressão de vaporização, formando bolhas de vapor que, quando implodem próximas a superfícies hidráulicas, podem causar danos significativos à estrutura. A adição de ar ao escoamento reduz a severidade dos danos causados pela cavitação em sistemas hidráulicos. O Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul construiu um sistema capaz de, em condições específicas, reproduzir o fenômeno da cavitação e seus efeitos em corpos de prova de concreto, permitindo estudar como os danos devidos ao efeito de cavitação se relacionam com a resistência do concreto e como a inserção de ar no escoamento pode reduzir a ocorrência dos danos causados por esse fenômeno. Foram realizados testes em 73 corpos de prova de concreto com relações água/cimento variando entre 0,35 e 0,65. Os corpos de prova foram expostos ao fenômeno durante 120 minutos, onde foram pesados e fotografados para que fosse avaliada a evolução da perda de massa ao longo do tempo. Constatou-se que a adição de 2% de ar no escoamento reduziu em até 95% a perda de massa nos corpos de prova. Observou-se que corpos de prova com maior resistência à compressão tendem a perder menos massa. Notou-se, também, que para o escoamento não aerado a adição de ar ao escoamento reduz significativamente a taxa de perda de massa ao longo do tempo.

Palavras-Chave – Cavitação; Perdas de Massa; Dano em Concreto.

Abstract: Cavitation is a phenomenon that occurs when water pressure is reduced below the vaporization pressure, forming vapor bubbles that, when they implode near hydraulic surfaces, can cause significant damage to structures. Adding air to the flow reduces the severity of damage caused by cavitation in hydraulic systems. The Hydraulic Works Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul built a system capable of, under specific conditions, reproducing the phenomenon of cavitation and its effects on concrete specimens, allowing the study of how damage due to the cavitation effect is related to with concrete strength and how the insertion of air in the flow can reduce

¹ Graduando em Engenharia de Energia, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: leandro.sousa@ufrgs.br.

² Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, LOH, IPH, UFRGS, 9500, Porto Alegre, Brasil, e-mail: alsaupe@ufrgs.br

³ Professor Doutor, DOH, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: mauricio.daipra@ufrgs.br

⁴ Professor Doutor, DOH, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: eder.teixeira@ufrgs.br.

⁵ Professor Doutor, DHH, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: endres@ufrgs.br.

⁶ Professora Doutora, DHH, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: dsanagiotto@ufrgs.br.

⁷ Professor Doutor, LOH, IPH, UFRGS; e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.

⁸ Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Eletrobrás - FURNAS, e-mail: edtrier@furnas.com.br.

⁹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, LOH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, E-mail: guilhermecastiglio@gmail.com.

¹⁰ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, LOH, IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, e-mail: pedroguido33@hotmail.com.

the occurrence of damage caused by this phenomenon. Tests were performed on 73 concrete specimens with water/cement ratios ranging from 0.35 to 0.65. The specimens were exposed to the phenomenon for 120 minutes, where they were weighed and photographed in order to evaluate the evolution of mass loss over time. It was found that the addition of 2% air in the flow reduced by 95% the mass loss of the specimens. It was observed that more cohesive specimens (with greater resistance to compression) tend to lose less mass. It is also noted that for the non-aerated flow the addition of air to the flow significantly reduces the rate of mass loss over time.

Key words – Cavitation; Mass Loss; Concrete Damage.

INTRODUÇÃO

A cavitação é um fenômeno que ocorre quando a pressão no escoamento é reduzida abaixo da pressão de vaporização do fluido, formando bolhas de vapor que, quando implodem próximas a superfícies hidráulicas, podem causar danos significativos a estruturas hidráulicas. Considerando um escoamento turbulento de alta velocidade, eventualmente, ocorre que a pressão local se torne muito baixa, tornando possível observar o efeito de vaporização da água mesmo a uma temperatura ambiente. Henn (2001), indica que a implosão das bolhas de vapor gerados pelo fenômeno da cavitação pode gerar ondas de choque que se propagam com uma frequência de 10 a 180 kHz, podendo causar o aumento repentino da pressão local de 60 a 200 MPa.

A coesão interna dos materiais é a característica mais importante para a determinação de sua suscetibilidade aos danos por cavitação. Materiais mais coesos tendem a ter menos desprendimentos durante o processo de implosão das bolhas. O concreto, material composto formado por argamassa e agregado, possui coesão interna inferior a materiais metálicos devido à existência de pontos de fragilidade na região de contato entre o agregado e a argamassa, sendo assim os efeitos de cavitação podem causar rupturas mais severas quando atuantes nessas regiões de vulnerabilidade (Colgate, 1977). Em superfícies de concreto as implosões das bolhas em contato com essas estruturas podem gerar pressões instantâneas localizadas extremamente altas que propiciam a ocorrência de pequenas fissuras e eventuais rupturas por fadiga, sendo a remoção sucessiva de material de revestimento a causadora de danos significativos na estrutura de concreto (Kells e Smith, 1991).

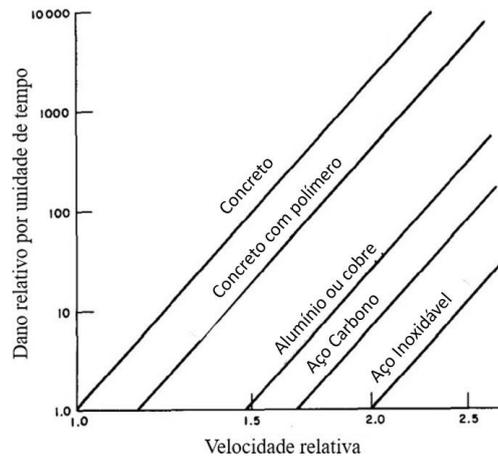
Colgate (1977) e Falvey (1990) desenvolveram estudos relacionando a ocorrência de danos por cavitação a diferentes tipos de materiais, dentre eles, o concreto. Os resultados de Falvey (1990) mostraram que, para diferentes superfícies sólidas quando expostas à mesma condição cavitante, o concreto sofre mais danos quando comparado aos materiais metálicos. Esses danos estão associados às fragilidades que ocorrem na região de contato entre o agregado e a argamassa do cimento Portland. A Figura 1 mostra os resultados obtidos por Falvey (1990) comparando o dano relativo por unidade de tempo de distintos materiais quando expostos a um dispositivo tipo Venturi com velocidade do escoamento de 30 m/s.

Peterka (1953) informa que a adição de ar ao escoamento reduz a severidade dos danos causados pela cavitação em sistemas hidráulicos. O autor indica ainda a inserção de dispositivos que permitam a adição de ar aos escoamentos que possam estar sujeitos ao fenômeno de cavitação. Os dispositivos utilizados para adição de ar no escoamento são os aeradores, os quais podem apresentar a presença de defletores, degraus, ranhuras ou alguma combinação entre si (Abreu, 2022).

Diferentes estudos foram realizados na instalação experimental do United State Bureau of Reclamation (USBR), de forma a permitir a ocorrência dos efeitos da cavitação em corpos de provas de concreto com diferentes resistências à compressão. Durante seus ensaios os autores determinaram que o dano pelos efeitos de cavitação depende de dois fatores principais: a resistência do concreto e a quantidade de ar inserida no escoamento. A Figura 2 mostra a relação de perda de massa para as concentrações de ar de 0%, 0,25%, 0,5%, 1% e 2%, e para diferentes relações água/cimento (A/C) de concreto. Nota-se que a perda de massa reduziu significativamente conforme foi adicionado ar ao escoamento. A título de exemplo, para os corpos de prova com relação A/C de 0,70 a perda média de

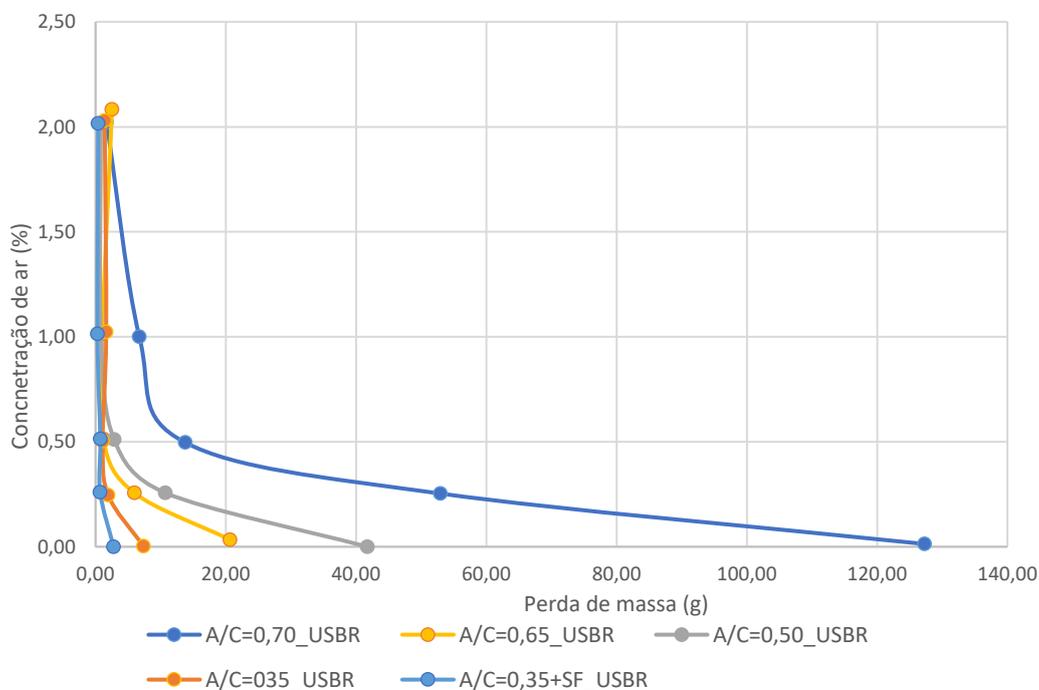
massa foi reduzida de 127,3 g (0% de ar) para 1,7 g inserindo 2% de ar no escoamento. Também é possível verificar que, para um escoamento não aerado o bloco de A/C 0,70 perdeu 127,3 g, enquanto que o bloco de A/C 0,35 perdeu 7,3 g em média.

Figura 1: Dano relativo em diversos materiais. Fonte: Adaptado de Falvey (1990)



Obs: O autor analisou danos em diferentes materiais relacionando-os com danos obtidos em sua estrutura experimental com corpos de prova em concreto, considerando uma profundidade média de 13mm, após testes de 3 horas de velocidade $\cong 30\text{m/s}$.

Figura 2: Perda de Massa por concentração de ar no escoamento. Fonte: Abreu (2020).



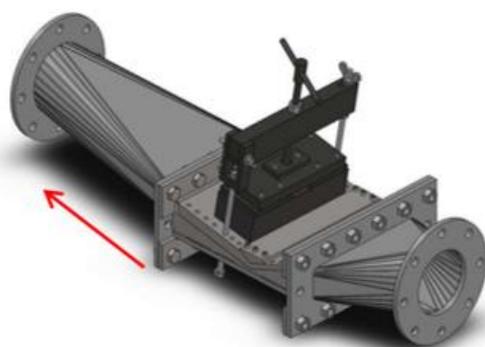
Visando o estudo dos efeitos da cavitação no concreto em superfícies hidráulicas, foi construído no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) um sistema capaz de, em condições específicas, reproduzir o fenômeno da cavitação e seus efeitos

em corpos de prova em concreto, semelhante ao dispositivo de cavitação existente no USBR. Desta forma, no presente trabalho serão apresentados os resultados referentes às perdas de massa de diferentes corpos de prova expostos à influência do fenômeno da cavitação, considerando as relações A/C de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 com concentrações de ar de 0 a 2%.

MATERIAIS

Os dados deste estudo foram coletados em um aparato experimental presente no Laboratório de Obras Hidráulicas – LOH, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, onde foi construído o dispositivo de cavitação caracterizado, inicialmente, através das definições apresentadas no USBR (1963). O dispositivo de cavitação (Figura 3) foi inserido em um sistema hidráulico composto por um conjunto motobomba, um conjunto de reservatórios e um sistema de inserção de ar comprimido (Figura 4).

Figura 3:(a) Projeto computacional do dispositivo de cavitação; (b) Dispositivo físico construído e implementado no LOH. A flecha em vermelho representa o sentido do fluxo. Fonte: Abreu (2022).

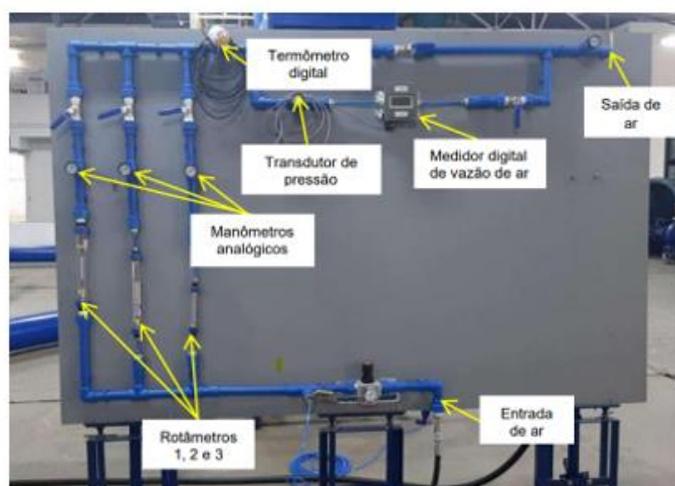


(a)



(b)

Figura 4: Sistema de inserção de ar comprimido, quadro de instrumentação (a); compressor e reservatório de ar (b).



(a)



(b)

O dispositivo de cavitação foi construído em aço inoxidável, a fim de resistir aos danos provenientes do efeito da cavitação, visto que a coesão interna desse material é o que garante as menores taxas de perda de massa entre os materiais estudados por Falvey (1990). A seção de controle do dispositivo tipo Venturi tem uma altura de 6,35mm e largura de 305 mm, onde passam

aproximadamente 60 l/s, conferindo uma velocidade média ao escoamento na seção contraída de, aproximadamente, 30 m/s.

Um conjunto motobomba de 100 CV de potência foi utilizado para operar o sistema. O controle da vazão de ensaio foi realizado através de um inversor de frequência. A água disponível para o sistema é armazenada em um conjunto de dois reservatórios de água, formando um circuito fechado.

A inserção de ar no sistema foi realizada através de uma válvula gaveta de ½” pol de diâmetro responsável por conectar a tubulação do sistema hidráulico à tubulação em PPR do sistema de geração e controle de ar, composto de um compressor de 15 hp, com pressão de trabalho de 7,5 bar, alimentado através de um reservatório cilíndrico de 425,0 litros.

Características dos corpos de prova

Durante os ensaios no LOH foram moldados 24 blocos com relação A/C = 0,35; 22 blocos com relação A/C = 0,45; 14 blocos com relação A/C = 0,5; e, 13 blocos com relação A/C = 0,65. Na Tabela 1 são apresentadas as quantidades de material necessário para moldar um metro cúbico do concreto para cada um dos traços estudados.

Tabela 1: Parâmetros dos concretos estudados. Fonte: Adaptado de Abreu (2022).

Material	Quantificação dos materiais utilizados (kg/m ³)			
	A/C = 0,35	A/C = 0,45	A/C = 0,50	A/C = 0,65
Cimento	632,4	547,8	511,4	364,7
Agregado Graúdo	1220,6	1271,8	1280,4	1243,1
Agregado Miúdo	988,6	1080,9	1101,1	1156,2
Água	220,9	246,2	255,9	256,1

Os traços de concreto utilizados foram expostos a testes de resistência à compressão, onde determinou-se que a resistência do concreto com A/C = 0,35 é de 64,5MPa, a do traço com A/C = 0,45 é de 47,9MPa, a do traço com A/C = 0,50 é de 40,4 MPa e a do traço com A/C = 0,65 é de 29,4 MPa. A partir dos traços especificados foram moldados os blocos de concreto com as dimensões de 304,8 mm de comprimento, 114,3 mm de largura e 72,0 mm de altura para os estudos experimentais no dispositivo de cavitação. A Figura 5 apresenta um exemplo de corpo de prova antes e após exposição ao fenômeno da cavitação, sem presença de ar, para o concreto de A/C = 0,45.

Figura 5: Corpo de prova modelado antes do ensaio (a), e após o ensaio de 2hs na máquina de cavitação do LOH, sem a inserção de ar (b).



(a)

(b)

MÉTODOS

Utilizando-se do aparato experimental do LOH foi adotada a mesma metodologia empregada por Peterka (1953) e USBR (2020) para a realização dos ensaios no dispositivo de cavitação. Para cada bloco que seria exposto ao experimento, foram realizados registros fotográficos a fim de permitir uma comparação visual do desgaste ao longo do tempo. Em seguida os blocos foram pesados e fixados no dispositivo de cavitação, de maneira a garantir a estanqueidade da região de contato entre a máquina e o corpo de prova. Na sequência o conjunto motobomba foi acionado de forma a garantir que a vazão de ensaio fosse, em média, igual para todos os corpos de prova. Por fim, foi ajustada a aeração no fluxo, utilizando o sistema de injeção de ar comprimido, das válvulas gaveta para ajuste das concentrações de ar, e dos rotômetros utilizados para a determinação da vazão de ar a ser considerada nos ensaios.

Os blocos foram mantidos no dispositivo de cavitação durante 30 minutos, e após esse tempo eram removidos, fotografados, pesados e novamente inseridos na máquina de cavitação, até que cada corpo de prova completasse o tempo máximo de duas horas de exposição à cavitação ou até que os danos fossem tais que não permitissem a continuidade do experimento sem comprometer a segurança do dispositivo ou dos operadores envolvidos.

RESULTADOS

Os danos verificados nos diferentes tipos de concreto foram analisados em função das perdas de massa e relação água/cimento dos corpos de prova, após exposição ao fenômeno da cavitação. Com os resultados obtidos também foi possível verificar qual foi a influência de diferentes concentrações de ar inseridas ao escoamento, de forma a detectar a interferência da aeração na perda de massa dos corpos de prova durante a ocorrência do fenômeno da cavitação.

Na Figura 6, observa-se que existe uma evidente queda nas perdas de massa médias conforme há um aumento das concentrações de ar no escoamento, para todos os traços de concreto. Por exemplo, para o traço de relação A/C= 0,65 a perda de massa dos blocos expostos ao escoamento não aerado foi de aproximadamente 152,0 g, enquanto, para o escoamento com 2,0% de ar as perdas de massa registradas não ultrapassaram 8,2g. Já quando se observa o comportamento da perda de massa para os diferentes tipos de concreto utilizados neste estudo, percebe-se que quando não há aeração no escoamento os blocos de maior relação A/C e, portanto, menor resistência a compressão, perdem mais massa, indicando conformidade com os resultados de Peterka (1953). Conforme é adicionado mais ar ao escoamento, essas diferenças diminuem consideravelmente, o que indica que a concentração de ar é um dos principais fatores de redução dos danos ocasionados pelo fenômeno da cavitação em superfícies de concreto de mesma composição dos blocos considerados nesta pesquisa.

A Figura 7 apresenta o comparativo entre os resultados obtidos nesse estudo e os definidos pelo USBR (2020). Estão sendo apresentados os resultados após 2h de exposição dos corpos de prova ao efeito da cavitação, para condições hidráulicas (vazão e pressão idênticas). Pode-se observar a semelhança de comportamento entre os dados extraídos pelo LOH e as informações coletadas na bibliografia de um sistema similar ao implementado no IPH/UFRGS. Em geral, em ambos os dispositivos de cavitação (LOH e USBR), as perdas de massa dos blocos de concreto foram decrescendo em função do aumento da inserção de ar e da resistência do concreto. Porém, foi constatado que, para as relações A/C de 0,35; 0,50 e 0,65 as perdas de massa dos corpos de concreto do USBR (2020) e LOH não apresentaram valores próximos, tendo os blocos ensaiados no LOH perdido mais massa do que os do USBR.

Figura 6: Resultados obtidos para as perdas de massa média em função das diferentes concentrações de ar consideradas

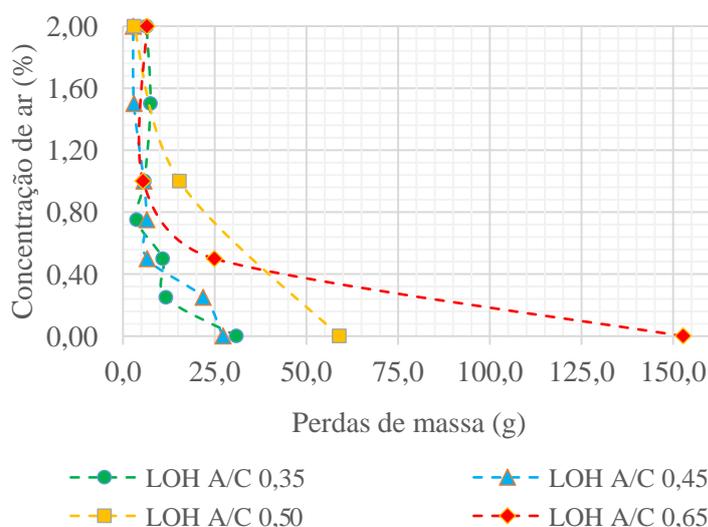
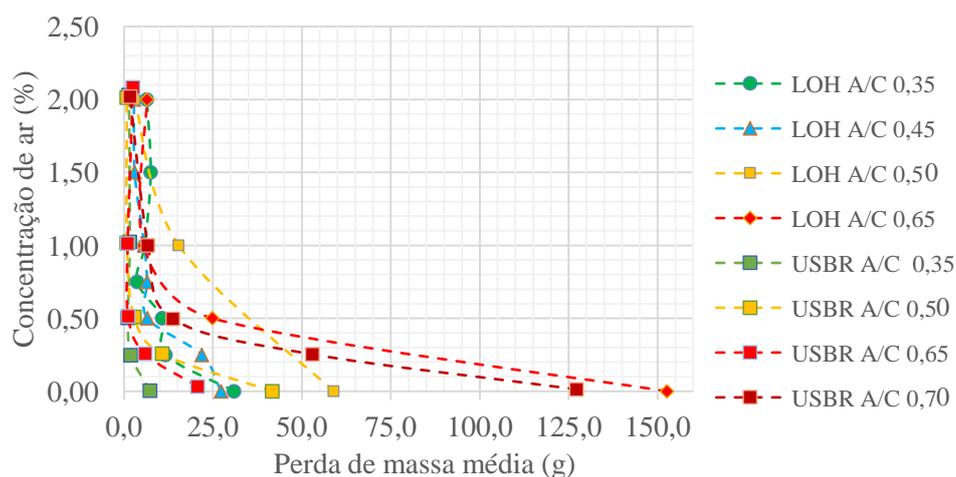


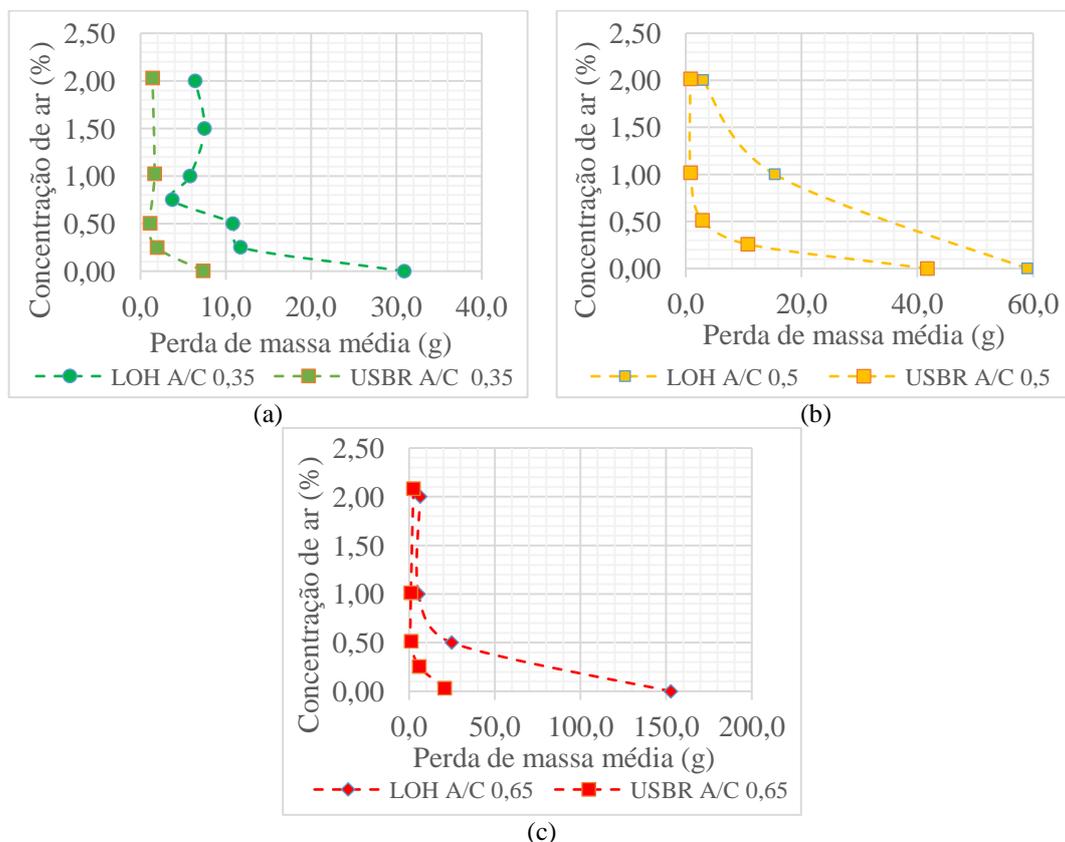
Figura 7: Comparativo entre as perdas de massa dos blocos ensaiados no LOH e no dispositivo de cavitação do USBR.



Na Figura 8 (a, b e c) foram evidenciadas as diferenças de perda de massa dos corpos de prova de mesma relação A/C dos ensaios realizados pelo LOH e o USBR. Os resultados de maiores perdas de massa foram expressos nos blocos ensaiados pelo LOH principalmente para A/C=0,50 (Figura 8b) e A/C = 0,65 (Figura 8c), possivelmente justificado por eventuais diferenças no processo de concretagem ou vibração do composto (argamassa /agregado graúdo), ou tempo de cura dos corpos de prova, visto que o dispositivo de cavitação do LOH foi construído a partir das características do sistema do USBR na tentativa de reduzir interferências na condição de formação do fenômeno da cavitação.

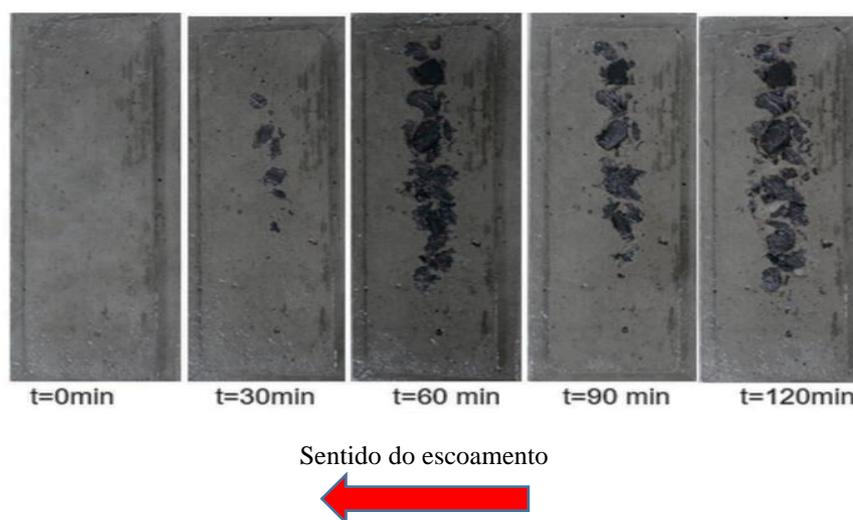
Outro aspecto relevante que influencia diretamente na perda de massa do concreto é o tempo de exposição ao fenômeno da cavitação, visto que os danos são cumulativos e intensificados pela sua ocorrência, ou seja, a presença de irregularidades ou rugosidades na superfície analisada acaba por acentuar os efeitos de desgastes/erosões locais. Desta forma, o tempo de exposição a cavitação também foi considerado durante a realização dos ensaios no LOH.

Figura 8: Comparativo entre as concentrações de ar e as perdas de massa dos blocos ensaiados no LOH x USBR, para $A/C=0,35$ (a); $A/C=0,50$ (b), e; $A/C=0,65$ (c).



Em virtude disto, a Figura 9 , apresenta a evolução dos danos ocasionados pela cavitação ao longo de um período de duas horas para um bloco de $A/C = 0,65$, com a presença de 0,50% de ar no escoamento.

Figura 9: Evolução dos danos após 2 horas de exposição a cavitação de um bloco de $A/C = 0,65$, com 0,50% de ar no escoamento.



A Figura 10 identifica as variações de perda de massa para três corpos de prova (A6; B1 e B10) de relação $A/C = 0,5$ após serem expostos à cavitação em um escoamento não aerado, considerando intervalos de 30 min. Conforme o tempo de exposição aumenta, é possível perceber a crescente perda de massa dos corpos de prova ao longo do tempo, com exceção do resultado obtido no bloco A6 para

$t = 30$ min, talvez justificado por eventuais alterações durante o processo de moldagem ou pesagem do corpo de prova em questão. Quando é inserido ar no sistema, avaliando os blocos de relação $A/C = 0,50$, pode-se observar que o tempo de exposição não é mais relevante e a evolução dos danos nas superfícies dos concretos tornam-se praticamente constante ao longo dos 120 min avaliados, com exceção do bloco C13 para $t = 30$ min. (Figura 11).

Figura 10: Variação da perda de massa ao longo do tempo, para escoamento não aerado, blocos de $A/C = 0,50$

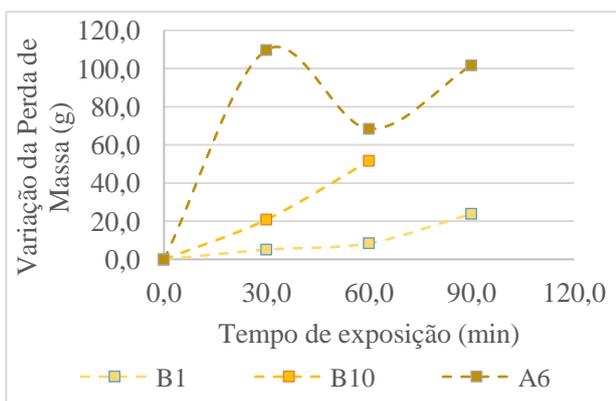
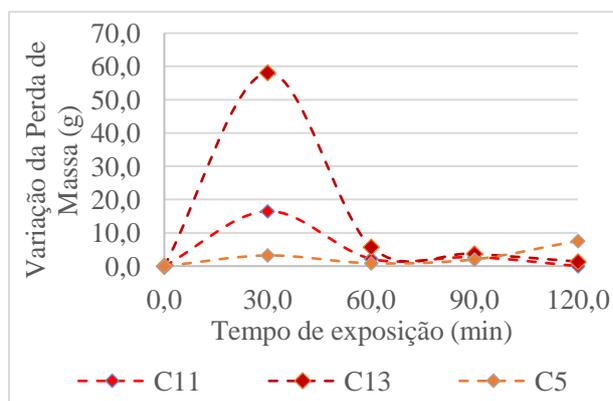


Figura 11: Variação da perda de massa ao longo do tempo, para escoamento de 2,0%, blocos de $A/C = 0,50$



CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados no LOH notou-se que três fatores principais são importantes para a perda de massa em corpos de prova de concreto expostos à cavitação: o tempo de exposição, o traço do concreto e a concentração de ar no escoamento.

O traço do concreto influencia diretamente na resistência do mesmo, e foi observado que blocos com maiores relações A/C tendem a perder mais massa quando expostos às condições de cavitação, por terem menor resistência a esforços de compressão.

Entretanto, a quantidade de ar no escoamento é um fator ainda mais influente na quantidade de dano sobre os corpos de prova. A inserção de 2% de ar no escoamento chegou a reduzir o dano médio sofrido pelos corpos de prova em 95% para o traço mais frágil do concreto. Além disso a adição de ar no escoamento reduziu a diferença entre as perdas de massa para cada traço, pois quanto mais ar era incorporado ao escoamento menor era a influência da resistência do concreto para a perda de massa.

O tempo de exposição aos efeitos da cavitação também se mostraram importantes para a perda de massa dos corpos de prova. Os danos sofridos pelos corpos de prova, por óbvio, são cumulativos, e tendem a aumentar conforme o tempo de exposição aumenta. Além disso, para o escoamento não areado, nota-se que a taxa de perdas de massa tende a aumentar conforme aumenta o tempo de exposição, e isso se deve ao aumento da rugosidade da superfície provocada pelo desgaste ao longo do ensaio. Entretanto, para os escoamentos aerados não foi possível visualizar esse aumento na taxa de perda de massa ao longo do tempo, por que os danos sofridos pela superfície são menos significativos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Foz do Chapecó Energia e à Eletrobrás-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. Ao CNPq e à CAPES.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A.S. “*Fenômeno de cavitação em estruturas hidráulicas de concreto*”. Tese de doutorado. UFRGS. Porto Alegre. 2022. (Em elaboração).
- BUREAU OF RECLAMATION “*Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces*”, 2020.
- BUREAU OF RECLAMATION “*Design and Construction of New Cavitation Machine*”, 1963
- COLGATE, D. “*Cavitation damage in hydraulic structures*”. Wear of Materials 1977. ASME, New York, N. Y. 1977, 433-438, 1977.
- FALVEY, Henry T. “*Cavitation in chutes and spillways*”. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1990
- HENN, E. L. “*Máquinas de Fluido*”. Santa Maria: UFSM, 2001.
- KELLS, James A.; SMITH, C. D. “*Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment*”. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 18, p.358-377, 1991.
- 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.