

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

ALINE SAUPE ABREU

ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE DANOS EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO
ATRAVÉS DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

Porto Alegre

2024

ALINE SAUPE ABREU

Estudo da Ocorrência de Danos em Superfícies de Concreto através do
Fenômeno da Cavitação

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Dai Prá

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Saupe Abreu, Aline
ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE DANOS EM SUPERFÍCIES DE
CONCRETO ATRAVÉS DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO / Aline
Saupe Abreu. -- 2024.
319 f.
Orientadora: Maurício Dai Prá.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Escoamento cavitante. 2. Dispositivos tipo
Venturi. 3. Estruturas hidráulicas. 4. Características
do concreto. 5. Danos por cavitação. I. Dai Prá,
Maurício, orient. II. Título.

ALINE SAUPE ABREU

ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE DANOS EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO
ATRAVÉS DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Aprovada em: Porto Alegre, 18 de março de 2024.

Prof. Dr. Maurício Dai Prá – IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH/UFRGS
Examinador

Eng. Dr. Edgar Fernando Trierweiler Neto – Eletrobrás/FURNAS
Examinador

Eng. Dr. Selmo Chapira Kuperman – Desek/SP
Examinador

Dedico este trabalho ao meu amado esposo Márcio, por todo carinho e atenção.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos ensinamentos e oportunidades ao longo de todo o curso de doutorado.

Ao Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) pela disposição de infraestrutura, instrumentação e apoio técnico durante a realização deste trabalho.

Ao CNPq e a Capes pela concessão de bolsas durante o período do doutorado. À Foz do Chapecó Energia por todo o apoio financeiro fornecido ao projeto, tornando possível a investigação experimental.

Ao US Bureau of Reclamation (USBR), em especial ao MSc. Eng. Josua Mortensen e a toda a equipe do Hydraulic e do Concrete Laboratories, pelas orientações, apoio e informações técnicas que nortearam esta pesquisa, obrigada.

Ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME, principalmente ao Dr. Eng. Lucas Reginatto e ao técnico Sr. Edgar, pelo apoio e orientações no que tanque suas áreas de conhecimento, e pela disponibilidade de uso de suas estruturas, muito obrigada.

À Furnas Centrais Elétricas pelas informações, troca de experiências e apoio técnico, obrigada.

À DESEK Engenharia, através do Dr. Selmo Chapira Kuperman, pelas contribuições acerca do tema “Tecnologia do Concreto” e pelo incentivo no início da pesquisa sobre as necessidades de informação da área, obrigada.

Aos professores Dr. Marcelo Giulian Marques, Dr. Eder Daniel Teixeira e Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres pela oportunidade de participação neste projeto, pela confiança e apoio durante todo este trabalho, muito obrigada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauricio Dai Prá, pelo exemplo de caráter, pelas conversas, ensinamentos e, principalmente, por todo o constante apoio desde antes do doutorado, fez toda a diferença, obrigada professor.

Aos meus colegas da Pós-Graduação Guilherme Castiglio, Rute Ferla, Pedro Guido Bassegio, Renato Steinke Jr., Carolina Novakoski pelo apoio técnico e conversar antes, durante e pós-pandemia, e a todos os bolsistas de

graduação (Leandro, Flávia, Cassiano, Sieg, Francine) do LOH pela ajuda, responsabilidade e companheirismo, muito obrigada.

Ao meu esposo Márcio por toda força dada nos momentos difíceis, pelas conversas intermináveis de sempre, pela cumplicidade e carinho, nas noites de estudo e nos momentos decisivos desta trajetória, te amo. A minha sogra Rosina e meu cunhado Mauro pelo incentivo na busca constante por conhecimento, obrigada.

A toda a minha família, em especial ao meu pai Albino por todo carinho, trabalho e incansável afeto, me apoiando e torcendo por mim todos os dias. As minhas tias, Mery, Naiara, Maristela e Stela pela força feminina que apoia todos os sobrinhos da nossa família, pelo carinho e compreensão durante os períodos de ausência para construção deste trabalho, muito obrigada.

Aos meus amigos engenheiros e irmãos de coração Janice Ferreira da Silveira e Juliano Pacheco dos Santos, que à distância torcem por mim.

“E é tão bonito quando a gente entende
Que a gente é tanta gente onde quer
que a gente vá
É tão bonito quando a gente sente
Que nunca está sozinho por mais que
pense estar
É tão bonito quando a gente pisa firme
Nessas linhas que estão nas palmas de
nossas mãos
É tão bonito quando a gente vai à vida
Nos caminhos onde bate, bem mais
forte o coração.”

Canção Caminhos do Coração
(Gonzaguinha)

RESUMO

A problemática que envolve os efeitos causados pelo fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas vai muito além das condições críticas de operação e do risco previsto à integridade desses dispositivos de segurança através das vazões máximas de projeto. Alterações superficiais e danos de maior magnitude nos revestimentos de concreto de vertedouros e bacias de dissipação, onde a generalização do fenômeno torna-se mais complexa, tanto as características hidrodinâmicas do escoamento quanto os parâmetros considerados na tecnologia do concreto tornam-se fatores preponderantes para a compreensão do fenômeno cavitação. Desta forma, a presente pesquisa visa identificar a interação entre o concreto e o escoamento cavitante, por meio da análise dos danos apresentados em diferentes traços de concreto e distintas demandas relativas de ar (β). Os ensaios foram realizados expondo blocos de concreto de relação a/c de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 ao fenômeno da cavitação através de um dispositivo tipo *Venturi* ($V \cong 30,0$ m/s), localizado na instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH/UFRGS). Além da análise dos danos causados as superfícies dos corpos de prova de diferentes composições, após ação do fenômeno, também foram verificadas as pressões médias e os índices de cavitação apresentados pelo escoamento durante a operação do dispositivo de cavitação. Em seguimento a esta pesquisa, foram analisadas as acelerações impostas a instalação experimental pelo impacto da implosão das cavidades de vapor no interior da máquina de cavitação do LOH/UFRGS. Os resultados obtidos foram comparados aos dados extraídos na máquina de cavitação do United States of Bureau of Reclamation (USBR) em Denver no Colorado, e com as informações disponíveis em literatura sobre o tema. Os critérios técnicos desenvolvidos serviram de ferramenta para o controle e análise da ocorrência do fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas, tais como vertedouros e bacias de dissipação. Este trabalho compõe parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado: "Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas", financiado por Foz do Chapecó Energia com participação de Furnas Centrais Elétricas, do Laboratory of Hydraulic and of Concrete do United States of Bureau of Reclamation (USBR), da Desek Consultoria em Engenharia Civil e da Universidade Federal do Rio Grande (UFRGS) através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e do LOH.

Palavras-chave: Escoamento cavitante, características do concreto, danos por cavitação, estruturas hidráulicas, dispositivos tipo *Venturi*.

ABSTRACT

The problem involving the effects caused by cavitation in hydraulic structures goes far beyond the critical operating conditions and the predicted risk to the integrity of these safety devices through maximum design flow rates. Surface changes and damages of greater magnitude in the concrete linings of spillways and dissipation basins, where the generation of characteristics becomes more complex, both the hydrodynamic characteristics of the flow and the parameters foreseen in concrete technology become preponderant factors for the understanding cavitation. In this way, the present research aims to identify the interaction between concrete and cavitating flow, through the damage presented in different concrete analysis trait and specific demands related to air (β). The tests were carried out exposing concrete blocks with a w/c ratio of 0,35/ 0,45; 0,50 and 0,65 when presenting cavitation through a Venturi-type device ($V= 30,0$ m/s), located in the experimental installation of the Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH/UFRGS). In addition to analyzing the damage caused to the surfaces of test specimens of different compositions, after specific action, the average pressures and cavitation indices presented by the flow during the operation of the cavitation device were also verified. Following this research, the accelerations imposed on the experimental installation by the impact of the implosion of the steam chimneys inside the LOH/UFRGS cavitation machine were proven. The results obtained were compared to data extracted from the cavitation machine at the United of States of Bureau of Reclamation (USBR) in Denver, Colorado, and with information available in the literature on the subject. The technical criteria developed served as a tool for controlling and analyzing the occurrence of cavitation characteristics in hydraulic structures, such as spillways and dissipation basins. This work is part of the Research and Development (R&D) Project entitled: "Concrete Study for Hydraulic Surfaces", financed by Foz do Chapecó Energia with the participation of Furnas Centrais Elétricas, the Hydraulic and Concrete Laboratory of the USBR, from Desek Consultoria em Engenharia Civil and Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) through the Hydraulic Research Institute (IPH) and LOH.

Keywords: Cavitating flow, characteristics of concrete, cavitation damage, hydraulic structures, Ventury type devices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Danos iniciais observados no vertedouro da barragem de Oroville, após o fechamento das comportas em 07/02/17 (a), e; Danos finais apresentados ao longo da calha do vertedouro em maio/17 (b). Fonte: adaptado de Wahl <i>et al.</i> , (2019a).....	36
Figura 3-1: Dinâmica de colapso das bolhas de vapor, próximo a uma superfície (a); e em um fluido “estático” afastado da superfície (b). Adaptado de Falvey (1990).....	43
Figura 3-2 - Dinâmica de colapso das bolhas de vapor próximo a um gradiente hidráulico de pressão (a); e o colapso de um grupo de bolhas (b). Fonte: adaptado de Falvey (1990).....	44
Figura 3-3: Estágio de formação e colapso das cavidades de vapor. Dental Reviews. Cavitation in slow motion (37500 fps). YouTube, 11/10/22. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=CKakEG6X82M	45
Figura 3-4: Índices de cavitação e os estágios de desenvolvimento da cavitação. Fonte: adaptado de Dalfré Filho (2002) e Falvey (1990).....	49
Figura 3-5: Circuito hidráulico da instalação da máquina de cavitação. Fonte: Peterka (1953).....	53
Figura 3-6: Registro fotográfico dos danos ocasionados nas amostras de concreto após 2 h de exposição a cavitação, para diferentes demandas relativas de ar. Fonte: adaptado de Peterka (1953).	54
Figura 3-7: Relação obtida entre a concentração de ar e a perda de massa de corpos de prova de concreto. Fonte: Ferla (2020) adaptado de Peterka (1953).	55
Figura 3-8: Aparato experimental utilizado por Dong e Su (2006) e Dong <i>et al.</i> , (2007; 2008; 2010), vista lateral da seção de ensaio (a), e; pontos de inserção de ar (b). Adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2008; 2010).....	57
Figura 3-9: Relação entre as concentrações mínimas de ar e a velocidade média do escoamento para evitar erosões por cavitação. Fonte: adaptado de Dong e Su (2006).....	58
Figura 3-10: Comportamento do sinal de pressão adquiridos para as velocidades médias do escoamento de 20,2; 44,4 e 49,6 m/s, com a inserção de 1,6; 5,4 e 6,4 de ar. Fonte: adaptado de Dong e Su (2006).....	58

Figura 3-11: Resultados das variações de pressão em função das diferentes demandas relativas de ar (a), e; variações dos índices de cavitação (b), ambos para a $V = 49,8$ m/s. Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2007).	59
Figura 3-12: Concreto após 5 min de exposição, $\beta = 0\%$ e $V = 49,8$ m/s (DONG <i>et al.</i> , 2007).	60
Figura 3-13: Concreto após 15 min de exposição, $\beta = 4,8 \%$ e $V = 49,8$ m/s (DONG <i>et al.</i> , 2007).	60
Figura 3-14: Imagem do escoamento com a formação da nuvem de cavidades bem delimitada sobre a saliência de 2,0 mm de altura (a), e; do fluxo aerado com $\beta = 4,3 \%$, ambos com $V = 36,1$ m/s. Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2008). 61	
Figura 3-15: Variação obtidas entre as pressões médias extraídas da parte superior e inferior da saliência em estudo.	61
Figura 3-16: Nuvens de vapor formadas pela inserção de irregularidades abruptas e chanfros de 2,0 mm (a, b), e; de 5,0 mm (c, d) de altura.....	62
Figura 3-17: Espessura teórica da camada limite (δ) x espessura da nuvem de cavitação medida (x). Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , 2010.	63
Figura 3-18: Índices de cavitação determinados para o fluxo cavitante considerando a presença de irregularidades abruptas de 2,0 mm (a), e; de 5,0 mm (b) para β de 0; 2,3; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0% de ar. Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2010)	63
Figura 3-19: Erosões ocasionadas pela ação do fenômeno da cavitação nas amostras de concreto compostas de distintos tamanhos de grãos de areia, considerando $V = 38,2$ m/s (a), e; 28,1 m/s (b). Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2023).	65
Figura 3-20: Taxas de erosão dos concretos compostos pelos d_{50} de 0,08 mm (a); 0,25 mm (b); 1,0 mm (c); 2,0 mm (d), e; 3,0 mm (e). Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , 2023.	66
Figura 3-21: Pressões médias (a), e; os índices σ (b), estimados para os fluxos de água + areia de $V = 38,2$ m/s. Fonte: adaptado de Dong <i>et al.</i> , (2023).	67
Figura 3-22: Resultado das variações de perda de massa (WL) das amostras em função do tempo (a); da pressão de entrada do ar no escoamento cavitante (b), e; da área do tubo de entrada do ar (c). Fonte: adaptado de Wu e Lou (2011).	68

Figura 3-23: Imagens dos danos causados nas amostras de 16,0 mm de diâmetro alterando a pressão do ar (a), a área (b), e; o número das saídas dos jatos cavitante (c). Fonte: Wu e Lou (2011).	69
Figura 3-24: Instalação da placa de alumínio (a), e; posicionamentos do acelerômetro e do Sensor (AE) de banda larga (b). Fonte: adaptado de Mortesen (2017).	70
Figura 3-25: Registro dos 15 “pits” causados pela erosão por cavitação pelo jato cavitante submerso. Fonte: Mortesen (2017).	70
Figura 3-26: Exemplos dos bocais utilizados no estudo de jatos de Houlston e Vickers (1978). Fonte: adaptado de Dalfré (2002; 2006).	71
Figura 3-27: Desenho esquemático do aparato experimental (a), e; imagem do sistema cavitante desenvolvido pelo autor. Fonte: Dalfré (2002; 2006).	72
Figura 3-28: Erosão nas amostras ensaiadas pelo equipamento tipo jato cavitante. Fonte: Dalfré (2002; 2006).	73
Figura 3-29: Estrutura básica da câmara de cavitação. Fonte: Adaptado de Momber (2000).	74
Figura 3-30: Imagem macroscópica dos danos por cavitação após $t = 10$ s, a esquerda o concreto nº1 e a direita o concreto nº2. Fonte: Adaptado de Momber (2000).	75
Figura 3-31: Prejuízos ocasionados pela ação do fenômeno da cavitação. Transição entre o vertedouro e a bacia de dissipação (a), e; Paramento de jusante do vertedouro de Shahid Abbaspour em março de 1978. Fonte: Sentürk, 1994, pg. 172 e Minor, 2000, p.4.	77
Figura 3-32: Danos da erosão causada pela cavitação na UHE de Porto Colômbia, nos <i>chutes blocks</i> existentes na calha, e: a jusante da laje do vertedouro. Fonte: Carvalho, 1997.	78
Figura 3-33 : Ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro de calha lisa. Fonte: Hampe (2018).	78
Figura 3-34: Ilustração esquemática da formação e posterior colapso das cavidades de vapor junto ao fundo de um vertedor. Fonte: Schulz <i>et al.</i> , (2010).	81
Figura 3-35: Tipos de irregularidades e as zonas de provável erosão por cavitação. Fonte: BRITO, 2011, adaptado de Falvey, 1990.	82

Figura 3-36: Detalhe dos regimes do escoamento quanto à aeração natural em vertedouros. Fonte: Brito (2011) adaptado de Chanson (1993).	89
Figura 3-37: Aerador tipo degrau utilizado na UHE Pedra do Cavallo. Fonte: Chanson (1993).....	94
Figura 3-38:Aerador tipo defletor instalado no vertedouro da barragem de Kárahnjúkar na Islândia. Fonte: Pfister, (2011).	94
Figura 3-39: Comparativo entre a resistência a cavitação para diferentes materiais. Fonte: adaptado de Falvey (1990).	97
Figura 3-40: Influência do tempo de exposição à cavitação na profundidade da fossa de erosão, conforme o tipo de concreto empregado. Fonte: Canellas 2020 adaptado de Houghton <i>et al.</i> , (1978).	100
Figura 3-41: Gráfico obtidos através de danos verificados em estruturas vertentes. Fonte: adaptado de Falvey (1990).	101
Figura 3-42: Relação entre as velocidades, a resistência a compressão e a aeração do escoamento. Fonte: adaptado de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971).	102
Figura 3-43:Imagens das microfissuras formadas nos concretos n° 1(a), e; n° 2 (b) após 10 s de ensaio. Fonte: Adaptado de Momber (2000).	105
Figura 4-1:Instalação experimental do dispositivo de cavitação do US of Reclamation, em Denver no Colorado (EUA).	109
Figura 4-2: Válvula gaveta à jusante do sistema, em amarelo o dispositivo de aeração; caixa de proteção acústica da máquina de cavitação (b), a flecha indica o sentido do escoamento.	110
Figura 4-3: Controles de pressão à montante (a), e: à jusante do dispositivo de cavitação (b), circulados em amarelo, a seta indica o sentido do fluxo.	111
Figura 4-4: Compressor e reservatório de ar comprimido (a); circuito de medição e controle das vazões de ar, circulado em amarelo o ponto de inserção de ar ao circuito hidráulico (b), a flecha indica o sentido do escoamento.....	111
Figura 4-5: Representação gráfica do dispositivo tipo <i>Venturi</i> e das peças que auxiliam na conexão com o sistema hidráulico (a); máquina de cavitação utilizada nos ensaios do USBR (b), a seta indica o sentido do fluxo.	112
Figura 4-6: Medidor de vazão tipo <i>Venturi</i> instalado no circuito hidráulico do aparato experimental do USBR (a); manômetro de Mercúrio utilizado nas leituras de vazão (b), a seta indica o sentido o fluxo.	113

Figura 4-7: Instrumentação utilizada no controle e determinação das vazões de ar, instalação experimental do <i>US Reclamation</i>	114
Figura 4-8: Posicionamento dos transdutores instantâneos (P2 ao P9) e D ₁ e D ₂ , em função das distâncias horizontais a partir da seção contraída do dispositivo de cavitação do USBR.	115
Figura 4-9: Conexões dos transdutores P1 ao P10, no dispositivo de cavitação e ao longo da tubulação principal, realizadas por meio de tubos de cobre. A seta amarela indica o sentido do escoamento no sistema.	116
Figura 4-10: Ponto de fixação dos transdutores D ₁ e D ₂ (a); placa de fixação com os transdutores posicionados sobre o dispositivo de cavitação do USBR (b).	116
Figura 4-11: Sistema de aquisição de dados de pressão.....	117
Figura 4-12: Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de ruptura de corpos de prova por esforços de compressão localizada no <i>Concrete Laboratory</i> do USBR.	118
Figura 4-13: Formas utilizadas na moldagem dos corpos de prova de m concreto (a); Blocos de concreto finalizados após a cura de 28 dias (b).	119
Figura 4-14: Posicionamento do bloco no dispositivo de cavitação, a seta indica o sentido do escoamento no sistema.	120
Figura 4-15: Instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas, as setas em amarelo indicam o sentido do escoamento.....	122
Figura 4-16: Reservatório superior readequado ao sistema para auxiliar na dissipação de energia do escoamento após a saída do circuito hidráulico. ...	123
Figura 4-17: Disposição geral do sistema hidráulico implementado no LOH, as setas em amarelo indicam o sentido do fluxo.....	124
Figura 4-18: Detalhes do sistema <i>bypass</i> , à montante (a), e: à jusante do dispositivo de cavitação (b) do LOH.....	124
Figura 4-19: Conjunto motobomba de 100 CV (a), e; painel elétrico de acionamento com inversor de frequência de 60 Hz (b).	125
Figura 4-20: Medidor e transmissor eletromagnético de vazão de água.	125
Figura 4-21: Disposição dos manômetros ao longo do sistema de recalque, à montante (a); à jusante do dispositivo (b); no ponto de inserção de ar (c), e; na saída do conjunto motobomba (d).	126
Figura 4-22: Quadro de medição e controle do ar comprimido.	128

Figura 4-23: Sistema de geração e armazenamento de ar comprimido, reservatório e compressor de ar.....	128
Figura 4-24: Sistema de aquisição de dados ao lado do painel de instrumentação de ar.	129
Figura 4-25: Ponto de inserção de ar comprimido no circuito hidráulico.	129
Figura 4-26: Desenho esquemático com as dimensões características da máquina de cavitação (a); versão "3D" do dispositivo (b), e; imagem do dispositivo construído e instalado no LOH/UFRGS (c), a flecha indica o sentido do fluxo.....	130
Figura 4-27: Placa de fixação para os transdutores de pressão na parte superior da máquina (a), e; furos inferiores para posicionamento dos sensores no dispositivo de cavitação do LOH (b).....	131
Figura 4-28: Desenho esquemático das Posições P1, indicadas pelas setas vermelhas, e P2, pelas setas azuis, adotadas para a instalação dos sensores de pressão no LOH.	132
Figura 4-29: Sistema de aquisição dos dados de pressão dos sensores piezoelétricos.	133
Figura 4-30: Sistema de aquisição dos acelerômetros no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.	134
Figura 4-31: Posição do acelerômetro sobre a placa metálica do dispositivo de cavitação – vista de jusante para montante, a seta indica o sentido do fluxo.	135
Figura 4-32: Desenho esquemático dos sentidos dos eixos adotados nas leituras dos acelerômetros.	135
Figura 4-33: Desenho esquemático da posição adotada para coleta das acelerações no eixo "z"(a), e; imagem do sensor fixado no dispositivo de cavitação (b).....	137
Figura 4-34: Limpeza e adição de desmoldante nas formas.	138
Figura 4-35: Pesagem dos materiais.....	139
Figura 4-36: Realização do <i>Slump Test</i>	139
Figura 4-37: Processo de moldagem e retirada dos blocos e corpos de prova em concreto.....	140
Figura 4-38: Armazenamento dos blocos e CPs em câmara úmida.	140
Figura 4-39: Transferência dos blocos de concreto para o LOH.	141

Figura 4-40: Pesagem ao ar livre (a), e pesagem hidrostática (b), dos blocos de concreto ensaiados.	142
Figura 4-41: Sistema de aquisição dos pontos “x”, “y” e “z” (a), e Mesa de Coordenadas Automatizada com o Perfilador a Laser (b).....	142
Figura 4-42: Detalhamento da Mesa de Coordenadas Automatizada, com indicação do posicionamento do Nível a Laser.	143
Figura 4-43: Superfície gerada para visualização da superfície erodida e para extração dos pontos coordenados através do uso do software Surfer®.	144
Figura 4-44: 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.	145
Figura 4-45: Posicionamento da amostra de concreto sobre o dispositivo de cavitação do LOH.....	146
Figura 4-46: Fluxograma dos ensaios e parâmetros analisados nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR.	147
Figura 4-47: Fluxograma dos ensaios e metodologias adotadas para a determinação dos parâmetros característicos do concreto nos laboratórios do LOH/UFRGS e do USBR.	148
Figura 5-1: Posicionamento dos transdutores de pressão, Posição 1 (a); Posição 2 (b), e; vista de corte do dispositivo de cavitação (c).....	153
Figura 5-2: Pressões instantâneas adquiridas na Posição 1, no intervalo $0 < t < 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes demandas relativas de ar (Beta).....	154
Figura 5-3: Pressões instantâneas adquiridas na Posição 2, no intervalo $0 < t < 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes demandas relativas de ar (Beta).....	154
Figura 5-4: Resultados das pressões médias (P_x) para os diferentes β , dispositivo de cavitação do LOH	155
Figura 5-5: Comportamento das pressões médias ao longo dos dispositivos de cavitação, consideração a distância da seção de controle ($d=0cm$), dados do USBR e LOH.....	157
Figura 5-6: Resultados das pressões médias obtidos para diferentes demandas relativas de ar, dos sensores utilizados pelo USBR e LOH.....	159

Figura 5-7: Comparativo entre os índices de cavitação estimados para os dispositivos de cavitação do LOH e do USBR.....	160
Figura 5-8: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos considerando diferentes vazões de água sem inserção de ar no escoamento.	163
Figura 5-9: Gráfico da função densidade de probabilidade (<i>DProb</i>) x aceleração no eixo “z”, considerando diferentes vazões de água (a), e; detalhe das curvas de densidade obtidas para as acelerações (b).....	166
Figura 5-10: Desvios padrão das acelerações no eixo “z” extraídos para as velocidades de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH.	167
Figura 5-11: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos até o instante $t = 0,10s$, considerando a vazão de $Q_w = 64,32$ l/s e as demandas relativas de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 % de ar no escoamento.....	169
Figura 5-12: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos até o instante $t = 0,10s$ separados para cada demanda de ar avaliada, sendo de: 0 %(a); 0,25% (b); 0,50 % (c); 0,75% (d); 1,0 %(e); 2,0% (f); 4,0%(g); 6,0% (h), e; 8,0 %(i).	170
Figura 5-13:Gráfico da função densidade de probabilidade x aceleração no eixo “z”, considerando diferentes demandas relativas de ar (a), e; detalhe das curvas de densidade obtidas para as acelerações obtidas(b).	173
Figura 5-14:Flutuações das pressões instantâneas de 1MHz aquisitadas nos sensores D_1 e D_2 no dispositivo de cavitação do USBR. Fonte: adaptado de Mortesen (2020).	178
Figura 5-15:Comparativo entre os desvios padrão pressões instantâneas de 1MHz (sensores D_1 e D_2) e as aceleração no eixo “z” extraídas no dispositivo de cavitação do LOH.....	180
Figura 5-16: Comparativo entre as pressões médias aquisitadas nos dispositivos de cavitação do LOH (2023), USBR(2020) e Dong <i>et al.</i> , (2007).....	182
Figura 5-17:Comparativo entre as variações de pressão média extraídas nos dispositivos de cavitação do LOH, USBR e Dong <i>et al.</i> , (2007), para β de 0 e 2,0% de ar.	183
Figura 5-18:Comparativo entre as pressões médias x distâncias da seção de controle, extraídos pelos diferentes autores e dispositivos de cavitação, $\beta = 0$ e 2,0% de ar.	184
Figura 5-19: Comparativo entre os índices de cavitação (σ) x demanda relativa de ar (β), para os distintos autores.....	186

Figura 5-20:Comparativo entre os índices de cavitação x distâncias da seção de controle, extraídos pelos diferentes autores e dispositivos de cavitação, $\beta = 0\%$	187
Figura 5-21: Comparativo entre as variações de pressões médias aquisitadas no teto e na base dos dispositivos utilizados pelos autores, para diferentes β . ..	188
Figura 5-22: Desenho esquemático dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação LOH.....	191
Figura 5-23: Curvas de resistência a compressão ($f_{cm,j}$) x tempo para os concretos expostos ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.	192
Figura 5-24: Blocos de concreto após exposição a máquina de cavitação do LOH/UFRGS sem a inserção de ar no escoamento ($\beta = 0\%$), relações a/c de: 0,35 (a); 0,45 (b); 0,50 (c), e; 0,65 (d).	193
Figura 5-25: Evolução dos danos em blocos de relação a/c= 0,65, sem a inserção de ar no escoamento durante 1 hora de ensaio.	194
Figura 5-26: Blocos de concreto de relação a/c= 0,35, após 2 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, para diferentes demandas relativas de ar.	195
Figura 5-27: Blocos de concreto de relação a/c= 0,45, após 2 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH, para diferentes demandas relativas de ar.	196
Figura 5-28: Blocos de concreto de relação a/c= 0,50, após ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.....	196
Figura 5-29: Blocos de concreto de relação a/c= 0,65, após ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.....	197
Figura 5-30: Ensaio de longa duração em bloco de concreto com relação a/c de 0,35, sem a inserção de ar no escoamento.	198
Figura 5-31: Comparativo entre as curvas de resistência média a compressão ($f_{cm,i}$) obtidas para os concretos utilizados nos ensaios do USBR e do LOH/UFRGS.	200
Figura 5-32:Danos registrados nos blocos de a/c 0,35 do LOH (a); blocos de a/c 0,35+SF (b), e; 0,35 (c), ambos do USBR.....	203
Figura 5-33:Danos registrados nos blocos de concreto de relação a/c 0,50 após exposição ao dispositivo de cavitação, do LOH/UFRGS (a), e; do USBR (b).	205

Figura 5-34: Danos registrados nos blocos de concreto de relação a/c 0,65 após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS (a); do USBR (b), e; os danos definidos aos blocos de a/c 0,70 do USBR (c).	205
Figura 5-35: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 0%, e; (b) 0,50%.	208
Figura 5-36: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 1,0%, e; (b) 2,0%.	208
Figura 5-37: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 0%.	210
Figura 5-38: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 2,0%.	211
Figura 5-39: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 0\%$ (a), e; $\beta = 0,25\%$ (b).	213
Figura 5-40: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 0,50\%$ (a), e; $\beta = 1,0\%$ (b).;	214
Figura 5-41: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 2,0\%$.;	215
Figura 5-42: Comparativo entre os resultados dos volumes erodidos do USBR x LOH, definidos pela metodologia da pesagem.	216
Figura 5-43: Gráfico de perda de massa x coeficiente Beta, adaptado de Peterka (1953) e Mortesen (2020).”	218
Figura 5-44: Curvas cota x área (a) e cota x volume (b) dos danos gerados nas superfícies dos blocos de concreto através do Escâner “3D”, após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS	223
Figura 5-45: Volumes erodidos dos blocos de concreto após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, metodologia do Perfilador a Laser.	224

Figura 5-46: Comparativo entre os volumes erodidos, Escâner “3D” x Pesagem, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH.	225
Figura 5-47: Comparativo entre os volumes erodidos, Escâner “3D” x Perfilador a laser, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH. ...	226
Figura 5-48: Resultados dos volumes máximos erodidos ($V_{e\text{máx.}}$) x resistência a compressão ($f_{cm,i}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH/UFRGS, para os coeficientes β de 0; 0,25; 0,50 e 1,0%.	227
Figura 5-49: Profundidade máxima ($h_{máx.}$) das fossa de erosão x resistência média a compressão, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH, distintas β	229
Figura 5-50: 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	230
Figura 5-51: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0\%$	235
Figura 5-52: Relações entre as $h_{máx.}$ (médias) x resistências médias à compressão de projeto (f_{ck}) dos concretos ensaiados no LOH, para $\beta = 0\%$.	236
Figura 5-53: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h (a) e $\beta = 0,25\%$	237
Figura 5-54: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0,50\%$	239
Figura 5-55: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0,75\%$	240
Figura 5-56: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 1,0\%$	241
Figura 5-57: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 2,0\%$	242
Figura 5-58: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin <i>et al.</i> , (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 6,0\%$ (a), e; para $\beta = 8,0\%$	243
Figura 6-1: Ábaco das correlações estabelecidas entre os $h_{máx.}$, os Betas e os principais parâmetros característicos dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS.	246

Figura 6-2: Detalhamento da utilização do ábaco/tabela para determinação da ocorrência de erosões que sejam oriundas do fenômeno da cavitação. 248

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: Barragens brasileiras que apresentaram registros de danos ou desgastes superficiais em seus dispositivos de segurança.	34
Tabela 3-1: Critérios de projeto a serem considerados na prevenção de danos por cavitação.	50
Tabela 3-2: Velocidades críticas limites (V_{cr}) onde há riscos em vertedouros devido a ocorrência da cavitação, segundo diferentes autores e inclinações de calha distintas.	51
Tabela 3-3: Descrição das amostras de concreto utilizada no estudo experimental de Dalfré(2002).	73
Tabela 3-4: Evolução dos desgastes nas amostras de concreto avaliadas.	73
Tabela 3-5: Vazões específicas críticas (q_{cr}) limites para vertedouros em degraus, segundo diferentes autores e estruturas avaliadas.	86
Tabela 3-6: Valores e limites indicados por diferentes autores aos índices críticos de cavitação (σ_{cr}).	87
Tabela 3-7: Formulações para a estimativa da concentração média ar obtidas por diferentes autores.	92
Tabela 3-8: Equações de demanda relativa de ar para vertedouros de calha lisa.	95
Tabela 4-1: Distâncias dos transdutores de pressão P1 ao P10, utilizados na instalação experimental do USBR.	115
Tabela 4-2: Composição dos concretos ensaiados no dispositivo de cavitação do USBR.	118
Tabela 4-3: Características dos equipamentos de medição dos parâmetros do ar. ...	127
Tabela 4-4: Características gerais dos ensaios de aceleração, para escoamentos com diferentes vazões de água.	136
Tabela 4-5: Frequências limitantes de aquisição dos acelerômetros.	136
Tabela 4-6: Dosagem dos concretos a serem utilizados nos ensaios do dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.	138
Tabela 4-7: Composição dos concretos investigados nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR.	148
Tabela 4-8: Resistências médias à compressão, extraídas para os concretos utilizados nos dispositivos do LOH/UFRGS e do USBR.	149
Tabela 4-9: Condições de ensaio consideradas para a aquisição das pressões instantâneas nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR.	149
Tabela 4-10: Descrição das características gerais dos ensaios realizados com acelerômetros no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.	150

Tabela 5-1: Parâmetros estatísticos das séries amostrais de acelerações extraídas para os ensaios com diferentes vazões de água, dispositivo LOH.....	164
Tabela 5-2: Parâmetros estatísticos das acelerações obtidas dos ensaios com diferentes demandas relativas de ar, dispositivo do LOH.	172
Tabela 5-3: Parâmetros estatísticos das pressões instantâneas dos sensores D_1 e D_2 para os ensaios com diferentes demandas relativas de ar, dispositivo do USBR.....	177
Tabela 5-4: Resistências médias à compressão, extraída para os concretos utilizados no dispositivo do LOH/UFRGS.	192
Tabela 5-5: Perdas de massa médias, em ordem decrescente, blocos ensaiados no LOH/UFRGS e USBR.	217

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1: Características do sistema e do dispositivo <i>Cavijet</i> desenvolvido por Conn <i>et al.</i> (1984) de acordo com sua utilização.....	72
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

α	menor ângulo formado entre a calha inclinada do vertedouro e o plano horizontal
β	demanda relativa de ar
γ_a	peso específico da água
δ	espessura da camada limite
θ'	ângulo de inclinação do defletor
θ	ângulo do fundo do canal com plano horizontal
ρ_a	massa específica da água
ρ_M	massa específica do concreto
σ	índice de cavitação
σ_i	índice de cavitação incipiente
σ_{cr}	índice de cavitação crítico
υ_p	desvio padrão da amostra de pressões
υ_x	desvio padrão da amostra
g	aceleração da gravidade
SF	aditivo “ <i>Superfluidizing</i> ” (superfluidificante)
h_c	altura crítica do escoamento
$h_{eq.}$	altura equivalente de água do escoamento aerado
H	altura vertical do chanfro
H_0	altura da lâmina d’água sobre a crista do vertedouro
A_a	área do dispositivo adutor de ar
A_w	área do escoamento de água a montante do dispositivo aerador
A	coeficiente de assimetria da amostra
K	coeficiente de curtose da amostra
C_p'	coeficiente de flutuação de pressão
C_p	coeficiente de pressão extremas
C_f	coeficiente de resistência média
F	coeficiente utilizado na estimativa do ponto de afloramento da camada limite
L_j	comprimento do jato de água lançado pelo defletor
L_C	comprimento horizontal do chanfro
C_a	concentração de ar local
C_{min}	concentração de ar mínima

C	concentração média de ar no escoamento
U	constante atribuída ao valor de 1,5 m/s por Gal'perin et al., (1971) e de 3,0 m/s por Kudriashov et al., (1983).
Beta	demanda relativa de ar
d_{50}	diâmetro médio da partícula correspondente a 50% da amostra
Δz	diferença de cotas entre dois pontos
ΔP	diferença entre a pressão
$\Delta P'$	diferença entre a pressão (máxima ou mínima) e a média
x	espessura medida da nuvem de cavitação
f	fator de resistência ou cisalhamento para escoamentos não-aerados (Darcy-Weisbach)
m_s	massa do bloco ao ar livre
m_{ss}	massa do bloco submerso em água
Fr	número de Froude do escoamento
Fr_0	número de Froude do escoamento no início do defletor
P'	parcela de pressão correspondente as flutuações de pressão
H_s	perda de carga entre o ponto de início da aeração e o nível do reservatório
Pe_m/t	perda de massa total em função do tempo de ensaio
V_R	perda volumétrica
T	período de exposição da estrutura a velocidade do fluxo considerado
x_s	ponto de afloramento da camada limite
L_a	ponto de início da aeração no escoamento, definido a partir da crista do vertedouro.
P_a	pressão atmosférica local
P_v	pressão de vaporização da água
P_n	pressão instantânea da amostra
P_i	pressão instantânea junto ao fundo do ressalto hidráulico
\bar{P}	pressão instantânea média na bacia de dissipação
$P_{\bar{x}}$	pressão média da amostra.
P	pressão média do fluido.
y	profundidade característica do escoamento
h	profundidade da água no sentido normal à direção do escoamento
h_0	profundidade do escoamento imediatamente a montante do defletor
h_{90}	profundidade do escoamento referente a posição de concentração de ar de 90%

$h_{m\acute{a}x.}$	profundidade máxima do dano
$h_{m\acute{a}x.}/t$	profundidade máxima do dano em funao do tempo de exposiao ao dispositivo de cavitaao
$h_{m\acute{a}x.}m\acute{e}d.$	profundidade máxima média do dano
$h_{m\acute{a}x.}m\acute{e}d./t$	profundidade máxima média em funao do tempo de exposiao ao dispositivo de cavitaao
r	raio de curvatura no plano vertical do fundo do canal (positivo, se côncavo)
R_c	resistência do concreto ao fenômeno da cavitaao
f_{ck}	resistência característica  compressão de projeto
f_{ckj}	resistência característica  compressão do concreto aos j dias
f_{cm}	resistência média a compressão do concreto
f_{cmj}	Resistência média a compressão do concreto aos j dias
K_s	rugosidade absoluta equivalente do degrau
k	rugosidade da superfície
Δp	supressão abaixo do escoamento
t	tempo de duraao do ensaio no dispositivo de cavitaao
\bar{x}	valor médio da amostra
Δm	variaao da massa de concreto perdida do concreto
Q_w	vazão de gua
Q_{ar}	vazão de ar
$Q_{aer.}$	vazão do escoamento aerado
q	vazão específica
q_{cr}	vazão específica crítica
V_{90}	velocidade correspondente  profundidade h_{90}
V_{cr}	velocidade crítica
V_T	velocidade do fluxo atrelada ao tempo de exposiao da estrutura
V	velocidade média do escoamento
V_e	volume do material erodido
V_{eMP}	volume erodido estimado pela metodologia da Pesagem Hidrostática
V_{eME}	volume erodido estimado pela metodologia do Escâner “3D”
V_{ePL}	volume erodido estimado pela metodologia do Perfilador a Laser

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	31
	Relevância do tema	33
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	38
2.1	Objetivos da Pesquisa.....	38
	2.1.1 Objetivo Principal	38
	2.1.2 Objetivos Específicos	38
2.2	Delimitações.....	39
2.3	Pressuposto	39
2.4	Limitações	39
2.5	Delineamento	40
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
3.1	Cavitação: Descrição do fenômeno	42
	3.1.1 Tipos de Cavitação.....	47
	3.1.2 Parâmetros de Cavitação.....	48
3.2	Dispositivos de Estudo do Fenômeno da Cavitação	51
3.3	Efeitos e estruturas de ocorrência do fenômeno	76
	3.3.1 Cavitação em Estruturas Hidráulicas	77
3.4	Aeração do Escoamento	87
	3.4.1 Vertedouro de Calha Lisa.....	88
	3.4.2 Aeração Induzida – Tipos de Aeradores	93
	3.4.3 Proteção contra o efeito da cavitação.	94
3.5	Características dos Materiais Resistentes à Cavitação.....	96
	3.5.1 Parâmetros Característicos do Concreto	99
	3.5.2 Mecanismos de Desgaste Superficial em Estruturas Hidráulicas de Concreto	103
4	METODOLOGIA	107
4.1	Instalação Experimental US Bureau of Reclamation (USBR)	108

4.1.1	Descrição do Aparato Experimental	109
4.1.2	Dispositivo de Cavitação - USBR	112
4.1.3	Instrumentação e Aquisição de Dados	113
4.1.4	Caracterização dos Concretos Utilizados no USBR	117
4.1.5	Resistência à Compressão – Concreto Endurecido	118
4.1.6	Ensaio de “Slump test” – Concreto Fresco	118
4.1.7	Procedimentos de ensaio USBR	119
4.2	Instalação Experimental Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH/UFRGS	121
4.2.1	Circuito Hidráulico	122
4.2.2	Dispositivo de Cavitação – LOH/UFRGS	129
4.2.3	Pressões Instantâneas – LOH/UFRGS	131
4.2.4	Vibrações do Dispositivo Cavitante - Acelerômetros	133
4.2.5	Caracterização dos Concreto Utilizados no LOH	137
4.2.6	Determinação dos Volume Erodidos: Metodologia da Pesagem Hidrostática, do Perfilador a Laser e do Escâner “3D”	141
4.2.7	Procedimentos de Ensaio – Instalação Experimental do LOH/UFRGS	145
4.3	Metodologia de Análise dos Dados	147
5	RESULTADOS	152
5.1	Condições Hidráulicas	152
5.1.1	Pressões Médias – Dispositivo de Cavitação LOH/UFRGS e USBR	153
5.1.2	Análise de Vibrações – Dispositivo LOH	161
5.1.3	Pressões Instantâneas (1 MHz) – Dispositivo de Cavitação USBR ..	175
5.1.4	Análise Comparativa – Dados de Pressão Instantânea (Média e de 1MHz) e das Acelerações	179
5.2	Danos no Concreto	190
5.3	Análise de Danos no Concreto	190
5.4	Proposta de Gal’perin et al., (1971) - Modificado	232
6	APLICABILIDADE PRÁTICA	245
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	250
8	RECOMENDAÇÕES E CONTRAINDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	256
	Referências Bibliográficas	258

APÊNDICES..... 269

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas hidráulicas como vertedouros e bacias de dissipação, responsáveis pela segurança das barragens, o fenômeno de cavitação é amplamente estudado uma vez que seus esforços hidrodinâmicos, oriundos de escoamentos turbulentos e caracterizados por fluxos de alta velocidades e elevada complexidade, podem vir a gerar danos cumulativos e irreversíveis às superfícies de revestimento desses dispositivos.

A cavitação é definida como a formação e posterior colapso das bolhas de vapor, de água ou diferentes gases dissolvidos no fluido, através da redução brusca de pressão e do aumento significativo de velocidade no escoamento (PINTO, 1988; FALVEY, 1990).

Henn (2001) afirma que a onda de energia gerada possui altíssimos picos de pressão, cerca de 60 a 200 MPa e frequência de propagação de 10 a 180 KHz, removendo partículas da estrutura, causando erosões localizadas e intensificando o próprio fenômeno.

Os mecanismos hidráulicos determinantes para a ocorrência dos danos ao concreto de revestimento das estruturas hidráulicas são induzidos pela existência de rugosidades e/ou irregularidades superficiais nos dispositivos ou mesmo pelas propriedades mecânicas do concreto utilizado gerando interrupções no funcionamento e riscos à integridade das obras hidráulicas avariadas. Notadamente, superfícies de concreto de vertedouros e descarregadores de fundo de alta queda, quando bem acabadas as fronteiras limítrofes da superfície com o escoamento, admitem velocidades superiores a faixa de 30,0 a 35,0 m/s sem apresentar problemas de cavitação. Porém, em vertedouros de calha lisa, quando as irregularidades na superfície do concreto ultrapassam as relações de declividade máximas de 20:1, as velocidades médias aceitáveis para a não ocorrência de danos por cavitação reduzem significativamente, de 12,0 a 28,0 m/s (BALL, 1976; FALVEY 1990; BHATE, 2018; MORTENSEN, 2020).

Nos vertedouros em degraus o risco de danos pelo fenômeno da cavitação é determinado pela existência da macro rugosidade imposta ao escoamento pelos degraus da estrutura, estando limitada principalmente à região não aerada do escoamento onde são associadas as variações

significativas de pressão e a faixas limitadas de vazões específicas, sendo elas: de 20 a 30 m³/s/m para Matos *et al.*, (2000); de 11,5 a 14,0 m³/s/m em forma de cavitação incipiente para Amador (2005), de 11,3 a 15,6 m³/s/m para Gomes (2006), de 11,0 a 17 m³/s/m segundo Novakoski *et al.*(2018).

Ball (1959), Arndt *et al.*, (1979), Falvey (1982), Amador (2005), Pfister *et al.*, (2006a e b), Frizell *et al.*, (2013), Pfister e Boes (2014), dentre outros, especificam o início do processo da cavitação por meio de limites superiores e inferiores definidos aos índices de cavitação crítico (σ_{cr}). Os menores valores foram estabelecidos por Ball (1959), Arndt (1979), Falvey (1982) de $\sigma_{cr} \leq 0,20$ para superfícies sem a presença de irregularidades. Além de estabelecer a ocorrência de danos por cavitação os autores identificaram os índices de cavitação críticos como parâmetros importantes na delimitação de regiões de possível surgimento do fenômeno para vertedouros baseados nas mesmas inclinações de calha estudadas.

Com o objetivo de evitar as condições hidrodinâmicas do escoamento que propiciem o fenômeno da cavitação são verificadas, em etapa de projeto, as vazões, velocidades e pressões médias máximas de operação das estruturas hidráulicas de segurança das barragens. Entretanto, inúmeros estudos em modelos reduzidos e de análise de danos em escala de protótipo, atribuem os danos gerados pelo fenômeno da cavitação e/ou erosão em vertedouros em degraus às velocidades e pressões instantâneas extremas, mínimas e máximas (SANAGIOTTO, 2003; CONTERATO *et al.*, 2015; DAI PRÁ *et al.*, 2016; OSMAR *et al.*, 2018; PRIEBE, 2020; CANELLAS, 2020; FERLA *et al.*, 2021).

Visando compreender os critérios técnicos utilizados como indicativo do risco à ocorrência cavitação em estruturas hidráulicas, tais como, índices de cavitação (σ), pressões médias e suas flutuações, atrelados aos parâmetros característicos do concreto, foram desenvolvidos estudos sobre os danos ocasionados a diferentes traços de concreto após exposição ao fenômeno da cavitação. Os ensaios foram realizados através da utilização de um dispositivo tipo Venturi presente na instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS).

Desta forma, a presente pesquisa propõe o estudo das relações entre os efeitos do escoamento e suas interações com o material utilizado no revestimento de estruturas hidráulicas, durante o processo de surgimento dos

danos gerados pela cavitação. O aparato experimental utilizado, permitiu avaliar condições reais de eminência ao risco de danos propostos pelo fluxo às superfícies de contorno por meio de velocidade, pressões e concentrações de ar de mesma ordem de grandeza das empregadas em escala de protótipo.

As informações e resultados obtidas que compõem essa tese fazem parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado: “Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas”, financiado por Foz do Chapecó Energia com participação da Eletrobrás-Furnas, do Laboratory of Hydraulic and of Concrete do US Bureau of Reclamation (USBR), da Desek Consultoria em Engenharia Civil e da Universidade Federal do Rio Grande (UFRGS) através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH).

Relevância do tema

A problemática que envolve os danos ocasionados pelo fenômeno da cavitação, apesar de inúmeros os estudos na área, vai muito além da caracterização das condições hidráulicas críticas de operação das estruturas de segurança das barragens e do risco “previsto” à integridade de dispositivos como vertedouros e bacias de dissipação através das vazões máximas de projeto.

Atualmente, foram encontradas alterações superficiais e danos de maior magnitude nos revestimentos de concreto de estruturas e barragens com distintas particularidades e em diversas condições de operação, onde a generalização do fenômeno da cavitação torna-se mais complexa e dependente tanto das características hidrodinâmicas do escoamento quanto dos parâmetros considerados na tecnologia do concreto utilizado.

A exemplo da disparidade das estruturas atingidas pelo efeito da cavitação, pode-se analisar a realidade das barragens brasileiras e norte-americanas, que, quando comparadas entre si, verificam-se formas de solicitações e características estruturais distintas. Os vertedouros e bacias de dissipação no Brasil são acionados, em sua maioria, com maior frequência ao longo do tempo escoando vazões e, conseqüentemente, velocidades inferiores as definidas em projeto. Em contrapartida, a realidade hidrológica e estrutural das barragens americanas favorece o acionamento de seus dispositivos de segurança preferencialmente em eventos de cheias significativos, de elevadas vazões e velocidades do escoamento, em função das características dos

empreendimentos de alta queda e de regimes de estiagem prolongados características marcantes por exemplo, da região centro-oeste do país.

Na Tabela 1-1 são apresentadas algumas barragens brasileiras, de armazenamento e/ou geração de energia, que desenvolveram desgastes superficiais nos revestimentos de concreto dos dispositivos de segurança (vertedouros e bacias de dissipação), por ação erosiva ou pelo fenômeno da cavitação.

Tabela 1-1: Barragens brasileiras que apresentaram registros de danos ou desgastes superficiais em seus dispositivos de segurança.

Responsável	Barragem/UHE/PCH	Dispositivo
CEMIG	PCH 3 Marias	Vertedouro de calha lisa
	UHE Nova Ponte	
	UHE Camargos	
CERAN -Companhia Energética Rio das Antas	PCH Monte Carlo	Vertedouro em degraus
	PCH 14 de Julho	
CESAMA	Chapéu d'Uvas	Descarregador de fundo
Companhia de Energia de São Paulo - CESP	Engenheiro Sérgio Motta Porto Primavera	Vertedouro em calha lisa
Dona Francisca Energia	PCH Dona Francisca	Vertedouro em degraus
	PCH Castro Alves	
CERBANORTE	PCH Capivara	Chute Blocks
EMAE - Empresa Metropolitana de Água e Energia	PCH Guarapiranga	Bacia de Dissipação
ENGIE Brasil	UHE Miranda	Vertedouro de calha lisa
Foz do Chapecó Energia	UHE Foz do Chapecó	Bacia de Dissipação
Furnas Centrais Elétricas S.A.	UHE Corumba	Vertedouro de calha lisa
	UHE Furnas	
	UHE Itumbiara	
	UHE Luís Carlos Barreto de Carvalho	Final da soleira do vertedouro
	UHE Porto Colômbia UHE Marimbondo	Bacia de Dissipação
Investco S.A.	UHE Luiz Eduardo Magalhães	Vertedouro de calha lisa
Itaipu Binacional	UHE Itaipú	Vertedouro de calha lisa
CTG Brasil	UHE Ilha Solteira	Blocos dissipadores Bacia de Dissipação
Santo Antônio Energia	UHE Santo Antônio	Bacia de Dissipação
Serra do Facão Energia S.A. - SEFAC	UHE Serra do Facão	Vertedouro de calha lisa
CEEE	PCH Passo Real	Vertedouro de calha lisa

*registro histórico consolidado de danos pelo fenômeno da cavitação/erosão.

Cabe salientar que, as estruturas citadas acima não apresentam danos que venham a comprometer o funcionamento ou integridade das mesmas, sendo aqui elucidadas como exemplos de dispositivos hidráulicos brasileiros com indícios iniciais da ação constante e inerente de escoamentos de elevadas velocidades.

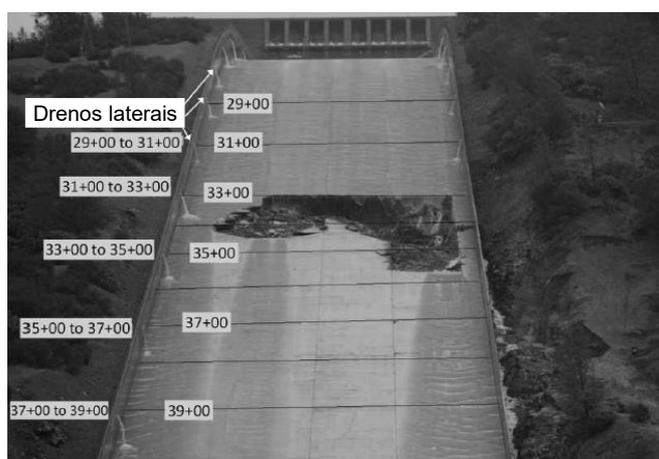
No contexto norte-americano podemos citar as barragens de Boulder, Grand Coulee, Palisades, Tuttle Creek, Flaming Gorge, Blue Mesa, Yellowtail, Glen Canyon, Hoover, Kebon, Korun, Old River, Pomona, Enid, Webbers Falls, Kinzua, Oroville, etc, sendo, em sua maioria, implementadas em regiões topograficamente acentuadas, expressaram registros de algum tipo de dano ocasionado pelo escoamento de alta velocidade em seus dispositivos de segurança (FALVEY, 1990; WAHL *et al.*, 2019b; WAHL e FALVEY, 2022). Conforme o enfatizado pelo eng. Mortensen (informação verbal)¹: “Devido sua configuração (topográfica) e regime hidrológico distinto, seus vertedouros são raramente acionados, porém quando em operação essas estruturas são submetidas a escoamentos com velocidades de fluxo de maior magnitude do que as registradas nas estruturas hidráulicas brasileiras.”

A exemplo dessa realidade, o caso histórico mais difundido sobre os danos ocasionados pela ação erosiva do escoamento é referente a remoção do concreto de revestimento do túnel de acesso ao vertedouro esquerdo da usina de Glen Canyon, registrados em setembro de 1983. Após a ocorrência das vazões de 205,0 m³/s e 425,0 m³/s, em um curto intervalo de tempo, foram identificados danos de até 11,0 m de profundidade, com a total remoção do concreto e de suas estruturas de ancoragem. As duas seções transversais avariadas ao longo do túnel do vertedouro apresentaram, durante os eventos, velocidades que variavam de 40,82 a 45,37 m/s (FALVEY, 1990).

O caso mais recente registrado nos EUA foi sobre os danos causados no revestimento de concreto do vertedouro da usina Hidrelétrica de Oroville, localizada no Rio Feather ao norte do estado da Califórnia. Logo após sua construção em 1968 foi verificada a presença de fissuras sobre a laje e o sistema

¹ Reunião técnica do P&D, Eng° Joshua Mortensen. Videoconferência. [11/2021]. Participantes: Prof. Dr. Mauricio Dai Pra, Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, Engª. Aline Saupe Abreu, 2021.

de drenagem da estrutura vertente, resultando em um longo histórico de reparos periódicos do concreto utilizado. Em fevereiro de 2017, durante um evento de cheias prolongadas, a passagem inicial de uma vazão de 1.840,0 m³/s iniciou o surgimento dos primeiros danos e erosões significativas na superfície de concreto do vertedouro da barragem de Oroville. Após a ocorrência das vazões de 354,0 m³/s (Figura 1-1a) e 2.830,0 m³/s, entre os dias de 8 e 16 de fevereiro, e o término das operações, em 19 de março, a estrutura foi totalmente inviabilizada devido ao avanço dos danos causados pela ação do escoamento de altas velocidades (Figura 1-1b) (WAHL *et al.*, 2019a).



(a)



(b)

Figura 1-1: Danos iniciais observados no vertedouro da barragem de Oroville, após o fechamento das comportas em 07/02/17 (a), e; Danos finais apresentados ao longo da calha do vertedouro em maio/17 (b). Fonte: adaptado de Wahl *et al.*, (2019a)

Considerando o registro histórico de danos por cavitação mais intenso no Brasil, podemos destacar as erosões dos *chute-blocks*, atualmente removidos, da bacia de dissipação da usina hidrelétrica de Porto Colômbia. A vazão máxima identificada até outubro de 1983, data da inspeção subaquática da estrutura, foi de 5.700,0 m³/s, correspondendo a uma velocidade média do escoamento, no

final da bacia, da ordem de 22,0m/s. As dimensões médias das erosões detectadas foram de 2,0 m de comprimento, 1,6 m de largura e, 0,70 m de profundidade (CARVALHO, 2010). Apesar das semelhanças entre a gravidade dos danos e o fato de serem atrelados ao fenômeno da cavitação (baixas pressões e altas velocidades do escoamento), as avarias detectadas na usina Hidrelétrica Glen Canyon foram atreladas às irregularidades superficiais do revestimento em concreto. Já na usina de Porto Colômbia o fator desencadeante da cavitação foi a presença de obstáculos inseridos ao fluxo, ou seja, a presença dos *chute-blocks* na estrutura.

Desta forma, em virtude das discrepâncias entre os exemplos citados acima e, das condições que favorecem o surgimento de potenciais danos às estruturas, torna-se evidente a necessidade de estudos que retratem os esforços hidrodinâmicos do fluxo e os parâmetros característicos do concreto – com e sem a presença de ar no escoamento – como ferramenta de prevenção aos danos ou deteriorações dos distintos sistemas avaliados.

Sendo assim, a presente pesquisa visa detalhar os limites existentes entre as diferentes concentrações de ar em escoamentos de altas velocidades, considerando as características de resistência do concreto, bem como as pressões submetidas as estruturas durante a ocorrência do fenômeno da cavitação. Além disso, pretende-se reproduzir os resultados obtidos por Peterka (1953) e Gal'perin *et al.*, (1971), os quais indicam as concentrações de ar mínimas responsáveis por reduzir os danos da cavitação e/ou erosão, atribuindo a essas as relações das pressões médias impostas a vertedouros e bacias de dissipação pelos esforços das ondas de choque geradas às superfícies.

Outro aspecto relevante dessa pesquisa é que os ensaios realizados no dispositivo de cavitação permitiram avaliar as ações do escoamento durante o fenômeno da cavitação sem a necessidade de aplicabilidade de critérios de semelhança em seus parâmetros, uma vez o sistema é acionado com fluxos sem redução de escala ou influências que corroborem para a atenuação das ações hidrodinâmicas do escoamento sobre os blocos de concreto considerados.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes que norteiam esta pesquisa são apresentadas neste capítulo.

2.1 Objetivos da Pesquisa

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e específicos e serão apresentados na sequência.

2.1.1 *Objetivo Principal*

Verificar as interações existentes entre o fenômeno da cavitação, os parâmetros característicos do concreto e os danos causados às superfícies hidráulicas por meio dos esforços hidrodinâmicos - com e sem a presença de ar no escoamento.

2.1.2 *Objetivos Específicos*

Para entendimento do objetivo principal foram investigados os seguintes aspectos específicos:

- i) Quantificar as pressões médias atuantes no dispositivo de cavitação do LOH, considerando diferentes demandas relativas de ar, e as pressões extremas máximas e mínimas adquiridas na máquina de cavitação do USBR, durante a ocorrência do fenômeno da cavitação em ambos os aparatos experimentais;
- ii) Verificar as interações existentes entre as pressões médias, a partir da inserção de diferentes concentrações de ar no escoamento. E, as vibrações ocasionadas ao sistema durante a operação das condições críticas de funcionamento da máquina de cavitação do LOH;
- iii) Identificar o efeito e a intensidade dos danos causados pela ação da cavitação em diferentes composições de concreto;
- iv) Estabelecer relações existentes entre os parâmetros de resistência à compressão, as relações água/cimento e os danos causados pela cavitação obtidas em escoamentos com diferentes concentrações de ar;

- v) Correlacionar os parâmetros característicos do concreto e as condições hidrodinâmicas de ocorrência do fenômeno da cavitação por meio da aplicação dos estudos já fundamentados de Peterka (1953) e Gal'perin *et al.*, (1971).

2.2 Delimitações

A pesquisa delimita-se ao estudo dos efeitos ocasionados pelo fenômeno da cavitação ao escoamento e as superfícies compostas por diferentes composições de concreto, considerando a influência de diferentes demandas relativas de ar no sistema.

2.3 Pressuposto

Presume-se ser possível a caracterização dos parâmetros hidráulicos, durante a interação do fenômeno da cavitação com distintos coeficientes Beta no escoamento, e do concreto, por meio da ocorrência de danos com diferentes intensidades.

2.4 Limitações

Admite-se as seguintes limitações desta pesquisa:

- a vazão máxima de ensaio atribuída, essencialmente, pelas características geométricas do dispositivo de cavitação tipo Venturi utilizado para a realização dos ensaios em laboratório (LOH/UFRGS e USBR);
- as pressões de controle do sistema;
- a vibração do aparato experimental;
- as características operacionais dos sensores de pressão, sistema de aquisição e dos rotâmetros utilizados;
- os traços de concreto adotados;
- o tempo de cura dos corpos de prova de concreto;
- o suporte de fixação dos corpos de prova no dispositivo de cavitação.

2.5 Delineamento

Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados em um dispositivo experimental tipo Venturi, o qual possibilita o desenvolvimento do fenômeno da cavitação através do favorecimento das condições reais de contorno para sua ocorrência, alta velocidade e redução brusca de pressão abaixo da pressão de vaporização do fluido.

O embasamento desta pesquisa, o cronograma experimental e a realização das práticas de laboratório foram alicerçadas nas etapas desenvolvidas durante o andamento do P&D “Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas”. Financiado por Foz do Chapecó Energia com participação de Furnas Centrais Elétricas, do Laboratory of Hydraulic and of Concrete do US Bureau of Reclamation (USBR), da Desek Consultoria em Engenharia Civil e da Universidade Federal do Rio Grande (UFRGS) através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) em julho de 2019 e findado em dezembro de 2023.

Em seguimento as diretrizes de pesquisa no presente capítulo, é apresentada a Revisão Bibliográfica, página 42, cujo objetivo é contextualizar a problemática que envolve o fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas, os estudos e considerações abordados por diferentes autores na área da hidráulica e da tecnologia do concreto.

No capítulo 4, Metodologia, página 107, é descrito o dispositivo de cavitação, as instalações experimentais dos sistemas de ar e água, implementadas no LOH e as utilizadas nos ensaios realizados no USBR, os equipamentos e procedimentos metodológicos considerados na coleta dos dados do escoamento e dos concretos avaliados nesta pesquisa.

Já no capítulo 0, página 152, são apresentados os Resultados e discussões acerca dos dados obtidos em laboratório comparando-os as propostas e pesquisas pertinentes sobre o tema, descritas no capítulo 2. Além da avaliação das características do escoamento e dos danos ocasionados aos concretos pelo fenômeno da cavitação, é apresentado neste capítulo uma proposta de alteração dos estudos de Gal’perin *et al.*, (1971) e Kudriasov *et al.*, (1983), amplamente difundido na literatura.

No capítulo 6, APLICABILIDADE PRÁTICA, página 245, são descritas duas possíveis utilizações dos resultados de profundidade máxima dos danos (h_{máx.}), causados as superfícies dos concretos analisados no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS através do uso de ábaco/tabela.

As Considerações Finais, descritas no capítulo 7, página 250, expõem as principais conclusões atribuídas aos dados coletados em laboratório, a análise comparativa entre os resultados extraídos no LOH/UFRGS e no USBR e as metodologias desenvolvidas por diferentes autores.

Por fim, no capítulo 8, Recomendações e Contraindicações para Trabalhos Futuros, página 256, são explicitadas algumas das ideias e possibilidades de ensaios futuros utilizando a estrutura do dispositivo de cavitação implementada no laboratório do LOH/UFRGS. Sendo também elencadas neste capítulo, algumas das constatações que inviabilizariam a evolução de novos estudos através de contraindicações, estas embasadas na análise dos resultados e nas considerações apresentadas ao longo do capítulo 5.

No capítulo 9, página 258, são listadas as publicações (livros, artigos, *reports*, teses e dissertações) que auxiliaram no entendimento e na elaboração desta pesquisa.

Vislumbra-se com esta pesquisa contribuir para a uma maior compreensão sobre a problemática que envolve o fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas e o processo de aeração do escoamento, como ferramenta de atenuação ou controle para a não ocorrência de danos em superfícies de concreto. Desta forma, no que tange as limitações inerentes a metodologia adotada, espera-se com este trabalho ampliar os conhecimentos existentes para a proteção das superfícies de revestimento dos dispositivos de segurança de barragens, tais como vertedouros e bacias de dissipação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos os diferentes estudos que visam a compreensão do fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas, as particularidades que envolvem os escoamentos aerados e as principais metodologias de análise de danos gerados nas superfícies de concreto.

3.1 Cavitação: Descrição do fenômeno

Estudos referentes a teoria na qual envolve o fenômeno da cavitação existem desde o século XVIII, elaborados inicialmente por Euler, Froude e Parsons, sendo que as primeiras observações que vinculam o fenômeno aos danos gerados em hélices marítimas foram realizadas pelo engenheiro Normand no século XIX (LOPES, 1944).

A cavitação é o fenômeno composto pela formação, crescimento e posterior colapso de cavidades ou bolhas de vapor, em áreas onde a pressão dinâmica do fluido é superior à pressão de vaporização do líquido, formando assim, uma mistura heterogênea das fases líquida e gasosa. Os requisitos indispensáveis para sua ocorrência são: i) presença de núcleos microscópicos de ar, gases, vazios ou até impurezas no escoamento, ii) pressão do escoamento ser reduzida à pressão de vapor e iii) pressão circundante às cavidades ser superior à pressão de formação das bolhas. O ar livre ou bolhas de ar contidas em fendas dos contornos são as principais fontes dos núcleos que originam as cavidades. Quando a pressão local for próxima a pressão de vapor e as bolhas atingirem o diâmetro crítico, essas *explodirão*. Caso, a pressão circundante às bolhas seja superior à pressão de vaporização do líquido as cavidades tornar-se-ão instáveis favorecendo a *implosão* das mesmas (COLGATE, 1977; QUINTELA e RAMOS, 1980; TULLIS, 1982 ; FALVEY, 1990).

As bolhas de vapor, geradas nas zonas de baixa pressão e transportadas pelo escoamento para as áreas de pressão mais elevada, podem sofrer colapso em duas condições distintas, conforme o local onde se encontram: próximas ou afastadas à superfície de contorno. Em condições em que as cavidades de vapor se encontram próximas a região limítrofe da estrutura, o escoamento é restringido e a bolha sofre deformação do lado oposto à superfície de contato. Nessa situação há formação de micro jatos que penetram no sentido da

concauidade da bolha para a superfície, deixando-a com a forma de um toróide. Os microjatos geram desgastes e danos nas superfícies atingidas quando caracterizados pelas altas velocidades. Após a ocorrência do micro jato o toróide expande gerando uma onda de choque local, retomando assim, o formato esférico inicial da bolha de vapor (Figura 3-1a).

Na condição em que o colapso das bolhas de vapor ocorre afastado da estrutura, há inicialmente a redução do diâmetro das bolhas até um diâmetro mínimo e sua subsequente expansão gerando assim, ondas de choque que também favorecem danos as superfícies expostas ao fenômeno da cavitação (Figura 3-1b).

A Figura 3-2 apresenta esquematicamente as conformações teóricas esperadas no colapso das cavidades, individuais ou em conjunto, ao longo do escoamento através da presença de gradientes hidráulicos de pressão. Na existência de um colapso em conjunto das bolhas de vapor no escoamento há a ocorrência de um acúmulo das ondas de choque formadas, concentrando a energia do conjunto em um único pico de pressão no escoamento (Figura 3-2b).

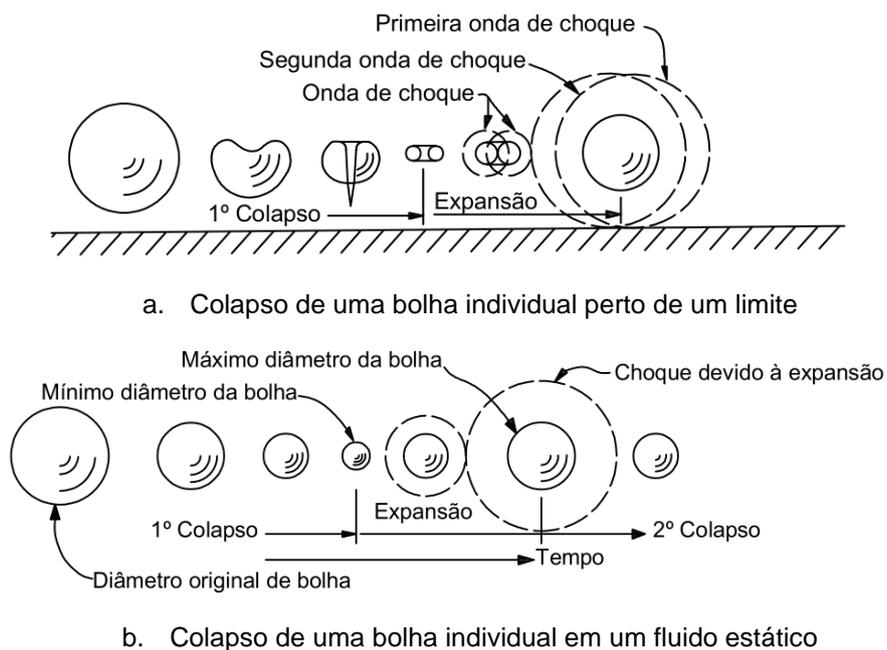
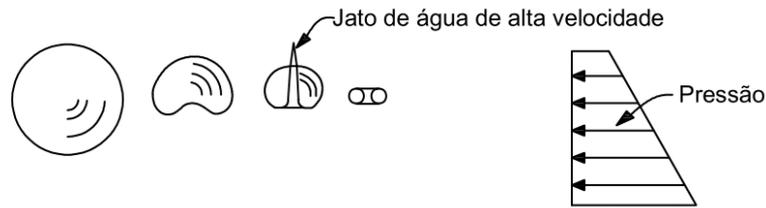
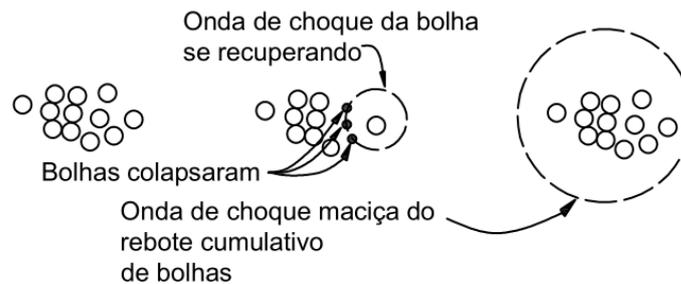


Figura 3-1: Dinâmica de colapso das bolhas de vapor, próximo a uma superfície (a); e em um fluido “estático” afastado da superfície (b). Adaptado de Falvey (1990).



a. Colapso de uma bolha individual em um gradiente hidráulico



b. Colapso de um conjunto de bolhas

Figura 3-2 - Dinâmica de colapso das bolhas de vapor próximo a um gradiente hidráulico de pressão (a); e o colapso de um grupo de bolhas (b). Fonte: adaptado de Falvey (1990).

Lopes (1944) define ainda que o fenômeno da cavitação é composto essencialmente de duas fases, sendo elas:

1ª Fase) Formação das cavidades ou bolhas: ocorrem de maneira variável no tempo e no espaço, preenchidas com vapor, gases em dissolução ou a mistura de ambos podem apresentar um volume entre frações de 1mm^3 , dm^3 ou mais. Em condições específicas essas bolhas podem vir a apresentar tamanhos infinitamente maiores, principalmente quando vinculadas ao funcionamento de hélices do tipo Kaplan com vários diâmetros de comprimento. Nesta fase, através da redução de pressão, abaixo da pressão atmosférica e da pressão de vaporização da água, ocorre a liberação dos gases dissolvidos na água, principalmente o ar encontrado em maior percentagem no meio, formando assim as bolhas características da primeira fase.

2ª Fase) Implosão ou redução das cavidades de vapor: formada pelo colapso das bolhas, inicia quando as mesmas são transportadas pelo escoamento para uma região cuja pressão local é superior à tensão de vapor dando origem a pressões localizadas extremamente elevadas, resultando em flutuações de pressão, vibrações e ruídos.

A dinâmica de formação, expansão e implosão das cavidades de vapor, descritas anteriormente segundo Lopes (1944) e Falvey (1990), pode ser melhor elucidada através das imagens apresentadas na Figura 3-3. Cada segmento que

compõem o processo de ocorrência do fenômeno da cavitação foi extraído a partir de uma filmagem em *slow motion* realizada a uma frequência de aquisição de 37500 fps (Figura 3-3).

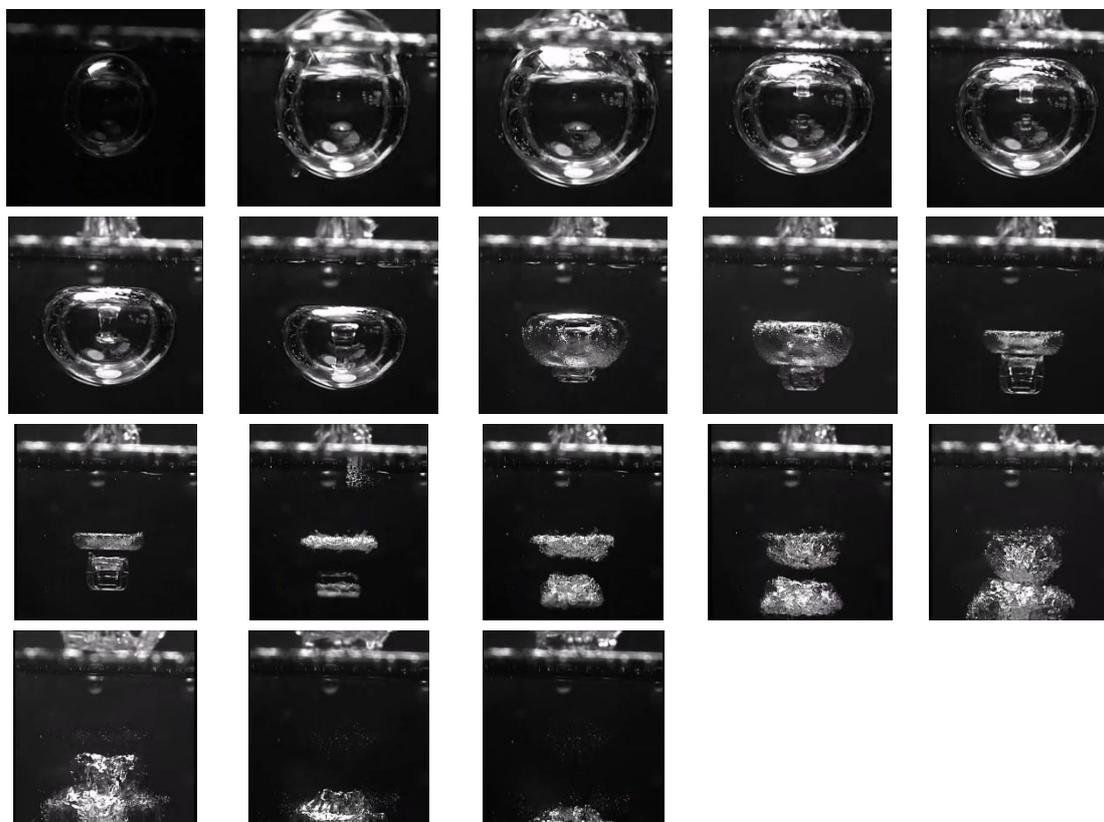


Figura 3-3: Estágio de formação e colapso das cavidades de vapor. Dental Reviews. Cavitation in slow motion (37500 fps). YouTube, 11/10/22. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CKakEG6X82M>.

Henn (2001) retrata que o espaço vazio ocasionado pela condensação brusca das cavidades, imediatamente preenchido pela água circundante durante a implosão das bolhas de vapor, pode ser comparado com o volume específico da água na fase de vapor a 17°C (69,67 m³/kg) com o da fase líquida (0,001001 m³/kg), cerca de 69.600 vezes maior.

A onda de choque gerada pelas partículas de água, ao preencherem o espaço vazio causado pela implosão das bolhas de vapor, assemelha-se ao golpe de aríete, capaz de propiciar o surgimento de picos de pressão no local que variam de 60 a 200 MPa caracterizados por uma frequência de propagação de 10 a 180 KHz (HENN, 2001). Para Tullis (1982) estes picos de pressão máximas poderiam superar os 150.000 psi, ou seja, \cong 1034 MPa de pressão.

Quintela e Ramos (1980), Falvey (1990) e Dalfré (2006), relacionam o início e a intensidade do fenômeno da cavitação à dinâmica do escoamento,

caracterizada pela distribuição de velocidades, características da camada limite, campos de pressões médias e suas flutuações de pressão.

White (2011) informa que, além das propriedades físicas do fluido, as características dos materiais que revestem as estruturas hidráulicas e mecânicas são parâmetros que favorecem a ocorrência da cavitação. Notadamente, as regiões atingidas pela implosão das bolhas não são aquelas em que se registram as menores pressões, mas as áreas onde são condensadas as partículas de vapor. Quando a condensação de vapor ocorre na entrada de bombas centrífugas, em tubulação de sucção ou a jusante de hélices de propulsão, o fenômeno é chamado de “*Supercavitação*” (MACINTYRE, 1997).

A coesão interna dos materiais é a característica mais importante para a determinação de sua suscetibilidade à cavitação. Segundo Quintela (1980) pode-se encontrar o efeito erosivo do fenômeno em metais, duros ou macios, quimicamente ativos ou inertes, em borrachas, plásticos, vidros, concreto, etc. Quando há propagação contínua das ondas de choque no meio, através do fenômeno de vibração da estrutura, ocasiona-se localmente o enfraquecimento dos cristais constituintes do material envolvido. No momento em que as partículas condensadas das superfícies limítrofes ao escoamento encontram-se em percussão vibratória, vibrando milhares de ciclos por segundo, podem vir a favorecer o aumento considerável da temperatura. Nesta condição fica reduzida pontualmente a resistência estrutural dos cristais de formação do material envolvido, gerando pontos de ruptura e fragilidade na superfície (MACINTYRE, 1997).

Em superfícies de concreto a presença de microfissuras, entre o composto ou entre a argamassa e seus agregados, contribuem para o desenvolvimento de danos pela ação da erosão por cavitação. Nessas zonas, as ondas de choque geradas pelo escoamento podem causar tensões de tração que intensificam as microfissuras existentes. A ação constante das ondas propagadas amplifica a intensidade da cavitação, uma vez que o deslocamento dos agregados que compõem o concreto passa a impor novas irregularidades ao fluxo. Com as alterações causada ao perfil do escoamento, outros esforços podem surgir comprometendo as camadas mais aparentes do concreto (SERRA, 1986; BRITO, 2011).

3.1.1 Tipos de Cavitação

Diferentes autores apresentam classificações distintas para a cavitação considerando características como presença de ar no escoamento, sua ocorrência e intensidade do fenômeno em questão.

Tullis (1982) e Lopes (1944) categorizam a cavitação de acordo com a presença ou ausência de bolhas de vapor em *vaporosa* e *gasosa*. Define-se como cavitação *vaporosa* quando as cavidades ou vazios do fluido, formado pelas implosões das bolhas, são preenchidos em sua maioria por vapor de água. Enquanto, a cavitação *gasosa* os espaços formados por esses vazios são preenchidos com gases diferentes ao do vapor do líquido.

A cavitação gasosa normalmente está associada a quantidade consideráveis de ar em suspensão no líquido, de maneira a permitir o aumento do volume de ar no interior das bolhas de vapor existentes. O crescimento e posterior colapso dessas cavidades são extremamente lentos devido à presença de ar livre no escoamento, tornando assim o fenômeno menos violento para a integridade dos sistemas hidráulicos. Em contrapartida, baixas concentrações de ar no líquido propiciam a ocorrência da cavitação vaporosa, de maior intensidade, quando altas taxas de crescimento e colapso das bolhas de vapor geram pressões extremamente elevadas no meio que as circundam favorecendo danos significativos as superfícies de contorno.

De acordo com sua ocorrência May (1987) classifica o fenômeno em:

- i) *Cavitação itinerante*: quando as cavidades formadas em zonas de baixa pressão são direcionadas pelo fluxo a zonas de alta pressão, gerando posterior colapso das bolhas de vapor após seu deslocamento;
- ii) *Cavitação fixa ou super-cavitante*: definida quando há separação das cavidades de vapor do escoamento, formando uma “zona concentrada” de bolhas entre o fluido e a estrutura hidráulica envolvida;
- iii) *Cavitação em vórtice*: ocorre através da formação de bolhas em núcleos de vórtices de rápida rotação em regiões de alto cisalhamento, normalmente encontrada em equipamentos de propulsão e turbo máquinas.

Segundo Falvey (1990) o tipo de cavitação pode ser determinado de acordo com as características do escoamento em: *Incipiente* quando há redução

da pressão do escoamento através do aumento de velocidade do fluxo. E, cavitação *Crítica* ou *Desinente* quando o colapso das cavidades ocorre por meio da redução significativa da velocidade ou através do aumento de pressão no escoamento. A cavitação crítica normalmente antecede o final do fenômeno no escoamento, ambos os tipos não são encontrados de maneira simultânea no fluxo uma vez que dependem de condições distintas para sua ocorrência.

3.1.2 Parâmetros de Cavitação

O parâmetro de referência amplamente utilizado para a determinação da ocorrência do fenômeno da cavitação em diferentes escoamentos é o índice de cavitação “*teta*”(σ). Quando associado a estruturas hidráulicas torna-se um critério indicativo de eventuais riscos que os dispositivos de segurança de barragens possam vir a desenvolver durante suas operações em condições críticas de funcionamento – altas velocidades e redução brusca de pressão do escoamento. Para vertedouros e bacias de dissipação o índice de cavitação é vinculado a valores mínimos de sua ocorrência tornando-se crítico (σ_{cr}) e correlacionado a velocidades médias do escoamento também críticas (V_{cr}).

Os limites máximos definidos das velocidades e vazões específicas críticas para a não ocorrência de danos pelo fenômeno variam conforme os modelos e estruturas avaliadas por diferentes autores, assim como, os limites mínimos estimados para o índice de cavitação crítico (σ_{cr}). Os parâmetros citados acima são expressos a seguir, conforme suas especificidades e condições de surgimento de danos provocados pela ação danosa da cavitação.

3.1.2.1 Índices de Cavitação

A avaliação das características cinética, dinâmica e geométrica que envolve o fenômeno da cavitação possui uma alta complexidade. Desta forma, a definição de um único parâmetro que indique sua magnitude e incidência torna-se algo impreciso.

O parâmetro hidráulico mais importante para avaliar o risco da cavitação em estruturas hidráulicas é o índice de cavitação (σ) (Equação 3-1), responsável por relacionar as forças atuantes geradas pelas altas pressões diferenciais e a carga de velocidade média do fluido. (COLGATE, 1977. ARNDT, 1981; FALVEY 1990).

$$\sigma = \frac{P + P_a - P_v}{\rho_a V^2 / 2}$$

Equação 3-1

A pressão local (P), desprezando a entrada de ar no escoamento, pode ser estimada pela Equação 3-2.

$$P = P_a + \rho_a h \left(g \cos \theta \pm \frac{V^2}{r} \right)$$

Equação 3-2

Obtendo assim, seguinte formulação para a determinação do índice de cavitação (Equação 3-3):

$$\sigma = \frac{\frac{P_a}{\gamma_a} - \frac{P_v}{\gamma_a} + h \cos \theta + \frac{h V^2}{g r}}{\frac{V^2}{2g}}$$

Equação 3-3

Sendo: σ o índice de cavitação; P_a a pressão atmosférica local; γ_a o peso específico da água; P_v a pressão de vapor da água; V a velocidade média do escoamento; ρ_a a massa específica da água; θ o ângulo do fundo do canal com plano horizontal; h a profundidade da água no sentido normal à direção do escoamento; g a aceleração da gravidade; r o raio de curvatura no plano vertical do fundo do canal (positivo - se côncavo – e negativo – se convexo).

Falvey (1990) descreve o estágio da cavitação através do parâmetro σ , o qual atribui aos menores índices de cavitação as situações mais críticas de desenvolvimento apresentadas pelo fenômeno (Figura 3-4).

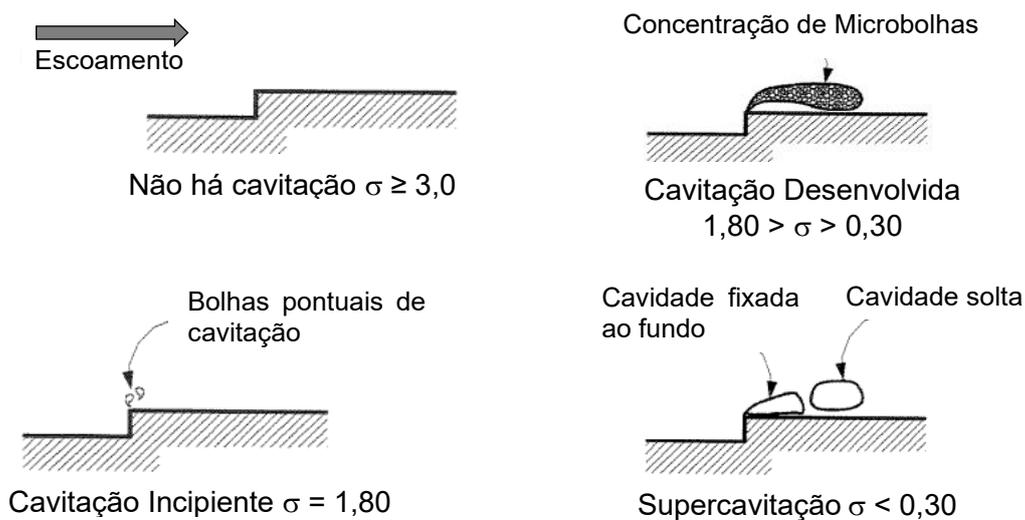


Figura 3-4: Índices de cavitação e os estágios de desenvolvimento da cavitação. Fonte: adaptado de Dalfré Filho (2002) e Falvey (1990).

A cavitação de fato é verificada comprando-se o índice de cavitação (σ) com o índice de cavitação crítico (σ_{cr}), determinado, experimentalmente, de acordo com o tipo e a dimensão das irregularidades encontradas pelo escoamento. Para superfícies de concreto bem-acabadas, em que as irregularidades são graduais e podem ser limitadas a uma declividade de chanfro máxima de 1:20, o $\sigma_{cr} = 0,25$. Em situações em que o índice de cavitação estiver abaixo deste limite, há indicação da utilização de aeração no escoamento como alternativa de prevenção dos danos da cavitação (BALL, 1976; PINTO, 1988; BHATE, 2018; MORTENSEN, 2020). Em concordância aos índices de cavitação crítico (σ_{cr}), Falvey (1990) descreve ainda critérios de projeto para a prevenção de danos de erosão por cavitação, como o mostrado na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Critérios de projeto a serem considerados na prevenção de danos por cavitação.

Índice σ_{cr}	Exigências do Projeto
> 1,80	Nenhuma proteção contra a erosão por cavitação é requerida.
0,25 - 1,80	O contorno sólido pode ser protegido por tratamento superficial, por exemplo, suavizando todas as irregularidades de superfície.
0,17 - 0,25	Modificação do projeto, por exemplo, através do aumento da curvatura do contorno sólido.
0,12 - 0,17	Proteção por aeração induzida por aeradores do tipo ranhura ou degrau.
< 0,12	O contorno sólido não pode ser protegido e deve-se assumir outra configuração

Fonte: adaptado de Falvey (1990).

3.1.2.2 Velocidade Crítica (V_{cr})

O risco à cavitação incipiente pode ser definido pelo critério de velocidade crítica (V_{cr}), o qual estabelece limites da ocorrência do fenômeno da cavitação e a possibilidade de danos as superfícies de concreto de vertedouros em degraus e de calha lisa.

Considerando os trechos das estruturas hidráulicas que antecedem o ponto de início de aeração do escoamento (L_a), pode-se generalizar as velocidades críticas em: $V_{cr} > 20,0$ m/s, onde há riscos de danos pela cavitação; $15,0$ m/s $\leq V_{cr} \leq 20,0$ m/s, faixa de velocidades compreendidas como de transição e com incertezas de ocorrência de danos as superfícies avaliadas, e; $V_{cr} < 15,0$ m/s, limite mínimo sem danos por cavitação.

A Tabela 3-2 define, de acordo com diferentes pesquisadores, as velocidades críticas mínimas para a existência de danos nas superfícies de concreto.

Tabela 3-2: Velocidades críticas limites (V_{cr}) onde há riscos em vertedouros devido a ocorrência da cavitação, segundo diferentes autores e inclinações de calha distintas.

Autor	Ângulo (graus) V:H	Velocidades limites
Ball (1959) ⁽¹⁾	1V:20H	≥ 12,0 m/s
	1V:50H	≥ 28,0 m/s
	1V:100H	≥ 37,0 m/s
Olinger (2001) e Olinger e Brighetti (2002) ⁽³⁾	53,13° (1V:0,75H)	≥ 15,0 m/s e 34,0 m/s ⁽²⁾
Boes e Hager (2003) ⁽³⁾	30°, 40° e 50°, (1V:1,73H, 1V:1,19H, e 1V:H0,84)	≥ 20,0 m/s

⁽¹⁾ para vertedouros de calha lisa;

⁽²⁾ a variação da velocidade (V_{cr}) foi definida através de: $V_{cr} = 6,8 \frac{d}{K_s} + 5,8(\pm 1,0)$

⁽³⁾ para vertedouros em degraus.

*sendo: d a profundidade equivalente da lâmina de água e, K_s a rugosidade do degrau.

Ball (1959) além de definir velocidades críticas limites de ocorrência do fenômeno da cavitação, sugere ainda uma classificação de intensidade aos problemas gerados nas superfícies hidráulicas, como sendo: *leves* para velocidades médias (V) próximas de 15,0m/s, e *graves* para $V > 25,0$ m/s. Para Falvey (1990), velocidades médias de escoamento acima dos 30,0 m/s o concreto, utilizado nas estruturas hidráulicas, já estaria sobre o efeito da cavitação. Por se tratar de dispositivos de segurança das barragens, o autor informa que devem ser realizadas observações do escoamento e da superfície de revestimento a partir dos 10,0 m/s (BHATE, 2018; MORTENSEN, 2020).

3.2 Dispositivos de Estudo do Fenômeno da Cavitação

Devido sua alta complexidade e as particularidades que o fenômeno da cavitação impõe ao escoamento, torna-se inviável, em condições naturais de sua ocorrência, seu estudo em campo. Desta forma, a utilização de modelos reduzidos e dispositivos desenvolvidos em laboratório são amplamente difundidos para a verificação dos danos causados em estruturas hidráulicas e mecânicas pela cavitação.

Colgate (1977) define que os estudos em laboratório podem ser realizados de três maneiras distintas, sendo eles através de:

a) Modelos reduzidos: as variáveis, tais como velocidade e pressão, são medidas e convertidas em escala de protótipo de acordo com as relações estabelecidas, pressupondo que há ocorrência de cavidade no escoamento e que a pressão apresentada seja menor que a pressão de vaporização da água. Esses estudos fornecem parâmetros limitantes de pressão e velocidades que podem vir a fomentar o processo de cavitação;

b) Modelos ou aparelhos específicos de teste: visam o estudo da camada limite do escoamento, responsável pela formação das cavidades ou bolhas de vapor no fluxo observado. Essa modalidade de equipamento possibilita principalmente a visualização do fenômeno através da formação das denominadas “nuvens de cavitação”, que ocorrem quando o escoamento está sujeito a velocidades e pressões ambientes adequadas para a formação da cavitação;

c) Dispositivos ou máquinas de cavitação: são equipamentos capazes de reproduzir o fenômeno da cavitação. Geralmente operando em condições críticas de funcionamento em altas velocidades e baixíssimas pressões, produzem danos significativos às estruturas submetidas a ação do escoamento e a implosão das bolhas. Esses dispositivos visam principalmente a avaliação da resistência e qualidade dos diferentes materiais quando expostos a cavitação.

Peterka (1953), USBR (1963), Gal’perin *et al.*, (1971), Quintela e Ramos (1980) e Gikas (1981) desenvolveram seus estudos sobre o fenômeno da cavitação e os desgastes provocados em superfícies de concreto, através de dispositivos tipo Venturi. Enquanto que Houlston e Vickers (1978), Conn *et al.*, (1984), Cheng *et al.*, (1990), Dalfré (2002) e Dalfré Filho *et al.*, (2006) verificaram a influência do fenômeno em dispositivos do tipo Jato Cavitante.

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 6,35 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. A instalação experimental utilizada no estudo de Peterka (1953) é apresentada na Figura 3-5.

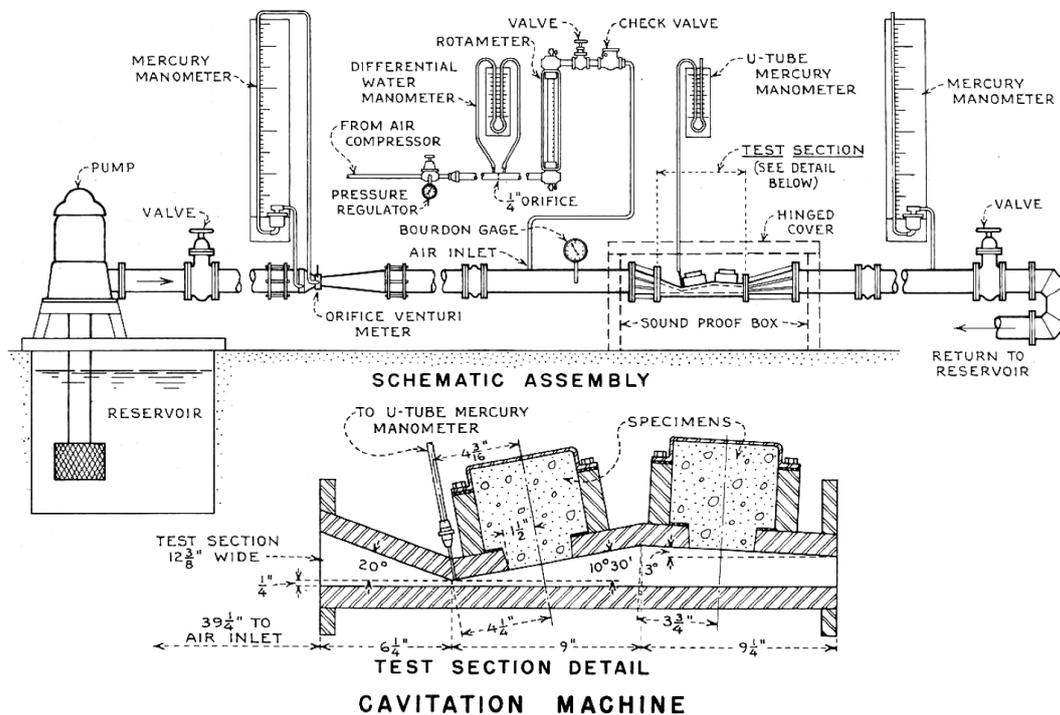


Figura 3-5: Circuito hidráulico da instalação da máquina de cavitação. Fonte: Peterka (1953).

Os testes realizados pelo autor consistiram em avaliar qualitativamente e quantitativamente os danos causados pela cavitação em blocos de concreto de mesma composição, após a exposição de 2 (duas) horas ao fenômeno com e sem a inserção de ar no escoamento (Figura 3-6). A composição do concreto utilizado por Peterka (1953) consistia de uma mistura de: 13,6 kg de areia bem graduada – com diâmetro máximo da partícula de 3,175 mm ; 3,40 kg de cimento *Type II* com baixo teor alcalino, e 2,35 l de água, correspondendo a relação a/c de 0,69. As amostras foram vibradas e a face de contato com o escoamento foi moldada através de uma placa lisa de aço, os blocos foram curados em câmara úmida durante 7 (dias) a 70°F (\cong 21°C) em um ambiente com 100% de umidade.

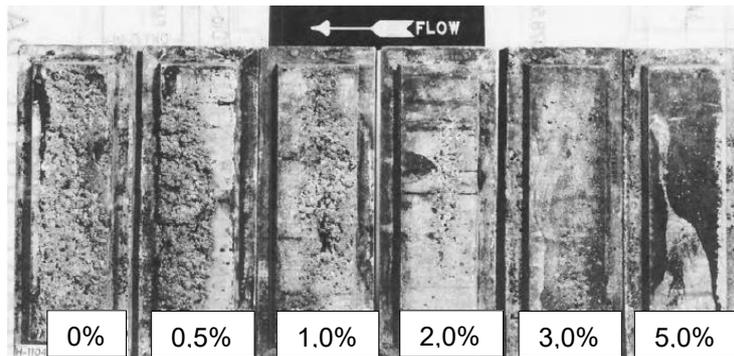


Figura 3-6: Registro fotográfico dos danos ocasionados nas amostras de concreto após 2 h de exposição a cavitação, para diferentes demandas relativas de ar. Fonte: adaptado de Peterka (1953).

Considerando os resultados obtidos experimentalmente, Peterka (1953) relacionou diferentes concentrações de ar no escoamento com a perda de massa dos corpos de prova (Figura 3-7). 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 da cavitação. Observando as pressões médias ao longo do dispositivo Venturi, o autor definiu graficamente a relação existente entre os índices de cavitação e diferentes concentrações de ar no escoamento, confirmando assim, a tendência de redução de risco de dano por cavitação em escoamentos aerados.

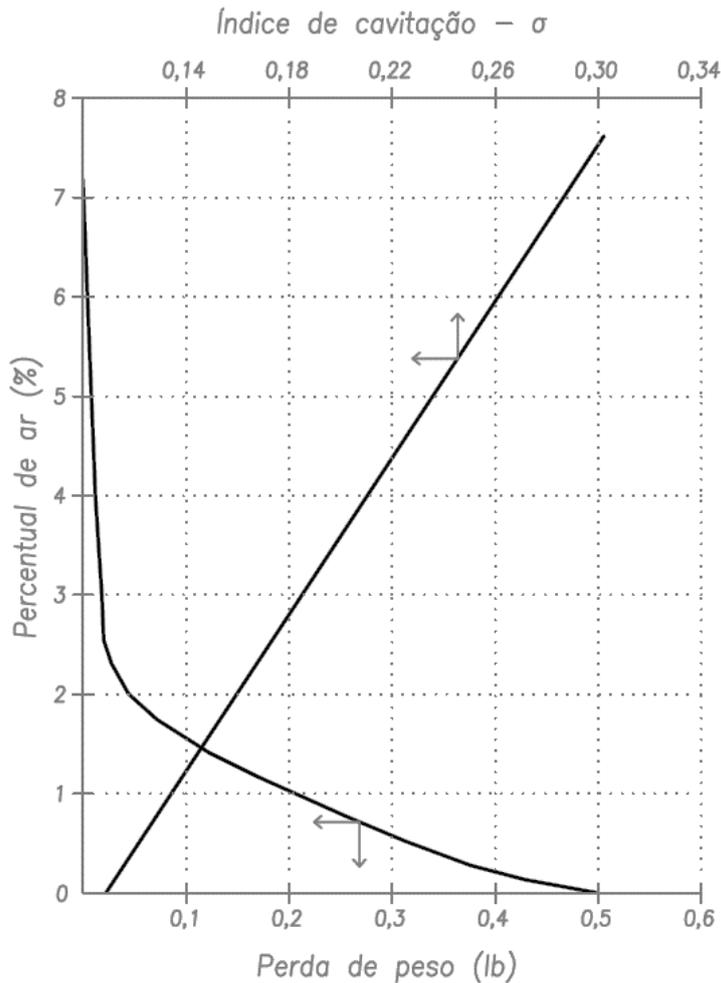


Figura 3-7: Relação obtida entre a concentração de ar e a perda de massa de corpos de prova de concreto. Fonte: Ferla (2020) adaptado de Peterka (1953).

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 de cavitação. Em sua pesquisa foram verificadas diferentes concentrações de ar e velocidades médias do escoamento em concretos com diferentes resistências à compressão, os resultados obtidos pelo autor são apresentados no item 3.5.1 - *Parâmetros Característicos do Concreto*.

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.

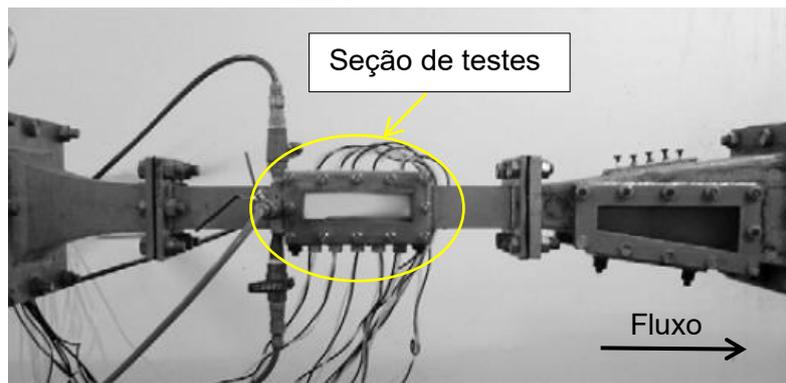
Utilizando um aparato experimental similar ao de Peterka (1953), Gikas (1981) verificou os efeitos da cavitação sobre corpos de prova de diferentes

materiais (resina epóxi, concreto comuns e especiais), de maneira a estabelecer relações entre os materiais avariados e suas resistências ao fenômeno. A duração dos ensaios variou de 140 h, 60 h e 30 h nas vazões de 100,0 l/s e 150,0 l/s.

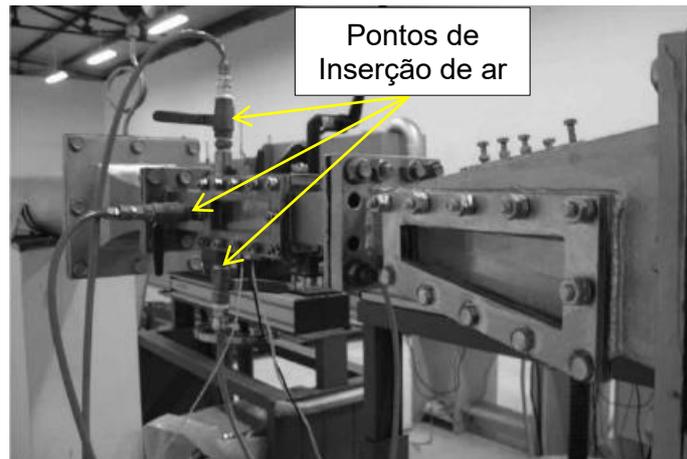
Gikas (1981) salienta ainda a importância de estabelecer correlações entre a resistência à cavitação e as propriedades físicas de dureza, tensão de ruptura e coeficiente de elasticidade dos materiais. Parâmetros como tensão do escoamento e a definição da energia de deformação também deveriam ser estudados 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 onde a erosão for avaliada até sua fase estável de perda de material.

Considerando um dispositivo tipo Venturi (Figura 3-8), Dong e Su (2006) e Dong *et al.*, (2007; 2008; 2010; 2023) 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.

Devido à grande abrangência de informações dessas pesquisas e por se tratar de um dispositivo experimental semelhante ao que será utilizado no desenvolvimento desta tese, serão descritos a seguir os resultados e discussões acerca dos danos nos corpos de prova e dos parâmetros hidráulicos caracterizados por esses autores.



(a)



(b)

Figura 3-8: Aparato experimental utilizado por Dong e Su (2006) e Dong *et al.*, (2007; 2008; 2010), vista lateral da seção de ensaio (a), e; pontos de inserção de ar (b). Adaptado de Dong *et al.*, (2008; 2010).

Dong e Su (2006) estabeleceram correlações entre a velocidade média do escoamento (V) e as concentrações de ar mínimas ($C_{min.}$), necessárias para se evitar a erosão por cavitação. Os autores realizaram ensaios com corpos de prova em concreto com as relações água/cimento (a/c) de 0,43; 0,70 e 1,5, relações cimento/areia (c/a) de 1,0; 0,25 e 0,21 e resistência média a compressão (f_{cm}) de 15,4; 6,2 e 2,2 MPa, respectivamente. O período de cura adotado foi de 4 semana (28 dias) e o tempo de exposição ao dispositivo de cavitação de 2 horas. Além dos ensaios com corpos de prova, Dong e Su (2006) coletaram dados de pressão do escoamento para as demandas relativas de ar de 4,1; 6,4; 8,8; 10,0 e 12,0 % nas distâncias (x) de 0,02; 0,045; 0,07 e 0,12m da seção contraída do dispositivo de cavitação.

Os autores concluíram que a velocidade média e a $C_{min.}(\%)$ segue uma relação parabólica semicúbica (Figura 3-9) representada pela função $C_{min.}(\%) = 0,00018 \cdot V^{3/2}$. Quanto aos resultados das pressões, Dong e Su (2006) afirmam que a aeração do escoamento proporcionou acréscimos nas pressões negativas

e reduções das pressões positivas na zona de ocorrência da implosão das cavidades de vapor conforme o apresentado na Figura 3-10.

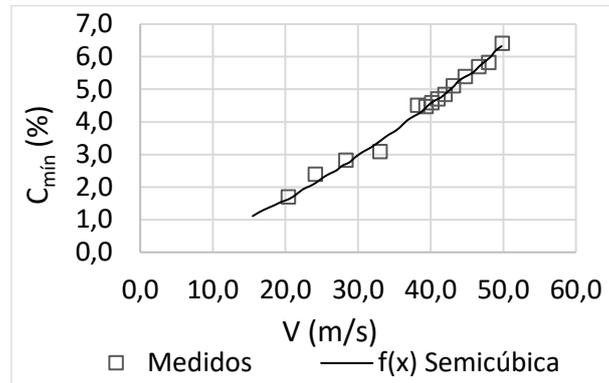


Figura 3-9: Relação entre as concentrações mínimas de ar e a velocidade média do escoamento para evitar erosões por cavitação. Fonte: adaptado de Dong e Su (2006).

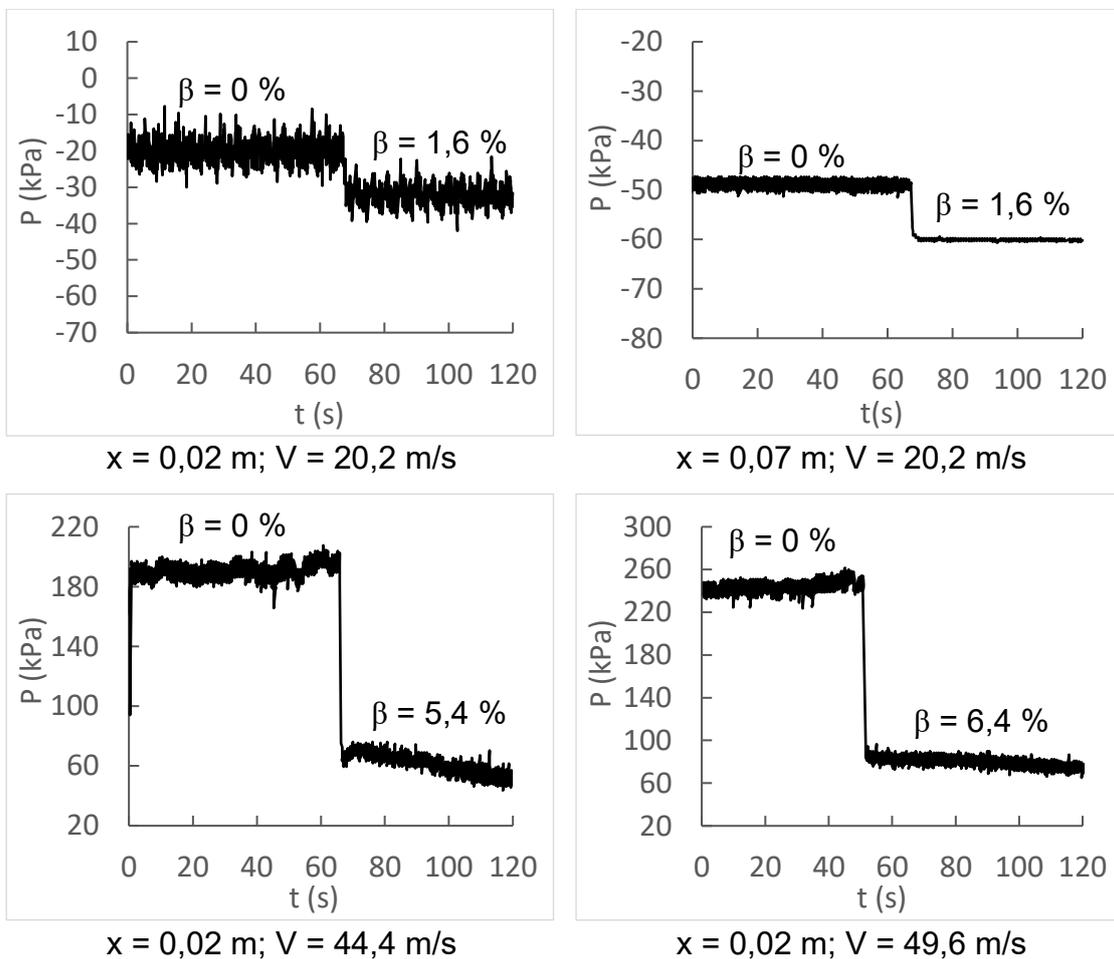
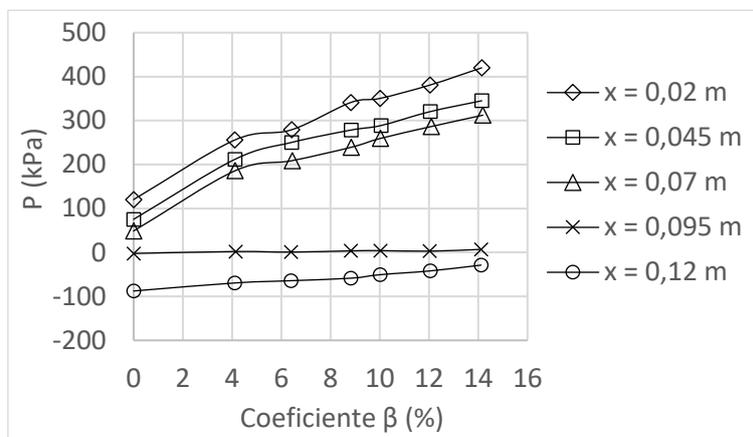
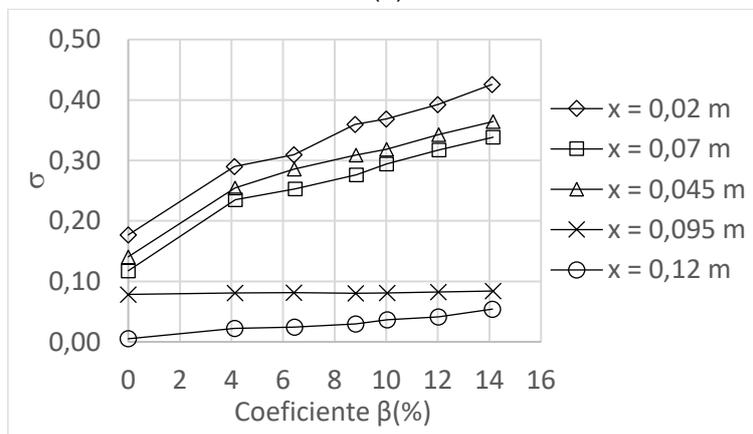


Figura 3-10: Comportamento do sinal de pressão adquiridos para as velocidades médias do escoamento de 20,2; 44,4 e 49,6 m/s, com a inserção de 1,6; 5,4 e 6,4 de ar. Fonte: adaptado de Dong e Su (2006).

Dong *et al.*, (2007) investigaram as variações de pressão e do índice de cavitação correspondentes para a vazão de água (Q_w) de 34,8 l/s, velocidade média (V) de 49,8 m/s, as demandas relativas de ar (β) de 4,1; 6,5; 8,8; 10,0; 12,0 e 14,1%. As distâncias utilizadas no posicionamento dos sensores de pressão foram de 0,02; 0,045; 0,07; 0,095 e 0,12 m a jusante da seção transversal reduzida. Em conjunto com a aquisição das pressões foram realizados testes com corpos de concreto de mesma composição dos adotados por Dong e Su (2006). O comportamento das variações de pressão e dos índices de cavitação (σ) estimados para os diferentes coeficientes β são apresentados na Figura 3-11.



(a)



(b)

Figura 3-11: Resultados das variações de pressão em função das diferentes demandas relativas de ar (a), e; variações dos índices de cavitação (b), ambos para a $V = 49,8$ m/s. Fonte: adaptado de Dong *et al.*, (2007).

Dong *et al.*, (2007) avaliaram a perda de material em corpos de prova em concreto durante a realização de dois ensaios distintos. O primeiro consistiu em expor o corpo de prova a ação do escoamento sem aeração a uma velocidade de 49,8 m/s durante um tempo de 5 min. O segundo, foi desenvolvido com a

mesma velocidade do escoamento, porém com uma demanda relativa de ar de 4,8% durante um período de 15 min. O f_{cm} do concreto utilizado foi de 15,7 MPa. A dimensão final dos blocos moldados foi de 0,14 m x 0,04 m x 0,06 m. Após os ensaios, o corpo de prova exposto à cavitação sem aeração perdeu 65% de seu peso inicial sendo totalmente danificado pela ação do escoamento (Figura 3-12). Já o segundo bloco, exposto ao fluxo aerado com $\beta = 4,8 \%$, desenvolveu erosões de menor intensidade do que as definidas para a primeira condição ensaiada (Figura 3-13).



Figura 3-12: Concreto após 5 min de exposição, $\beta = 0\%$ e $V = 49,8$ m/s (DONG *et al.*, 2007).

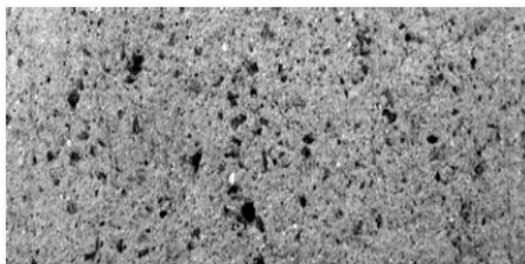


Figura 3-13: Concreto após 15 min de exposição, $\beta = 4,8 \%$ e $V = 49,8$ m/s (DONG *et al.*, 2007).

Foi descrito pelos autores a dificuldade de aeração do escoamento a partir da velocidade de 40,0 m/s, no entanto, para a condição de $V = 49,6$ m/s, a inserção de ar, apesar de difícil, ainda foi eficaz para controlar a erosão dos blocos de concreto de $f_{cm} = 15,7$ MPa (DONG *et al.*, 2007).

Dong *et al.* (2008) realizaram seus estudos sobre a cavitação com e sem a inserção de ar no sistema considerando uma saliência cilíndrica de aço inoxidável de 6,0 mm de diâmetro e 2,0 mm de altura posicionada transversalmente ao escoamento com uma velocidade de 36,1 m/s. Essa pesquisa surgiu da necessidade de compreensão dos danos ocasionados pela erosão por cavitação no concreto de revestimento da seção vertical do túnel do vertedouro da usina hidrelétrica de Liujiaxia na China, após uma onda de cheia de 13 dias, a qual formou uma erosão grave por meio da exposição de 3 barras de aço de 8,0 mm de altura, componentes estruturais das lajes que compõem o vertedouro.

Foram verificados nos ensaios de laboratório os perfis de pressões médias na parte superior e inferior do conduto. Os pontos de medição utilizados foram de -15,0; 10,0; 40,0; 70,0 e 100,0 mm a partir da saliência em estudo.

A Figura 3-14 descreve a nuvem de cavidades formadas sobre a estrutura de 2,0 mm de altura para as demandas relativas de ar 0% e 4,3%, e a Figura

3-15 apresenta o comportamento das pressões médias para todas os coeficientes β avaliados.



(a) Escoamento sem aeração, $\beta = 0\%$.



(b) Escoamento aerado, $\beta = 4,3\%$ de ar.

Figura 3-14: Imagem do escoamento com a formação da nuvem de cavidades bem delimitada sobre a saliência de 2,0 mm de altura (a), e; do fluxo aerado com $\beta = 4,3\%$, ambos com $V = 36,1$ m/s. Fonte: adaptado de Dong *et al.*, (2008).

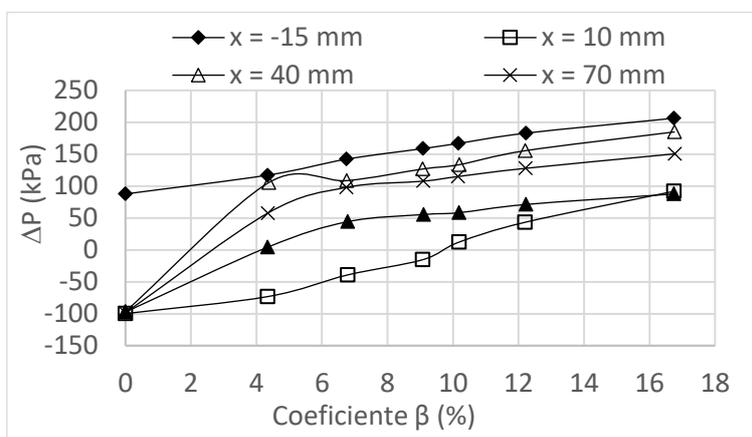


Figura 3-15: Variação obtidas entre as pressões médias extraídas da parte superior e inferior da saliência em estudo. Fonte: adaptado de Dong *et al.*, (2008).

Os resultados de pressões médias entre as paredes superior e inferior do dispositivo de cavitação em $x = 10,0$ mm, extraídos por Dong *et al.* (2008), demonstraram que a pressão do teto sofreu uma redução de 95,0 kPa para – 155,0 kPa devido a presença da saliência cilíndrica, corroborando para a ocorrência de danos pelo fenômeno da cavitação.

Os estudos de Dong *et al.*, (2010) possibilitaram o comparativo entre as nuvens de cavidades formadas pela cavitação considerando diferentes coeficientes β e a presença de chanfros e irregularidades definidas em abruptos e inclinados de 2,0 e 5,0 mm de altura para velocidades de fluxo que variaram de 36,9 a 40,3 m/s. Foram determinados os índices de cavitação (σ) e a relação

entre as espessuras das camadas limite e das nuvens de vapor geradas pela presença das distintas das irregularidades citadas anteriormente.

A Figura 3-16 ilustra, através de registros fotográficos, as diferentes formações das nuvens de vapor no escoamento devido a presença dos chanfros e irregularidades fixados na base do dispositivo de cavitação utilizado por Dong *et. al.*, (2010). Nela se pode observar a formação da camada limite bem definida sobre as alturas de 2,0 e 5,0 mm dos obstáculos impostos ao escoamento.

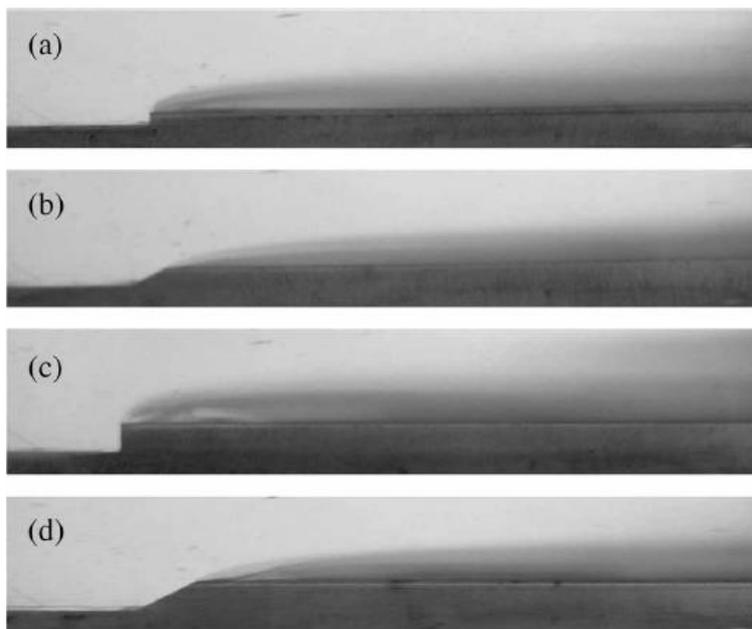


Figura 3-16: Nuvens de vapor formadas pela inserção de irregularidades abruptas e chanfros de 2,0 mm (a, b), e; de 5,0 mm (c, d) de altura.
Fonte: Dong *et. al.*, (2010).

Na Figura 3-17 e na Figura 3-18 são apresentados alguns dos resultados das estimativas teóricas de altura da camada limite (δ) e dos índices de cavitação (σ) comparando-os às espessuras das nuvens de cavitação medidas (x). Os δ foram obtidos através das pressões médias do fluxo (DONG *et. al.*, 2010).

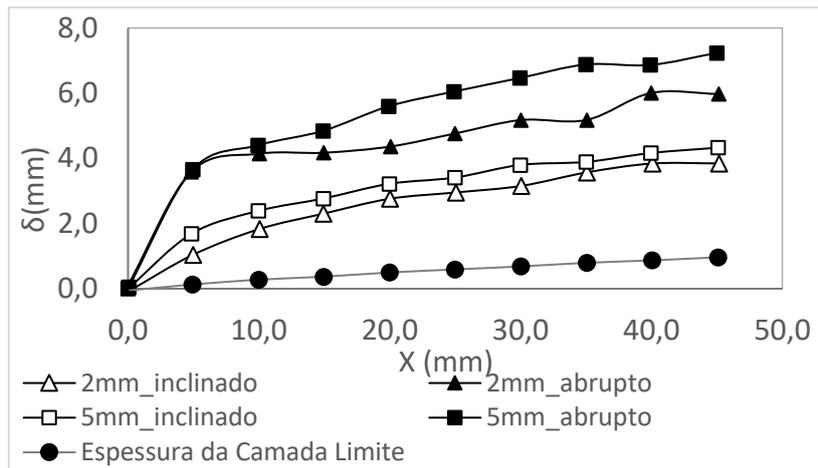


Figura 3-17: Espessura teórica da camada limite (δ) x espessura da nuvem de cavitação medida (x). Fonte: adaptado de Dong *et al.*, 2010.

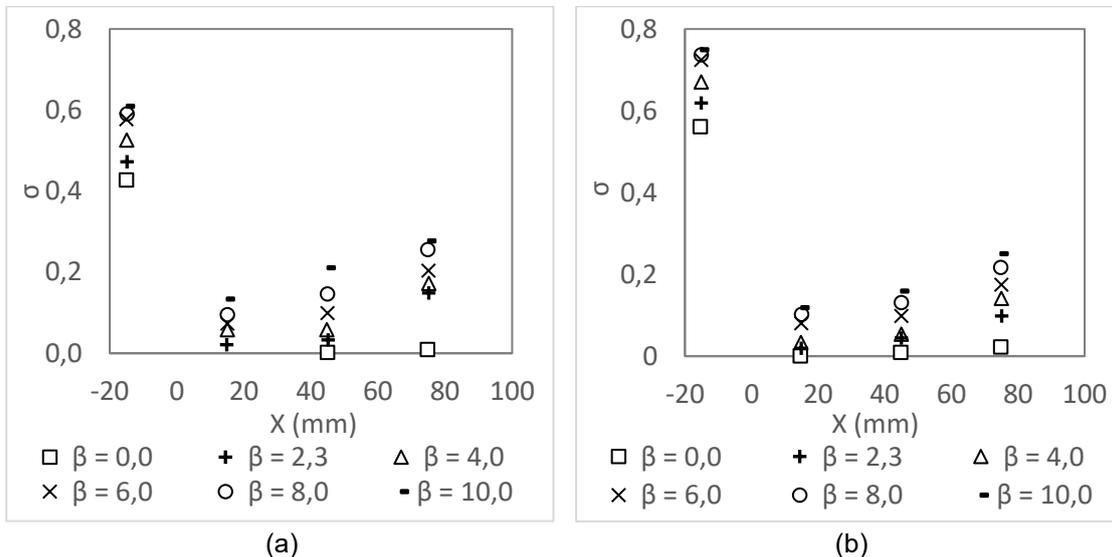


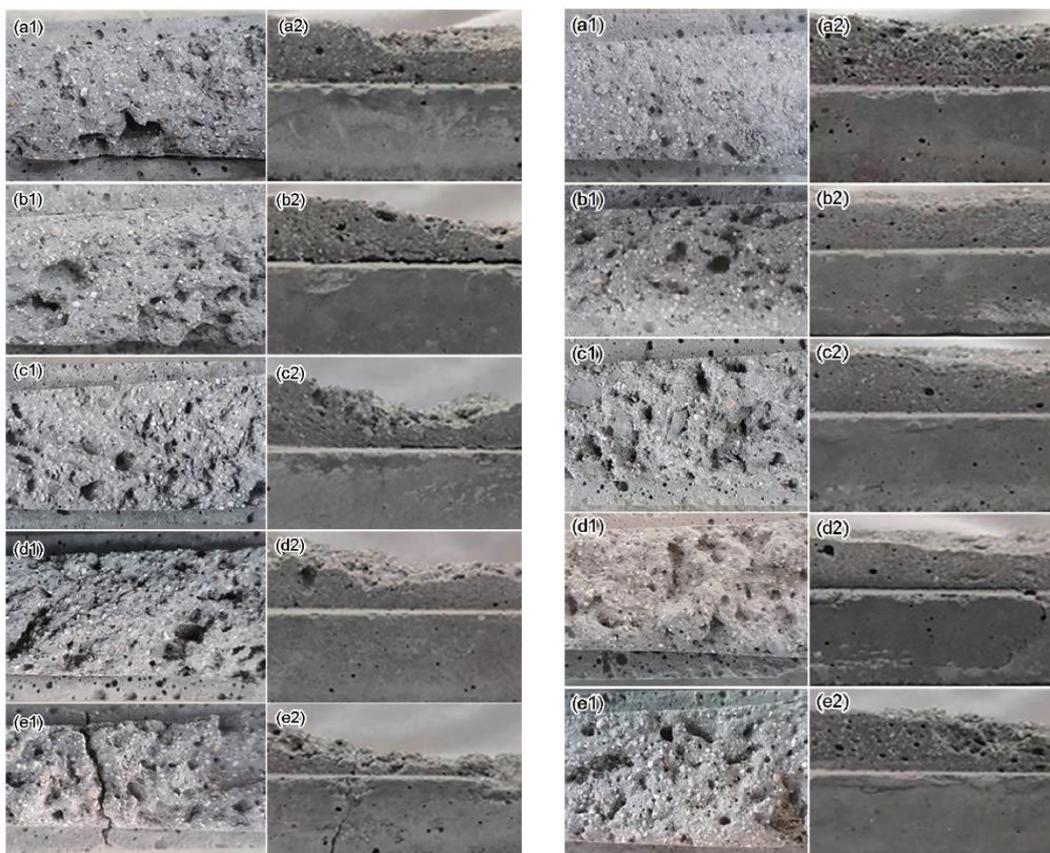
Figura 3-18: Índices de cavitação determinados para o fluxo cavitante considerando a presença de irregularidades abruptas de 2,0 mm (a), e; de 5,0 mm (b) para β de 0; 2,3; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0% de ar. Fonte: adaptado de Dong *et al.*, (2010)

Dong *et al.*, (2010) concluíram em suas pesquisas que: *i)* a utilização de chanfros em vez de irregularidades abruptas não proporcionou melhoras nos índices de cavitação obtidos; *ii)* há formação de nuvens de cavitação até mesmo sobre o chanfro de 2,0 mm; *iii)* as pressões obtidas a jusante das irregularidades abruptas e chanfros inclinados foram negativas e próximas a pressão atmosférica em $\beta = 0\%$, reduzindo também a quase zero os índices de cavitação; *iv)* a aeração no escoamento propicia o aumento das pressões a jusante dos deslocamentos; *vi)* na presença de ar, os índices aumentam progressivamente, e; *vii)* os σ gerados pelos chanfros inclinados de 5,0 mm foram superiores aos estimados na presença das irregularidades abruptas de mesma altura.

Em estudos recentes Dong *et al.*, (2023) verificaram os danos ocasionados a corpos de prova constituídos de cimento, cal, areia e água, sem a presença de agregados graúdos, por um escoamento cavitante contendo a presença de areia. A concentração de sedimentos adicionado ao escoamento foi de 12kg/m^3 com tamanhos médios de partículas (d_{50}) de 0,08; 0,25; 1,0; 2,0 e 3,0 mm.

As amostras de concreto eram compostas de $a/c = 0,40$, c/a (cal / areia) = 1,5 e $f_{cu,k}$ (resistência a compressão no dia do rompimento do corpo de prova - CP) de 17,8kPa após 7 dias de cura, a granulometria das areias utilizadas nos CPs foram as mesmas adicionadas na mistura água + sedimentos. As perdas de massa, identificadas em intervalos de 1 hora durante o período de 4 (quatro) horas de ensaio, aliadas as imagens de microscopia eletrônica dos danos nos blocos de concreto definiram a capacidade de resistência a cavitação. A velocidade do escoamento foi de 38,2 e 28,1 m/s. Também foram realizadas aquisições de pressão média e estimativas dos índices de cavitação na parte inferior e na seção contraída do dispositivo de cavitação (DONG *et al.*, 2023).

Os danos registrados por Dong *et al.*, (2023) nos blocos de concreto, por meio da análise de imagens extraídas pela microscopia eletrônica, são apresentados na Figura 3-19 para ambas as velocidades de fluxo consideradas. Os autores concluíram através dessas imagens que os danos por cavitação são intensificados com o aumento das partículas de areia, tornando as áreas dos danos e a quantidade de cavidades nos corpos de prova maiores com o aumento gradual dos diâmetros de areia d_{50} avaliados (DONG *et al.*, 2023).



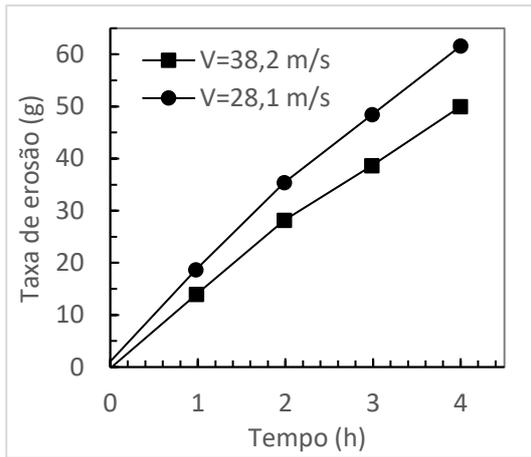
Onde: (a1 e a2) = d_{50} 0,08 mm; (b1 e b2) = d_{50} 0,25 mm; (c1 e c2) = 1,0 mm; (d1 e d2) = 2,0 mm, e; (e1 e e2) = d_{50} 3,0 mm
 (a) (b)

Figura 3-19: Erosões ocasionadas pela ação do fenômeno da cavitação nas amostras de concreto compostas de distintos tamanhos de grãos de areia, considerando $V= 38,2$ m/s (a), e; $28,1$ m/s (b). Fonte: adaptado de Dong *et al.*, (2023).

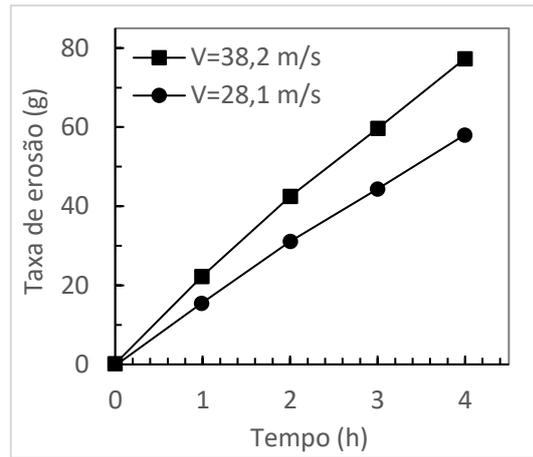
Os resultados obtidos para as variações das taxas de erosão ocasionadas pela cavitação, bem como, as pressões médias e os índices σ estimados para os fluxos contendo a concentração de 12 kg/m^3 de água + areia para a $V = 38,2$ m/s são descritos na Figura 3-20 e Figura 3-21 (DONG *et al.*, 2023).

As taxas de erosão (Figura 3-20) expressas pelas perdas de massa dos corpos de prova demonstraram que o aumento da velocidade do fluxo, de $28,1$ para $38,2$ m/s, favoreceu significativamente a perdas de material das amostras expostas a ação do fenômeno da cavitação.

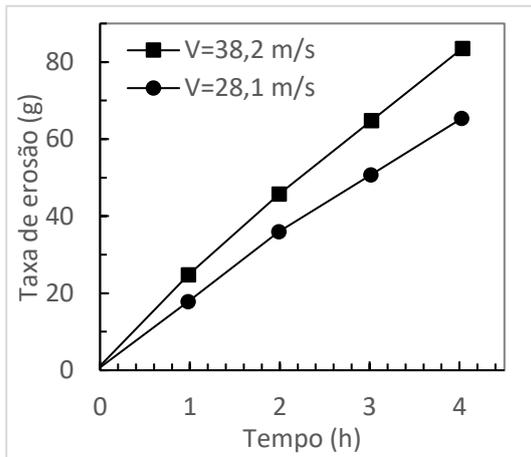
Além disso, segundo Dong *et al.*, (2023) foram verificados aumentos das pressões médias e dos índices de cavitação do escoamento a medida em há o afastamento dos sensores de medição da seção de formação das cavidades e o aumento dos diâmetros dos grãos inseridos no fluxo cavitante (Figura 3-21).



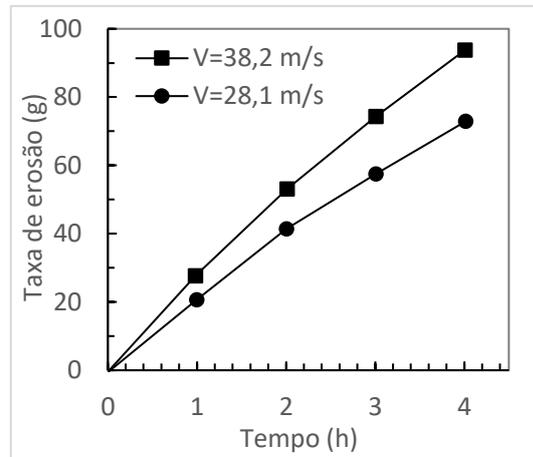
(a)



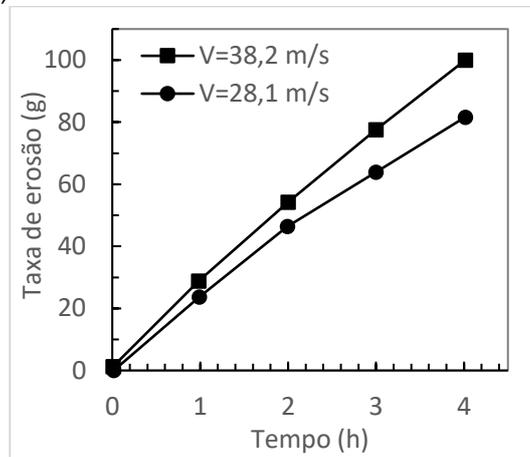
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3-20: Taxas de erosão dos concretos compostos pelos d50 de 0,08 mm (a); 0,25 mm (b); 1,0 mm (c); 2,0 mm (d), e; 3,0 mm (e). Fonte: adaptado de Dong et al., 2023.

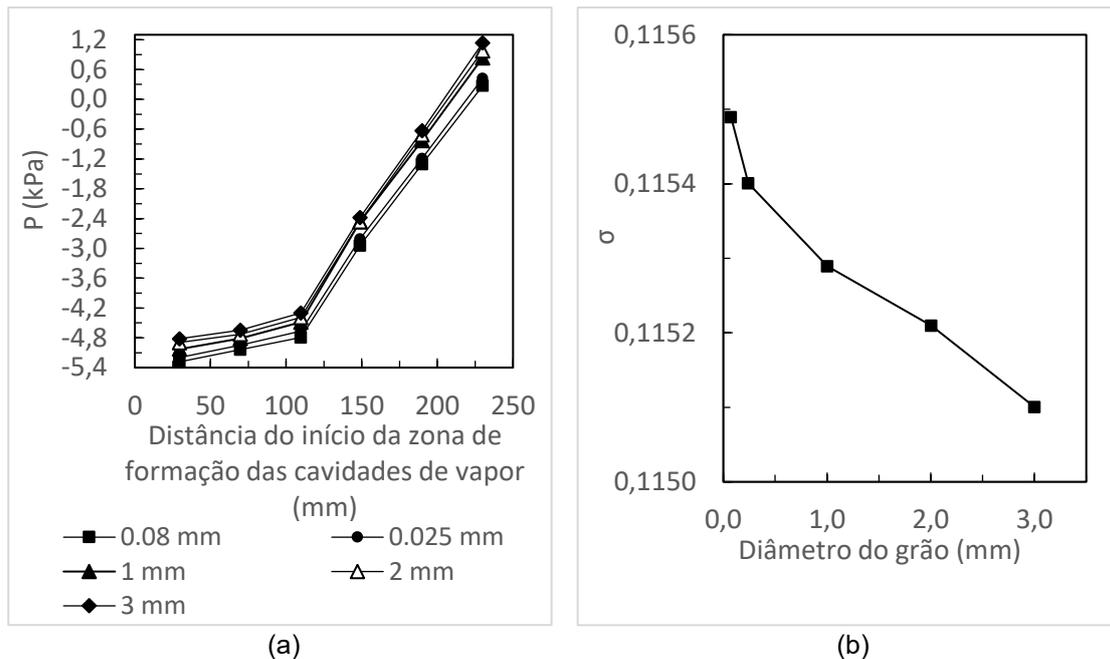


Figura 3-21: Pressões médias (a), e; os índices σ (b), estimados para os fluxos de água + areia de $V = 38,2$ m/s. Fonte: adaptado de Dong et al., (2023).

Dong *et al.*, (2023) afirmam que o aumento do tamanho das partículas de areia, transportadas pelo escoamento, também resultam na redução das pressões negativas e, por consequência, dos índices de cavitação, favorecendo assim o fenômeno da cavitação na seção de controle do aparato experimental utilizado.

Quando avaliados os efeitos ocasionados as superfícies de concreto pelo mesmo tamanho de grão adicionado ao escoamento, mas com velocidades de distintas, $V = 38,2$ e $V = 28,1$ m/s, os autores concluíram que os danos de maior intensidade apresentados pelos corpos de prova foram vinculados a $V = 38,2$ m/s. Ou seja, para essas condições de ensaio, são os parâmetros hidráulicos do fluxo que possuem a capacidade de remoção do material avaliado (DONG *et al.*, 2023).

Houlston e Vickers (1978); Conn *et al.*, (1984), Dalfré (2002), Wu e Lou (2011) e Mortesen (2017) 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.

Wu e Lou (2011) e Mortesen (2017) observaram a interação da cavitação em amostras metálicas de aço Q235 e placas de alumínio, respectivamente. Wu e Lou (2011) investigaram as influências geradas nas perdas de peso das

amostras cilíndricas de aço com diâmetro de 16 mm, alterando as características de pressão do ar, da área e do número de tubos utilizados em sua instalação experimental. As pressões de ar consideradas nos ensaios variaram de 0 a 0,08 MPa, as áreas dos tubos de 0,028; 0,085; 0,283; 0,849 mm² e as combinações associadas às diferentes áreas dos tubos de 0,053+0,085+0,145 mm², o número de tubos variaram de 1 a 3 unidades. Os tempos dos exposição aos jatos foram de 1 a 4 horas de ensaio.

Os danos e as relações obtidas entre os resultados das perdas de massa (WL) em função do tempo de ensaio, das pressões de ar inseridas ao sistema e das áreas de saída dos jatos são apresentadas na Figura 3-22. Os autores verificaram que o aumento do tempo de exposição das amostras de aço aos jatos gerou acréscimos às perdas de peso do material, porém a injeção de ar comprimido em maiores pressões e o aumento da área de saída dos jatos auxiliou na redução expressiva dessas perdas, principalmente nos ensaios de longa duração (t = 4 h) (WU e LOU, 2011).

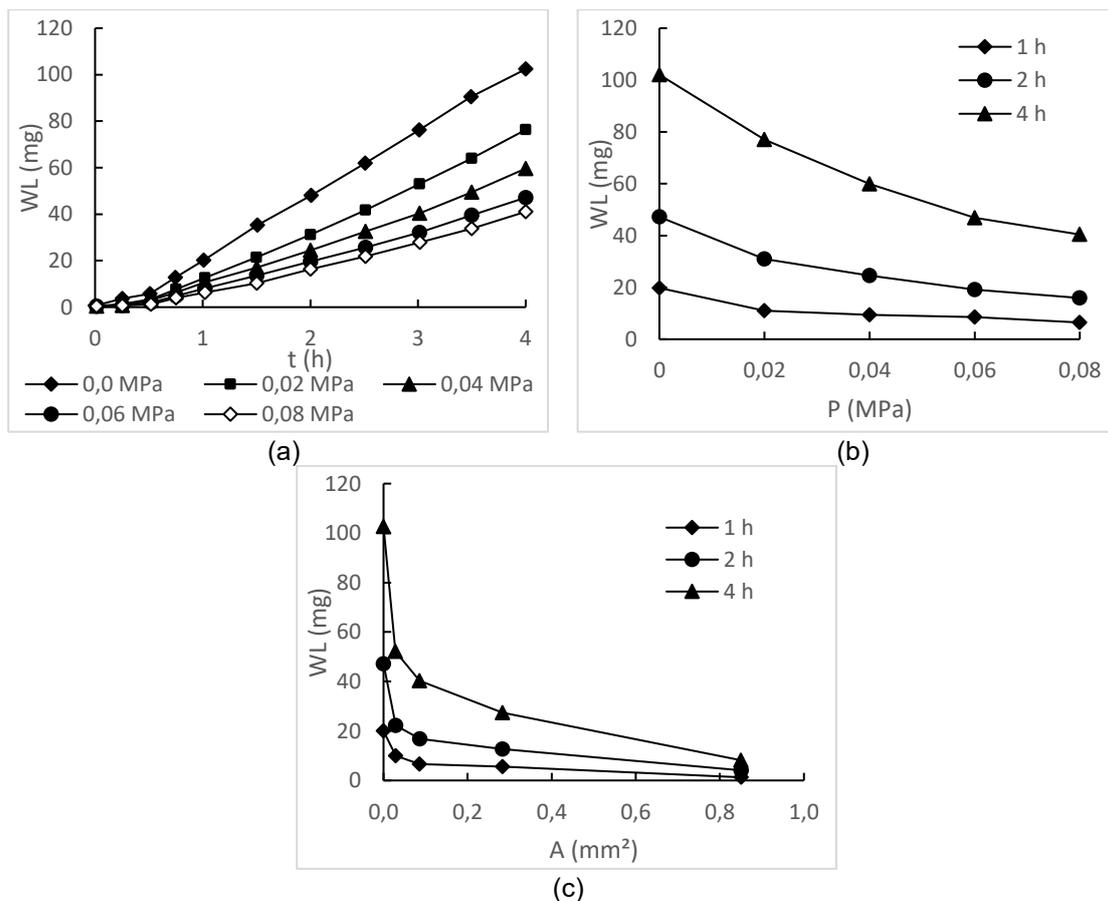


Figura 3-22: Resultado das variações de perda de massa (WL) das amostras em função do tempo (a); da pressão de entrada do ar no escoamento cavitante (b), e; da área do tubo de entrada do ar (c). Fonte: adaptado de Wu e Lou (2011).

A Figura 3-23 apresenta os registros fotográficos dos danos gerados as amostras de aço através das alterações de pressão do ar, área e quantidade dos jatos cavitantes (WU e LOU, 2011).

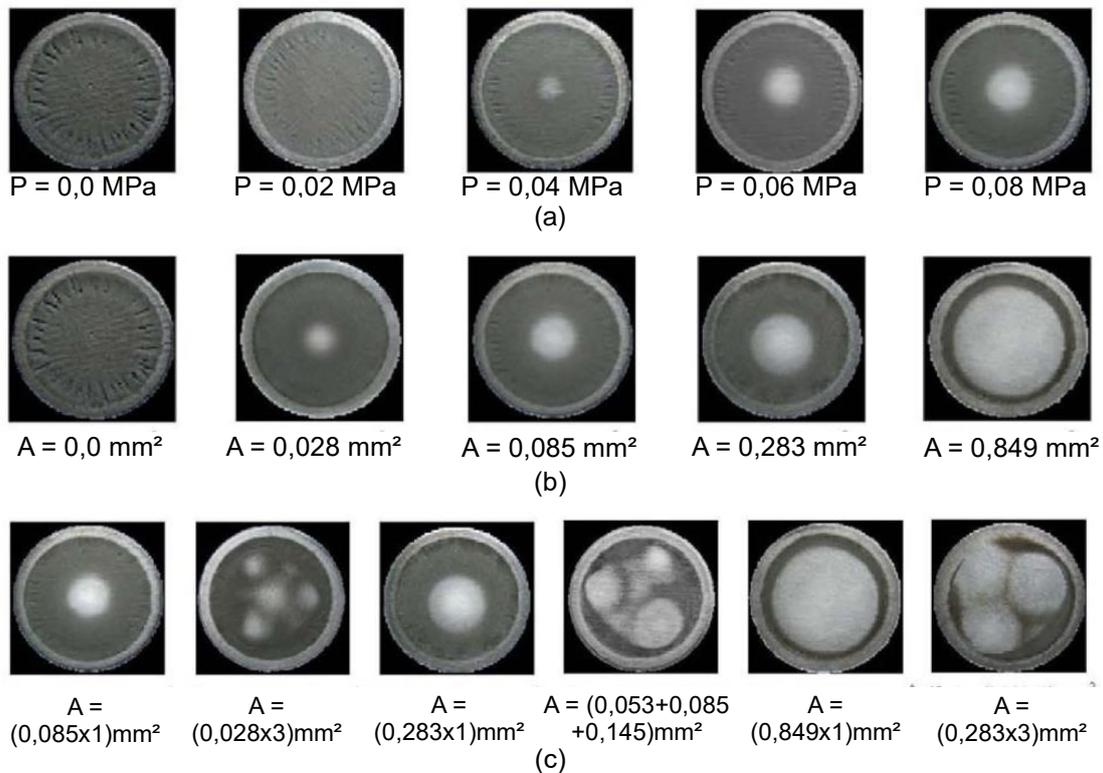


Figura 3-23: Imagens dos danos causados nas amostras de 16,0 mm de diâmetro alterando a pressão do ar (a), a área (b), e; o número das saídas dos jatos cavitante (c). Fonte: Wu e Lou (2011).

Por fim, Wu e Lou (2011) identificam que as maiores pressões de ar e áreas do tubo cavitante possuem os melhores efeitos sobre o controle dos danos por cavitação, uma vez que o elevado fornecimento de ar e sua melhor distribuição sobre a superfície acabam por proteger a superfície do material exposto. A prevenção dos danos já se faz presente com a adoção de 3 unidades de saída, conforme a expressão $1+1+1>3$, para os ensaios de igual pressão e área de jato.

Mortesen (2017) utilizando placas de alumínio nas dimensões de 15,2 cm x 45,7 cm x 2,5 cm, posicionadas a 5,0 cm de distância do jato cavitante, verificou a possibilidade de detecção dos danos de diferentes intensidades por meio da utilização de uma Sonda Acústica de Banda Larga (AE) (nas faixas red, blue e pink em uma frequência de 1MHz durante 0,95 segundos) e de um acelerômetro (obtendo medições a 80 kHz por 11,89 segundos) ambos fixados na amostra de alumínio verificada (Figura 3-24). Os danos (pits) gerados na superfície da placa

foram medidos de acordo com as amplitudes do sinal AE dentro e fora das irregularidades formadas (Figura 3-25).

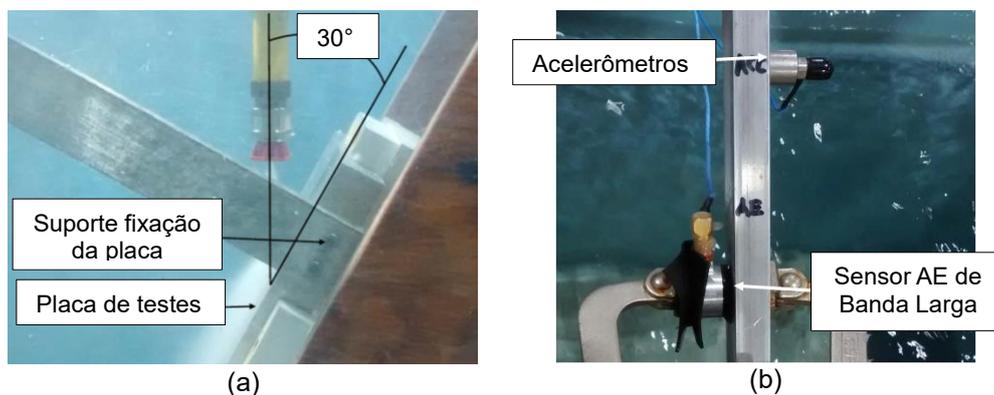


Figura 3-24: Instalação da placa de alumínio (a), e; posicionamentos do acelerômetro e do Sensor (AE) de banda larga (b). Fonte: adaptado de Mortesen (2017).

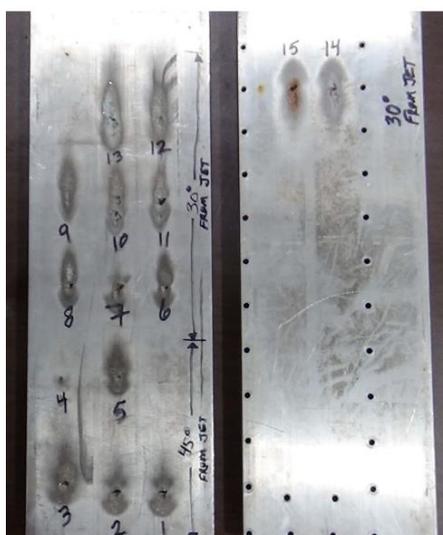


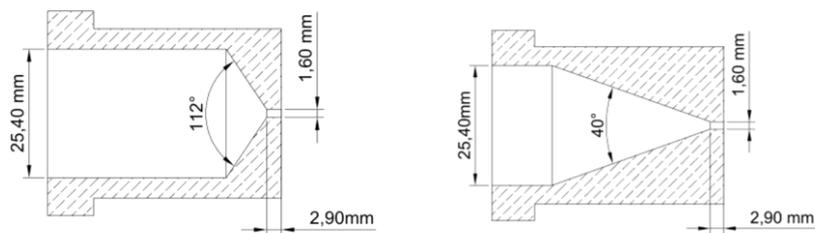
Figura 3-25: Registro dos 15 “pits” causados pela erosão por cavitação pelo jato cavitante submerso. Fonte: Mortesen (2017).

Os ensaios realizados com o uso de jato submerso identificaram uma correlação entre os sinais produzidos pelo sensor de banda larga (AE) e a profundidade dos danos por cavitação. A repetibilidade das condições de ensaio demonstrou que os resultados são influenciados pela conexão mecânica dos sensores na instalação experimental, produzindo resultados aleatórios quando removidos e novamente fixados os sensores a estrutura de teste. Já os dados dos acelerômetros não expressaram nenhuma tendência identificada em relação a profundidade dos pits (MORTESSEN, 2017).

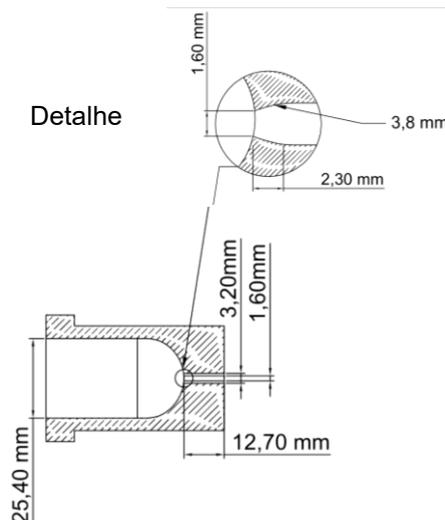
Diferentemente dos demais autores, Houlston e Vickers (1978), Conn *et al.*, (1984) e Dalfré (2002; 2006), desenvolveram seus estudos avaliando inicialmente a aplicabilidade benéfica do fenômeno da cavitação na limpeza

adstringente tradicional de superfícies com jato convencional. O equipamento cavitante utilizado por Houlston e Vickers (1978) era composto de um jato de água contínuo produzido por um sistema de pistão diferencial intensificador óleo-para-água controlados por um circuito de válvulas. A pressão de água no acionamento do jato era de 13,8 MN/m².

Os autores avaliaram os desgastes produzidos por bocais de diferentes diâmetros (0,4; 0,8; 1,6 e 3,2 mm) em suas análises (Figura 3-26). A eficiência da erosão e penetração dos jatos foram constatadas pelos efeitos dos danos gerados nas superfícies, tanto pelo jato quanto pelas gotículas produzidas. Os maiores danos produzidos pela ação cavitante do jato foram constatados durante o uso dos bocais cônicos de 112° e com formato convergente logarítmico. Bocais cônicos de 40° e hemisféricos apresentaram desempenhos inferiores aos esperados pelo fenômeno da cavitação. Em geral, mesmo com a utilização de bocais bem projetados, a cavitação é obtida em combinações específicas de diâmetro e velocidade (HOULSTON e VICKERS, 1978; CONN *et al.*, 1984; DALFRÉ, 2002; 2006).



a) Bocais cônicos de 1,6mm de diâmetro: 112° e 40° de abertura.



b) Bocais logarítmicos de 1,6mm de diâmetro.

Figura 3-26: Exemplos dos bocais utilizados no estudo de jatos de Houlston e Vickers (1978). Fonte: adaptado de Dalfré (2002; 2006).

Em suas pesquisas Conn *et al.*, (1984) desenvolveram um orifício denominado de “*Cavijet*”, com o objetivo de viabilizar a limpeza de superfícies submersas de plataformas de concreto e cortes em cimento. Considerando a influência da cavitação, sistematizaram adaptações ao “*Cavijet*” em função dos diâmetros, vazões, pressões e potência das bombas necessárias a limpeza e ao corte de estruturas. Em suma, as especificações dos bocais e as características do sistema são apresentadas no Quadro 3-1.

Quadro 3-1: Características do sistema e do dispositivo *Cavijet* desenvolvido por Conn *et al.* (1984) de acordo com sua utilização

Uso	Diâmetro (mm)	Pressão da Bomba (MPa)	Q _w (l/min)	Potência da Bomba (kW)
Limpeza de Plataformas	2.3	68.9	52.2	75.0
Corte de Cimento	1.4	68.9	76.0	112.0
Corte de Concreto Armado	2.7	66.2	72.0	79.0

Fonte: adaptado de Conn *et al.* (1984).

Já Dalfré (2002; 2006) desenvolveu em seus estudos 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 (Figura 3-27). Através das limitações do sistema e da necessidade de adequação das pressões e diâmetros dos bocais, que efetivamente gerassem o fenômeno as superfícies avaliadas, optou-se pelo diâmetro de 3,00 mm e uma distância de posicionamento dos corpos de prova de 0,05m.

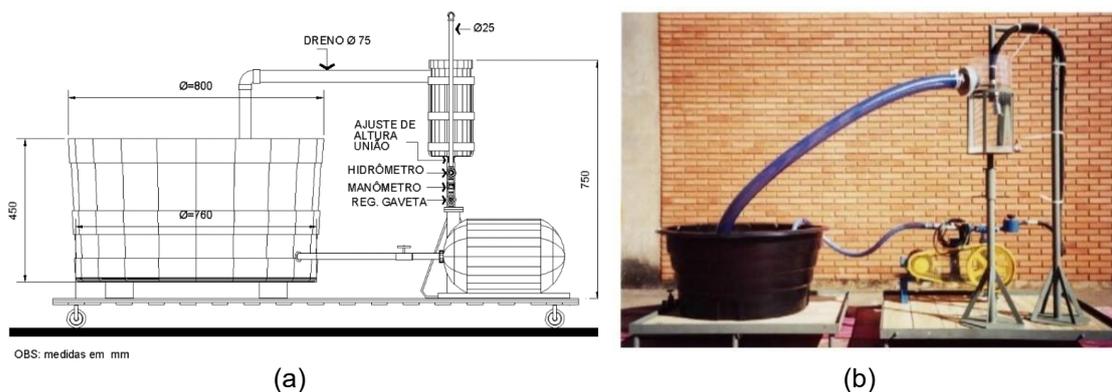


Figura 3-27: Desenho esquemático do aparato experimental (a), e; imagem do sistema cavitante desenvolvido pelo autor. Fonte: Dalfré (2002; 2006).

O autor realizou ensaios com $Q_w = 6,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e pressão de 3,50 MPa. Para detectar a erosão causada pela cavitação foram avaliados 4 (quatro) amostras de concreto com diferentes composições (Tabela 3-3).

Tabela 3-3: Descrição das amostras de concreto utilizada no estudo experimental de Dalfré(2002).

Amostra	Traço em Massa	Relação a/c	f_{cm} (MPa)	Agregado Graúdo
1	1: 4	0,30	43,00	Granito
2	1: 6,9	0,70	6,23	Calcário
3	1: 6,9	0,70	6,23	Calcário
4	1: 6,9	0,70	10,45	Calcário

A intensidade e evolução dos danos gerados nos corpos de prova foram estimados pelo autor 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. Os resultados obtidos são expressos na Tabela 3-4 e Figura 3-28.

Tabela 3-4: Evolução dos desgastes nas amostras de concreto avaliadas.

Tempo (min)	Pits/cm ²			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
10	22	85	40	115
20	52	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*
30	75	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*
50	88**	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*	Fossa de erosão*

Obs:

*Foram determinadas como fossas de erosão, erosões passíveis de medição a olho nu, próximas a 10 mm de diâmetro ou 10mm de profundidade, onde a contagem dos pits não era possível;

** Contagem realizada a olho nu, superfícies rugosas com pequenas fossas de erosão.

Fonte: adaptado de Dalfré (2002; 2006).

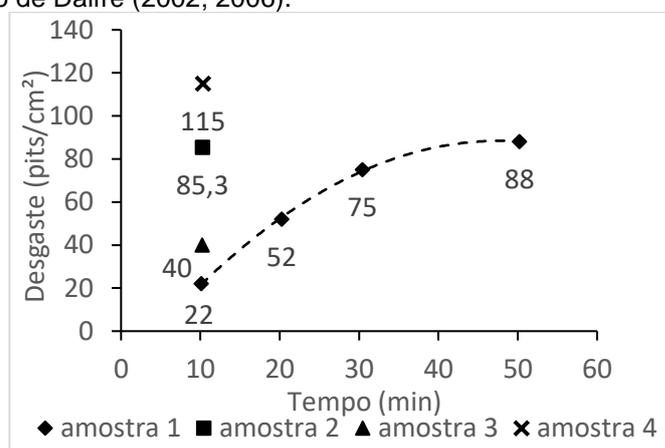


Figura 3-28: Erosão nas amostras ensaiadas pelo equipamento tipo jato cavitante.
Fonte: Dalfré (2002; 2006).

Dalfré (2002) 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. Em suma, o autor conclui

que a instalação experimental desenvolvida é adequada para a realização de ensaios de resistência à cavitação em concretos, pois permite a execução de testes em tempo reduzido, quando comparados ao dispositivo tipo Venturi, além de requerer uma pequena área para sua instalação e baixos custos com a energia necessária à sua alimentação.

Com o intuito de verificar as erosões ocasionados pela cavitação de curta duração Momber (2000) realizou ensaios com um dispositivo tipo jato cavitante no interior de uma câmara, considerando os tempos de exposição de 2 e 10s (Figura 3-29). As amostras de concreto avaliadas variavam o tipo e o formato do agregado graúdo utilizado, quartzo redondo (concreto n°1) e calcário quebrado (concreto n°2), caracterizados pelas resistências a compressão de 21 e 39 MPa, respectivamente.

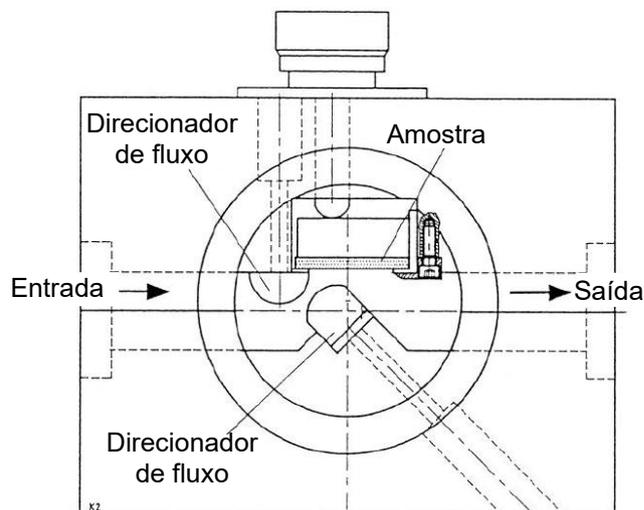


Figura 3-29: Estrutura básica da câmara de cavitação. Fonte: Adaptado de Momber (2000).

O autor analisou a perda de massa e a ocorrência de macro e microfissuras nas amostras de concreto após exposição ao fenômeno da cavitação. A média das perdas de massa obtidas foram de 1,1 g para o concreto n° 1, e 0,3 g para o concreto n° 2. A Figura 3-30 apresenta a visão macroscópica dos danos por cavitação nos concretos compostos pelos dois tipos de agregados após $t = 10s$.

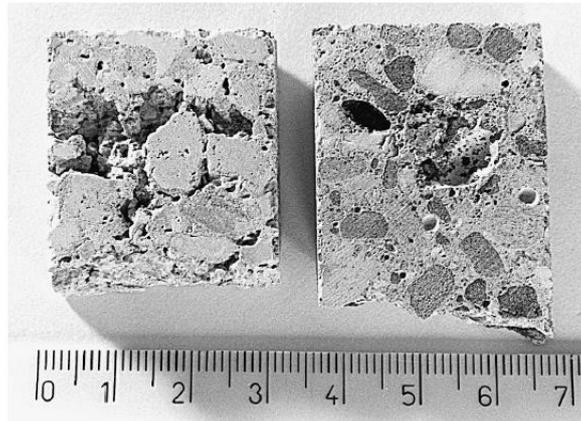


Figura 3-30: Imagem macroscópica dos danos por cavitação após $t = 10$ s, a esquerda o concreto n°1 e a direita o concreto n°2. Fonte: Adaptado de Momber (2000).

Cheng *et al.*, (1990) realizaram comparativos interessantes sobre o efeito do fenômeno da cavitação através de 3 (três) diferentes tipos de dispositivos e metodologias específicas de ensaio, sendo:

- i) Testes vibratórios Ultrassônicos, onde as amostras de concreto foram submersas e expostas ao fenômeno da cavitação através de oscilações de alta frequência, porém sem o efeito da alta velocidade do escoamento.
- ii) Testes em dispositivo tipo Venturi, de efeito mais realista quando comparado ao demais aparatos experimentais, os corpos de prova foram submetidos a carga de 137,0m.c.a., a vazão de 0,5 m³/s e a velocidade de escoamento de 32,0 m/s. A duração dos ensaios foi de 7 horas.
- iii) Testes no dispositivo tipo Jato Cavitante, a pressão fornecida ao sistema foi de 14,5 MPa através de uma bomba tipo pistão. A vazão utilizada foi de $3,9 \times 10^{-4}$ m³/s, tendo sido posicionados os blocos de concreto a 51,0 mm de distância do orifício saída do jato. A distância foi determinada empiricamente pelos autores e o tempo de exposição utilizado foi de 1 minuto.

Foram testadas amostras de concreto de mesma composição revestidas com pintura de resina epóxi, com e sem o tratamento de irradiação com raios gama, este adotado na tentativa de verificar também sua eficiência na aderência entre distintos materiais (concreto/epóxi). Os blocos que receberam tratamento prévio com raios gama possuíram adesividade maior entre os materiais, quando comparados aos sem o mesmo tratamento. Em relação aos resultados obtidos,

os testes com Venturi e com Jato Cavitante apresentaram erosões e desgastes bem maiores em seus corpos de prova do que os blocos após exposição ao equipamento ultrassônico vibratório.

Desta forma, Cheng *et al.*, (1990) concluíram que o efeito gerado pelo equipamento ultrassônico é semelhante ao efeito puro da cavitação, sem os esforços causados pelas velocidades elevadas do escoamento, tornando assim, esta metodologia ineficaz para a determinação da resistência de materiais ao fenômeno da cavitação.

Em suma, grande parte dos estudos vinculados ao fenômeno da cavitação em laboratório são realizados por meio de dispositivos do tipo Jato Cavitante, justificado por diferentes autores, principalmente, devido aos baixos custos de aquisição e implementação desses sistemas. Entretanto, as características de disposição dos corpos de prova (próximos a zona de implosão das bolhas de vapor) e as altas velocidades atingidas pelo escoamento nos dispositivos de cavitação tipo Venturi propiciam a melhor compreensão do fenômeno da cavitação em superfícies de concreto. Independente do dispositivo utilizado, a maioria dos resultados expressos em literatura apresentam análises de caráter qualitativo sobre os danos e erosões causados aos materiais avariados com exceção das pesquisas de Peterka (1953), Gal'perin *et al.*, (1971), Dong e Su (2006) e Dong *et al.*, (2007, 2008, 2010; 2023).

3.3 Efeitos e estruturas de ocorrência do fenômeno

Existem diferentes efeitos causados pela ocorrência do fenômeno da cavitação, podendo ser classificados como benéficos, quando a alta turbulência auxilia em processos de mistura, homogeneização de leitos, catalizador de reações químicas ou em limpezas de superfície, através de dispositivos ultrassônicos. Contudo, e em grande parte do tempo, quando a cavitação é ocasionada em sistemas hidráulicos os efeitos tornam-se prejudiciais, sendo eles: o ruído, as vibrações, as flutuações de pressão, os danos por erosão e a perda de eficiência de turbomáquinas.

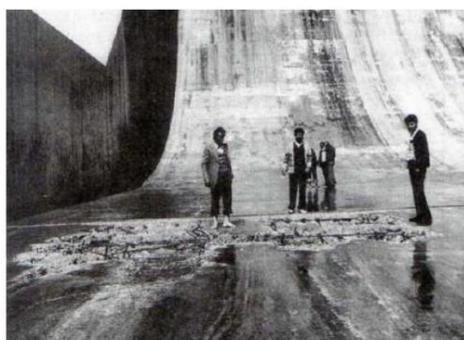
O surgimento e a intensidade do ruído, principalmente em sistemas confinados, servem de indicativos do nível leve, moderado ou intenso da cavitação. As ondas de choque causadas pela implosão das bolhas de vapor no

fluido geram flutuações de pressão no escoamento, e, conseqüentemente, a vibração da estrutura resultando na fadiga do material e falhas nas estruturas envolvidas. Quando as cavidades de vapor rompem próximas as superfícies de contorno originam a erosão dos materiais expostos.

Em condições de favorecimento para o crescimento das bolhas de vapor, as cavidades maiores formadas acabam por alterar a hidrodinâmica do escoamento, reduzindo assim, a eficiência de turbo máquinas. Válvulas, hélices marítimas, bombas centrifugas, turbinas e estruturas hidráulicas, como vertedouros e bacias de dissipação, são os sistemas potencialmente expostos aos feitos prejudiciais da cavitação e, portanto, devem ser constantemente avaliados durante sua vida útil. O item 3.3.1 *Cavitação em Estruturas Hidráulicas*, apresentado a seguir, identifica as principais estruturas hidráulicas, as quais são submetidas a ação da cavitação e os parâmetros hidráulicos que os caracterizam.

3.3.1 Cavitação em Estruturas Hidráulicas

Vertedouros em degraus e de calha lisa, bacias de dissipação e comportas de acionamento são estruturas hidráulicas que, invariavelmente, quando expostas aos esforços hidrodinâmicos consideráveis, de velocidades e pressões (médias, extremas máximas e mínimas), acabam por sofrer danos pelo efeito do fenômeno da cavitação (Figura 3-31 e Figura 3-32). As particularidades de cada sistema conduzem a precauções em zonas específicas da estrutura, ou seja, as interações entre o escoamento e as superfícies de concreto são intensificadas por componentes hidráulicos de maneiras distintas.



(a)



(b)

Figura 3-31: Prejuízos ocasionados pela ação do fenômeno da cavitação. Transição entre o vertedouro e a bacia de dissipação (a), e; Paramento de jusante do vertedouro de Shahid Abbaspour em março de 1978. Fonte: Sentürk, 1994, pg. 172 e Minor, 2000, p.4.

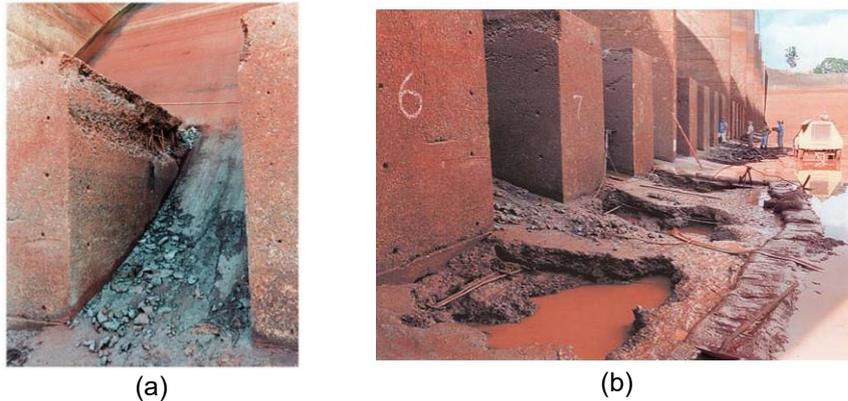


Figura 3-32: Danos da erosão causada pela cavitação na UHE de Porto Colômbia, nos *chutes blocks* existentes na calha, e: a jusante da laje do vertedouro. Fonte: Carvalho, 1997.

Estudos realizados por Bowers e Tsai (1969), considerando dados de pressões instantâneas coletados em trechos que compõem o segmento final de um vertedouro de calha lisa e ao longo da bacia de dissipação, demonstram que as maiores oscilações de pressão estão condicionadas às zonas do ressalto do hidráulico e, portanto, as mesmas tornam-se mais suscetíveis a danos.

As flutuações de pressão, concentradas na zona de recirculação dos ressaltos hidráulicos (Figura 3-33) foram atribuídas a pressões não tão extremas, porém de longa duração, o que condiciona o surgimento de danos por fadiga dos materiais, vibrações estruturais e cavitação intermitente devido as depressões locais no sistema. (BOWERS e TSAI, 1969; ABDUL *et al.*, 1974; PINTO *et al.*, 1988; FIOROTTO e REGINALDO, 1992).

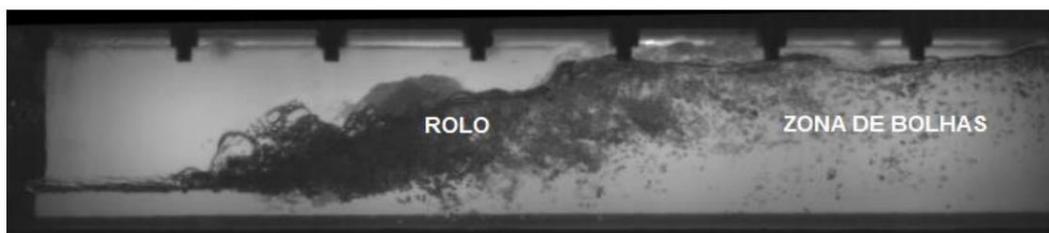


Figura 3-33 : Ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro de calha lisa. Fonte: Hampe (2018).

Akbari; Mittal; Pande, (1982) e Lopardo (1986; 1996; 2019) evidenciaram a necessidade de análise das pressões hidrodinâmicas através das parcelas de pressões instantâneas, médias e suas flutuações, segundo a Equação 3-4. Quantitativamente a parcela de energia cinética incipiente que é transformada em flutuações de pressão pelo ressalto hidráulico pode ser expressa pelo parâmetro C_p' (Equação 3-5).

$$P_i = \bar{P} + P' \quad \text{Equação 3-4}$$

Onde: P_i é a pressão instantânea junto ao fundo do ressalto hidráulico; \bar{P} é o valor médio das pressões instantâneas na bacia de dissipação, e; P' é a parcela de pressão correspondente as flutuações de pressão.

$$C_p' = \frac{v_p}{\frac{V^2}{2g}} \quad \text{Equação 3-5}$$

Sendo: C_p' o coeficiente de flutuação de pressão; v_p o desvio padrão da amostra de pressões; V a velocidade no local considerado, e; g a aceleração da gravidade.

Apesar da grande influência das flutuações de pressão, Toso e Bowers (1988) atribuem as pressões instantâneas extremas a probabilidade de danos estruturais pelo fenômeno da cavitação intermitente em bacias de dissipação. O coeficiente de pressões extremas (C_p) é definido pela Equação 3-6, como sendo o parâmetro mais representativo dessas pressões.

$$C_p = \frac{\Delta P'}{\frac{V^2}{2g}} \quad \text{Equação 3-6}$$

Sendo: $\Delta P'$ a diferença entre a pressão (máxima ou mínima) e a média, dada em m.c.a.

Lopardo (1996; 2019), Teixeira (2003) e Daí Prá (2011), baseados em comparativos entre modelo-protótipo, recomendam a utilização de pressões extremas de não-excedência de 0,1% como indicativo do processo de cavitação incipiente em bacias de dissipação, sendo essas mais relevantes ao fenômeno do que as pressões de probabilidade de não excedência de 1,0% e 99,9%.

Nos vertedouros de calha lisa, a existência de danos por cavitação concentra-se nas zonas de ocorrência de pressões negativas extremas, próximas às ogivas e anteriores ao ponto de aeração natural do escoamento. Segmentos de declividade acentuada, onde as velocidades do fluxo superam os 30 m/s, também originam subpressões acentuadas, favorecendo os esforços cavitantes nas superfícies de contato do escoamento com a estrutura extravasoras (KELLS e SMITH, 1991).

No contexto dos vertedouros em degraus pesquisas realizadas por Sanchez-Juny (2001), Amador (2005), Gomes (2006) e Terrier (2016) identificaram a influência das flutuações de pressão especialmente nas faces horizontais dos degraus. Ao passo que, a vorticidade imposta pelo escoamento às faces verticais dos degraus propiciam a ocorrência de esforços de tração e, conseqüentemente, a incidência de pressões negativas significativas à estrutura.

Peterka (1953) verificou em seus experimentos que a presença de ar no escoamento mesmo que em pequenas concentrações, tem efeito significativo na redução ou extinção dos danos erosivos ocasionados às superfícies de concreto pela cavitação. Partindo desta premissa, diversos autores vêm desenvolvendo estudos, através de modelos físicos reduzidos de vertedouros em degraus e de calhas lisas, referentes a implementação de aeradores nessas estruturas e seus impactos nos campos das pressões hidrodinâmicas do escoamento (PFISTER *et al.*, 2006a e b; ZAMORA *et al.*, 2008; TERRIER, 2016).

Devido à grande variedade de dispositivo hidráulicos e estudos que visam a compreensão do fenômeno da cavitação, serão apresentadas a seguir as contribuições realizadas por diferentes autores sobre os efeitos da cavitação vinculada essencialmente as estruturas hidráulicas de vertedouros de calha lisa e em degraus e a influência da aeração como proteção da erosão e/ou cavitação.

As contribuições citadas anteriormente sobre pesquisas desenvolvidas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico objetivaram identificar que as interações do campo das pressões nesses dissipadores de energia são atribuídas, preponderantemente, às flutuações de pressão e à ocorrência de fadiga, ressonância e vibrações as lajes de fundo. Desta forma, compõem um segmento paralelo e de complexidades distintas as quais não serão abordadas na presente tese.

3.3.1.1 Vertedouros de Calha Lisa

Fundamentalmente, a ocorrência da cavitação em superfícies lisas está condicionada a presença de núcleos gasosos, impurezas no escoamento e a existência de irregularidades superficiais, rugosidades singulares ou distribuídas uniformemente sobre o revestimento dos vertedouros de calha lisa avariados.

A cavitação, oriunda do colapso dos núcleos microscópicos (ou cavidades) através das zonas de turbulência do escoamento é ocasionada nas zonas tangenciais das superfícies (curvas ou de declividades abruptas) em altas velocidades e baixas pressões conforme o ilustrado por Schulz *et al.*, 2010 na Figura 3-34.

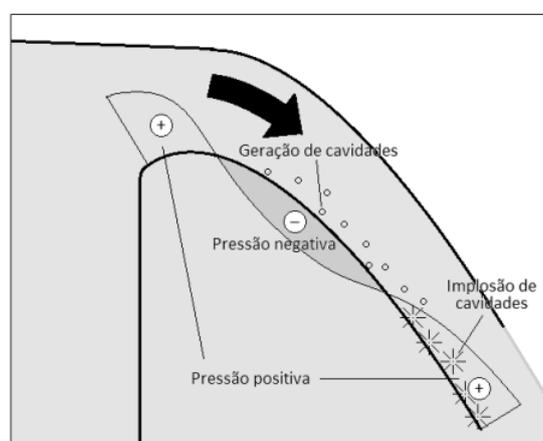


Figura 3-34: Ilustração esquemática da formação e posterior colapso das cavidades de vapor junto ao fundo de um vertedor. Fonte: Schulz *et al.*, (2010).

Quintela e Ramos (1980) classificam as irregularidades em superfícies de concreto em: i) Irregularidades superficiais, como rachaduras, fissuras e demais patologias inerentes ao concreto; ii) Elementos estruturais, como blocos dispersores, de queda ou amortecimento e juntas de dilatação, os quais propiciam problemas por cavitação mesmo em escoamento de velocidades relativamente baixas, de 16,0 a 18,0 m/s, e; iii) Irregularidades oriundas de materiais inapropriados para o acabamento da superfície.

A Figura 3-35, expressa a classificação das irregularidades dos contornos sólidos e a localização das zonas de provável erosão por cavitação a serem esperadas de acordo com o sentido do fluxo existente (FALVEY, 1990).

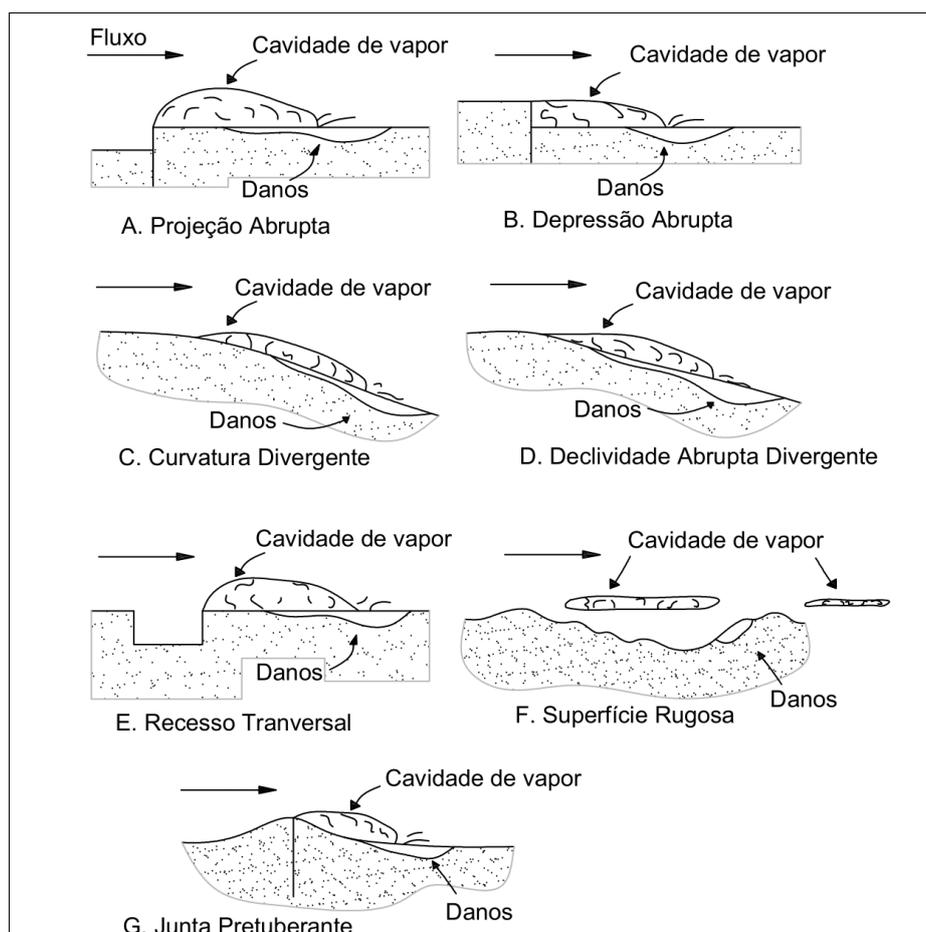


Figura 3-35: Tipos de irregularidades e as zonas de provável erosão por cavitação. Fonte: BRITO, 2011, adaptado de Falvey, 1990.

As discontinuidades superficiais no concreto também são responsáveis pelo aumento da taxa de erosão local, definida segundo Ball (1976) e Tullis (1982) através da função $f(x) = V^n$, que relaciona a velocidade no escoamento entre a quinta e a sétima potências.

Ball (1976) estabelece limites aceitáveis para as relações máximas entre as micro rugosidades nas superfícies hidráulicas e as velocidades médias do escoamento como sendo: i) $20H:1V$, para velocidades entre 12,0 e 27,0 m/s; ii) $50H:1V$, para velocidades entre 27,0 e 36,0 m/s, e; $100H:1V$. para velocidades acima de 36,0 m/s.

Na presença de ressaltos e ranhuras os mesmos devem ser limitados a 3,0mm e 6,4mm, respectivamente, passíveis de alterações quando: i) a superfície tenha sido moldada ou não por formas e ii) se as irregularidades se orientem transversal ou longitudinalmente ao sentido preferencial do escoamento. Em situações onde as irregularidades localizam-se a jusante de

uma comporta de controle, devem ser imediatamente removidas da superfície em questão (BALL, 1976; FALVEY, 1990).

Jin *et al.*, (1980) apud Falvey (1990) verificou experimentalmente o comportamento do escoamento na presença de chanfros e alturas de irregularidades pré-definidas, Através de ensaios em um dispositivo tipo Venturi com seção reduzida retangular de 200mm x 200mm estabeleceu a Equação 3-7, para a determinação do índice de cavitação incipiente (σ_i). A função se limita a relações de $L_C/H > 5,0$, onde L_C é o comprimento horizontal do chanfro, e H a altura vertical do mesmo.

$$\sigma_i = 1,8 \left(\frac{L_C}{H} \right)^{-0.7}$$

Equação 3-7

Os elementos singulares citados anteriormente são responsáveis por, localmente, esforços de cisalhamento por parte do escoamento nas superfícies de concreto, permitindo assim, o início da cavitação incipiente próxima às irregularidades avaliadas.

Na existência de rugosidades uniformes e contínuas, há formação de uma camada cisalhante sobre toda a superfície de ação do escoamento, onde cavitação incipiente poderá ocorrer aleatoriamente sobre qualquer ponto do revestimento. Considerando a dificuldade de informações referentes ao comportamento de pressões atuantes ao longo do perfil da camada limite turbulenta do escoamento, Arndt *et al.*, (1979) define o índice de cavitação incipiente através da Equação 3-8.

$$\sigma_i = 16 C_f = 4f$$

Equação 3-8

Onde: C_f é o coeficiente de resistência média, e; f é o fator de atrito de *Darcy-Weisbach*, definido experimentalmente para rugosidades pré-estabelecidas em condutos de vidros revestidos com areias de distintas granulometrias.

Kudriashov *et al.*, (1983) desenvolveu parte de seus estudos em laboratório avaliando a ocorrência de danos pela cavitação em superfícies planas de concreto com distintas rugosidades artificiais, uniformes e pontuais, quando expostas a escoamentos que variaram de 20,0 a 60,0 m/s. Como conclusão, indica que, para superfícies com rugosidades uniformes e espaçadas

em intervalos de até 5 vezes a altura dessas irregularidades não foram verificados efeitos danosos ao material exposto a fluxos de até 60,0 m/s.

Porém, conforme há o acréscimo de distanciamento entre essas ranhuras, cerca de 8 a 10 vezes a altura dessas irregularidades, inicia-se a erosão intensa do revestimento exposto. Os autores vinculam as erosões essencialmente a desaceleração pontual proporcionada ao escoamento e não ação do fenômeno da cavitação propriamente dito.

3.3.1.2 Vertedouros em Degraus

Quando comparados os vertedouros em degraus aos de calha lisa, a turbulência provocada ao escoamento pela presença dos degraus acaba por favorecer o processo de aeração natural do fluxo, dissipando mais energia que as estruturas de canal liso.

Entretanto, essas novas “irregularidades” impostas ao sistema acabam por intensificar a ocorrência de pressões extremas mínimas, que vinculadas a fluxos de altas velocidades, favorecem à ocorrência do fenômeno da cavitação nessas estruturas. As faces verticais dos degraus e as regiões que antecedem o ponto de início de aeração são as mais propensas ao dano.

Desta forma, com o intuito de evitar condições de operação que ocasionem danos, os vertedouros em degraus normalmente são dimensionados para vazões específicas baixas, de 15,0 a 30,0 m³/s.m, quando comparados aos vertedouros de calha lisa, de 100,0 m³/s.m (PFISTER *et al.*, 2006a; AMADOR *et al.*, 2009, Terrier, 2016).

Por requererem maior atenção em seu uso e dimensionamento, os vertedouros em degraus vem sendo o principal objeto de estudo por diversos pesquisadores da área, dentre eles: Matos *et al.*, (2000); Sanagiotto, (2003); Amador (2005); Gomes (2006); Pfister *et al.*, 2006a; Amador *et al.*, 2009; Zamora *et al.*, (2008); Conterato *et al.*, (2015); Terrier (2016); Dai Prá *et al.*, (2016); Novakoski *et al.*, (2018); Osmar *et al.*, (2018); Priebe (2020); Canellas (2020); Ferla *et al.*, (2021); Novakoski (2021); Matos *et al.*, (2022); Ferla (2022).

Pesquisas relacionadas a modelos teórico-experimentais de vertedouros em degraus estabelecem novos limites para as velocidades, vazões específicas

(q) e índices de cavitação críticos (σ_{cr}) existentes, inicialmente propostos pela literatura, e agora readequados às particularidades de cada estrutura.

Boes e Hager (2003) definem o início do fenômeno da cavitação para escoamentos em velocidades a partir de 20 m/s e vazões específicas de 25 m³/s.m. Os autores indicam que, dependendo da declividade da calha e da altura dos degraus, torna-se necessária a instalação de dispositivos aeradores nas regiões não aeradas do escoamento.

Amador (2005) estabelece um intervalo de 11,5 m³/s.m a 14,0 m³/s.m como novos limites para as vazões específicas e 0,74 e 0,83 para os índices de cavitação críticos, considerando um vertedouro de inclinação 1V:0,8H, compostos por degraus de 0,9m de altura. Para Gomes (2006) avaliando alturas de degraus de 3 cm e 9cm, estabeleceu as vazões específicas limites entre 11,3 a 15,6 m³/s.m para um índice de cavitação crítico de 0,65.

Falvey (1990) , assim como Pfister *et al.*, (2006a) utilizam o $\sigma_{cr} = 0,90$ para um único degrau. Frizell *et al.* (2013), analisando calhas em degraus inseridas em uma câmara de baixa pressão com declividades de 21,8° e 68,2°, obtiveram índices críticos de 0,30 e 0,40 e 0,62 a 0,64, respectivamente. Seu experimento também avaliou os ruídos oriundos do fenômeno em função das alterações dos índices de cavitação, constatando que o início da formação do fenômeno corresponde ao limite do índice crítico (0,90) proposto por Falvey (1990). Pfister e Boes (2014) verificando estruturas com declividade de 50° indicam σ_{cr} entre 0,5 e 0,7.

Novakoski *et al.*, (2018) e Endres *et al.*, (2019), através da análise de pressões negativas extremas com probabilidade de não excedência de 0,1%, considerando que o início do fenômeno da cavitação ocorrerá de fato a uma pressão de -10,09 m, atribuem o risco de ocorrência da cavitação para vazões específicas críticas entre 9,0 e 17,2 m³/s/m. Para vazões superiores aos 17,3 m³/s/m os autores afirmam que ocorrência de cavitação se torna provável na estrutura.

Para Canellas (2020) há riscos de cavitação na estrutura quando a vazão específica é superior a 22,0 m³/s/m, tendo sido estabelecido por meio de equações de previsão de pressões mínimas e de estimativa de concentrações de ar no fundo da estrutura. Seus estudos foram baseados em um modelo físico caracterizado por uma declividade de 53° e degraus com altura de 0,60m

Resumidamente, os limites estabelecidos das vazões específicas críticas (q_{cr}) podem ser expressões em três condições distintas de ocorrência, sendo elas: $q_{cr} \geq 15,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, há riscos de danos por cavitação; $10,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \leq q_{cr} \leq 15,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, região de incertezas de danos pelo efeito da cavitação, e: $q_{cr} < 10,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$: sem danos de cavitação. Na Tabela 3-5 e Tabela 3-6 são descritas as vazões específicas críticas (q_{cr}) e os índices de cavitação críticos (σ_{cr}), definidos por diferentes autores para vertedouros em degraus.

Tabela 3-5: Vazões específicas críticas (q_{cr}) limites para vertedouros em degraus, segundo diferentes autores e estruturas avaliadas.

Autor	Ângulo (graus) (V:H)	Vazão específica limite:	
		Sem risco de cavitação	Cavitação
Tozzi (1992)	53,13° (1V:0,75H)	$\leq 10,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	$\geq 15,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Elviro e Mateos (1996) apud Gomes (2006)	-	$\leq 10,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	-
Matos <i>et al.</i> , (2001)	53,13° (1V:0,75H)	-	$\geq 20,0 \text{ a } 30,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Boes e Hager (2003)	30°, 40° e 50°, (1V:1,73H, 1V:1,19H, e 1V:0,84H)	-	$\geq 25,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Chonggang (2003) apud Amador <i>et al.</i> , (2004)	51,34° (1V:0,8H)	9,0 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	-
Amador (2005)	51,34° (1V:0,8H)	$\leq 11,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	$\geq 14,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Gomes (2006) Osmar (2016)	53,13°	$\leq 11,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ -	$\geq 15,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ $\geq 23,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Novakoski <i>et al.</i> , (2018)	(1V:0,75H)	$\leq 10,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	$\geq 17,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Endres <i>et al.</i> , (2019) Canellas (2020)		$\leq 9,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 15,0 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	$\geq 17,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ $\geq 22,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Tabela 3-6: Valores e limites indicados por diferentes autores aos índices críticos de cavitação (σ_{cr}).

Autor	Ângulo (graus) (V:H)	σ_{cr}		Obs.
		Inferior	Superior	
Falvey (1990) ⁽¹⁾	-	-	-	0,90 ⁽¹⁾
Amador (2005) ⁽²⁾	51,34° (1V:0,80H)	0.74	0.83	-
Gomes (2006) ⁽²⁾	53,13° (1V:0,75H)	0.59	-	-
Pfister <i>et al.</i> , (2006) ⁽³⁾	50° (1V:0,84H)	-	-	0,90 ⁽²⁾
Boes (2012) apud Pfister e Boes (2014)	55° (1V:0,70H)	0.50	0.70	-
Frizell <i>et al.</i> , (2013)	21,8° (1V:2,50H)	0.30	0.40	Início 0,90 ⁽⁴⁾
	68,2° (1V:0,40H)	0.62	0.64	Pontual $\sigma_{cr}=4f$
Pfister e Boes (2014)	50° (1V:0,84H)	0.50	0.70	-

⁽¹⁾ início do fenômeno de cavitação para um degrau único;

⁽²⁾ valores obtidos através de pressão extrema com 0,1% de não excedência;

⁽³⁾ valor indicado por Falvey (1990);

⁽⁴⁾ início da ocorrência através de ruído.

Atualmente grande parte das pesquisas realizadas visam ampliar a magnitude das vazões escoadas pelos vertedouros em degraus sem a ocorrência de riscos a estrutura pelo fenômeno da cavitação. Porém, de acordo com a realidade das barragens existentes torna-se evidente relacionar não somente a magnitude das vazões vertidas, mas também ao tempo de acionamento dessas estruturas durante sua vida útil. A utilização de dispositivos aeradores ao longo de superfícies hidráulicas vêm sendo estudada pela comunidade científica como forma de melhorar a eficiência do processo de aeração do escoamento em vertedouros em degraus, protegendo-os dos efeitos da cavitação.

3.4 Aeração do Escoamento

A água pura pode ser considerada como um fluido incompressível, pois apresenta uma redução de 1/20.000 seu volume quando submetida a um aumento de pressão equivalente a 1 (uma) atmosfera. Ao ser adicionado 0,1% de seu volume em ar, a nova mistura ar-água passa a obter uma compressibilidade de 10 (dez) vezes maior. Segundo Peterka (1953); Semenov e Lentyaev (1973) e Volkart e Rutschman (1984), essa nova condição adquirida

pela mistura (ar-água) reduz significativamente as forças geradas durante o colapso das cavidades de vapor.

O processo de aeração do escoamento pode ocorrer de maneira natural ou artificial, sendo amplamente indicado na prevenção da cavitação em vertedouros e obras de descarga, devendo ser efetuado próximo as regiões de fundo dos canais, criando assim um “colchão” de ar responsável pelo amortecimento da implosão das bolhas de cavitação junta a estrutura (CHANSON, 2004).

A aeração natural ocorre quando a camada limite turbulenta em um canal ou vertedouro aflora na superfície livre da água. Entretanto, a aeração induzida artificialmente é uma das soluções viáveis e estudadas para a proteção das estruturas hidráulicas em condições onde as baixas pressões e as altas velocidades não podem ser evitadas.

Peterka (1953) salienta que, a maneira de introdução de ar no escoamento, bem como o tamanho dos núcleos gasosos inseridos devem ser considerados no processo. Bolhas de ar muito grandes tendem a subir rapidamente não sendo devidamente incorporadas ao sistema devido à alta turbulência local. Ao passo que, dispositivos de aeração, quando instalados em zonas de baixas pressões, porém em locais da estrutura hidráulica que não propiciam a uniformização do ar na mistura, deixam de proteger a superfície exposta aos escoamentos de altas velocidades dos efeitos da cavitação.

3.4.1 *Vertedouro de Calha Lisa*

3.4.1.1 *Aeração Natural*

A aeração natural em vertedouros de calha lisa ocorre quando o escoamento livre, proveniente do reservatório, contorna a superfície sólida da estrutura transformando a camada-limite fluidodinâmica em camada-limite turbulenta. Crescendo gradualmente, essa camada atinge a superfície livre da água, incorporando ar ao escoamento. Este ponto, onde há o enlaçamento do ar, é denominado de ponto (ou posição) de início de aeração (Figura 3-36).

Chanson (1993) descreve a aeração natural de escoamentos em vertedores através de 3 (três) regiões principais, sendo elas: *i) Região sem entrada de ar*, onde a camada limite turbulenta não atingiu a superfície livre; *ii) Região de início da incorporação de ar*, mas as concentrações de ar distribuídas

longitudinalmente junto ao fundo não são constantes, e: *iii) Região de entrada de ar totalmente estabelecida*, onde o perfil de concentração de ar normal ao fundo é constante.

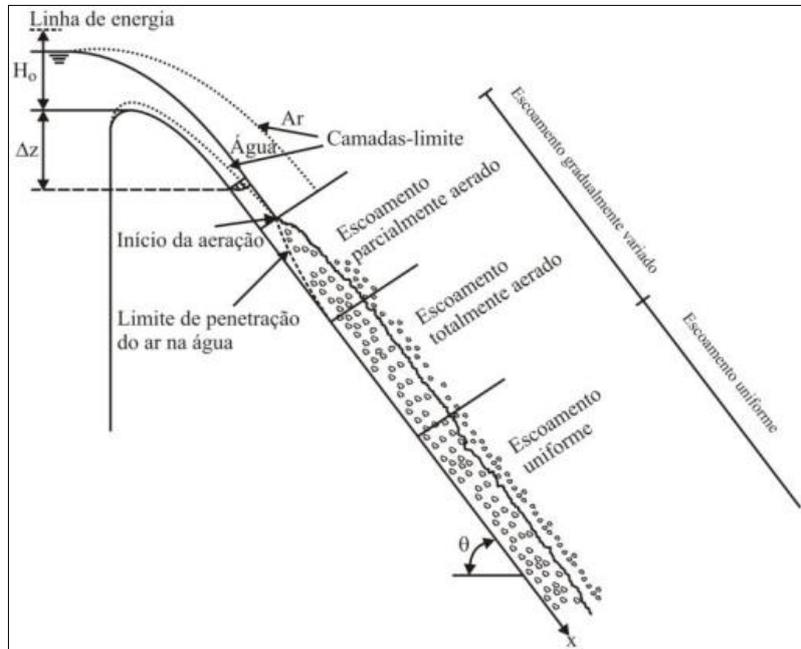


Figura 3-36: Detalhe dos regimes do escoamento quanto à aeração natural em vertedouros. Fonte: Brito (2011) adaptado de Chanson (1993).

Os principais parâmetros característicos da aeração natural em vertedouros são a localização do ponto de início da aeração, a concentração média do ar, a profundidade de água no escoamento aerado, bem como, as velocidades do ar e da água no escoamento aerado (WOOD, 1991; CHANSON, 1993).

A localização do ponto de início de aeração e o estudo do desenvolvimento longitudinal da camada limite foi sugerido inicialmente por Bauer (1954) apud Brito (2011), que por meio de estudos experimentais obteve a Equação 3-9. Campbell, Cox e Boyd (1965) e Wood, Ackers e Loveless (1983), apresentam, posteriormente, alterações distintas em suas formulações para a estimativa da espessura da camada limite conforme o expresso na Equação 3-10 e na Equação 3-11.

$$\frac{\delta}{x_s} = 0,0447 \left(\frac{x_s}{k_s} \right)^{-0,154} \quad \text{Equação 3-9}$$

$$\frac{\delta}{x_s} = 0,08 \left(\frac{x_s}{k_s} \right)^{-0,233} \quad \text{Equação 3-10}$$

$$\frac{\delta}{x_s} = 0,0212 \left(\frac{x_s}{H_s} \right)^{0,11} \left(\frac{k_s}{x_s} \right)^{0,10}$$

Equação 3-11

Onde: δ é a espessura da camada limite; x_s é o ponto de afloramento da camada limite medido a partir da crista do vertedor; k_s é a rugosidade absoluta equivalente, e: H_s e a perda de carga entre o ponto de início da aeração e o nível do reservatório.

Hager e Blaser (1998) propõem a Equação 3-12 para a determinação do ponto de início de aeração acrescentando o ângulo de inclinação do vertedor (θ) e a altura crítica do escoamento (h_c) como variáveis importantes.

$$\frac{x_s}{h_c} = 16(\text{sen}\theta)^{-0,60} \left(\frac{k_s}{h_c} \right)^{-0,08}$$

Equação 3-12

Sendo: x_s o ponto de afloramento da camada limite, ou seja, a origem da aeração, onde a profundidade do escoamento coincide com a espessura da camada limite.

Avaliando dados experimentais em vertedouros com declividade do canal de 5° a 70° , vazões específicas que variaram de 0,5 a 20 $\text{m}^3/\text{s.m}$ e rugosidades da superfície entre 0,001m a 0,003m, Fernando e Rico (2002) desenvolveram a Equação 3-13 e Equação 3-14 para a obtenção do ponto de início de aeração como sendo:

$$x_s = \left[\frac{Q_{aer.}}{0,056443 \cdot k_s^{0,056} \cdot (\text{sen}\theta)^{0,34}} \right]^F$$

Equação 3-13

em que:

$$F = [1,46443 \cdot k_s^{0,0054} \cdot (\text{sen}\theta)^{0,0027}]^{-1}$$

Equação 3-14

Sendo: $Q_{aer.}$ a vazão do escoamento aerado; F coeficiente utilizado na estimativa do ponto de afloramento da camada limite.

3.4.1.2 Concentração Média de Ar (C)

Avaliando escoamentos uniformemente aerados Chanson (1996) define que a concentração média de ar no escoamento (C) (vazão de ar/ vazão de água) pode ser obtida através da integral da concentração de ar local (C_a) ao longo da profundidade do escoamento, está definida como sendo a distância do fundo (ou pseudo-fundo no caso de vertedouros escalonados) até a posição da altura de lâmina d'água, onde há uma concentração de ar de 90%.

A Equação 3-15 estima a concentração de ar média no escoamento, podendo ser expressa também em função das vazões de ar e água presentes no escoamento, conforme a Equação 3-16.

$$C = \frac{1}{h_{90}} \cdot \int_0^{h_{90}} C_a \cdot dh$$

Equação 3-15

$$C = \frac{Q_{ar}}{Q_{ar} + Q_w} \text{ ou } \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Equação 3-16

Sendo, C a concentração média de ar no escoamento; h_{90} a profundidade do escoamento referente a posição de concentração de ar de 90%; C_a a concentração de ar local; Q_{ar} a vazão de ar, e; Q_w a vazão de água.

A altura equivalente de água do escoamento aerado ($h_{eq.}$) pode ser definida através da concentração média de ar pela Equação 3-17, onde:

$$h_{eq.} = (1 - C) \cdot h_{90}$$

Equação 3-17

A Tabela 3-7 apresenta diferentes formulações para a determinação da concentração média de ar no escoamento, segundo Hager (1991), Chanson (1991; 1996), Wood, Ackers e Loveless (1983); Straub (1958) apud Brito (2011).

Tabela 3-7: Formulações para a estimativa da concentração média ar obtidas por diferentes autores.

Autor	Equação	Descrição	
Hager (1991)	$C = 0,75 \cdot (\text{sen}\theta)^{0,75}$	θ , declividade do canal do vertedor.	Equação 3-18
Chanson (1991)	$C = 1,44 \cdot \text{sen}\theta - 0,08$	Dados baseados em rios em montanhas e canais irregulares, com diferentes rugosidades.	Equação 3-19
Chanson (1996)	$C = 0,9 \cdot \text{sen}\theta$ para $\theta \leq 50^\circ$	Avaliou os dados de: Straub e Anderson (1958); Wood, Ackers e Loveless (1983) e Hager (1991).	Equação 3-20

Matos (1990) afirma que para $C \geq 6,0$ e 8,0% a superfície de concreto encontra-se completamente protegida pelos efeitos da cavitação. Já para Pinto *et al.*, (1982) a condição ideal, sem ocorrência de danos, é definida para concentrações de ar no escoamento de 5% e 10%.

Analogamente ao apresentado nos vertedouros de calha lisa, vertedouros em degraus também são amplamente estudados quanto aos aspectos de aeração (posição do início) e concentrações de ar.

Destacam-se os autores Wood *et al.*, (1983); Chanson (1994); Matos (1999); Mateos Iguacel e Elviro Garcia (1999); Chanson e Toombes (2002); Boes e Hager (2003); Sanagiotto (2003); Amador (2005); Andre (2004;2005); Meirelles *et al.*, (2012); Conterato *et al.*, (2015), dentre outros que desenvolveram propostas para posição de início de aeração.

Em relação aos estudos desenvolvidos sobre as concentrações de ar no escoamento de vertedouros em degraus podemos citar as importantes contribuições realizados por Matos (1999); Boes (2000) apud Pfister e Hager, (2011); Boes e Hager (2003); Pfister e Hager (2011); Meireles *et al.*, (2012); Terrier (2016), dentre outros. Apesar de inúmeros os estudos sobre calhas escalonadas não serão aqui apresentados, tendo em vista os objetivos definidos nesta pesquisa.

Entretanto vale ressaltar que tanto em calhas em degraus como em calhas lisas, as altas concentrações de ar no escoamento auxiliam no aumento de pressões e acabam por reduzir riscos pela ação da cavitação. Porém, as altas velocidades no fluxo e as rugosidades relativas dos degraus também devem ser

observadas, pois interferem diretamente no favorecimento de formação das cavidades de vapor (BOES e HAGER, 2003; SANAGIOTTO, 2003 e TERRIER, 2016).

3.4.2 Aeração Induzida – Tipos de Aeradores

A aeração induzida vem sendo amplamente estudada como mecanismo de proteção das superfícies de concreto contra os efeitos da cavitação. Sabe-se que o ar incorporado ao escoamento através de dispositivos aeradores (de fundo ou de parede) auxiliam na atenuação dos efeitos da cavitação, seja da pressão resultante do colapso das cavidades, seja na redução da celeridade das ondas de choque e, conseqüentemente, nos seus efeitos quando do impacto sobre concreto (PINTO, 1988; BRITO, 2011).

Aeradores adequadamente posicionados ao longo da calha e devidamente dimensionados produzem subpressões locais que favorecem a sucção de ar para dentro do escoamento, de maneira a garantir a quantidade de ar necessária para a proteção contra os danos por erosão ou cavitação. Falvey (1990) apresenta modelos simplificados de aeradores em seu estudo, compostos de defletores, degraus, ranhuras, ou combinações entre si.

O primeiro registro histórico da utilização de aeradores em barragens de calha lisa foi encontrado na barragem de Bratsk na Rússia. Caracterizada por um vertedouro de declividade 1V:0,8H, possui dois aeradores do tipo defletor com altura de 0,45m. A exemplo da disposição e dos diferentes tipos de aeradores em vertedouros de calha lisa a Figura 3-37 e Figura 3-38 descrevem o aerador em degrau da UHE Pedra do Cavalo, e o aerador tipo defletor instalado na barragem de Kárahnjúkar na Islândia.

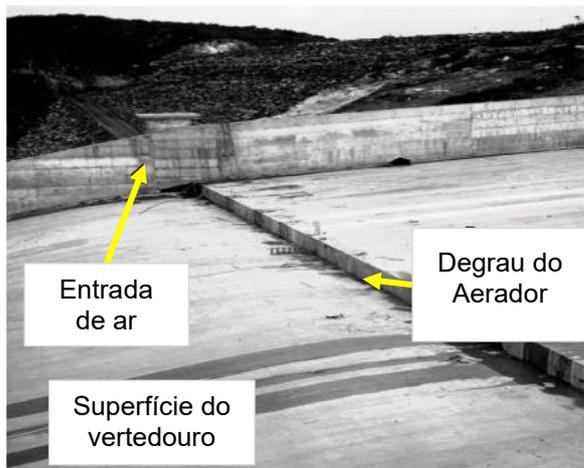


Figura 3-37: Aerador tipo degrau utilizado na UHE Pedra do Cavallo. Fonte: Chanson (1993).

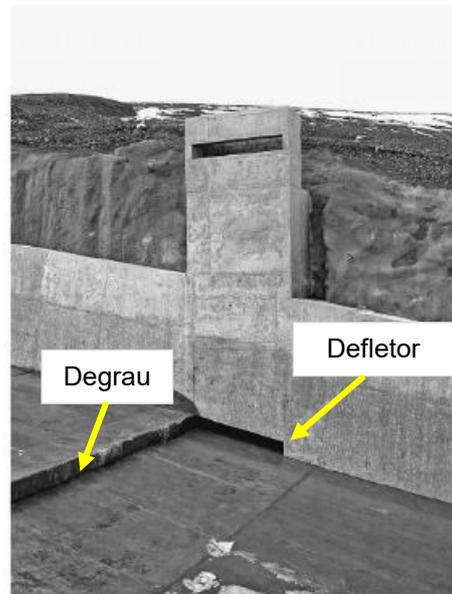


Figura 3-38: Aerador tipo defletor instalado no vertedouro da barragem de Kárahnjúkar na Islândia. Fonte: Pfister, (2011).

Como a presente pesquisa tem por objetivo o estudo do fenômeno da cavitação, sua ocorrência e interação com a presença de diferentes demandas relativas de ar no escoamento, não serão abordados nesse item estudos referentes a eficiência e utilização de diferentes aeradores em vertedouros de calha lisa e em degraus.

3.4.3 Proteção contra o efeito da cavitação.

A presença de ar no escoamento é responsável pelo aumento das pressões negativas e, portanto, torna-se uma das principais ferramentas na redução de riscos dos efeitos da cavitação sobre as estruturas (PETERKA, 1953; SEMENKOV e LENTYAEV, 1973; VOLKART e RUTSCHMAN, 1984).

Além das formulações definidas para a estimativa das concentrações médias de ar no escoamento, são verificadas as influências da demanda relativa de ar, que, segundo o apresentado na Equação 3-21, quantifica o ar inserido ao sistema por meio de aeradores.

$$\beta = \frac{Q_{ar}}{Q_w} \quad \text{Equação 3-21}$$

Onde: β é a demanda relativa de ar; Q_{ar} é a vazão de ar no escoamento, e Q_w é a vazão de água.

A Tabela 3-8 apresenta as relações de demanda relativa de ar propostas por Pinto *et al.*, (1982), Rutschmann *et al.*, (1988) apud Terrier (2016), Chanson (1988), Kökpınar e Gögüs (2002) e Pfister *et al.*, (2010b) para vertedouros de calha lisa.

Chanson (1988) define a demanda relativa de ar para vertedouros de calha lisa, com a presença de defletor e degrau conforme Equação 3-27.

$$\beta = k \left[Fr_0 + 8,17 - 5,77 \frac{h_o}{o} + 0,605 \left(\frac{h_o}{o} \right)^2 - 23,51 \left(\frac{h_o}{o} \right)^{-1,5} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho g h_o}} \right] \quad \text{Equação 3-22}$$

Para $3,0 \leq Fr_0 \leq 25$ e, $0,023\text{m} \leq h_o \leq 0,12 \text{ m}$.

Gaskin *et al.*, (2003) concluíram por meio de seus estudos em vertedouros de calha lisa com aeradores tipo defletor com ranhura, que a demanda relativa de ar cresce conforme o número de Froude do escoamento no início do defletor aumenta. Está consideração foi relatada para valores de $\beta \approx 0,4$ a $0,45$ e próximos a $Fr_0 \approx 12$.

Tabela 3-8: Equações de demanda relativa de ar para vertedouros de calha lisa.

Autor	Equação	Caraterística	item
Pinto <i>et al.</i> , (1982)	$\beta = 0,033 \frac{L_j}{h_o}$	Protótipo/modelo vertedouro Foz do Areia	Equação 3-23
Rutschmann <i>et al.</i> , (1988)	$\beta = 0,1713 (Fr - 4,94) - \frac{\Delta p}{h_o}$	$Fr \geq 5,0$	Equação 3-24
Rutschmann (1988) apud Terrier (2016)	$\beta = 0,0372 (L_j - 7,15)$	Calha lisa, defletor mais degrau $5\% < \alpha < 250\%$ $10\% < \theta < 20\%$	Equação 3-25
Kökpınar e Gögüs (2002)	$\beta = 0,0189 \left(\frac{L_j}{h_o} \right)^{0,83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0,24}$	Calha lisa, defletor mais degrau: $0 \leq \tan \theta \leq 1,25$ $0^\circ \leq \alpha \leq 9,45^\circ$ $5,56 \leq Fr \leq 10$ $0,02 < \frac{A_a}{A_w} < 1$	Equação 3-26
Pfister <i>et al.</i> , (2010b)	$\beta = 0,0028 Fr^2 (1 + Fr_0 \tan \theta') - 0,1$	Calha lisa, defletor mais degrau $0 < \beta < 0,80$	Equação 3-27

A_a = área do dispositivo adutor de ar;

A_w = área do escoamento de água a montante do dispositivo aerador;

α = declividade da calha;
 θ' = inclinação do defletor;
 Fr_0 = número de Froude do escoamento no início do defletor;
 h_0 = profundidade do escoamento imediatamente a montante do defletor;
 Δp = supressão abaixo do escoamento;
 L_j = comprimento do jato de água lançado pelo defletor;
 Fr = número de Froude no escoamento

Pfister e Hager (2010b) verificaram que o comportamento de β está fortemente relacionado ao número de Froude do escoamento e a inclinação do defletor. Através desta premissa, definiram os limites mínimos para Fr_0 que de fato permitam a entrada de ar no dispositivo, obtendo assim, para $Fr_0 \approx 4,0$ a $5,0$ os ângulos de inclinação de $\theta \approx 11^\circ$ e 6° .

Peterka (1953), define que com a ocorrência de $\beta \geq 2,0\%$ há grandes benefícios por parte do escoamento na redução de danos por cavitação, enquanto, $\beta \geq 7,0\%$ os danos se tornam inexistentes nas superfícies de concreto.

3.5 Características dos Materiais Resistentes à Cavitação

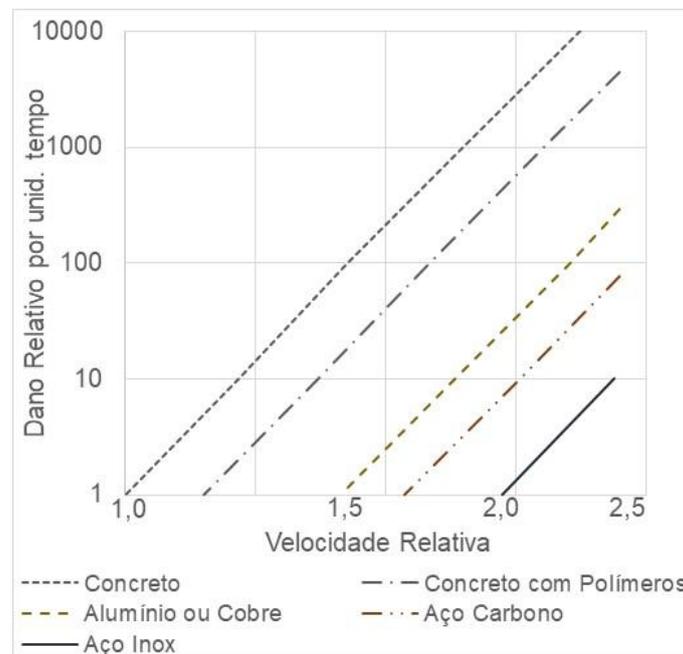
As propriedades físicas dos materiais utilizados no revestimento das superfícies hidráulicas são parâmetros importantes na determinação da susceptibilidade dos mesmos aos esforços ocasionados durante a ação da cavitação. Quintela e Ramos (1980) definem que a resistência a ação da cavitação é determinada essencialmente pelas propriedades de resistência à tração, compressão, cisalhamento, impacto e textura.

Colgate (1977) e Falvey (1990) desenvolveram estudos relacionando a ocorrência de danos por cavitação a diferentes tipos de materiais, dentre eles, o concreto convencional e com adição de polímeros, alumínio, cobre, aço carbono, e aço inoxidável. As velocidades do escoamento consideradas pelos autores foram de $12,95$ e $30,0\text{m/s}$, respectivamente, obtidas em instalações experimentais distintas, sendo a primeira obtida por meio de um aparato constituído de um degrau de $\frac{1}{2}$ " de altura, e também através de um dispositivo tipo Venturi, onde os materiais avaliados foram posicionados tangencialmente a zona de implosão das cavidades de vapor.

A partir de seus experimentos Falvey (1990) estabeleceu as relações de resistência a cavitação entre diferentes tipos de materiais tendo seus resultados descritos na Figura 3-9. O autor afirma que, a resistência de uma superfície a danos é dependente de diversos fatores dentre eles: a resistência final do

material, ductibilidade e homogeneidade. Por se tratarem de materiais com características de deformação distintas, a representação da resistência a cavitação através de um único fator torna-se impossível (FALVEY, 1990).

Porém, quando avaliada a resistência de um dado material em relação à resistência de outros materiais, durante a ocorrência de dano de referência, obtém-se as correlações de comparação entre materiais de propriedades físicas distintas. Ou seja, quando os materiais são expostos a condições semelhantes de ocorrência de danos por cavitação, $V = 30,0$ m/s, e um dano de profundidade e extensão pré-fixadas se forma, de acordo com o tempo de exposição exigido de cada material, define-se a unidade de dano correspondente (eixo “y”) e a velocidade relativa (eixo “x”), a qual o escoamento deve ser proporcionalmente alterado para que a erosão seja confirmada (Figura 3-39).



Obs.: Unidade de dano correspondente a uma erosão de 13,0mm de profundidade obtida no concreto após 3 horas de ensaio no dispositivo Venturi, a 30,0m/s.

Figura 3-39: Comparativo entre a resistência a cavitação para diferentes materiais. Fonte: adaptado de Falvey (1990).

O concreto convencional é amplamente utilizado nas estruturas hidráulicas pois possui, dentre outras características, boa resistência a compressão. Porém características como durabilidade e impermeabilidade são parâmetros importantes a serem cuidados nesse tipo de material. Os efeitos físicos que influenciam sua conservação são desgastes na superfície, fissuras, trincas, retrações térmicas e ciclos de gelo e degelo. Já sobre os efeitos químicos

podem ser citadas a lixiviação da pasta do cimento por soluções ácidas, as reações de expansão envolvendo sulfatos, o ataque de cloretos, as reações álcali-agregados e as corrosões do aço que compõem as armaduras do concreto (NEVILLE, 1997; METHA e MONTEIRO, 2014).

A incorporação de resinas epóxi ao concreto convencional, transformando-o em concreto modificado por polímeros, é realizada durante o processo de mistura do composto não alterando significativamente a sua produção. O concreto polimérico apresenta alta resistência mecânica, melhor endurecimento, maior durabilidade, melhor desempenho contra ataques químicos, além de endurecimento rápido quando comparado ao concreto convencional de cimento Portland. Esses concretos evitam problemas com retrações, penetrações de íons cloretos ou ações resultantes da amplitude térmica ocasionada pelo meio ambiente.

Mirza *et al.*, (2002) e Rosa (2016) afirmam que a aplicação de resinas epóxi ou de outros polímeros ligantes, tais como, poliéster e metacrilato de metila misturados a argamassa de revestimento é amplamente utilizada na realização de reparos superficiais. Dalfré (2002) salienta que, apesar de sua alta resistência mecânica, os revestimentos epóxi não possuem resultados satisfatório quando aplicados em locais de temperatura ou amplitudes térmicas elevadas. Pinturas epóxi não apresentam o mesmo comportamento, retardam a ação do dano, mas não evitam a ação da cavitação como as resinas e concretos poliméricos.

Gal'perin *et al.*, (1977) após realizarem testes de exposição de concretos a escoamentos cavitantes, descrevem que os corpos de prova com adição de epóxi apresentaram um aumento de até 50 vezes na resistência final dessas amostras contra os danos por erosão e cavitação. Para Dalfré (2002) concretos com aditivo polimérico e com a presença de resina epóxi podem vir a apresentar resistências com cerca de 10 a 100 vezes maiores que àqueles sem adição desses componentes.

Concretos de alto desempenho, superiores a 35 ou 40 MPa, com baixa relação água/cimento e com a presença aditivos superfluidificantes, também se caracterizam pela alta resistência ao fenômeno, porém independentemente do tipo de concreto adotado o processo de fabricação ainda é um fator preponderante a ser considerado mesmo em concretos especiais (DALFRÉ, 2002).

3.5.1 Parâmetros Característicos do Concreto

Considerando o concreto convencional, diversas pesquisas estabelecem que a resistência à cavitação está diretamente relacionada à resistência à compressão e à redução da relação água/cimento, sendo recomendada ainda a utilização de agregados graúdo de até 20,0 mm, visto que menor será a tendência ao desprendimento desses pela ação da cavitação. Agregados de maior dimensão tendem a apresentar zonas de transição extensas dificultando as ligações entre o grão do agregado e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014; ROSA, 2016).

May (1987) descreve as pesquisas realizadas por Jiang e Chen (1982) as quais utilizaram amostras de concreto expondo-as ao efeito da cavitação, em um dispositivo Venturi, com o objetivo de investigar como a resistência à cavitação pode ser alterada em relação ao fator água/cimento, ao uso de aditivos e a idade do concreto. A resistência ao fenômeno (R_c) pode ser estabelecida através do fator a/c (Equação 3-28), e da resistência a compressão do concreto (Equação 3-29).

$$R_c = \left(\frac{a}{c}\right)^{-4,83} \quad \text{Equação 3-28}$$

$$R_c = f_{ck}^{4,84} \quad \text{Equação 3-29}$$

Sendo: R_c a resistência do concreto ao fenômeno da cavitação (MPa); a/c a relação de água/cimento do composto (adm), e f_{ck} a resistência a compressão da amostra (MPa).

Gal'perin *et al.*, (1971) e Houghton *et al.*, (1978), com o intuito de verificar o comportamento da resistência à compressão dos concretos, quanto submetidos ao fenômeno da cavitação, estabeleceram relações entre a velocidade máxima, a resistência à compressão e o tempo de exposição da estrutura ao efeito destrutivo da implosão das cavidades de vapor.

Houghton *et al.*, (1978) definem a correlação entre a profundidade de fossas de erosão, o tempo de exposição de concreto convencional, concretos reforçados com polímeros, fibra de aço e a mistura de ambos (Figura 3-40).

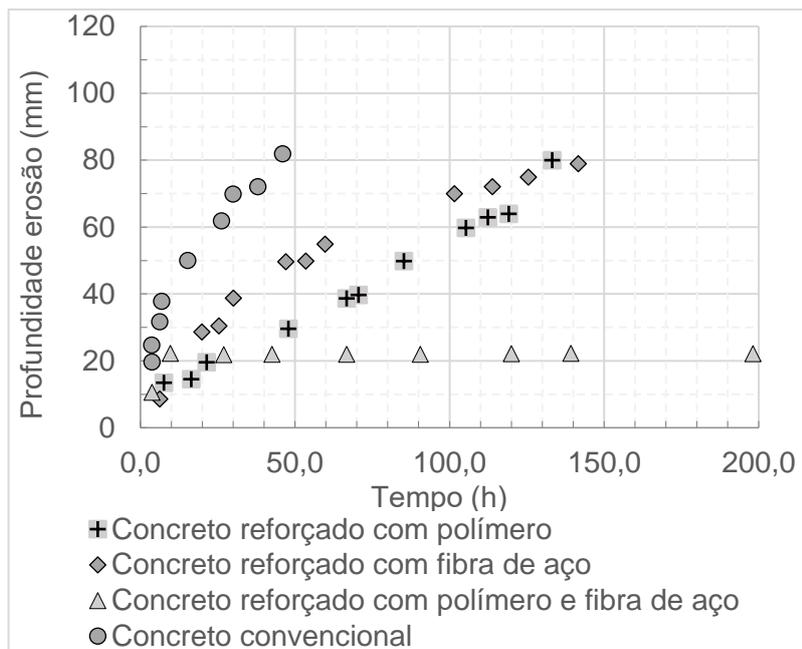


Figura 3-40: Influência do tempo de exposição à cavitação na profundidade da fossa de erosão, conforme o tipo de concreto empregado. Fonte: Canellas 2020 adaptado de Houghton et al., (1978).

Falvey (1982) propôs relações gráficas entre as informações de alturas de chanfros (mm) – irregularidades presentes na superfície de concreto de vertedouros - e os tempos de operação dessas estruturas, todas localizadas nos Estados Unidos da América (EUA). As velocidades do escoamento obtidas para as usinas hidrelétricas de Flaming Gorge, Blue Mesa, Yellowtail, Glen Canyon, Hoover, Kebon e Korun foram utilizadas pelo autor para estabelecer faixas de índices de cavitação para vertedouros, estabelecendo assim, a Figura 3-41. Falvey (1990), ampliando seus estudos, adiciona alterações e novas funções limites à Figura 3-41.

Como as informações utilizadas na elaboração da Figura 3-41 foram baseadas em dados de protótipo e, para a realidade das usinas norte americanas, a utilização das relações obtidas pelo autor entre índice de cavitação, chanfro e tempo de exposição das estruturas a escoamentos de altas velocidades, deve ser realizada com a devida cautela, uma vez que grande parte dos vertedouros e bacias de dissipação possuem particularidades em seus projetos e características hidrológicas distintas.

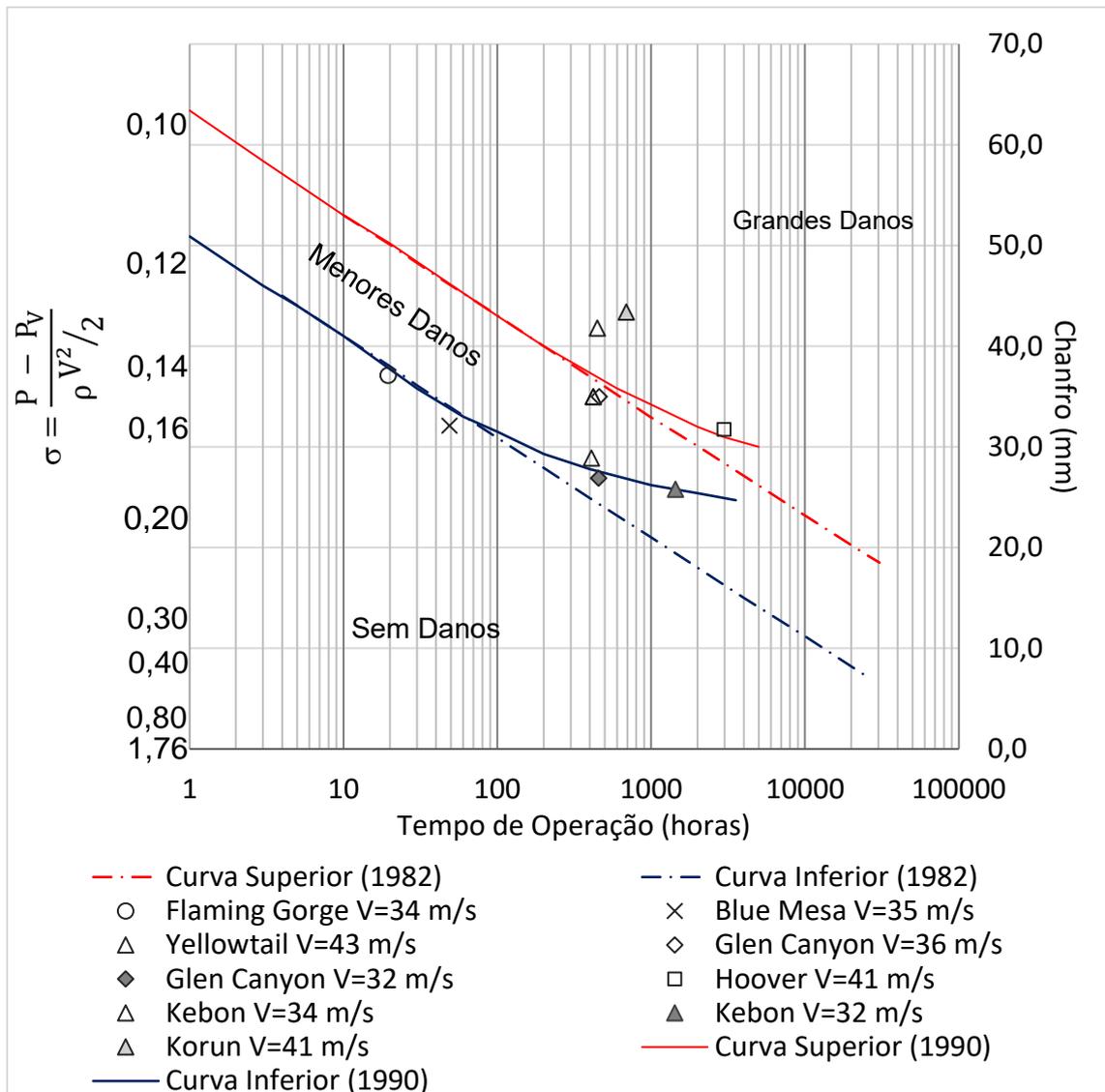


Figura 3-41: Gráfico obtidos através de danos verificados em estruturas vertentes. Fonte: adaptado de Falvey (1990).

Gal'perin *et al.*, (1971) desenvolveram seus estudos considerando a aeração no escoamento como um parâmetro condicional, além do f_{cm} e das velocidades do escoamento atribuídas as estruturas hidráulicas, como critério para a não ocorrência de danos por cavitação. Esses parâmetros foram estabelecidos pelos autores por meio de ensaios em laboratório, utilizando dispositivo de cavitação tipo Venturi, e da análise de danos em amostras de concreto.

Os limites definidos por Gal'perin *et al.*, (1971), como critérios de projeto e/ou operação são apresentados graficamente na , podendo seus resultados experimentais serem aproximados através da Equação 3-30, definida para a faixa de resistência à compressão do concreto entre $20 \leq f_{cm} \leq 50$ MPa.

$$V = U + 0,43 \cdot f_{cm}$$

Equação 3-30

Onde: V é a velocidade média do escoamento (em m/s); f_{cm} é a resistência à compressão do concreto e; U constante atribuída ao valor de aproximadamente 1,5 m/s.

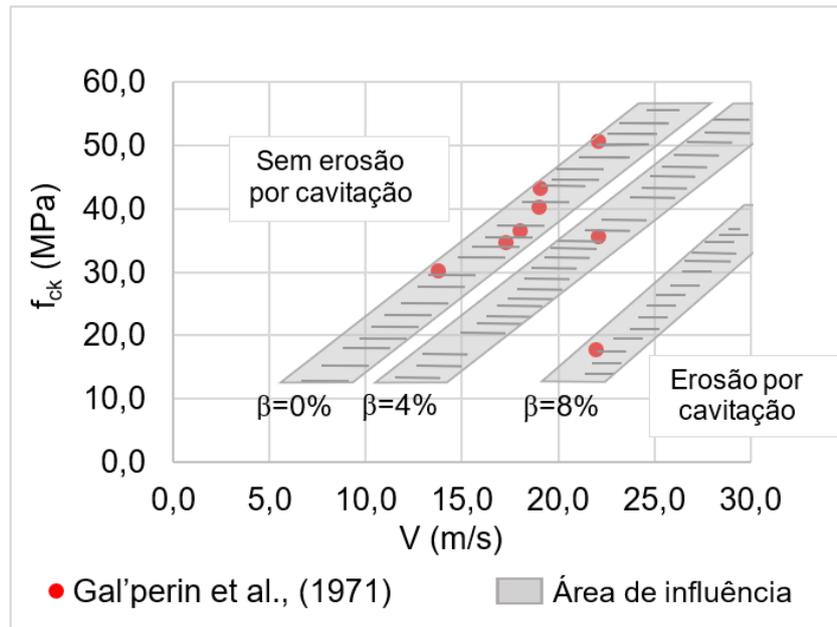


Figura 3-42: Relação entre as velocidades, a resistência a compressão e a aeração do escoamento. Fonte: adaptado de Gal'perin *et al.*, (1971).

As regiões, ou áreas de influência, discretizadas por Gal'perin *et al.*, (1971), considerando a presença de diferentes concentrações de ar no escoamento, permitem reduzir para uma mesma velocidade de referência, a resistência do concreto a ser implementado como revestimento de estruturas hidráulicas, somente através do uso adequado de incrementos maiores de ar inseridos no fluxo cavitante.

Kudriashov *et al.*, (1983) avaliando dados sobre velocidades de fluxo admissíveis em superfícies de concreto, reafirmam a utilização da relação definida por Gal'perin *et al.*, (1971) apud May (1987), Equação 3-30, alterando unicamente o valor da constante U para 3,0 m/s associando-a a mesma faixa de f_{cm} considerada.

Para tempos de exposição distintos, Kudriashov *et al.*, (1983) propõem a Equação 3-31 para ajustar a correlação existente entre velocidades médias do escoamento e f_{cm} proposta por Gal'perin *et al.*, (1971).

$$V_T = \frac{V}{2} \left[1 + \left(\frac{48}{T} \right)^{1/8} \right]$$

Equação 3-31

Sendo: V_T as velocidades médias do escoamento atreladas ao tempo de exposição da estrutura (m/s); V as velocidades médias utilizadas por Gal'perin *et al.*, (1971), e T o novo período de exposição da estrutura ao escoamento (h).

Em seus estudos Kudriashov *et al.*, (1983) desenvolveram suas análises através de modelos reduzidos e de observações a campo em protótipos (descarregadores e canais compostos de superfícies curvilíneas), caracterizados por alturas que variavam de 20,0 a 120,0 m, durante um período de aproximadamente 500 a 10.000 horas.

Por fim, os autores afirmam que a aeração de 2 a 3% do escoamento reduz consideravelmente as erosões por cavitação e, que para 7 a 8% de ar não ocorrem mais indícios do fenômeno na superfície avaliada, desde que a velocidade média do escoamento seja inferior aos 45,0 m/s (KUDRIASHOV *et al.*, 1983).

3.5.2 *Mecanismos de Desgaste Superficial em Estruturas Hidráulicas de Concreto*

O concreto utilizado é detalhado e produzido considerando os critérios específicos de projeto, as normativas vigentes, as condições operacionais, cargas e sobrecargas impostas às estruturas hidráulicas ao longo de toda a sua vida útil. Porém, os desgastes superficiais ocorrem e são principalmente ligados à desintegração do material quando submetido aos fenômenos de deterioração do concreto e suas respectivas interações com o meio ambiente (KORMANN, 2002).

Neville (1997) informa que as ações de desgastes do concreto podem ocorrer por atrito ou percussão. Ainda segundo o autor, em estruturas hidráulicas predomina a ação do fenômeno de erosão, resultante da passagem de materiais abrasivos transportados pela água nas superfícies de concreto, sendo a cavitação um agente secundário ligado principalmente às características hidráulicas do escoamento.

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.

Os ataques químicos também são responsáveis pelo desgaste do concreto e seriam provocados através da hidrólise gerada pela água pura, por trocas iônicas entre fluidos agressivos, pela pasta de cimento, geradas por sulfatos, por corrosões das armaduras, dentre outros (MEHTA e GERWICK apud KORMANN, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2014²).

Dalfré e Genovez (2004) apresentaram dois diferentes equipamentos para simulação dos efeitos do desgaste do concreto através da abrasão (por mistura água sólido) e da cavitação. Para avaliação da abrasão, os autores construíram um aparelho de ensaio que simula a ação abrasiva da água em movimento com sólidos em suspensão como silte, areia, agregados graúdos, dentre outros. Essa análise é realizada por meio de equipamentos tipo jato cavitante, onde o fluxo do jato incide sobre a mostra de concreto, desgastando-a.

Os autores concluíram que o equipamento utilizado para ensaio de abrasão é adequado para avaliação do desgaste em amostras de concreto frente a essa ação. Contudo, para as avaliações dos efeitos da cavitação sobre as amostras seriam necessários maiores estudos para determinação da geometria do bocal, e da utilização de um transdutor para medições da pressão na saída do bocal e no ponto de impacto do jato na amostra (DALFRÉ e GENOVEZ, 2004).

² Artigo publicado por Mehta e Gerwick e citado por Kormann (2002, p. 28) e Mehta e Monteiro (2014).

Momber (2000) analisando os efeitos da cavitação de curta duração ($t = 2$ e 10s) nas amostras de concreto com diferentes tipos de agregados graúdos, definiu a taxa de perda de material por meio da Equação 3-32.

$$V_R = \frac{t\rho_M}{\Delta m}$$

Equação 3-32

Sendo: V_R a perda volumétrica (cm^3); t o tempo de exposição (s); ρ_M a massa específica do concreto (g/cm^3); Δm massa perdida do concreto (g).

Nas amostras de concreto com presença de agregados de quartzo arredondados foi possível observar uma distribuição mais superficial dos efeitos do fenômeno da cavitação na amostra. Os danos foram registrados principalmente na interface da matriz de cimento com os grãos dos agregados de quartzo, apresentando um alto grau de porosidade e microfissuras em suas superfícies (Figura 3-43a).

Para as amostras elaboradas com agregados de calcário quebrado foram encontradas fissuras transgranulares focadas em áreas restritas dos corpos de prova (Figura 3-43b). Nessas condições, a matriz de cimento também foi removida, mas agregados grandes, mesmo que cobertos por uma camada de pasta de cimento, foram parcialmente fraturados à medida que a argamassa havia sido removida (MOMBER, 2000).

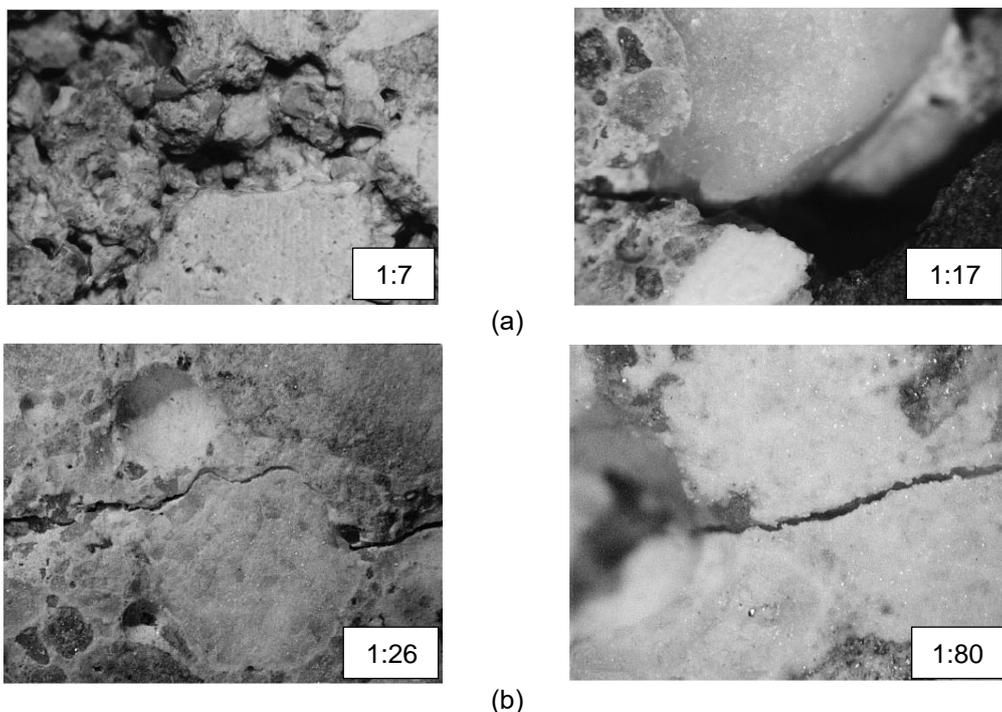


Figura 3-43:Imagens das microfissuras formadas nos concretos n° 1(a), e; n° 2 (b) após 10 s de ensaio. Fonte: Adaptado de Momber (2000).

Momber (2000) definiu também que, mesmo em curtos períodos de exposição, a cavitação pode vir a gerar danos a topografia das amostras de concreto avaliadas. Além disso, o autor afirma que agregados graúdos são mais facilmente arrancados, recomendando um tamanho máximo de agregado limitado a 20 mm. Informa ainda que, a ligação entre a matriz de cimento e os grãos dos agregados utilizados é o fator determinante para estabelecer a resistência final do concreto ao fenômeno de cavitação.

Choi e Bolander (2012) verificaram o comportamento de diferentes composições de concreto submetendo-os ao processo de abrasão. Os autores analisaram dois grupos distintos de concretos, sendo: *i*) elaborado a partir de uma mistura de água (170 kg/m^3), policarboxilato ($7,48 \text{ kg/m}^3$), agregado fino (675 kg/m^3); agregado graúdo (807 kg/m^3) e a substituição de cimento nas frações de 0%, 10%, 20% e 30% por cinzas volantes Classe “F” na mistura final. *ii*) considerados uma mistura de água, policarbonato ($4,44 \text{ kg/m}^3$), agregado fino (777 kg/m^3); agregado graúdo (731 kg/m^3) e a substituição de cimento nas frações de 0%, 20%, 40% e 60% por escória de alto forno na mistura final. A análise das amostras foi realizada por meio de um sistema de modelagem 3D.

Choi e Bolander (2012) concluíram que as irregularidades das superfícies expostas à abrasão afetam os processos subsequentes tendendo a promover mais abrasão. Isso implica que o acabamento final da superfície do concreto é importante para aumentar a resistência final ao processo de abrasão.

De maneira geral, se pode observar um grande número de pesquisas que avaliam as interações entre as velocidades máximas e pressões atuantes no escoamento durante a ocorrência do fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas, atribuindo limites baseados na existência de irregularidades aceitáveis das superficiais de concreto ou aos índices de cavitação existentes.

Porém, quando se buscam relações estabelecidas entre a ocorrência de riscos por cavitação, as propriedades do concreto e as concentrações de ar no escoamento, que generalizem uma solução de uso adequada das superfícies hidráulicas, a quantidade de estudos reduz significativamente. Tornando assim evidente a necessidade de estudos que possibilitem a parametrização de fatores hidráulicos com as características estruturais do concreto durante a problemática complexa que é o fenômeno da cavitação.

4 METODOLOGIA

Com o intuito de verificar as relações existentes entre o fenômeno da cavitação e os danos ocasionados nas superfícies de concreto, durante o colapso das cavidades de vapor - com e sem a presença de ar no sistema - foram realizadas investigações experimentais em dois dispositivos de cavitação tipo *Venturi*. Neles foram analisados os parâmetros hidráulicos e do concreto comparando-os com informações disponíveis na bibliografia, de maneira a estabelecer relações entre as condições do escoamento cavitante e do material de revestimento das estruturas hidráulicas.

A instalação experimental, procedimentos metodológicos de ensaio e os resultados obtidos por meio dos dispositivos de cavitação foram limitados à velocidade do escoamento de 30,0 m/s, as resistências médias à compressão e as demandas relativas de ar adotadas.

A partir disto, a fundamentação metodológica desta pesquisa foi alicerçada em três segmentos distintos, sendo eles:

- *Instalação experimental do US of Bureau of Reclamation (USBR)*: onde foram realizados ensaios com o dispositivo de cavitação tipo *Venturi* pertencente ao Laboratory of Hydraulic do *US Reclamation*. Os resultados observados nesse aparato constituem parte das análises desta pesquisa, servindo de comparativo entre os dados extraídos com o uso da máquina de cavitação brasileira (Instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas), semelhante em estrutura e dimensões da utilizada no USBR. Além da verificação das características hidrodinâmicas do escoamento (pressões instantâneas e médias ao longo do dispositivo) e seus efeitos nos corpos de prova em concreto (perdas de volume e massa), foram executados paralelamente aos ensaios no dispositivo, testes de resistência à compressão em corpos de prova de concreto cilíndricos.

- *Instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH/UFRGS)*: considerando as informações disponibilizadas pelos engenheiros do USBR e reproduzindo as condições dos ensaios realizado no USBR - referentes a velocidade do escoamento, às demandas relativas de ar e aos traços dos concretos utilizados - no dispositivo de cavitação do LOH, foram adquiridos dados de pressão média e as acelerações perpendiculares a

superfície do dispositivo ocasionadas pela cavitação. Foram verificados os danos nas superfícies de concreto expostas ao escoamento, bem como as perdas de volume e massa associadas à diferentes demandas relativas de ar. Como segmento desta pesquisa e dos ensaios no dispositivo do LOH, foram determinados os parâmetros de resistência a compressão dos concretos, em estado endurecido, permitindo assim a comparação com os dados dos corpos de prova do USBR.

- Análise e processamento dos dados: obtidos em ambos os dispositivos de cavitação (LOH x USBR), comparando-os aos parâmetros descritos por: i) Peterka (1953) – de perda de peso, percentual de ar inserido ao escoamento e os índices de cavitação; ii) Gal'perin *et al.*, (1971) – que associou as velocidades do escoamento à resistência média à compressão, avaliando diferentes demandas relativas de ar no escoamento; e iii) demais autores que avaliaram as relações de pressão e velocidade de escoamentos cavitantes. A partir disso, foram estabelecidas relações entre as características do concreto e do escoamento possíveis de serem adotadas como critérios de projeto e/ou dimensionamento de estruturas hidráulicas de concreto submetidos a escoamentos de alta velocidade e sob ocorrência de cavitação.

A seguir são descritas as instalações experimentais, as condições e procedimentos de ensaio, a instrumentação e a aquisição dos principais parâmetros hidráulicos e do concreto, bem como, a metodologia analítica utilizada para a interpretação dos dados obtidos.

4.1 Instalação Experimental US Bureau of Reclamation (USBR)

Os estudos experimentais para a determinação dos potenciais danos em superfícies de concreto, ocasionados pelos fenômenos de erosão e/ou cavitação, foram realizados no dispositivo de cavitação existente no Hydraulic Laboratory do United States Bureau of Reclamation (USBR) localizado na cidade de Denver no Colorado - Estados Unidos da América (EUA).

A realização dos ensaios que compõem parte dessa pesquisa no aparato experimental do USBR foi segmentada em coleta de dados referentes ao escoamento e análise dos danos ocasionados aos corpos de prova de concreto. Sendo assim foram realizadas: i) medições de pressões médias e instantâneas,

sob influência da inserção de diferentes demandas relativas de ar no escoamento, ii) quantificação das perdas de massa dos blocos de concreto analisados, e iii) análise das características gerais dos traços verificados, de resistência a compressão e trabalhabilidade dos concretos investigados pelo USBR.

As informações obtidas durante os ensaios no dispositivo de cavitação do USBR serviram de subsídio para a implementação da instalação experimental no LOH e, para a descrição metodológica a ser abordada durante a coleta de dados do sistema cavitante e das amostras de concreto utilizadas no LOH.

4.1.1 Descrição do Aparato Experimental

A instalação experimental do United States of Bureau of Reclamation (USBR) é composta de um reservatório inferior, responsável pelo abastecimento de todo o Laboratory of Hydraulic do US Reclamation, de um circuito hidráulico fechado com uma tubulação de aço galvanizado em DN 150mm, uma bomba centrífuga de eixo vertical de 60 HP, do dispositivo de cavitação (o qual permite a inserção de corpos de prova em concreto e de transdutores de pressão instalados ao longo da tubulação e também do dispositivo de cavitação), um medidor de vazões tipo *Venturi* e duas válvulas gaveta para controle das pressões à montante e a jusante do experimento (Figura 4-1).

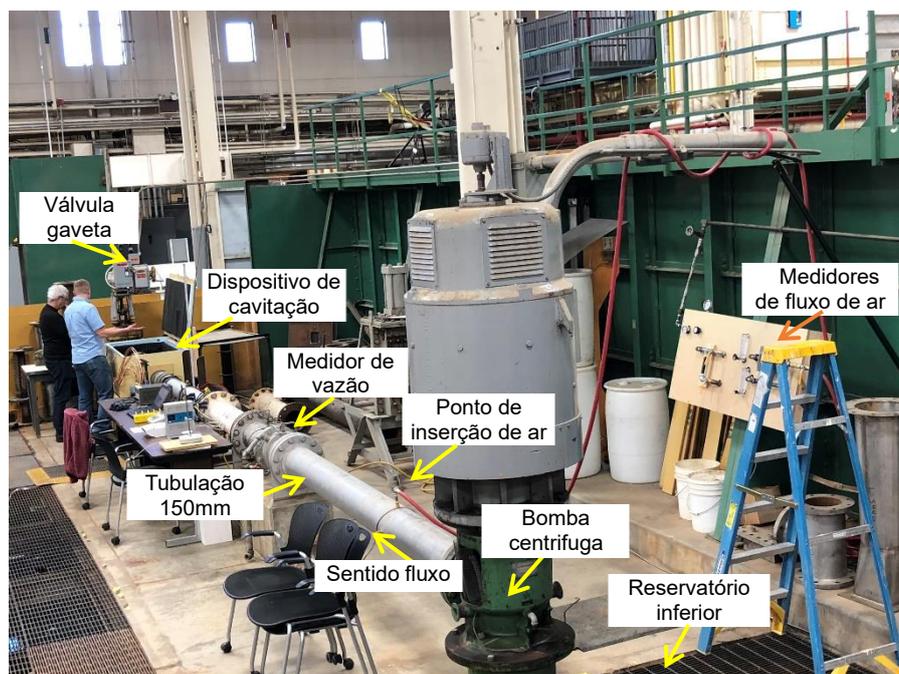


Figura 4-1: Instalação experimental do dispositivo de cavitação do US of Reclamation, em Denver no Colorado (EUA).

A válvula gaveta localizada à jusante do sistema hidráulico possui controle automático e um dispositivo de aeração próprio, com o objetivo de evitar processos de cavitação durante seu acionamento nos ensaios experimentais (Figura 4-2a). A peça central que compõem o dispositivo de cavitação é conectada a tubulação de DN 150 mm, sendo esta revestida com uma caixa acústica responsável por reduzir, significativamente, os altos ruídos oriundos da cavitação e do próprio desgaste gerado ao concreto durante seu funcionamento (Figura 4-2b).

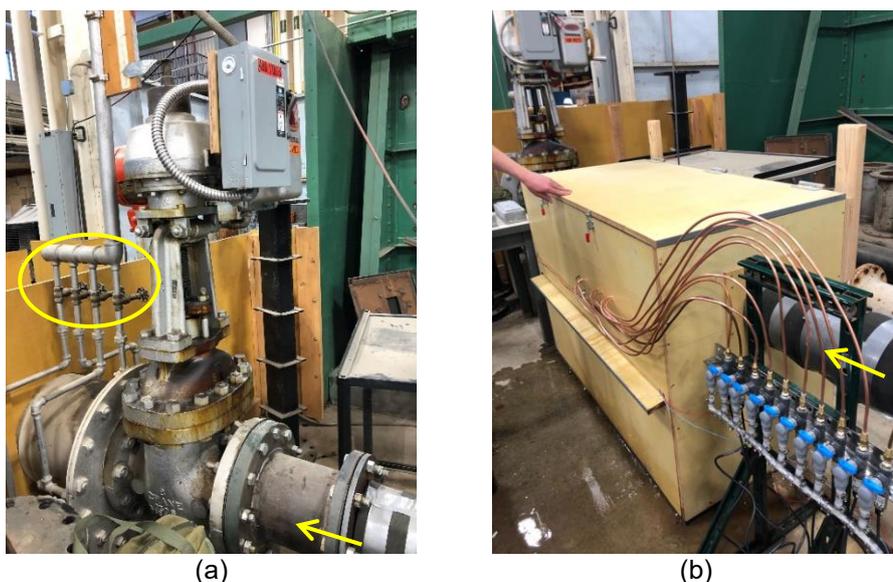
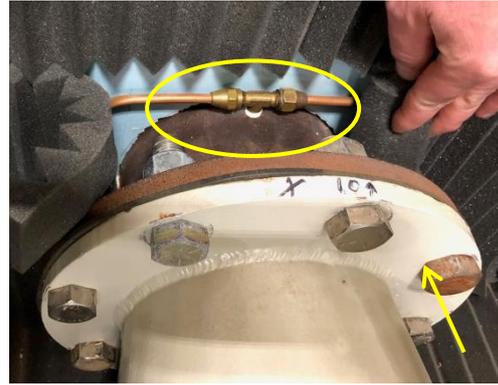


Figura 4-2: Válvula gaveta à jusante do sistema, em amarelo o dispositivo de aeração; caixa de proteção acústica da máquina de cavitação (b), a flecha indica o sentido do escoamento.

Para o correto funcionamento do dispositivo e, conseqüentemente, da ocorrência da cavitação na região onde se encontram os blocos de concreto, foram realizadas medições de pressão do escoamento a jusante e a montante da seção contraída por meio dos transdutores de controle P1 e P10, registrando, respectivamente, 12,5 e 41,5 m.c.a. (Figura 4-3).



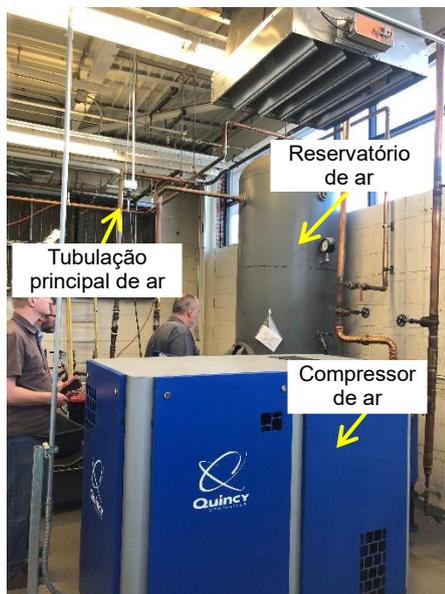
(a)



(b)

Figura 4-3: Controles de pressão à montante (a), e: à jusante do dispositivo de cavitação (b), circulados em amarelo, a seta indica o sentido do fluxo.

Paralelamente ao circuito hidráulico, encontra-se o sistema de inserção de ar comprimido composto de uma tubulação principal conectada ao compressor de ar de 793 kPa e ao reservatório de 2,5 m³ de capacidade (Figura 4-4a). O ar comprimido é direcionado a um sistema de tubulações secundárias onde são ajustadas e quantificadas as vazões de ar antes de serem inseridas ao escoamento de água em um ponto a montante da instalação experimental (Figura 4-4b).



(a)



(b)

Figura 4-4: Compressor e reservatório de ar comprimido (a); circuito de medição e controle das vazões de ar, circulado em amarelo o ponto de inserção de ar ao circuito hidráulico (b), a flecha indica o sentido do escoamento.

4.1.2 Dispositivo de Cavitação - USBR

A peça central que caracteriza o dispositivo de cavitação apresenta uma seção contraída de 6,35 mm de altura e 311,15 mm de largura e uma abertura superior de 74,92 mm x 273,05 mm de comprimento, onde são inseridos os blocos de concreto a serem submetidos à cavitação (Figura 4-5a). Além desta peça central, existem conexões que auxiliam na transição de tamanho e formato da estrutura com a tubulação circular do sistema hidráulico e o suporte de fixação dos blocos ao dispositivo (Figura 4-5b).

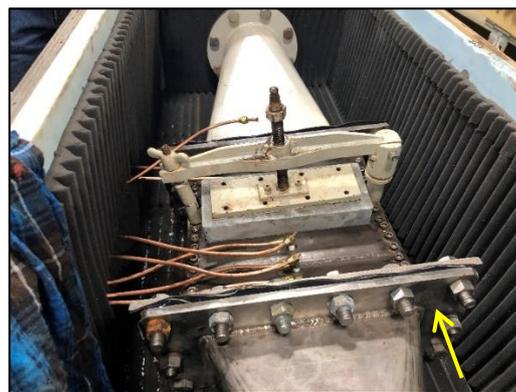
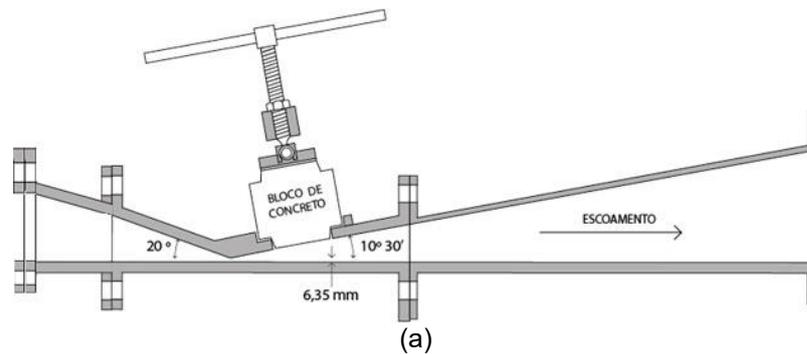


Figura 4-5: Representação gráfica do dispositivo tipo *Venturi* e das peças que auxiliam na conexão com o sistema hidráulico (a); máquina de cavitação utilizada nos ensaios do USBR (b), a seta indica o sentido do fluxo.

O material utilizado na construção da máquina de cavitação foi o aço inoxidável de 12,5 mm de espessura, devido sua alta resistência aos danos causados pela cavitação que, além de danificarem a superfície do concreto acabam por deteriorar a estrutura do dispositivo. O restante das transições e suporte de fixação dos corpos de prova são constituídos de aço galvanizado assim como o restante da tubulação do circuito hidráulico principal.

4.1.3 Instrumentação e Aquisição de Dados

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados equipamentos para a medição de vazão de água, sistema de inserção e medição de vazão de ar, transdutores de pressão e uma central de aquisição de sinais.

4.1.3.1 Medidor de Vazão

As vazões no circuito hidráulico foram medidas através de um dispositivo tipo *Venturi* instalado na tubulação principal (Figura 4-6a). As leituras foram realizadas por meio de um manômetro de Mercúrio que, conectado a constrição da tubulação, permitiu a determinação da vazão após a estabilização completa do fluido em seu interior (Figura 4-6b).



(a)



(b)

Figura 4-6: Medidor de vazão tipo *Venturi* instalado no circuito hidráulico do aparato experimental do USBR (a); manômetro de Mercúrio utilizado nas leituras de vazão (b), a seta indica o sentido do fluxo.

A vazão utilizada nos ensaios foi de 2,1 cfs, representando cerca de 60 l/s. O intervalo de precisão de leitura, nessa faixa de vazões, é de 0,2 cfs, ou seja, 5,66 l/s.

4.1.3.2 Sistema de Medição de Ar

Para determinar as vazões de ar inseridas no escoamento foi adicionado, em paralelo ao circuito hidráulico, um sistema de tubulações em aço galvanizado caracterizado pela existência de dois segmentos distintos, que através de sistemas de *bypass*, permitem a medição de diferentes faixas de vazões de ar.

O acionamento dos dois sistemas é realizado através de duas válvulas gaveta de 1/2" de diâmetro. A instrumentação responsável pela determinação das vazões de entrada de ar, inseridas a montante da seção contraída do dispositivo

de cavitação, é composta de 2 (dois) manômetros de pressão, 2 (dois) rotâmetros e 1 (um) medidor eletrônico de vazão (Figura 4-7).

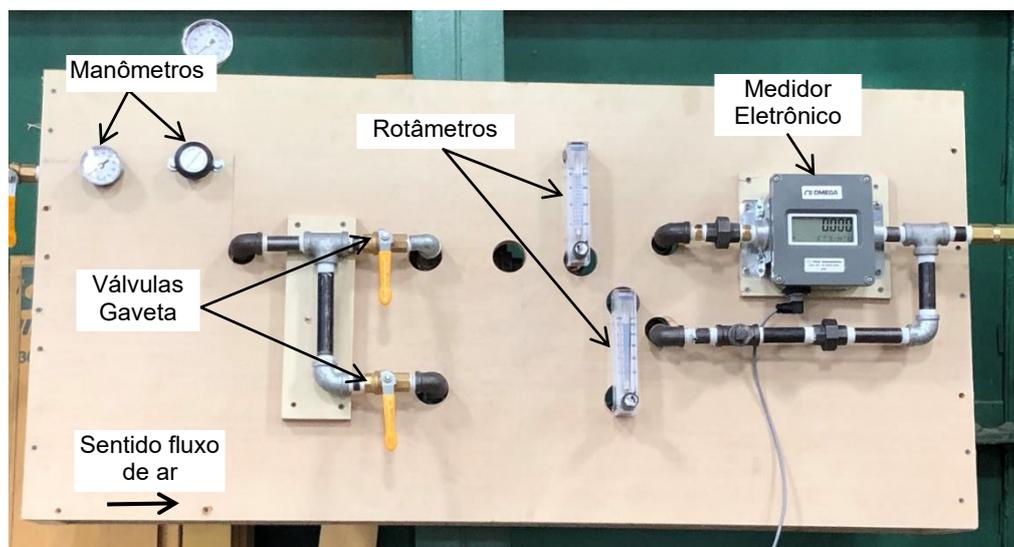


Figura 4-7: Instrumentação utilizada no controle e determinação das vazões de ar, instalação experimental do US Reclamation.

O medidor eletrônico de vazão de ar é da marca *Omega Engineering* série FLR, possui uma faixa de leitura de 0 a 75,0 SLPM, com exatidão de 2,0%, tempo de resposta de 1,0 s e repetibilidade de $\pm 0,5\%$. As vazões são apresentadas através de um display digital que possibilita as leituras de forma instantânea ao longo dos ensaios.

4.1.3.3 Pressões e Sistema de Aquisição de Dados

As pressões foram obtidas por meio de 10 (dez) sensores de pressão, sendo 8 (oito) da marca *Omega*, modelo PX309 e 2 (dois) (denominados de D₁ e D₂), da marca *Kistler*, modelo Type 603CBA01000.0. As frequências de aquisição foram de 100Hz e 1MHz, respectivamente, sendo os tempos de exposição alterados de acordo com a necessidade de cada ensaio. A discretização completa dos sensores utilizados no USBR é apresentada na Tabela 4-1.

O posicionamento dos transdutores de pressão no dispositivo de cavitação foi realizado de acordo com as distâncias apresentadas na Figura 4-8, definidas a partir da seção contraída ($d = 0$ cm) da máquina de cavitação. Desta forma, os sensores foram todos instalados na parte superior do dispositivo e alinhados em função do eixo central e longitudinal da estrutura, a montante e a

jusante da seção contraída de interesse, onde as velocidades médias do escoamento são próximas dos 30,0 m/s.

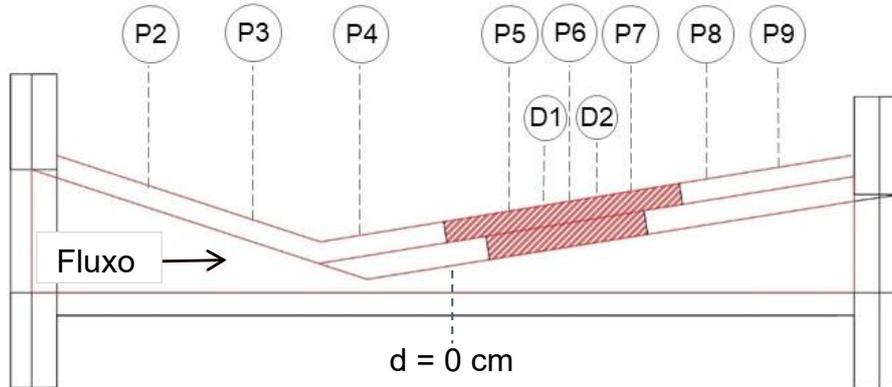


Figura 4-8: Posicionamento dos transdutores instantâneos (P2 ao P9) e D_1 e D_2 , em função das distâncias horizontais a partir da seção contraída do dispositivo de cavitação do USBR.

Tabela 4-1: Distâncias dos transdutores de pressão P1 ao P10, utilizados na instalação experimental do USBR.

Sensor	Distância (cm)	Aquisição amostras/s	Range
P1*	-116,84	100	0 – 100 psig ³
P2	-10,70	100	0 – 100 psig
P3	-5,64	100	0 – 100 psig
P4	-0,58	100	0 – 30 psia ⁴
P5	7,00	100	0 – 30 psia
D_1	8,45	1M	0 – 5000 psig
P6	9,86	100	0 – 30 psig
D_2	11,32	1M	0 – 5000 psi
P7	12,71	100	0 – 30 psig
P8	17,21	100	0 – 30 psig
P9	20,98	100	0 – 30 psig
P10*	77,47	100	0 – 30 psig

*Sensores de controle de pressão do sistema, a montante (P1) e a jusante (P2) do dispositivo de cavitação do USBR.

Os sensores P2 ao P9 foram utilizados na aquisição das pressões a uma frequência de 100 Hz, durante um tempo de exposição de 5 min. Responsáveis nesse estudo por definir a série temporal dos valores médios de pressão, foram todos conectados à máquina de cavitação do USBR por meio de tubos de cobre

³ Pressão manométrica em libras por polegada quadrada.

⁴ Pressão absoluta em libras por polegada quadrada.

(Figura 4-9a), fixados a um suporte lateral próximo a tubulação principal do circuito hidráulico (Figura 4-9b).

Já os sensores D_1 e D_2 , utilizados na coleta de pressões instantâneas a uma frequência de aquisição de 1 MHz, durante 2 min., foram instalados sobre a “janela” de acesso ao escoamento, existente na parte superior do dispositivo de cavitação do USBR (Figura 4-10a). Mesmo local onde também foram fixados, posteriormente, os corpos de prova de concreto para os ensaios de verificação de danos pelo fenômeno da cavitação.

Os transdutores de 1 MHz foram fixados com o auxílio de uma placa metálica instalada diretamente no aparato experimental, de maneira que, a face dos sensores ficasse em contato direto com o escoamento (Figura 4-10b).

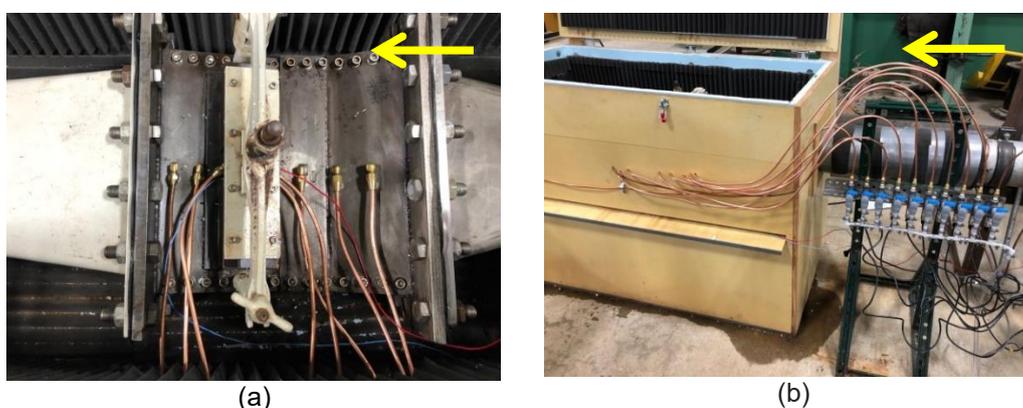


Figura 4-9: Conexões dos transdutores P1 ao P10, no dispositivo de cavitação e ao longo da tubulação principal, realizadas por meio de tubos de cobre. A seta amarela indica o sentido do escoamento no sistema.

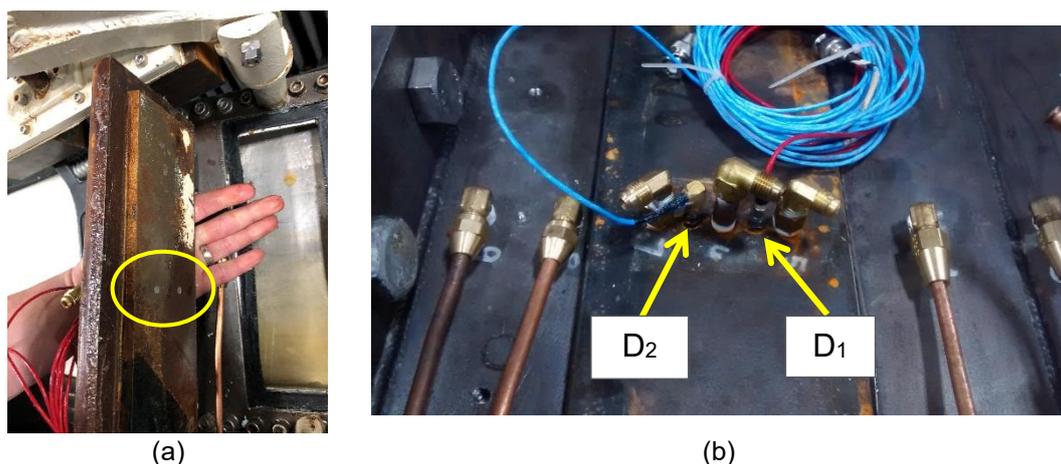


Figura 4-10: Ponto de fixação dos transdutores D_1 e D_2 (a); placa de fixação com os transdutores posicionados sobre o dispositivo de cavitação do USBR (b).

As pressões do escoamento foram coletadas através de uma central de aquisição de sinais (Figura 4-11). Os resultados possibilitaram a verificação das pressões médias distribuídas longitudinalmente no dispositivo de cavitação e

estabelecidas pelas leituras dos transdutores P2 ao P9. Também foram conduzidas as análises estatísticas das pressões instantâneas obtidas pelos sensores D₁ e D₂, valores máximos e mínimos além dos parâmetros estatísticos básicos, como média, desvio padrão, assimetria e curtose da amostra. Os dados dos sensores foram exportados em versão *.txt* para posterior análise através dos softwares *MatLab®* e *Microsoft Excel®*.



Figura 4-11: Sistema de aquisição de dados de pressão.

Os ensaios de coleta dos dados de pressão no USBR foram realizados considerando as demandas relativas de ar (Beta) de 0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95 e 2,25%.

4.1.4 Caracterização dos Concretos Utilizados no USBR

Os concretos definidos para análise dos danos pelo fenômeno da cavitação no dispositivo de cavitação do USBR caracterizam-se pelas relações água/cimento de 0,35; 0,35+SF (aditivo *Superfluidizing*); 0,50; 0,65 e 0,70. Foram moldadas 75 unidades de corpos de prova para a realização dos ensaios no aparato experimental, considerando as demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0%. As características de cada traço de concreto avaliado são descritas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Composição dos concretos ensaiados no dispositivo de cavitação do USBR.

Componentes	Material (kg/m ³) Descrição/Litologia	Relação a/c			
		0,35	0,50	0,65	0,70
Cimento	Tipo I/II	483,5	391,0	290,7	278,8
Agregado Graúdo	Granito artificial C33 N°67 (19mm)	933,2	978,9	950,4	950,4
Agregado Miúdo	Areia de origem Fluvial (MF ^I = 2,64mm)	755,8	841,9	888,1	884,0
Água		168,9	195,7	189,8	195,8
Aditivo 1 - Policarboxilato	GCP Applied Technologies Zyla 625 ^{II}	97,0	124,0	65,0	
Aditivo 2 - Superfluidizing (SF)	GCP Applied Technologies EXP 950 ^{III}	260 mL/100 kg cimento			-

^I Módulo de Finura

^{II} Hidratação mais completa do cimento Portland, com efeito mínimo de entrada de ar no concreto

^{III} Aumento da trabalhabilidade sem segregação do concreto

4.1.5 Resistência à Compressão – Concreto Endurecido

Para a definição das resistências médias à compressão (f_{cm}) dos concretos utilizados no dispositivo de cavitação foram realizados ensaios de ruptura por compressão de corpos de prova cilíndricos (CPs) de 10,0 cm de diâmetro, através de uma prensa hidráulica (Figura 4-12). Os ensaios foram efetuados pela equipe de engenheiros do *Concrete Laboratory* do *US Reclamation*, tendo sido rompidos os CP após 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias de cura.

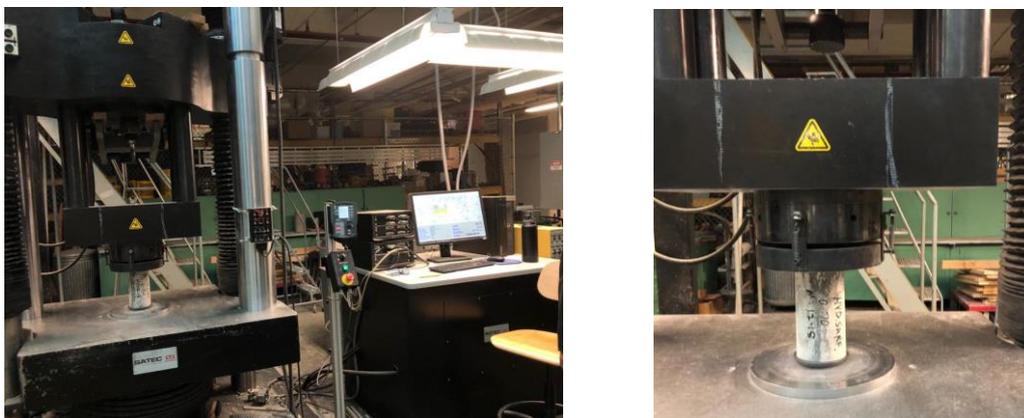


Figura 4-12: Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de ruptura de corpos de prova por esforços de compressão localizada no *Concrete Laboratory* do USBR.

4.1.6 Ensaios de “Slump test” – Concreto Fresco

Como controle tecnológico de produção dos concretos utilizados foram realizados testes de consistência em estado fresco para todas as relações água/cimento adotadas. O *Slump test* foi baseado na normativa internacional ASTM C 143.

4.1.7 Procedimentos de ensaio USBR

Os procedimentos descritos a seguir foram adotados durante a realização dos ensaios no *US Bureau of Reclamation*, sendo posteriormente repetidos e adequados para as estruturas brasileiras durante a realização dos testes no aparato experimental localizado no LOH/UFRGS.

4.1.7.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova de concreto foram moldados por meio de formas específicas de Poliestireno (Figura 4-13a) confeccionadas através de uma impressora 3D nas dimensões adequadas para o encaixe dos blocos no dispositivo do USBR.

Antes da inserção do concreto fresco, as formas recebiam uma camada de desmoldante a fim de se facilitar a remoção dos blocos após a cura inicial de 48 horas. Retirados os blocos dos moldes, os mesmos já identificados eram transferidos para uma câmara úmida, com temperatura de $\cong 22,0\text{ C}^\circ$ e umidade de 100% onde era finalizado o processo de cura do concreto, totalizando o período de 28 dias (Figura 4-13b).



(a)



(b)

Figura 4-13: Formas utilizadas na moldagem dos corpos de prova de m concreto (a); Blocos de concreto finalizados após a cura de 28 dias (b).

4.1.7.2 Operação do Dispositivo de Cavitação

As condições hidráulicas do escoamento foram definidas de acordo com as limitações do dispositivo de cavitação, das instalações experimentais e da metodologia adotada pelos engenheiros do *US Bureau of Reclamation*. Desta forma, os ensaios foram realizados com uma vazão de água (Q_w) de 60,0 l/s, o

que resultou uma velocidade média do escoamento da ordem de 30 m/s na seção contraída da máquina de cavitação. Nessas condições, as pressões a montante e a jusante do dispositivo foram de 41,5 m.c.a. e 12,5 m.c.a, respectivamente.

Previamente ao início da realização dos ensaios, os corpos de prova foram pesados com o uso de uma balança hidrostática, com o objetivo de posteriormente quantificar as perdas de massa e volume que venha a ocorrer durante a exposição dos blocos ao escoamento no dispositivo de cavitação.

Os blocos foram inseridos e fixados sobre a máquina de cavitação por meio de um suporte tipo prensa, com eixo rosqueado, sendo devidamente vedados no entorno de seu encaixe com a estrutura metálica por meio de uma cola adesiva de contato (Figura 4-14).

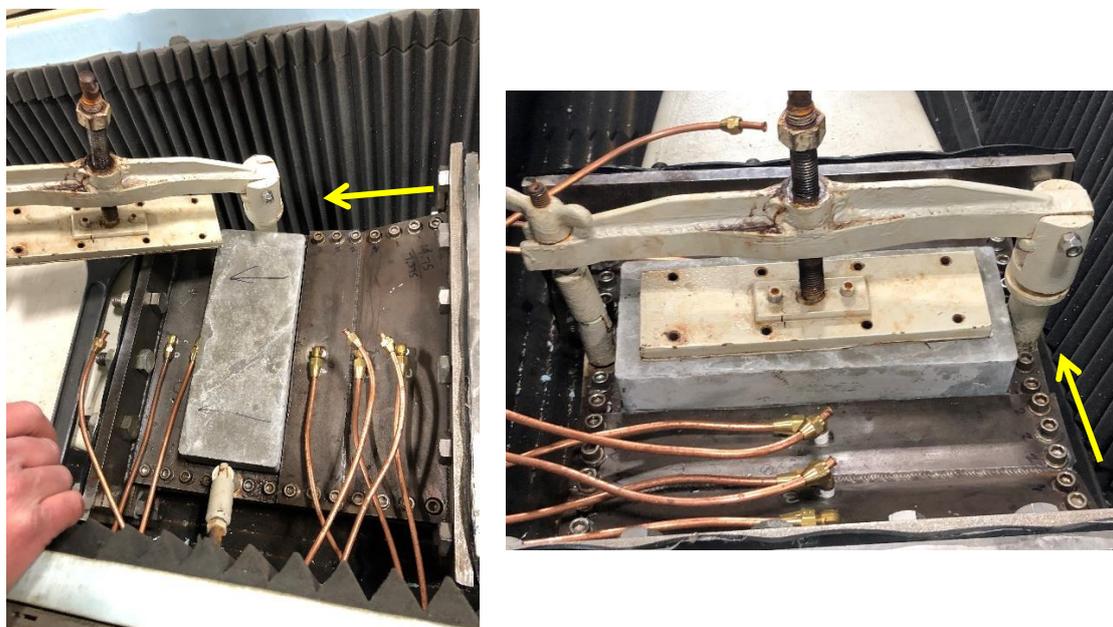


Figura 4-14: Posicionamento do bloco no dispositivo de cavitação, a seta indica o sentido do escoamento no sistema.

Iniciavam-se os ensaios com o acionamento do conjunto motor-bomba, e por meio de ajustes na abertura das válvulas gaveta, foram realizados os controles das pressões de operação a montante e a jusante da máquina de cavitação. As pressões de 41,5 e 12,5 m.c.a. foram estabelecidas com o auxílio das leituras instantâneas de transdutores de pressão, instalados próximos as válvulas de controle. Confirmada a vazão de água (Q_w) de 60,0 l/s, através das leituras realizadas no medidor de vazão tipo *Venturi*, o tempo de ensaio passava

a ser contabilizado. As durações dos ensaios foram de 4 horas para cada um dos blocos ensaiados no dispositivo de cavitação.

Os ensaios de investigação da influência das demandas relativas de ar (β) no escoamento e, conseqüentemente, dos danos gerados ao concreto, foram iniciados somente após a inserção de ar nas vazões pré-estabelecidas. O controle das vazões de ar ocorreu pelo acionamento manual das válvulas existentes no circuito de ar comprimido, sendo as vazões de ar verificadas pelas leituras instantâneas dos medidores eletrônicos e dos rotômetros presentes no sistema de ar comprimido.

Finalizados os ensaios o sistema de ar era fechado, a bomba desligada e os blocos de concreto removidos do dispositivo de cavitação para, então, serem fotografados e novamente pesados por meio de uma balança hidrostática.

Os ensaios para aquisição das pressões foram realizados de acordo com o procedimento descrito anteriormente, porém em momento distinto dos testes com os blocos de concreto, considerando as diferentes demandas relativas de ar no escoamento.

4.2 Instalação Experimental Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH/UFRGS

A instalação experimental implementada no Laboratório Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS), foi baseada nas características da instalação e do dispositivo de cavitação do *US Bureau of Reclamation*, adequando-as as particularidades dos sistemas hidráulico e elétrico existentes (Figura 4-15).

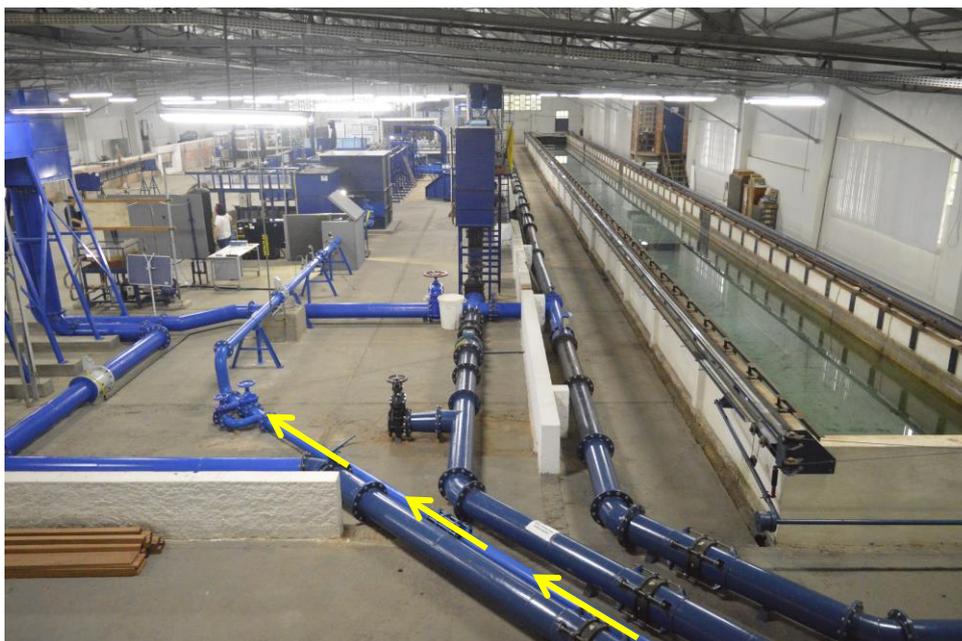


Figura 4-15: Instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas, as setas em amarelo indicam o sentido do escoamento.

O layout completo da instalação experimental, considerando a disposição das tubulações, conexões, válvulas de acionamento, equipamentos de medição de vazão – água e ar, manômetros, bem como o dispositivo de cavitação do LOH, é apresentado no *APÊNDICE A - Descrição do aparato experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas*.

4.2.1 Circuito Hidráulico

No intuito de melhor detalhar as partes constituintes do sistema hidráulico, o mesmo encontra-se dividido em: 4.2.1.1: *Sistema de Armazenamento e de Retorno*; 4.2.1.2: *Sistema de Distribuição*; 4.2.1.3: *Medição de Vazão de Água*; 4.2.1.4: *Controles de Pressão*, e; 4.2.1.5 *Sistema de Inserção de Ar*.

4.2.1.1 Sistema de Armazenamento e de Retorno

O sistema de armazenamento de água é composto de dois reservatórios, sendo denominados inferior e superior. O reservatório superior caracteriza-se por ser um tanque apoiado em lajes de concreto armado, já existente no LOH/UFRGS, construído em aço galvanizado com de 2m de largura, 2m de comprimento e 2,44m de altura (Figura 4-16).



Obs.:vista interna do reservatório superior.

Figura 4-16: Reservatório superior readequado ao sistema para auxiliar na dissipação de energia do escoamento após a saída do circuito hidráulico.

O reservatório inferior, também já existente, possui capacidade de armazenamento de 600m^3 , construído em concreto e localizado abaixo da laje que configura parte do piso do LOH/UFRGS.

4.2.1.2 Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição de água implementado para a instalação experimental do dispositivo de cavitação encontra-se disposto separadamente à rede de distribuição de água existente do LOH/UFRGS, conforme pode ser observado na Figura 4-17. De maneira geral, o sistema de distribuição é composto por tubulações fabricadas em ferro fundido, por válvulas borboletas, registros gavetas, curvas, conexões, dois sistemas *bypass* e um conjunto motobomba.

No segmento referente ao recalque, o diâmetro nominal da tubulação é de 150 mm, enquanto que o trecho de sucção caracteriza-se por uma tubulação de 200 mm (Figura 4-17).



Figura 4-17: Disposição geral do sistema hidráulico implementado no LOH, as setas em amarelo indicam o sentido do fluxo.

Foram implementados dois sistemas *bypass* em DN 100 mm no circuito hidráulico principal, conforme a Figura 4-18, cuja finalidade foi garantir as condições operacionais da máquina de cavitação em relação a vazão e às pressões necessárias para o correto funcionamento do dispositivo de cavitação.



(a)



(b)

Figura 4-18: Detalhes do sistema *bypass*, à montante (a), e à jusante do dispositivo de cavitação (b) do LOH.

O conjunto motobomba é composto de uma bomba hidráulica (marca KSB) e um motor elétrico (marca WEG) de 100 CV de potência, acionados por um inversor de frequência de 60Hz, trifásico, caracterizado por uma tensão de operação de 220V (Figura 4-19).



(a)



(b)

Figura 4-19: Conjunto motobomba de 100 CV (a), e; painel elétrico de acionamento com inversor de frequência de 60 Hz (b).

4.2.1.3 Medição de Vazão de Água

Para a realização das medições de vazão de água na entrada do dispositivo de cavitação foram instalados no circuito hidráulico principal 1 (um) medidor e 1 (um) transmissor eletromagnético de vazão, ambos da marca *Siemens* (Figura 4-20), modelos MAG 6000 e MAG 5100W, com uma exatidão de $0,2\% \pm 2,5$ mm/s e $\pm 1,0$ mm/s, respectivamente.



Figura 4-20: Medidor e transmissor eletromagnético de vazão de água.

4.2.1.4 Controles de Pressão

Para o correto funcionamento do dispositivo de cavitação torna-se necessária a existência de controles de pressão. Desta forma, foram instalados 2 (dois) manômetros analógicos e 2 (dois) manômetros digitais na tubulação principal do circuito hidráulico. Dois destes foram posicionados a uma distância

de 1,04 m, a montante, e os outros dois manômetros instalados a 14 cm de distância a jusante do dispositivo. Os manômetros digitais são da marca *Siemens*, modelo *Sitrans P*, com saídas de 4 a 20 mA, uma exatidão de $\pm 0,25\%$ FS e uma faixa de operação de 0 a 101,9 m.c.a. Já os manômetros analógicos são da marca *Instrutemp*, com uma exatidão de $\pm 2,0\%$ FS e uma faixa de operação de 0 a 80,0 m.c.a.

Para cada posição de medição de pressão há 4 (quatro) tomadas de acesso ao escoamento, sendo essas conectadas entre si por meio de anéis de tubulações flexíveis. Além das leituras médias de pressão, há a possibilidade de aquisição instantânea das pressões através de manômetros digitais quando acoplados a uma central de aquisição.

Foram instalados ainda 2 (dois) manômetros na tubulação de recalque, um próximo ao ponto de inserção de ar comprimido e o segundo próximo a conexão de recalque do conjunto motobomba. Na Figura 4-21 são apresentados os manômetros de pressão utilizados.

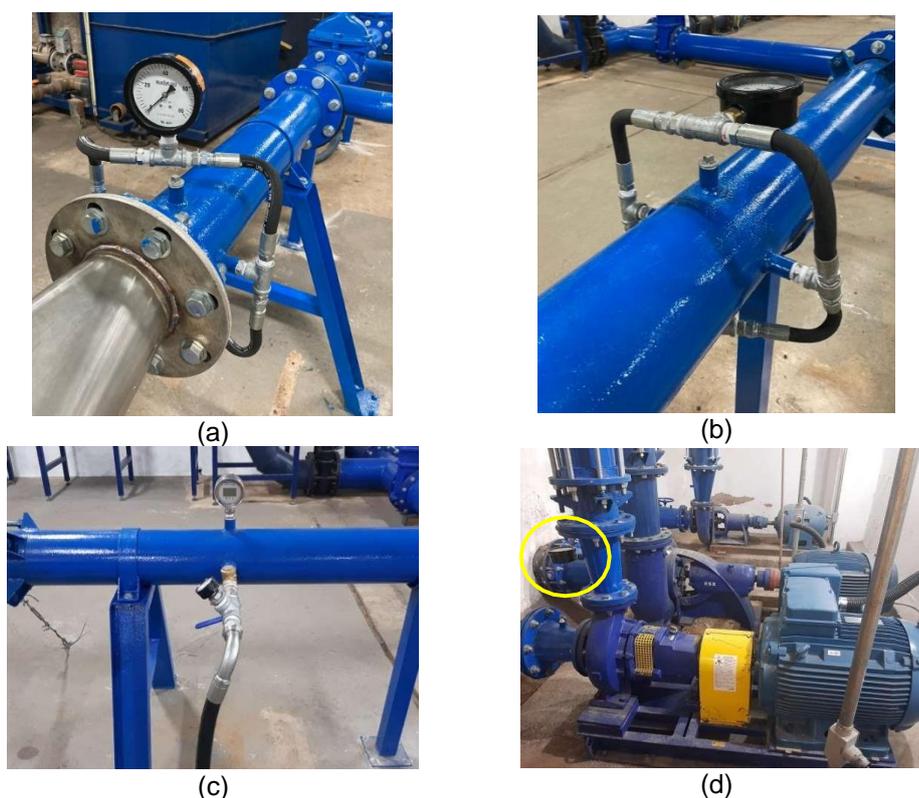


Figura 4-21: Disposição dos manômetros ao longo do sistema de recalque, à montante (a); à jusante do dispositivo (b); no ponto de inserção de ar (c), e; na saída do conjunto motobomba (d).

4.2.1.5 Sistema de Inserção de Ar

O sistema de inserção de ar comprimido é composto dos seguintes segmentos:

i) *Geração de ar comprimido*: realizada através de um compressor de ar tipo parafuso da marca *Metalplan*, com uma potência nominal de 15 HP e pressão de trabalho de 7,5 bar. O compressor é composto de um inversor de frequência, de um filtro e de um secador de ar, além de um módulo de controle com painel de microprocessamento em seu interior;

ii) *Armazenamento do ar comprimido*: correspondente ao reservatório de ar cilíndrico e vertical, com um volume de 425 litros, com pressão máxima de operação de 12 bar;

iii) *Distribuição e medição do ar*: composto por um sistema de tubulações de PPR com DN de 32 mm e pelos equipamentos de medição de vazão de ar.

A medição de parâmetros como vazão, pressão e temperatura do ar, foram realizados a partir de 3 (três) manômetros analógicos, 1 (um) transdutor de pressão, 3 (três) rotâmetros de faixas distintas de medição, 1 (um) medidor de vazão tipo área variável e 1 (um) termômetro digital conectado ao sistema de tubulações em PPR.

O controle de vazão e pressão do ar são realizados através de reguladores de pressão e de registros esfera. As características de marca, modelo, exatidão e faixa de operação dos equipamentos utilizados no quadro de medições e controle das vazões de ar são apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Características dos equipamentos de medição dos parâmetros do ar.

Equipamento	Quant.	Marca	Modelo	Sinal de Saída	Exatidão	Faixa de Operação
Medidor de Vazão Digital Área Variável - Ar	1	Ômega	FLR6725D -BSPP	Corrente 4 - 20 mA	+/- 2% FS	0,94 ... 11,80 l/s
Manômetro Analógico	3	Instrutemp	-	Corrente 4 - 20 mA	+/- 2% FS	0 - 80 mca
Transdutor de Pressão Quadro	1	Velki	VKP-039	Corrente 4 - 20 mA	0,1%F.E	0 - 200 mca
Termômetro	1	N/I	PT-100	Corrente 4 - 20 mA	0,1%F.E	-10 - 200 °C
Rotâmetro 1	1	Flowmetrics	RC -440	-	+/- 2% FS	200 - 2000 NI/h
Rotâmetro 2	1	Flowmetrics	RC -440	-	+/- 2% FS	1,1 - 11 Nm³/h
Rotâmetro 3	1	Flowmetrics	RC -440	-	+/- 2% FS	7,5 - 75 Nm³/h

Os equipamentos de medição foram instalados em um quadro próprio, confeccionado pela equipe do LOH/IPH, de acordo com a Figura 4-22. A Figura 4-23 apresenta o sistema de geração e armazenamento do ar comprimido que antecede ao painel de instrumentação de ar.

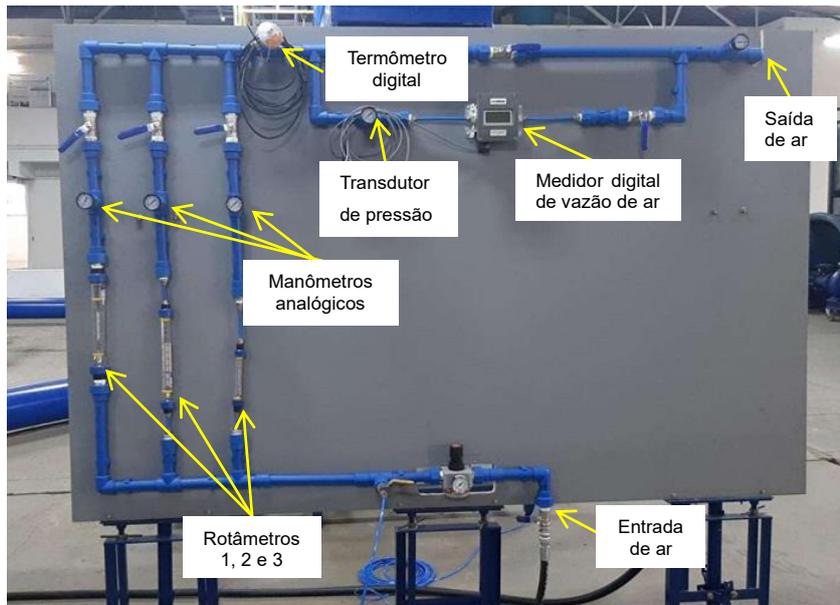


Figura 4-22: Quadro de medição e controle do ar comprimido.



Figura 4-23: Sistema de geração e armazenamento de ar comprimido, reservatório e compressor de ar.

As leituras de vazões de ar foram realizadas simultaneamente nos dois diferentes tipos de medidores de ar, visto que cada equipamento possui uma faixa específica de leitura. Os rotâmetros permitem leituras diretas durante os ensaios, enquanto que o medidor digital de área variável permite a coleta instantânea das variações de leitura ao longo do tempo, quando conectado a central de aquisição de dados (Figura 4-24).

O ar comprimido é inserido ao circuito hidráulico através de um orifício presente na lateral do circuito hidráulico principal, onde estão presentes - na mesma conexão - uma válvula de retenção e um manômetro analógico, para controle das pressões de entrada e de quaisquer retorno indesejável de água pelo circuito de ar comprimido (Figura 4-25).



Figura 4-24: Sistema de aquisição de dados ao lado do painel de instrumentação de ar.

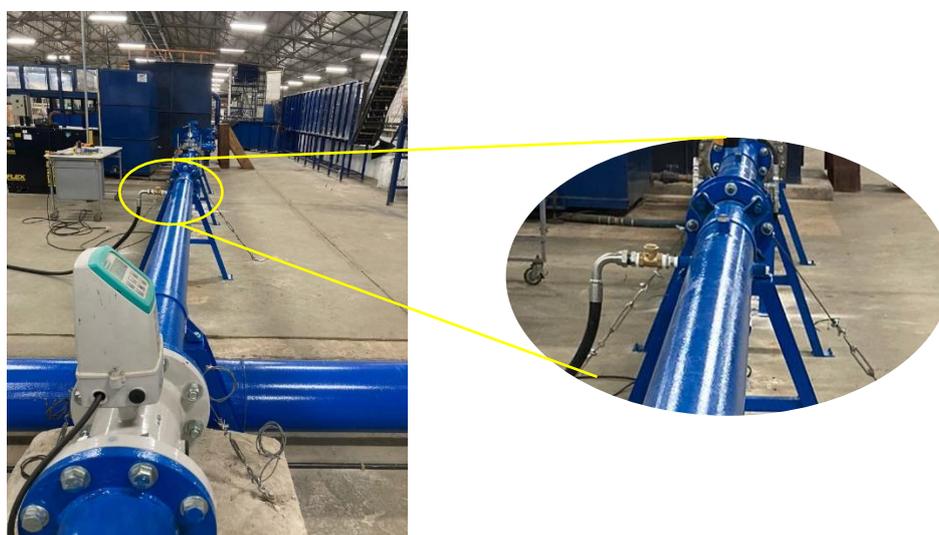


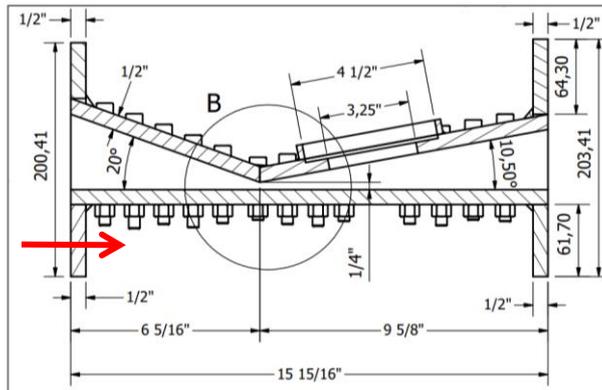
Figura 4-25: Ponto de inserção de ar comprimido no circuito hidráulico.

4.2.2 Dispositivo de Cavitação – LOH/UFRGS

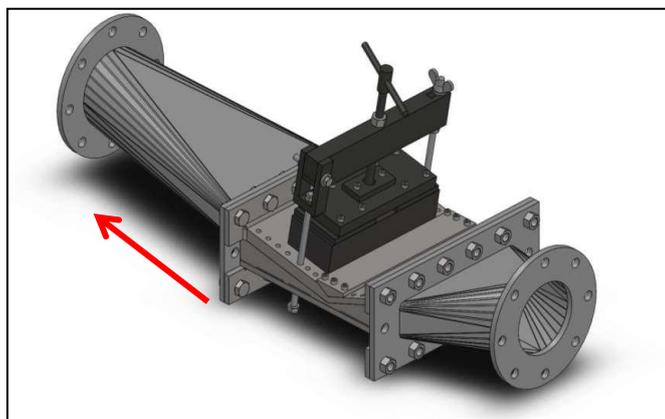
O dispositivo de cavitação da instalação experimental do LOH/UFRGS foi caracterizado inicialmente através das definições apresentadas por USBR (1963). A Figura 4-26, apresenta as dimensões características do dispositivo de cavitação, o desenho esquemático em “3D” e a versão construída e implementada no 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 nesta seção 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, visto que a implosão das cavidades não geram danos somente aos corpos de prova inseridos na máquina

de cavitação, mas também ao material que constitui o próprio dispositivo.



Obs.: medidas em mm, salvo indicação contrária.
(a)



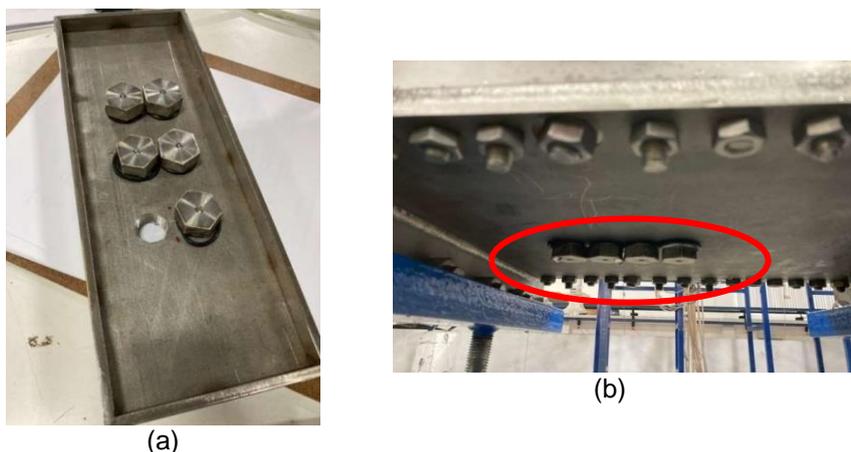
(b)



(c)

Figura 4-26: Desenho esquemático com as dimensões características da máquina de cavitação (a); versão "3D" do dispositivo (b), e; imagem do dispositivo construído e instalado no LOH/UFRGS (c), a flecha indica o sentido do fluxo

Foram acrescentados furos rosqueados de 1/2" de polegada, na parte inferior (Figura 4-27b) e superior (Figura 4-27a) do dispositivo de cavitação, com o objetivo de permitir a realização de ensaios com a aquisição de pressões instantâneas por meio de sensores de pressão próximos a seção contraída da máquina de cavitação. Os sensores foram fixados ao dispositivo de cavitação de forma faceada e em contato direto com o escoamento.



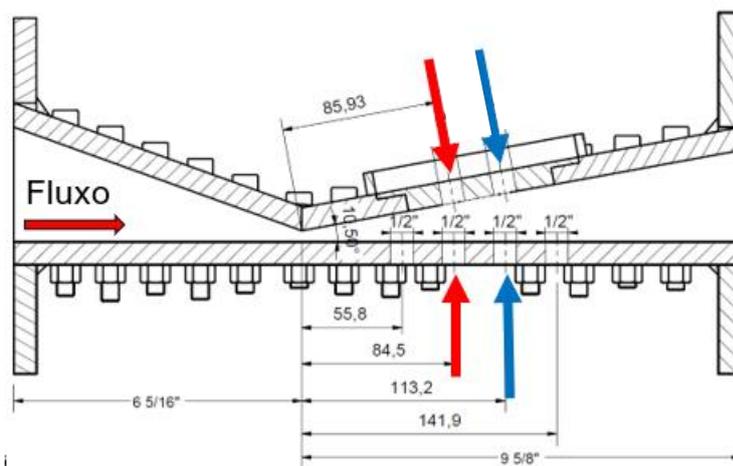
(a)
Figura 4-27: Placa de fixação para os transdutores de pressão na parte superior da máquina (a), e; furos inferiores para posicionamento dos sensores no dispositivo de cavitação do LOH (b)

4.2.3 Pressões Instantâneas – LOH/UFRGS

Para a coleta das pressões instantâneas impostas pelo fenômeno da cavitação ao escoamento no interior do dispositivo do LOH/UFRGS, foram utilizados 4 (quatro) transdutores de pressão, na parte superior e inferior da máquina de cavitação através de orifícios de 1/2" pol de diâmetro.

Os sensores utilizados são da marca *Keller*, modelo PP-21Y BR com uma exatidão nas leituras de $\pm 0,25\%$ FS. As faixas de operação escolhidas foram de -1,0 a 30,0 bar e de 0 a 500 bar, sendo utilizada uma frequência de aquisição de 2.000 Hz durante um tempo de exposição de 10 min.

A disposição adotada para os transdutores de pressão, denominados de P1 e P2, na máquina de cavitação do LOH/UFRGS está descrita na Figura 4-28. As distâncias utilizadas foram de 8,45 cm (Posição 1) e 11,32 cm (Posição 2) a jusante da seção contraída.



Obs.: As dimensões indicadas no desenho são em mm, salvo as com indicações contrárias.

Figura 4-28: Desenho esquemático das Posições P1, indicadas pelas setas vermelhas, e P2, pelas setas azuis, adotadas para a instalação dos sensores de pressão no LOH.

O posicionamento dos sensores de pressão P1 e P2 do LOH/UFRGS corresponde as mesmas distâncias estabelecidas para os sensores D₁ e D₂ do USBR, afim de possibilitar comparações entre as séries amostrais de pressão de ambos os dispositivos.

Os transdutores de pressão foram alimentados por uma fonte de 24V, gerando um sinal de corrente de 4 a 20 mA, proporcional à pressão aplicada no sensor. Os sinais foram aquisitados por intermédio de uma central (ou placa) de aquisição de dados da marca National Instruments modelo cDAQ-9178/NI9203, que conectada a uma caixa de aquisição e a um notebook, permitiu a coleta das leituras em mA em arquivos de extensão *txt*. (Figura 4-29).

Por fim, os dados de corrente foram então convertidos em pressão (m.c.a.) através da curva de calibração, característica de cada sensor de pressão, para valores que variaram entre -10,0 a 25,0 m.c.a.

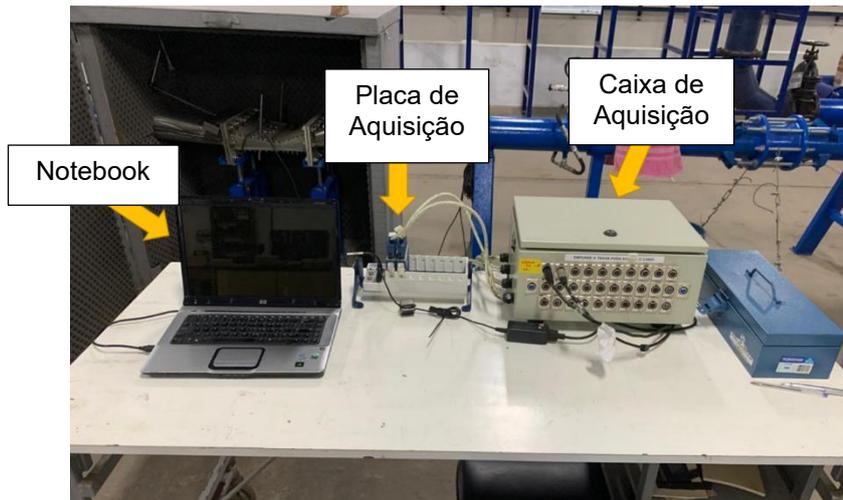


Figura 4-29: Sistema de aquisição dos dados de pressão dos sensores piezoelétricos.

Os ensaios para aquisição das pressões instantâneas foram realizados considerando as demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8%. A partir das séries amostrais de pressão foram analisados os comportamentos dos sinais e definidas as pressões médias características de cada condição de ensaio avaliada.

4.2.4 Vibrações do Dispositivo Cavitante - Acelerômetros

Em virtude de ser projetado e construído em aço inox rígido, o dispositivo de cavitação utilizado nesse estudo apresentou vibrações significativas durante seu funcionamento, sendo justificadas em grande parte pela ocorrência de ondas de choque oriundas das implosões das cavidades de vapor junto a estrutura da máquina. Constatado este efeito de vibração induzida pelo escoamento, buscou-se empregar sua caracterização como uma ferramenta de quantificação da intensidade do potencial efeito erosivo da cavitação sobre a região interna da máquina, mesmo lugar onde os blocos de concreto são expostos a ação do fenômeno.

Desta forma, além das verificações de danos em diferentes corpos de prova em concreto, foram analisadas como seguimento a esta pesquisa os resultados das medições de vibração do dispositivo de cavitação. As acelerações aquisitadas no exterior da máquina de cavitação do LOH foram extraídas de ensaios considerando diferentes condições hidráulicas de funcionamento, com distintas vazões de água - sem a inserção de ar no escoamento - e com a

presença de diferentes demandas relativas de ar no sistema durante a ocorrência do fenômeno da cavitação plenamente desenvolvido.

Assim, os ensaios com os acelerômetros tiveram por objetivo caracterizar as vibrações do aparato experimental como uma forma complementar de identificação da ocorrência da cavitação.

O sistema de aquisição foi composto de 1 (um) osciloscópio da marca Tektronix, modelo TDS-1012B, utilizado somente para a visualização instantânea do comportamento dos sinais, de maneira a identificar necessidades de ajuste as frequências de aquisição dos acelerômetros. E, uma base de alimentação via USB cDAQ-9171, acoplada a um conversor analógico-digital NI-9215, ambos da marca *National Instruments*. O conversor com resolução de 16 bits, frequência máxima de 100 kHz, e sistema de amostragem/armazenagem simultânea em 4 canais (Figura 4-30).

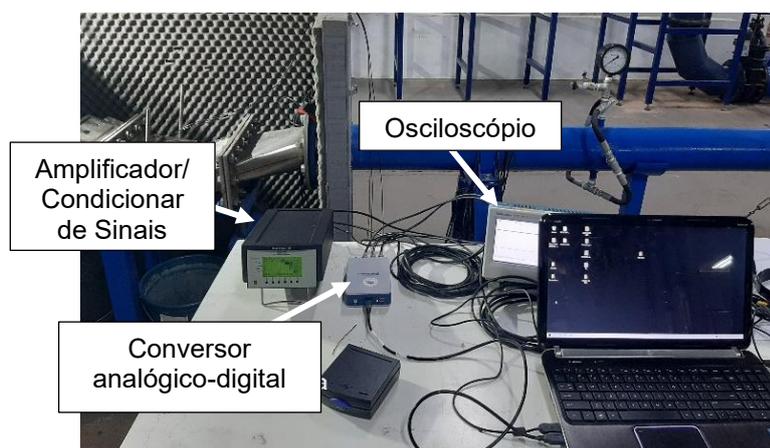


Figura 4-30: Sistema de aquisição dos acelerômetros no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

O software utilizado para aquisição dos dados foi o LABView (2017) da National Instruments. Os dados coletados em tensão elétrica (Volts) foram convertidos em aceleração através da equação de calibração dos acelerômetros, sendo a análise dos dados realizada por meio dos softwares Excel® e Matlab®. Os acelerômetros tiveram seus sinais elétricos condicionados por um amplificador/condicionador de sinais modelo NEXUS-2690, marca Brüel & Kjaer.

Os acelerômetros utilizados foram de carga piezoelétrica fixados no exterior da máquina de cavitação do LOH, na região de posição original dos blocos de concreto, na etapa em que foram realizados ensaios de avaliação de desgaste.

Nos ensaios sem inserção de ar os acelerômetros utilizados foram modelo Brüel & Kjaer 4326A - triaxial, instalados conforme apresentado na Figura 4-31. As frequências máximas de resposta dos acelerômetros são 9; 8 e 16 kHz, respectivamente, nos eixos “x”, “y” e “z”, sendo os sentidos adotados para os eixos, em relação ao dispositivo de cavitação, apresentados na Figura 4-32, onde aparece, também, a posição dos acelerômetros distantes 8,45 cm da seção contraída da máquina de cavitação, externamente à região de implosão das bolhas de vapor (cavitação).

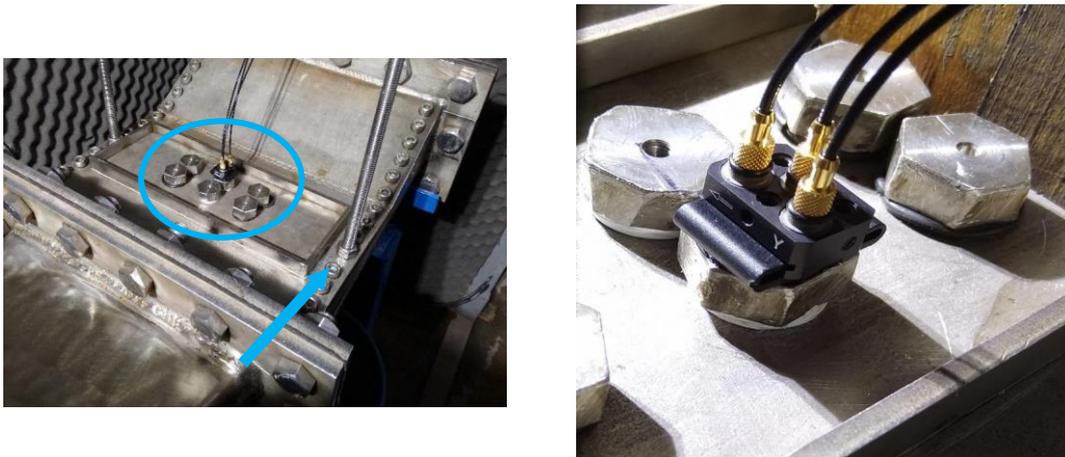


Figura 4-31: Posição do acelerômetro sobre a placa metálica do dispositivo de cavitação – vista de jusante para montante, a seta indica o sentido do fluxo.

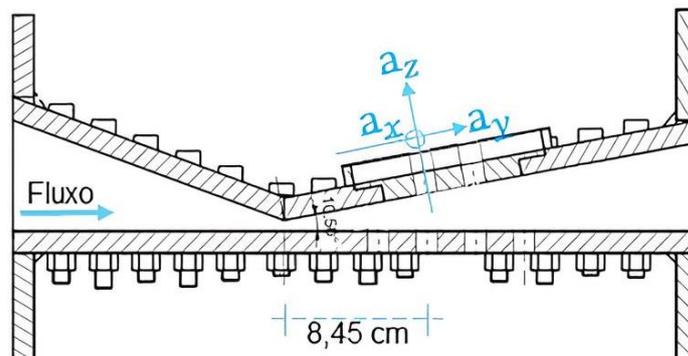


Figura 4-32: Desenho esquemático dos sentidos dos eixos adotados nas leituras dos acelerômetros.

A Tabela 4-4 apresenta as características gerais dos ensaios realizados para aquisição das acelerações, sem a inserção de ar comprimido no escoamento.

Tabela 4-4: Características gerais dos ensaios de aceleração, para escoamentos com diferentes vazões de água.

Q_w (l/s)	V (m/s)
0,0	0,0
25,7	12,47
33,1	16,10
35,2	17,09
37,0	17,98
38,7	18,77
41,9	20,36
45,3	21,99
50,3	24,41
57,3	27,81
59,0	28,65
64,3*	31,24

* Vazão de ocorrência do fenômeno da cavitação no dispositivo do LOH.

Os dados de tensão elétrica foram adquiridos pelo sistema, em três canais simultâneos, a uma frequência de 32 kHz, durante 2,048 segundos (65536 pontos por canal), filtrados analogicamente entre 1 Hz e as frequências de corte indicadas na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Frequências limitantes de aquisição dos acelerômetros.

Direção do acelerômetro	Freq. Corte (kHz)
"X"	10.0
"Y"	10.0
"Z"	22.4

Nos ensaios com inserção de ar foram empregados dois acelerômetros modelo Brüel & Kjaer 4393 – unidirecionais, montados conforme apresentado na Figura 4-33. A frequência adotada durante a aquisição das vibrações foi de 20 kHz durante 3 segundos, nos eixos "y" e "z", com sinal elétrico filtrado entre 0,1 Hz e 22,4 kHz, sendo os sentidos adotados para os eixos, em relação ao dispositivo de cavitação, os mesmos apresentados na Figura 4-33.

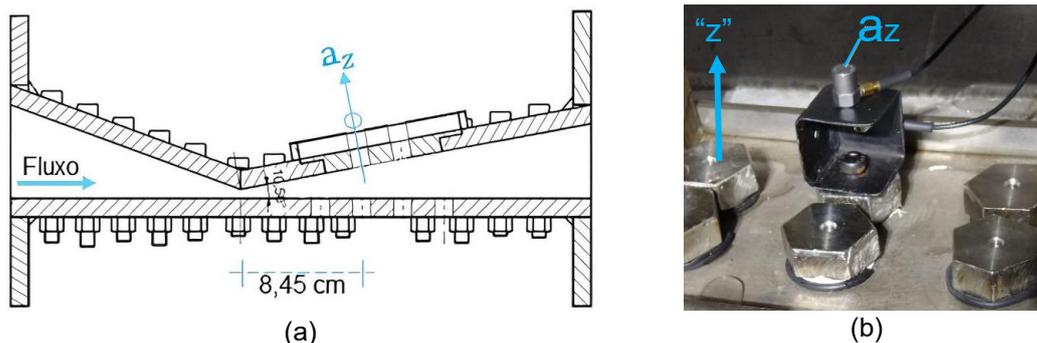


Figura 4-33: Desenho esquemático da posição adotada para coleta das acelerações no eixo “z”(a), e; imagem do sensor fixado no dispositivo de cavitação (b).

Nestes ensaios foi empregada uma vazão nominal de água constante e igual a 60,0 l/s (que resulta em velocidade de 30,0 m/s na seção contraída do dispositivo de cavitação), avaliando a resposta das vibrações através da inserção das demandas relativas de ar correspondentes a 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%.

Considerando que, para os dois tipos de ensaios, as acelerações mais significativas foram verificadas no sentido do eixo “z”, serão abordados apenas os resultados referentes aos sinais extraídos neste sentido preferencial das vibrações. As análises das acelerações resultantes no eixo “z” serão apresentadas nos itens 5.1.2.1 Vibrações – escoamentos com distintas vazões de água. e; 5.1.2.2 Vibrações – escoamento com diferentes concentrações de ar.

4.2.5 Caracterização dos Concreto Utilizados no LOH

4.2.5.1 Blocos de Concreto e Corpos de Prova Cilíndricos

Inicialmente foram moldadas 156 unidades de blocos de concreto, nas dimensões de 304,0 mm de comprimento, 114,0 mm de largura e 84,0 mm de altura para os estudos experimentais no dispositivo de cavitação. Na totalidade, foram previstos a realização de no mínimo 3 (três) repetições de ensaio para cada traço de concreto a ser considerado. Foram avaliados os desgastes causados pelo escoamento com a inserção das demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8%.

A caracterização dos concretos utilizados nos ensaios com a máquina de cavitação é apresentada na Tabela 4-6, tendo sido utilizadas as relações água/cimento de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65.

Tabela 4-6: Dosagem dos concretos a serem utilizados nos ensaios do dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Componentes	Material (kg/m ³)	Relação (a/c)			
	Descrição/Litologia	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

Conjuntamente com a moldagem e cura dos blocos de concreto foram produzidos corpos de prova cilíndricos (CPs) para rompimentos via carregamento através da utilização de uma prensa hidráulica, com o objetivo de determinar as resistências médias a compressão (f_{cm}) dos concretos a serem submetidos a máquina de cavitação do LOH. Foram produzidas 193 unidades de CPs, caracterizados por um diâmetro de 10,0 cm e altura de 20,0 cm para rompimentos nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 91 dias.

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.

O processo de fabricação e cura dos blocos de concreto e dos corpos de prova cilíndricos foi realizado através das seguintes etapas:

- i) Limpeza e adição de óleo mineral desmoldante nas formas de madeira e metálicas que foram utilizadas nos corpos de prova (Figura 4-34);

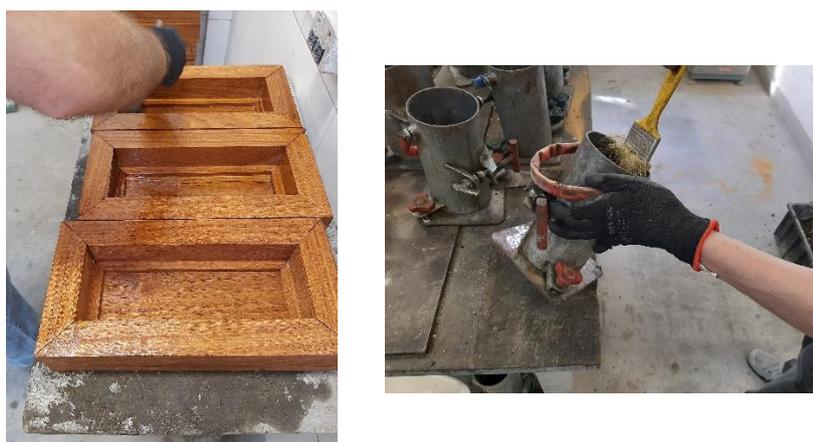


Figura 4-34: Limpeza e adição de desmoldante nas formas.

- ii) Pesagem dos componentes - cimento, brita, areia, água e aditivos - nas proporções correspondentes a cada traço de concreto a ser produzido (Figura 4-35);



Figura 4-35: Pesagem dos materiais.

iii) Transferência e mistura dos materiais, já pesados, através do uso de uma Betoneira de 400 l para uma total homogeneização do composto em estado fresco. Após a mistura, uma amostra de concreto era coletada para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - *Slump Test*, segundo a ABNT NBR 16889/2020: “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. Caso a altura do cone formado fosse inferior a 8,0 cm ou superior a 12,0 cm o composto era ajustado com a inserção de aditivos plastificantes e novamente homogeneizado. O *Slump Test* foi realizado a cada ajuste do composto até que fossem alcançados os limites de altura do cone conforme o estabelecido pela norma técnica vigente (Figura 4-36);



Figura 4-36: Realização do *Slump Test*.

iv) Moldagem dos blocos de concreto e corpos de prova cilíndricos: o composto devidamente homogeneizado era transferido para as formas previamente lubrificadas com desmoldante. Conforme as formas foram preenchidas com o concreto fresco, os mesmos eram submetidos à vibração em mesa vibradora. Caso as formas apresentassem espaços vazios adicionava-se mais do composto e essas eram novamente vibradas. Por fim, acabamentos na superfície exposta do concreto eram realizados com o auxílio de colheres de pedreiro. As formas, agora com concreto eram

deixadas para cura inicial ao ar livre por 24 horas. Após este período, os blocos e CPs eram retirados das formas, identificados e transferidos para cura em câmara úmida (Figura 4-37);



a) Inserção de concreto nas formas.



b) Blocos de concreto moldados.



c) Corpos de prova cilíndricos.



d) Desforma dos blocos de concreto.

Figura 4-37: Processo de moldagem e retirada dos blocos e corpos de prova em concreto.

v) Em câmara úmida os blocos e CPs foram armazenados para que o processo de cura ocorresse em ambiente controlado, com temperatura de 22°/23°C e 100% de umidade, a fim de não desenvolverem fissuras por retração. Os blocos de concreto permaneciam nesse local até o período mínimo de 28 dias e, os corpos de prova eram retirados a medida em que atingissem a idade de rompimento necessária (Figura 4-38);



Figura 4-38: Armazenamento dos blocos e CPs em câmara úmida.

vi) Finalizados os 28 dias de cura, os blocos de concreto eram transferidos ao LOH e armazenados em toneis totalmente submersos em uma solução de Cal Virgem e água até o dia de realização dos ensaios no dispositivo de cavitação (Figura 4-39).



Figura 4-39: Transferência dos blocos de concreto para o LOH.

Os ensaios de rompimento dos CPs, para determinação das resistências médias à compressão atendeu aos critérios da NBR 5739: 2018 – Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos, sendo rompidos por uma prensa hidráulica na instalação do LEME/UFRGS.

4.2.6 *Determinação dos Volume Erodidos: Metodologia da Pesagem Hidrostática, do Perfilador a Laser e do Escâner “3D”*

Os volumes das erosões formadas nos blocos de concreto após exposição ao fenômeno da cavitação, considerando a influência das diferentes demandas relativas de ar presentes no escoamento, foram estimados através de três distintas metodologias, sendo elas: Método da Pesagem Hidrostática, uso de Perfilador a Laser e uso de “Escâner 3D.”

O Método da Pesagem Hidrostática compreende na estimativa dos volumes de concreto removidos (V_e) por meio das diferenças de peso das amostras, ao ar livre e totalmente submersas em água, antes e após 2 horas de exposição ao dispositivo de cavitação. Nas duas condições de pesagem, os blocos encontravam-se saturados em água. O V_e foi definido por meio da Equação 4-1.

$$V_e = \frac{m_s - m_{ss}}{\rho_a}$$

Equação 4-1

Onde: V_e é o volume erodido (cm^3); m_s a massa do bloco ao ar livre (g); m_{ss} é a massa do bloco submerso em água (g), e; ρ_a a massa específica da água (g/cm^3).

As pesagens dos blocos de concreto foram realizadas em uma balança da marca Marte Científica, modelo AD10K com precisão de 0,1g. A Figura 4-40 apresenta as etapas das pesagens ao ar livre e hidrostática dos blocos de concreto avaliados.



Figura 4-40: Pesagem ao ar livre (a), e pesagem hidrostática (b), dos blocos de concreto ensaiados.

A metodologia do Perfilador a Laser (Figura 4-41) consistiu na determinação do volume de concreto perdido (erodido) por meio da extração de pontos coordenados das superfícies dos corpos de prova erodidos, a partir de uma referência “topográfica” inalterada.



Figura 4-41: Sistema de aquisição dos pontos “x”, “y” e “z” (a), e Mesa de Coordenadas Automatizada com o Perfilador a Laser (b).

O volume perdido foi estimado através de seções batimétricas extraídas pelo uso da Mesa de Coordenadas Automatizada, que gera deslocamentos contínuos nos eixos “x” e “y” (plano paralelo à superfície do bloco) e de leituras realizadas por um nível a laser correspondentes ao eixo “z” (Figura 4-42).

O nível é da marca Opto, modelo MD250 ADV de uma precisão na leitura de 0,1 mm. 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.

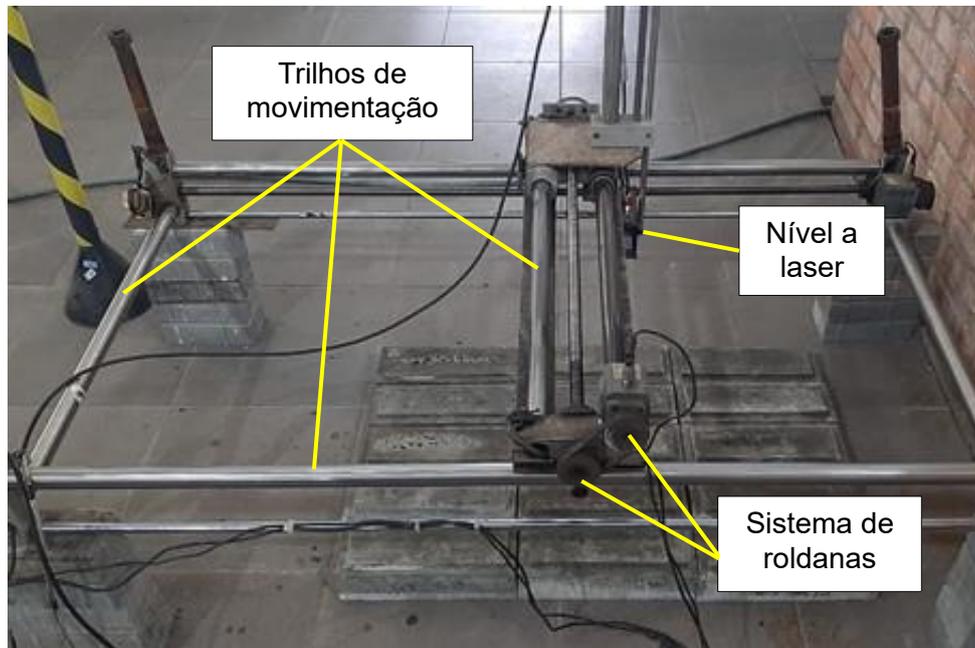
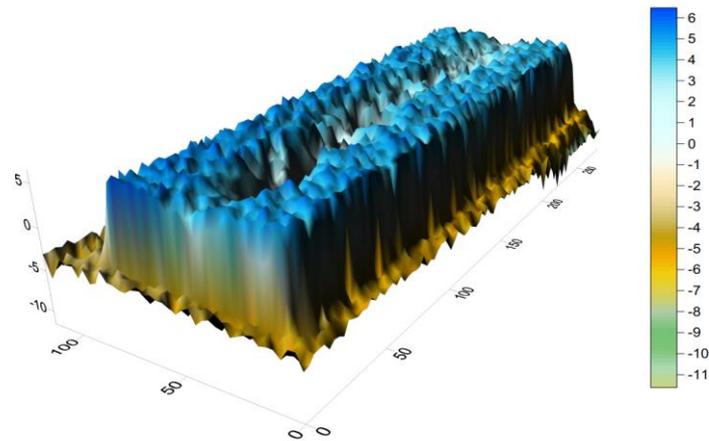


Figura 4-42: Detalhamento da Mesa de Coordenadas Automatizada, com indicação do posicionamento do Nível a Laser.

As coordenadas coletadas foram processadas através do uso dos softwares Surfer® - para visualização das superfícies erodidas (Figura 4-43), e *MatLab*®, onde foram estabelecidas as curvas de nível dos blocos de concreto erodidos para quantificação dos volumes erodidos. O intervalo entre curvas de nível utilizado foi de 0,5 mm de profundidade.



Obs.: As irregularidades “uniformes” evidenciadas na representação gráfica das superfícies dos blocos erodidos, superiores a $z = 0$ mm, na verdade são interferências ocasionadas pela vibração da Mesa de Coordenadas Automatizada durante sua operação. Esses pontos foram filtrados a partir de uma cota de referência estabelecida com o Perfilador a Laser em repouso.

Figura 4-43: Superfície gerada para visualização da superfície erodida e para extração dos pontos coordenados através do uso do software Surfer®.

A metodologia do Escâner “3D” consiste na extração das superfícies dos blocos erodidos, através de sobreposições sucessivas de imagens fotográficas do objeto escaneado, das quais construíam-se um modelo digital em 3 (três) dimensões dos corpos de prova analisados (Figura 4-44). Os danos superficiais foram digitalizados com o uso de um Escâner 3D da marca Artec, modelo EVA de propriedade da Eletrobrás – FURNAS, cedido ao LOH para extração das superfícies danificadas dos 73 blocos de concreto ensaiados.

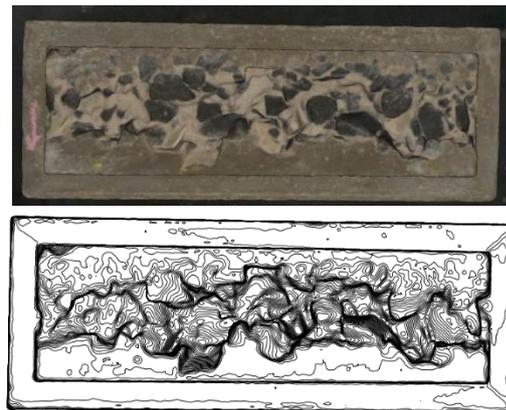
Os sólidos formados pela composição das imagens capturadas pela câmera do escâner 3D foram processados a partir do software do próprio equipamento (*Artec Studio 16 Professional*). Os arquivos obtidos possuem extensão *.dwg* compatíveis com o software *AutoCad®*, o que permitia a extração de curvas de nível com espaçamento de 0,5 mm da superfície erodida, permitindo a estimativa dos volumes e das áreas dos danos, conforme o apresentado na (Figura 4-44).



(a) Bloco e Escâner 3D – EVA.



(b) Escaneamento dos blocos.



(c) Superfície 3D formada pela sobreposição de imagens e curvas de nível em extensão .dwg utilizadas na estimativa dos volumes erodidos.

Figura 4-44: 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.

Os volumes estimados pelas três metodologias foram comparados e os resultados apresentados no item 5.3: *Análise de Danos no Concreto*.

4.2.7 Procedimentos de Ensaio – Instalação Experimental do LOH/UFRGS

A metodologia de realização dos ensaios com a presença das amostras de concreto no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS foi bastante semelhante àquela desenvolvida para a instalação experimental do *US of Reclamation*, sendo adaptadas as particularidades dos sistemas hidráulicas e de ar comprimido do LOH.

Anteriormente ao início dos ensaios no aparato experimental os blocos de concreto foram fotografados e pesados de acordo com a Metodologia da Pesagem Hidrostática. Em seguida, os blocos de concreto foram posicionados sobre a janela de acesso do dispositivo de cavitação (Figura 4-45), sendo a

vedação realizada com o uso de uma borracha inserida entre o encaixe metálico da máquina e o bloco de concreto.

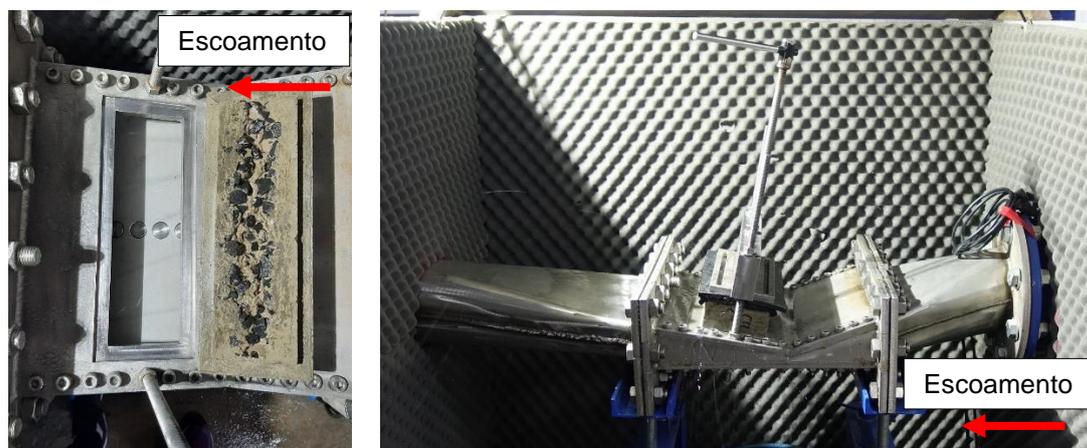


Figura 4-45: Posicionamento da amostra de concreto sobre o dispositivo de cavitação do LOH.

Inicialmente era acionado o sistema de ar comprimido e a vazão de ar ajustada através do uso dos registros gaveta e de leituras constantes nos rotômetros presentes na tubulação de PPR – quando os ensaios a serem realizados consideravam a inserção de diferentes demandas relativas de ar no escoamento. Assim que a vazão de ar estabilizasse o circuito de ar comprimido era isolado do sistema hidráulico e o acionamento do conjunto motobomba era realizado, impondo a vazão de ensaio de 60,0 l/s e as pressões de controle de montante e jusante de 41,5 e 12,5 m.c.a., respectivamente.

Regularizadas as pressões de controle e a vazão líquida do sistema o escoamento de ar era novamente liberado misturando-se ao escoamento em posição à montante da seção contraída do dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS tipo *Venturi*. Após a realização de pequenos ajustes no fluxo de ar iniciava-se a contagem do tempo de ensaio. O tempo total de ensaio adotado foi de 2 horas, porém a cada intervalo de 30 min, a vazão líquida e a vazão de ar eram desligadas, os blocos removidos, fotografados e pesados. Esse procedimento foi repetido até conclusão do ensaio.

O período de exposição dos blocos de concreto ao dispositivo de cavitação do LOH foi definido a partir de observações preliminares, essas realizadas em junto com a equipe de engenheiros do USBR através da utilização de corpos de prova de teste em seu aparato experimental. Além disso, também foram consideradas as informações existentes na bibliografia, principalmente no que tange os estudos desenvolvidos por Peterka (1983), os quais também

definiram como 2 horas o tempo ideal de avaliação dos danos a serem causados a diferentes superfícies de concreto após exposição ao um sistema similar ao construído e utilizado nessa pesquisa.

Com exceção da inserção dos blocos de concreto, os ensaios para coleta de dados de pressão, bem como, para a aquisição das acelerações resultantes na superfície externa do dispositivo de cavitação foram realizados pela mesma metodologia apresentada anteriormente.

4.3 Metodologia de Análise dos Dados

As diferentes etapas metodológicas desenvolvidas durante o processo de aquisição dos dados, referentes às características do escoamento e dos concretos ensaiados, nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR, são descritas a seguir na Figura 4-46 e Figura 4-47.

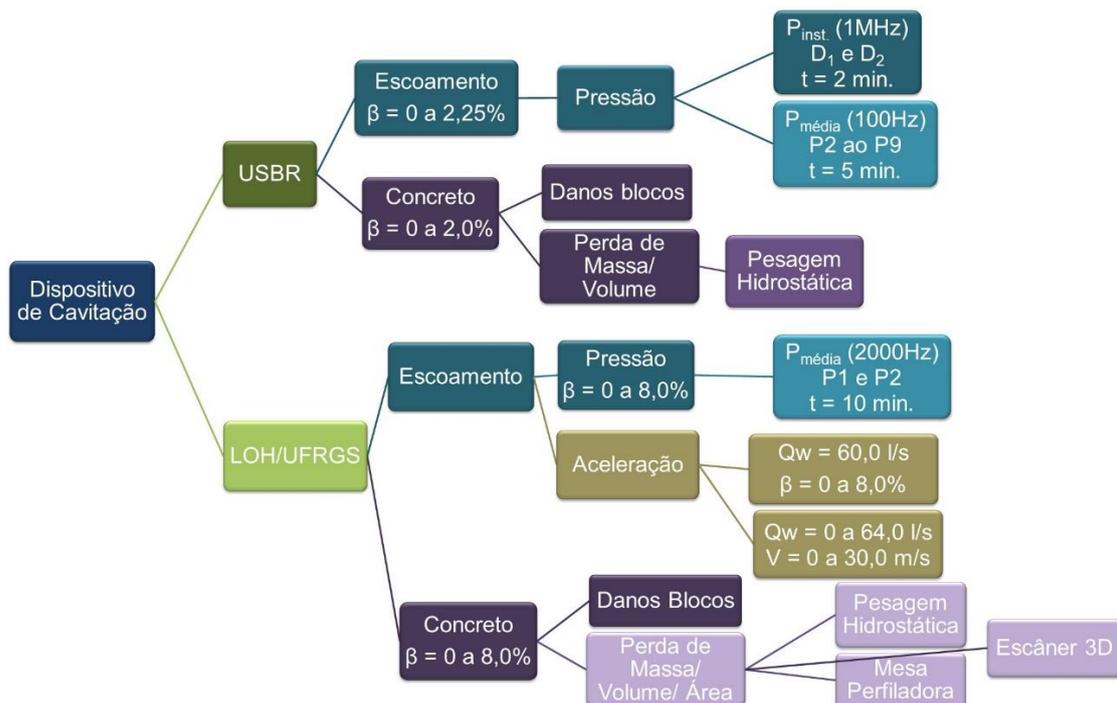


Figura 4-46: Fluxograma dos ensaios e parâmetros analisados nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR.

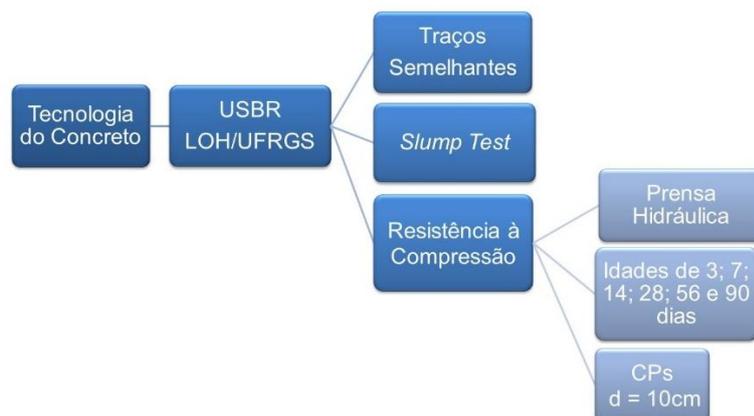


Figura 4-47: Fluxograma dos ensaios e metodologias adotadas para a determinação dos parâmetros característicos do concreto nos laboratórios do LOH/UFRGS e do USBR.

As características gerais dos concretos, suas composições, resistências médias à compressão, bem como, as condições de ensaio definidas para a aquisição dos dados de pressão instantânea, das acelerações além das demandas relativas de ar consideradas, em ambas as instalações experimentais, são apresentadas na Tabela 4-7, Tabela 4-8, Tabela 4-9 e Tabela 4-10 a seguir.

Tabela 4-7: Composição dos concretos investigados nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR.

Local	Componentes	Material (kg/m ³) Descrição/Litologia	Relação a/c				
			0,35	0,45	0,50	0,65	0,70
LOH/UFRGS	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 ^{III}	325,0	113,0	195,0	98,0	-
USBR	Cimento	Tipo I/II	483,5	-	391,0	290,7	278,8
	Agregado Graúdo	Granito artificial C33 N°67 (19mm)	933,2	-	978,9	950,4	950,4
	Agregado Miúdo	Areia de origem Fluvial (MF ^I = 2,64mm)	755,8	-	841,9	888,1	884,0
	Água		168,9	-	195,7	189,8	195,8
	Aditivo 1 - Policarboxilato	GCP Applied Technologies Zyla 625 ^{II}	97,0	-	124,0	65,0	
	Aditivo 2 - Superfluidizing (SF)	GCP Applied Technologies EXP 950 ^{III}	260 mL/100 kg cimento				-

^I Módulo de Finura

^{II} Hidratação mais completa do cimento Portland, com efeito mínimo de entrada de ar no concreto

^{III} Aumento da trabalhabilidade sem segregação do concreto

Tabela 4-8: Resistências médias à compressão, extraídas para os concretos utilizados nos dispositivos do LOH/UFRGS e do USBR.

Local	Dias	$f_{cm,j}$ (MPa)					
		0,35	0,35+SF	0,45	0,50	0,65	0,70
LOH/UFRGS	3	41,2	-	28,3	29,7	16,8	-
	7	49,0	-	34,5	33,8	21,9	-
	14	54,8	-	38,0	35,0	26,1	-
	28	62,4	-	43,6	38,0	27,4	-
	63	61,5	-	44,6	37,2	29,5	-
	91	64,5	-	47,9	40,4	32,7*	-
f_{cm}		55,6		39,5	35,6	25,2	
USBR	7	47,4	54,5	-	31,9	26,3	20,3
	25	53,5	53,4	-	37,2	31,3	26,4
	36	54,6	58,4	-	37,7	32,0	27,2
	$f_{cm,26-37}$	54,1	55,9	-	37,5	31,7	26,8

* valor estimado a partir dos aumentos de resistência média a compressão entre 63° e 91° dias para as demais relações água/cimento utilizadas.

Tabela 4-9: Condições de ensaio consideradas para a aquisição das pressões instantâneas nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR.

Local	Sensor	t (min)	Freq. Aquisição	Qw (l/s)	β (%)
USBR	D ₁ e D ₂	2	1MHz	60,0	0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95; 2,25; 3,40; 4,25; 5,10 e 8,50
USBR	P2 ao P9	5	100Hz	64,0	0; 0,15; 0,60; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,95 e 2,25
LOH/UFRGS	P1 e P2	10	2000Hz	64,0	0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0

Tabela 4-10: Descrição das características gerais dos ensaios realizados com acelerômetros no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

	β (%)	Q_w (l/s)	V (m/s)		β (%)	Q_w (l/s)	V (m/s)	
1ª Campanha	0,0	0,0	0,0	2ª Campanha	0,0	64,1	31,1	
	0,0	25,7	12,5		0,25	64,0	31,1	
	0,0	33,1	16,1		0,50	63,9	31,0	
	0,0	35,2	17,1		0,75	63,8	31,0	
	0,0	37,0	18,0		1,0	63,8	31,0	
	0,0	38,7	18,8		2,0	63,4	30,8	
	0,0	41,9	20,4		4,0	62,8	30,5	
	0,0	45,3	22,0		6,0	62,1	30,1	
	0,0	50,3	24,4		8,0	61,7	30,0	
	0,0	57,3	27,8					
	0,0	59,0	28,7					
	0,0	64,3	31,2					

Inicialmente foram realizadas as análises estatísticas das séries amostrais dos sinais de pressão instantânea e das acelerações coletadas no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, e das pressões de 100Hz e 1MHz dos transdutores utilizados na instalação experimental do USBR.

Os parâmetros estatísticos verificados foram a média (\bar{x}), desvio padrão (ν_x), assimetria (A), curtose (K), valores máximos e mínimos, tendo sido ainda verificadas as curvas de Densidade de Probabilidade para as acelerações aquisitadas no dispositivo do LOH/UFRGS.

Considerando as variáveis estatísticas extraídas dos ensaios com a presença das β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8% para o LOH/UFRGS e, de 0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95 e 2,25% para os ensaios do USBR, foram então, estimados os índices de cavitação para as distintas condições hidráulicas de funcionamento do dispositivo de cavitação.

Além disso, também foram realizados os comparativos entre os resultados extraídos para condições hidráulicas semelhantes de operação de ambos os aparatos experimentais, de maneira a estabelecer correlações entre os dois sistemas e a fornecer uma melhor compreensão do fenômeno da cavitação a partir do escoamento.

A análise dos danos apresentadas nas superfícies dos blocos de concreto após exposição ao escoamento cavitante - sobre a influência de distintos Betas - foi desenvolvida através das perdas de massa, volume e área dos corpos de

prova e das profundidades máximas dos danos correlacionando-os aos parâmetros de f_{cm} e a/c dos concretos avaliadas.

Devido ao fato de terem sido utilizadas 3 (três) metodologias de quantificação de danos (Pesagem Hidrostática, Escâner “3D” e Mesa Perfiladora) também foram verificadas as relações existentes entre essas metodologias e qual delas representaria com melhor descrição os desgastes e erosões apresentados pelas superfícies dos blocos de concreto do LOH/UFRGS.

Em paralelo a análise dos resultados obtidos nos dispositivos de cavitação - referentes ao escoamento e aos danos superficiais dos concretos - foram verificados os parâmetros referentes a tecnologia dos concretos utilizados no LOH/UFRGS e no USBR.

Os resultados de resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), pela metodologia da prensa hidráulica, e dos *Slump Tests*, em estado fresco, serviram para o controle de qualidade dos concretos, durante o processo de produção, moldagem e cura dos corpos de prova desenvolvidos nas diferentes instituições de pesquisa envolvidas.

Os dados referentes aos f_{cm} , relações a/c , perdas de volume e $h_{máx.}$ dos danos foram utilizados para a determinação das correlações, através da estimativa de funções de ajuste, exponenciais e logarítmicas, que vinculadas aos parâmetros característicos dos concretos, poderão ser utilizadas na estimativa dos danos causados pelo fenômeno da cavitação em concretos de traços semelhantes.

Por fim, foram realizados os comparativos entre os resultados extraídos de ambos os dispositivos de cavitação (LOH/UFRGS e USBR), confrontando-os com as informações existentes na bibliografia, principalmente as preconizadas por Peterka (1953) e Gal’perin *et al.*, (1971).

A partir das profundidades máximas dos danos, resistências médias à compressão e velocidade do escoamento ($V = 30,0$ m/s) foram propostas modificações a metodologia descrita por Gal’perin *et al.*, (1971) e Kudriashov *et al.*, (1983).

5 RESULTADOS

Em se tratando de uma pesquisa voltada a análise da interação entre o escoamento e o concreto, foram então verificadas as características do escoamento e seus efeitos nos blocos de concreto utilizados. Sendo assim, os resultados apresentados neste capítulo foram abordados de maneira a esclarecer o comportamento do fenômeno observado e os danos verificados em diferentes traços de concreto.

Os dados obtidos durante os ensaios em laboratório foram descritos através da análise das condições hidráulicas do escoamento, pressões médias e vibrações no dispositivo de cavitação, além das relações entre o concreto e a cavitação, por meio da evolução dos danos e dos registros de perda de massa e volume dos blocos de concreto.

Os resultados e parâmetros extraídos dos ensaios realizados foram expressos com o intuito de permitir a caracterização do fenômeno da cavitação e a obtenção de ferramentas de análise aplicáveis a estrutura hidráulicas de concreto quando submetidas a escoamentos de alta velocidade.

5.1 Condições Hidráulicas

Com o objetivo de identificar as principais alterações que o fenômeno da cavitação proporciona aos parâmetros característicos do escoamento durante a operação do dispositivo de cavitação, foram verificados os comportamentos das pressões médias, sob influência de diferentes demandas relativas de ar (β), e das vibrações ocasionadas ao sistema, pelo choque das implosões das bolhas de vapor, através da análise das acelerações adquiridas sobre o aparato experimental.

As pressões médias e a intensidade das vibrações do sistema causadas pela cavitação em diferentes condições de ensaios serão apresentadas nos itens *5.1.1- Pressões Médias – Dispositivo de Cavitação LOH/UFRGS e USBR e 5.1.2 - Análise de Vibrações – Dispositivo LOH*

5.1.1 Pressões Médias – Dispositivo de Cavitação LOH/UFRGS e USBR

Por se tratar de um dispositivo singular, desenvolvido especificamente para os estudos dos efeitos da cavitação em laboratório, os esforços de coleta e análise das condições impostas ao escoamento durante a ocorrência do fenômeno foram concentrados essencialmente na zona de ocorrência do fenômeno e posicionamento dos blocos de concreto.

As pressões produzidas pelo escoamento foram coletadas na parte superior e inferior do dispositivo de cavitação nas posições 1 e 2 (Figura 5-1) para as demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%. Além disso, foram verificadas as influências do posicionamento dos sensores de pressão em relação ao ponto de maior velocidade média do escoamento no dispositivo.

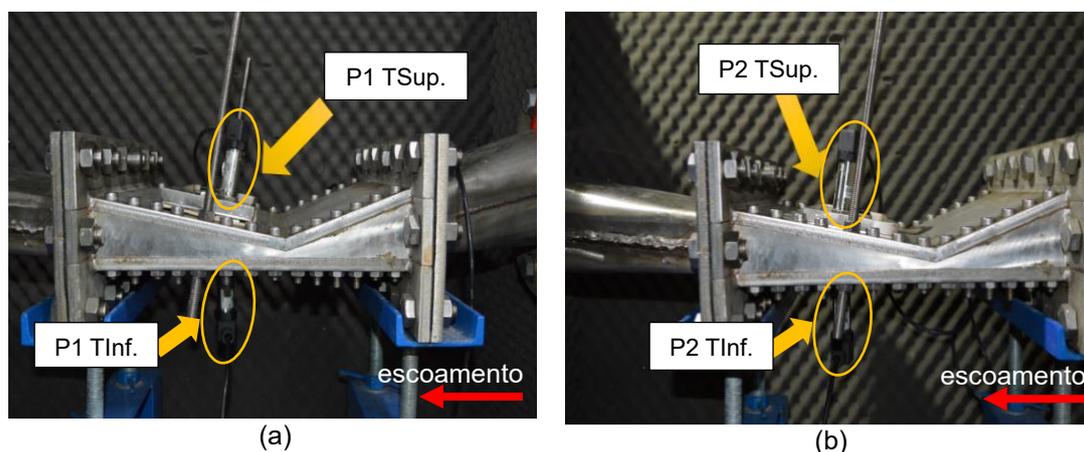


Figura 5-1: Posicionamento dos transdutores de pressão, Posição 1 (a); Posição 2 (b), e; vista de corte do dispositivo de cavitação (c).

Os resultados de pressões médias foram extraídos a partir das séries de pressões instantâneas dos transdutores de pressão adquiridas a frequência de 2.000 Hz e com acurácia de $\pm 0,25\%$. Sabe-se que, tanto a faixa de operação quanto o tempo de resposta dos sensores utilizados são incapazes de adquirir valores extremos gerados pelo fenômeno da cavitação, que segundo Henn (2001) podem variar de 60 a 200 MPa em frequências de 10 a 180 KHz. Portanto, a análise dos dados é descrita em valores médios de pressão devido, as limitações impostas pela instrumentação disponível para a realização desse estudo.

Somente em caráter ilustrativo, são apresentadas na Figura 5-2 e na Figura 5-3 amostras das séries de pressões instantâneas coletadas nas

posições 1 e 2 com o objetivo demonstrar as variações existentes entre os sinais coletados para as demandas relativas de ar ensaiadas.

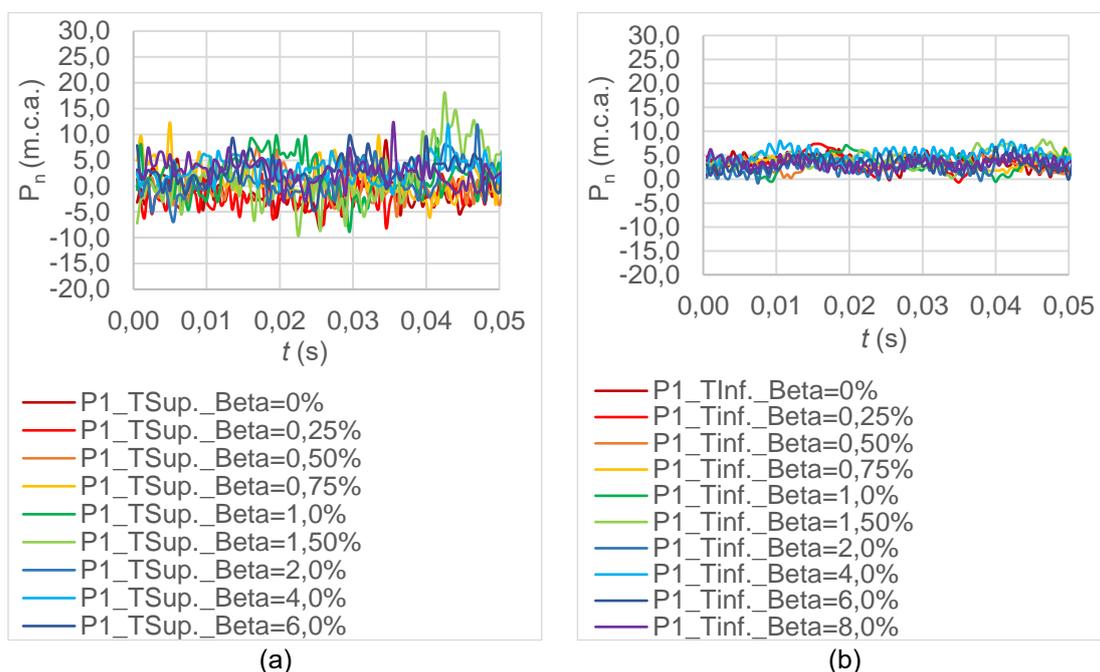


Figura 5-2: Pressões instantâneas adquiridas na Posição 1, no intervalo $0 < t < 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes demandas relativas de ar (Beta).

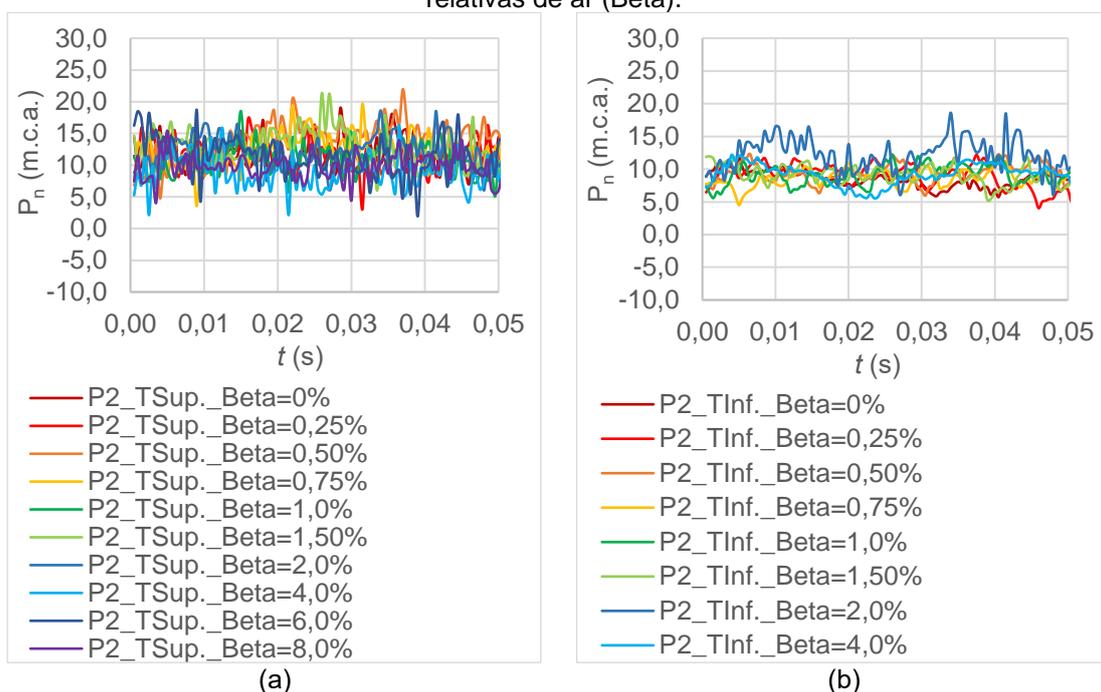


Figura 5-3: Pressões instantâneas adquiridas na Posição 2, no intervalo $0 < t < 0,05s$, na parte superior (a), e; inferior do dispositivo de cavitação (b), para diferentes demandas relativas de ar (Beta).

Foram verificadas diferenças de comportamento entre as pressões instantâneas registradas no teto (TSup.) e na base (TInf.) do dispositivo, sendo as pressões na parte inferior da máquina de menor amplitude (Figura 5-2b e Figura 5-3b) do que as encontradas na parte superior da máquina (Figura 5-2a

e Figura 5-3a). Esse comportamento corrobora com o esperado, uma vez que as perturbações registradas pelos sinais de pressão foram superiores exatamente na região onde os danos por cavitação foram observados durante as investigações com os corpos de prova em concreto, a serem apresentadas no item 5.2 - *Danos no Concreto*.

Através das séries de pressões instantâneas foram determinados os valores médios para cada condição de ensaio. Os resultados extraídos foram analisados em função das vazões de ar inseridas no escoamento, bem como seu comportamento em relação a disposição dos transdutores na máquina de cavitação (Figura 5-4).

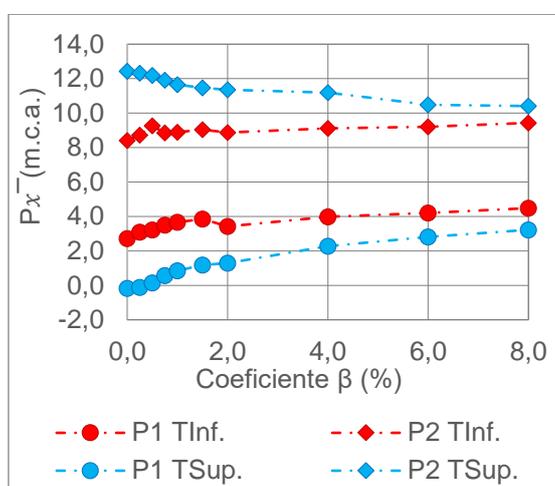


Figura 5-4: Resultados das pressões médias ($P\bar{x}$) para os diferentes β , dispositivo de cavitação do LOH

O aumento da quantidade de ar presente no escoamento resultou no acréscimo das $P\bar{x}$ na posição 1, no teto (TSup.) e na base (TInf) (Figura 5-4a), e na posição 2 na base da máquina de cavitação. Pode-se destacar que na P1 TSup., verificou-se os maiores acréscimos de $P\bar{x}$ de -0,173 para 1,293 m.c.a., comportamento que fomenta a afirmativa de que adições de ar, mesmo em baixas demandas relativas (< 2,0%) podem restringir as circunstâncias que promovem o fenômeno da cavitação, através do aumento das pressões médias negativas.

Obviamente que, esta análise está alicerçada a partir de valores médios de pressão, sendo extremamente necessário o estudo de flutuações de pressões e de pressões instantâneas representativas do escoamento neste dispositivo de cavitação, uma vez que o processo físico de implosão das cavidades de vapor gera pressões negativas de baixíssima ocorrência.

Em contrapartida, as pressões médias extraídas pelo transdutor P2 TSup., descreveram reduções significativas em seus valores médios, de 12,42 m.c.a. para 10,49 m.c.a. até a demanda relativa de ar de 6,0%, diferentemente do encontrado nos valores adquiridos pelos demais sensores (Figura 5-4a).

Devido as similaridades construtivas entre os dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR, foram realizadas comparações entre as características do escoamento, considerando a inserção de ar e as pressões médias em ambas as instalações experimentais (Figura 5-5).

A Figura 5-5 apresenta as pressões médias identificando em $d = 0$ cm o ponto de maior velocidade média do escoamento ($\cong 30,0$ m/s) em ambos os dispositivos tipo *Venturi*, coincidindo as seções de formação das bolhas de vapor nas duas máquinas de cavitação. No sistema do USBR foram extraídas as pressões médias em 10 (dez) pontos no teto e ao longo do dispositivo, sendo dois deles (P1 e P10) utilizados somente para o controle hidráulico do experimento (pressões à montante e à jusante do dispositivo de cavitação).

As demandas relativas de ar utilizadas no USBR foram de 0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95 e 2,25%, ao passo que no LOH foram verificadas as demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%. As demandas de ar superiores a 2,0% foram verificadas no LOH em caráter investigativo, e embasadas a partir dos valores considerados por Gal'perin (1971) que apresentou em seus estudos limites para a ocorrência (ou não) de danos por cavitação através de escoamentos com a presença de 2,0; 4,0 e 8,0% de ar.

As pressões médias registradas pelos sensores P1, posicionados no teto e na base do dispositivo (P1_TSup. e P1 TInf. Respectivamente), foram inferiores as expressas pelo transdutor instalado no P6 do sistema do USBR e pelo P2 (TSup. e TInf.). Os valores médios em P1_TSup. variaram de -0,173 a 1,293 m.c.a. e na P1_TInf. de 2,724 a 3,426 m.c.a. para as demandas relativas de ar de 0 e 2,0%. Enquanto que, as pressões médias no dispositivo de cavitação do USBR, no P5 alteraram de - 2,248 a - 1,833 m.c.a. e no P6 de 9,296 a 6,620 m.c.a. para as $\beta = 0$ e 2,25% (Figura 5-5).

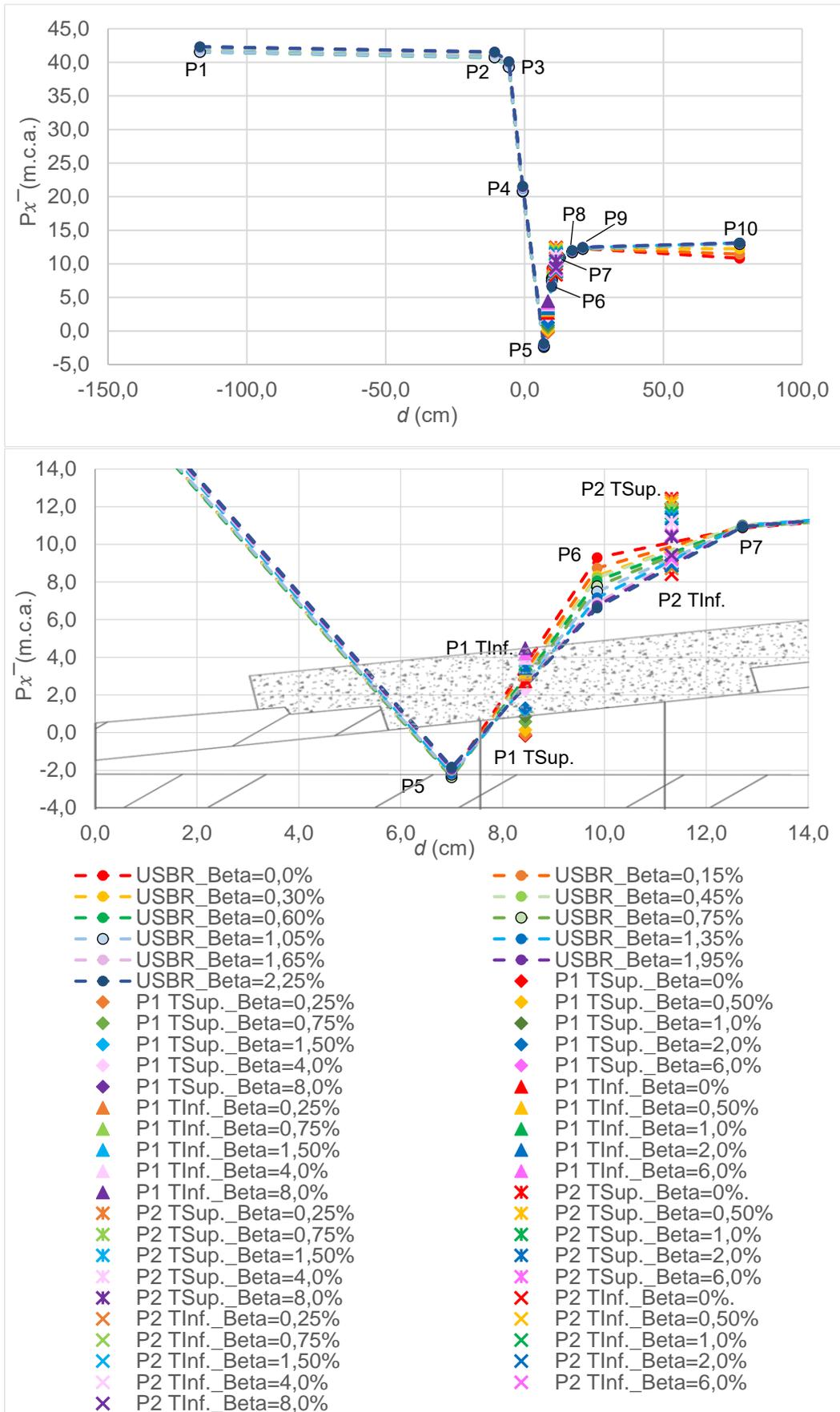


Figura 5-5: Comportamento das pressões médias ao longo dos dispositivos de cavitação, consideração a distância da seção de controle ($d=0$ cm), dados do USBR e LOH.

Pode-se observar na Figura 5-5 que os pontos P1 ao P5 e P7 ao P9 não expressam variações significativas das pressões médias com a inserção de ar no escoamento, esse fato pode ser justificado devido ao distanciamento dos sensores de pressão da zona de colapso das cavidades de vapor.

Ao ser avaliada a dinâmica do escoamento ao logo da instalação experimental do USBR é possível afirmar que, por se tratar de um escoamento bifásico (ar + água), as zonas de menor pressão acabam por favorecer a expansão do ar adicionado ao escoamento. Conseqüentemente, a própria redução de pressão do escoamento é responsável por intensificar o efeito de amortecimento das bolhas de ar, que quando expandidas exercem maior ação sobre as pressões médias. Análogo a isto, nos trechos onde a pressão local do escoamento é superior aos 10,0 m.c.a. há redução dessas bolhas de ar que mesmo em altas concentrações não ocasionam influências diretas as pressões médias nos pontos P1 ao P5 e P7 ao P9 (Figura 5-5).

Quando avaliados os pontos P5 e P6 (USBR) e os pontos P1 (TSup. e TInf.) e P2 (TSup. e TInf.) do LOH/UFRGS, todos inseridos entre o início e o fim da zona de formação do fenômeno da cavitação, observam-se acréscimos de pressão nos valores médios a medida em que há o distanciamento dos sensores da seção de maior velocidade em $d = 0\text{cm}$. No trecho entre 7,0 cm e 12,0 cm é observada uma inversão de comportamento dessas pressões quando analisadas em relação aos demais pontos de medição do dispositivo do USBR, sustentando a existência de uma região bem delimitada de ação do fenômeno em estudo (Figura 5-5).

Estando os sensores P1, do teto e da base, dispostos em um local de principal impacto das implosões das bolhas de vapor formadas, entendem-se que a influência do ar se tornou maior neste trecho, aumentando assim as pressões médias em resposta a presença de ar no sistema cavitante. O comportamento semelhante identificado no sensor P2 TInf. possibilita inferir a existência de uma possível segunda zona de impacto das bolhas de vapor, de menor intensidade, em $d = 11,32\text{ cm}$ na base do dispositivo do LOH.

Notadamente, as pressões determinadas pelos sensores P6 (USBR) e P2 TSup. (LOH/IPH) identificaram regiões de redução dos valores médios de pressão com a adição de ar ao escoamento. Arbitrariamente aos demais transdutores, os resultados encontrados podem ser indicativos da existência de

áreas onde o aumento da pressão circundante reduz os efeitos das bolhas de ar adicionados ao sistema. Além disso, há a possibilidade de neste trecho não haver concentrações de cavidades de vapor suficientes que ao implodirem pudessem refletir alterações nos registros das pressões médias de mesma ordem das encontradas nos demais transdutores avaliados (Figura 5-5).

Tendo em vista a proximidade espacial dos pontos P5 ($d = 7,0$ cm) e P6 ($d = 9,86$ cm) do USBR, e os pontos P1 ($d = 8,45$ cm) e P2 ($d = 11,32$ cm) do LOH, caso fossem instalados no mesmo dispositivo de cavitação, optou-se por avaliar separadamente os resultados das pressões médias extraídos nesses pontos considerando as demandas relativas de ar de 0 a 2,25% no USBR e de 0 a 8,0% no LOH (Figura 5-6).

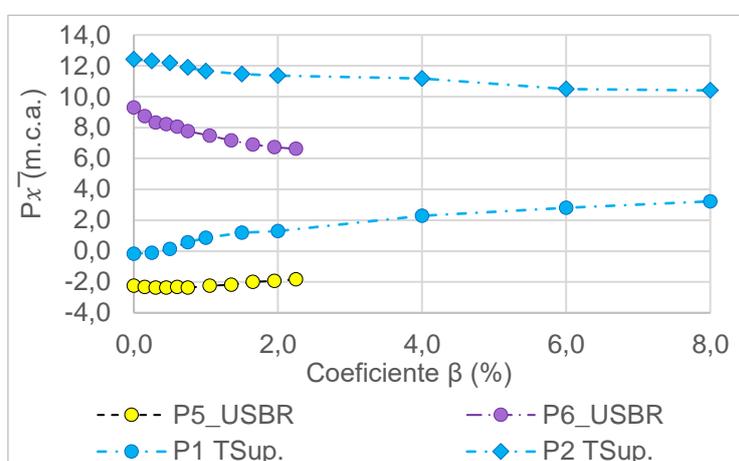


Figura 5-6: Resultados das pressões médias obtidos para diferentes demandas relativas de ar, dos sensores utilizados pelo USBR e LOH.

Na Figura 5-6 se observa que, em ambos os dispositivos, as maiores variações de pressão média com o acréscimo de ar se concentraram principalmente até a demanda relativa de ar de 2,0%. Nos transdutores P5 e P1 TSup., instalados nas distâncias de 7,0 e 8,45 cm da seção de maior velocidade, registraram aumentos nas pressões médias, permitindo afirmar, novamente, que na região de implosão das cavidades de vapor há um desfavorecimento das condições que propiciam o fenômeno da cavitação através da inserção de ar no fluxo.

Conforme há o distanciamento dos sensores mais para jusante, foram verificadas reduções das pressões médias nos pontos P6 ($d = 9,86$ cm) e P2 TSup. ($d = 11,32$ cm), sendo a maior queda registrada pelo transdutor P6 do

USBR de 9,29 m.c.a. para 6,2 m.c.a. através da adição dos mesmos 2,0% ar avaliado anteriormente (Figura 5-6).

Para as demandas relativas de 4,0; 6,0 e 8,0% verificadas no sistema do LOH/UFRGS não foram constatados aumentos das pressões médias no ponto P1 ou reduções ponto P2, fornecendo indicativos de que inserções de ar em volumes maiores do que 2,0% podem não produzir ganhos significativos adicionais na proteção de estruturas hidráulicas contra os efeitos do fenômeno da cavitação. Evidentemente que, essa observação é traçada pelo comportamento os valores médios de pressão do escoamento aerado, e para as mesmas condições de ensaio consideradas nessa pesquisa, sendo ainda necessários estudos que envolvam a análise das pressões instantâneas e flutuantes e os efeitos ocasionados para as diferentes relações de ar e água verificados (Figura 5-6).

Com o intuito de demonstrar ainda as diferenças existentes entre as pressões médias estimadas a partir dos sensores P1 e P2 (superiores) do LOH/UFRGS e os pontos P5 e P6 do USBR, foram determinados os índices de cavitação (σ) a partir das velocidades médias de referência de ambos os sistemas. Os resultados dos índices de cavitação são apresentados na Figura 5-7 assim como suas comparações com os limites dos índices críticos (σ_c) definidos por Falvey (1990; 1982); Ball (1982) e Arndt (1977).

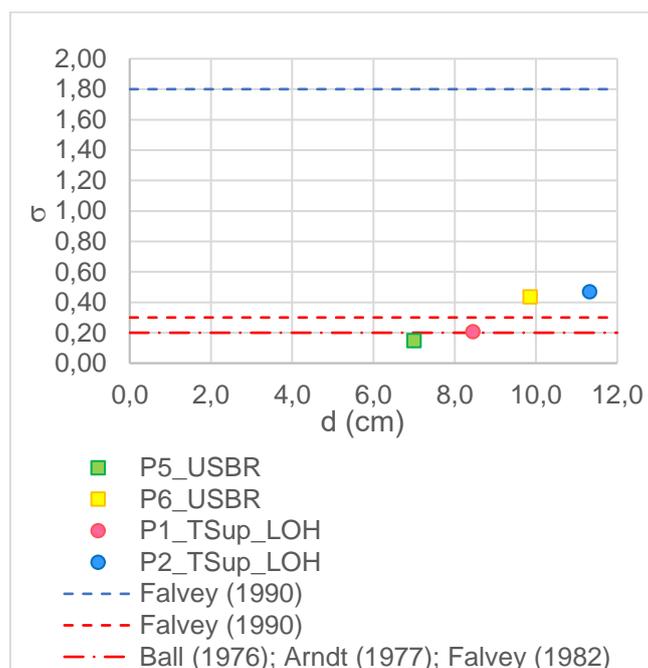


Figura 5-7: Comparativo entre os índices de cavitação estimados para os dispositivos de cavitação do LOH e do USBR.

Os índices de cavitação resultantes, expressos na Figura 5-7, indicam o crescimento das pressões médias a medida em que há o distanciamento da zona de formação das cavidades em $d = 0\text{cm}$, corroborando com a análise realizada anteriormente para os dados das pressões médias apresentados na Figura 5-5.

Os resultados obtidos para os σ foram de 0,14; 0,21; 0,43 e 0,47, os quais mostraram um aumento gradual, mas não superior ao limite máximo de 1,80 definido pelos estudos de Falvey (1990). Além disso, se pode observar que, com exceção dos transdutores P2_TSup do LOH/UFRGS e P6 do USBR, nos demais sensores os σ foram inferiores ao σ_c de 0,30 e próximos ao σ_c de 0,20 estabelecido por Ball (1982); Arndt (1977) e Falvey (1982) como parâmetro indicativo das condições hidráulicas a serem evitadas em qualquer estrutura hidráulicas quando submetida a escoamentos de altas velocidades.

Em suma pode-se concluir que, a evolução das pressões médias ao longo de ambos os dispositivos de cavitação (USBR e LOH/UFRGS), mesmo com as diferenças de posicionamento dos sensores e de adição de ar ao escoamento, demonstrou a comportamento hidráulico semelhante entre as duas máquinas de cavitação, permitindo também verificar o limite espacial da zona de implosão das cavidades de vapor no interior desses dispositivos, bem como, a correlação entre a pressão média do escoamento e a presença de ar no sistema.

5.1.2 Análise de Vibrações – Dispositivo LOH

Por meio das vibrações e eventuais interferências ocasionadas ao sistema pela ocorrência das implosões das cavidades de vapor, próximas as paredes internas do dispositivo de cavitação, serão descritos a seguir os resultados e considerações acerca das acelerações resultantes adquiridas durante as diferentes condições de ensaio no LOH.

Esperasse ainda, em caráter excepcional, detectar possíveis interferências nos sinais dos acelerômetros que venham a justificar, de maneira indireta, a ocorrência das pressões instantâneas de 1 MHz sem representatividade física adquiridas no dispositivo de cavitação do USBR.

A análise das acelerações resultantes serão abordadas através dos seguintes itens : 5.1.2.1 Vibrações – Escoamentos com distintas vazões de água, e; 5.1.2.2 Vibrações – Escoamento com diferentes concentrações de ar.

5.1.2.1 Vibrações – Escoamentos com distintas vazões de água.

As vibrações transmitidas ao sistema pelo efeito das vazões de água ensaiadas foram verificadas através das aquisições dos sinais de aceleração no sentido do eixo “z”, perpendicular à superfície superior do dispositivo de cavitação e a 8,45 cm de distância da seção de referência da máquina de cavitação do LOH em $d=0$ cm (Figura 4-3).

Os acelerômetros foram orientados de maneira que acelerações positivas indicassem vibrações oriundas de esforços de compressão do fluido em relação as paredes internas do dispositivo cavitante. Enquanto que, valores negativos, poderiam ser atribuídos a ações de tração causadas pela implosão das cavidades de vapor no interior do conduto metálico (Figura 5-8). As vazões e velocidades ensaiadas são descritas na Tabela 4-4 abaixo.

Tabela 4-4: Características gerais dos ensaios de aceleração, para escoamentos com diferentes vazões de água.

Q_w (l/s)	V^* (m/s)
0,0	0,0
25,7	12,4
33,1	16,1
35,2	17,0
37,0	17,9
38,7	18,7
41,9	20,3
45,3	21,9
50,3	24,4
57,3	27,8
59,0	28,6
64,3**	31,2

* As velocidades consideradas nos ensaios correspondem as velocidades médias determinadas na seção contraída do dispositivo de cavitação.

** Vazão de ocorrência do fenômeno da cavitação no dispositivo do LOH.

A Figura 5-8 expressa o comportamento dos sinais referentes às acelerações atuantes no eixo “z” para as diferentes vazões de água analisadas até o instante $t=0,10$ s. De acordo com os sinais obtidos podemos verificar que há um aumento significativo das acelerações a medida em que ocorrem acréscimos nas vazões observadas. Para as vazões superiores a 41,91 l/s foram registrados picos de acelerações acima de $500,0$ m/s^2 , em contrapartida, vazões inferiores a $Q_w = 38,65$ l/s as variações de aceleração se tornam menos evidentes e mais próximas entre si (Figura 5-8).

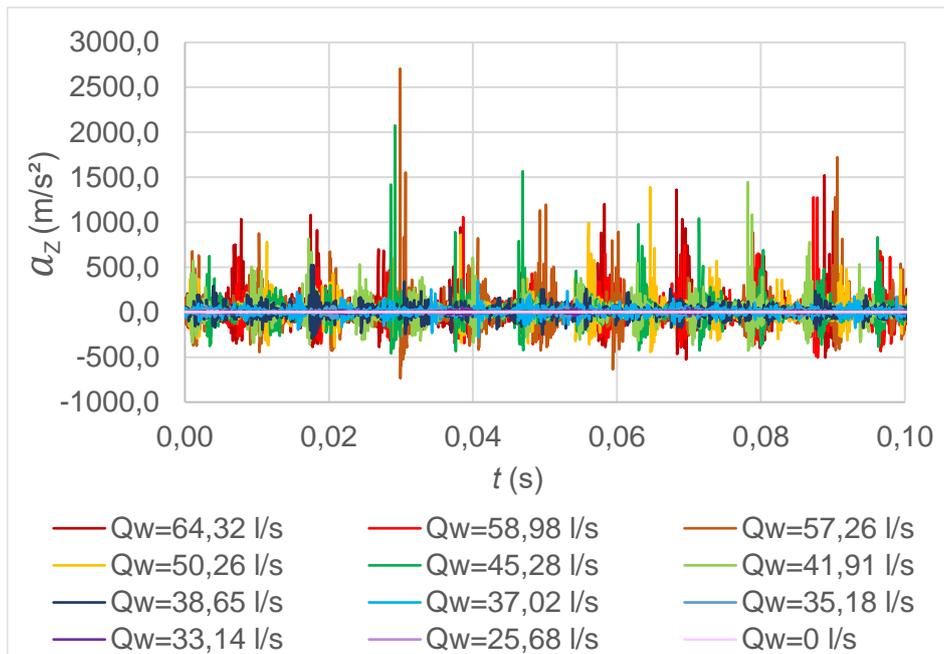


Figura 5-8: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos considerando diferentes vazões de água sem inserção de ar no escoamento.

Cabe ressaltar que, o ensaio sem a presença de água no sistema ($Q_w = 0$ l/s) foi realizado somente para obtenção de um sinal de referência do acelerômetro, de forma a evidenciar que o equipamento não está sob efeito de eventuais ruídos ou interferências externas ao dispositivo que gerem influências aos sinais aquisitados durante os demais ensaios.

Das séries amostrais, aquisitadas a uma frequência de 32 kHz, foram determinados os principais parâmetros estatísticos das acelerações sendo eles: média (\bar{x}), desvio padrão (ν_x), assimetria (A), curtose (K), máximos e mínimos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-1 a seguir.

Tabela 5-1: Parâmetros estatísticos das séries amostrais de acelerações extraídas para os ensaios com diferentes vazões de água, dispositivo LOH.

Q_w (l/s)	\bar{x} (m/s ²)	ν_x (m/s ²)	A	K	Máximo (m/s ²)**	Mínimo (m/s ²)**
0,0	2,75	0,7	0,40	9,7	10,2	-9,2
25,7	2,75	0,7	0,50	15,1	10,9	-10,8
33,1	2,76	8,0	0,03	11,7	154,5	-116,8
35,2	2,75	11,5	0,04	5,6	117,8	-104,7
37,0	2,79	41,8	0,01	4,4	345,7	-285,4
38,7	2,79	64,9	0,34	6,6	867,6	-416,3
41,9	2,59	98,4	1,38	16,3	1713,0	-488,2
45,3	2,75	117,8	1,81	20,1	2080,9	-560,2
50,3	2,97	125,5	2,27	24,6	2306,1	-540,9
57,3	2,87	137,2	2,21	20,5	2705,2	-739,7
59,0	3,01	138,4	2,03	17,0	1834,2	-592,7
64,3*	2,98	154,8	2,56	23,5	2840,4	-631,9

Obs.:* Vazão de ocorrência do fenômeno da cavitação no dispositivo do LOH.

** Os valores máximos e mínimos aqui apresentados foram obtidos após terem sido subtraídos de cada valor de aceleração, da série original, a média do conjunto amostral avaliado.

Em se tratando de um fenômeno estocástico de eventos aleatórios, a cavitação e os efeitos ocasionados ao escoamento resultaram em acelerações de comportamento estatístico semelhante. Com o aumento das vazões e, conseqüentemente, das vibrações impostas ao dispositivo, as séries amostrais distanciam-se do padrão de distribuição normal comprovado a partir do aumento das assimetrias determinadas para as $Q_w > 38,7$ l/s (Tabela 5-1).

A medida em que há o acréscimo de velocidade as vibrações são intensificadas apresentando aumento das flutuações e, conseqüentemente dos desvios padrão estimados. Quando avaliados os valores máximos e mínimos das séries amostradas foram identificados aumentos das acelerações máximas e redução dos valores mínimos conforme o fenômeno da cavitação vem sendo plenamente desenvolvido no interior do dispositivo (Tabela 5-1).

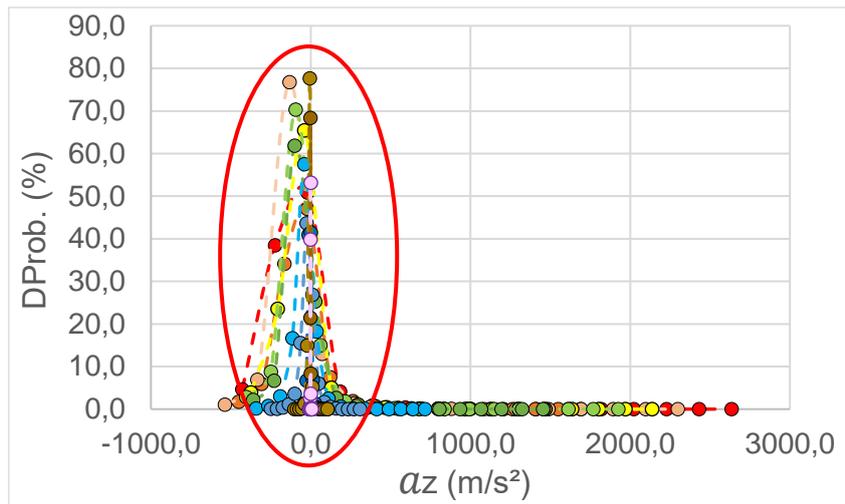
Por ser um sinal senoidal, esperava-se que as médias das acelerações não variassem entre si, independentemente da vazão analisada, sendo essas próximas à zero. Porém, apesar de relativamente semelhantes, as médias apresentadas variaram de 2,59 a 3,01 m/s², demonstrando que o início de cada sinal não parte de um valor nulo de aceleração possivelmente devido a vibração do próprio conjunto motobomba. Desta forma, os valores médios obtidos foram extraídos da série original das acelerações de maneira a que as estatísticas

descritas na Tabela 5-1 não considerassem esses acréscimos constantes de aceleração em suas amostras.

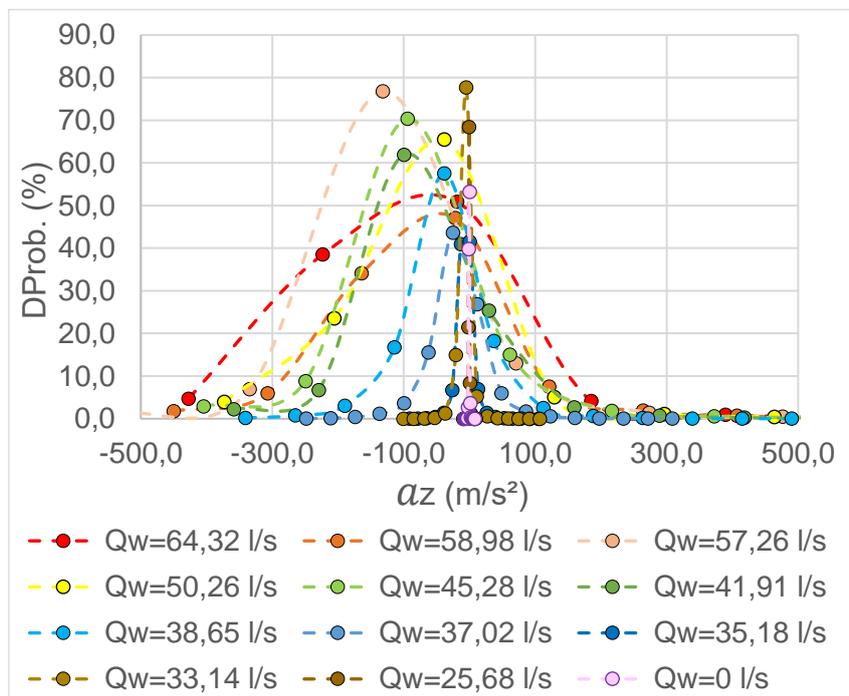
Na Figura 5-9 são expressas as curvas de densidade de probabilidade para as amostras de aceleração obtidas a partir das diferentes vazões de água. Nela podemos avaliar o deslocamento das faixas de aceleração mais representativas de cada ensaio, bem como, sua probabilidade de ocorrência de acordo com o acréscimo de fluxo no interior do aparato experimental.

As curvas de densidade de probabilidade extraídas para as Q_w de 58,98 a 64,32 l/s apresentaram comportamentos distintos das demais amostras avaliadas, tendo suas acelerações representativas inferiores a probabilidade de ocorrência de 53% (Figura 5-9).

Para a vazão máxima de 64,32 l/s, em que o fenômeno da cavitação está plenamente desenvolvido, as acelerações de maior probabilidade de ocorrência concentram-se na faixa de -100,0 a 0 m/s². Em geral, conforme há redução das vazões de água os picos das curvas de densidade de probabilidade se deslocam para acelerações cada vez menores em módulo, tornando-se mais próximos ao comportamento apresentado pelas curvas de distribuição extraídas para as Q_w de 33,14; 25,68 e 0 l/s (Figura 5-9b).



(a)



(b)

Figura 5-9: Gráfico da função densidade de probabilidade ($DProb$) x aceleração no eixo "z", considerando diferentes vazões de água (a), e; detalhe das curvas de densidade obtidas para as acelerações (b).

Avaliando as velocidades do fluxo, na seção contraída do dispositivo tipo *Venturi*, e os desvios padrão das acelerações para as vazões ensaiadas foi possível identificar a existência de 3 (três) distintas zonas de comportamento do escoamento na máquina de cavitação do LOH (Figura 5-10).

Os pontos de inflexão, caracterizados pelas velocidades de 16,1 e 23,2 m/s, nos permitem classificar a cavitação como sendo: *i) Cavitação incipiente*, onde há o início de formação das cavidades de vapor baixas concentrações sem a ocorrência de danos perceptíveis; *ii) Cavitação de bloqueio ou plenamente desenvolvida*, onde o efeito da implosão das bolhas torna-se evidente, gerando

possíveis danos e/ou desgastes as superfícies de concreto quando expostas a mesmas condições de ensaio no dispositivo de cavitação em questão, e; *iii) Zona de transição*, compreendida entre as velocidades citadas anteriormente, onde não foram percebidas mudanças de comportamento do escoamento somente um crescente aumento dos desvios padrão as amostras de acelerações aquisitadas na superfície do aparato experimental (Figura 5-10).

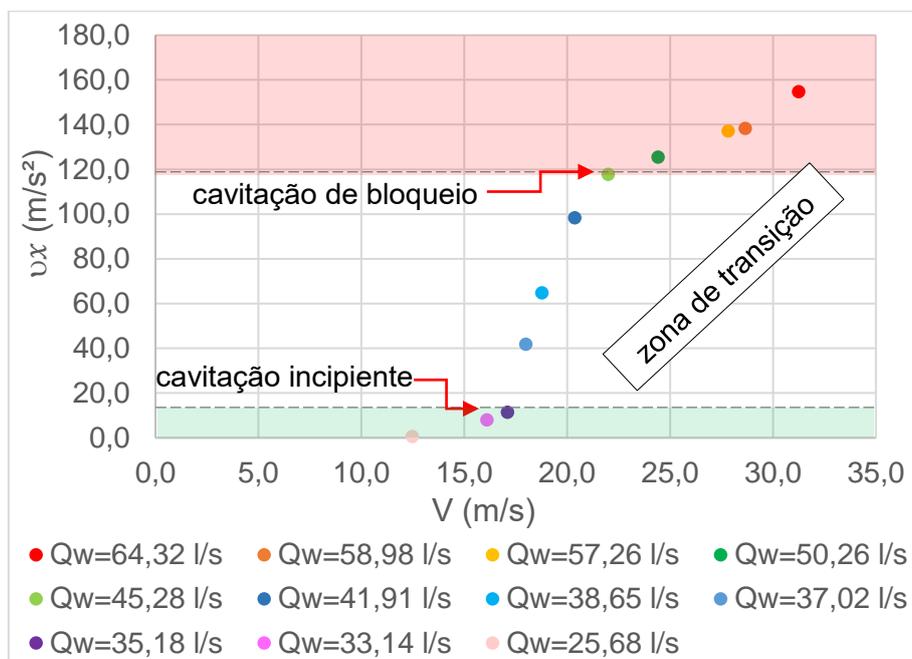


Figura 5-10: Desvios padrão das acelerações no eixo “z” extraídos para as velocidades de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH.

A determinação das zonas de alteração do escoamento foi realizada de acordo com as especificidades da máquina de cavitação do LOH. Devido às limitações construtivas desse sistema indica-se a realização de estudos complementares em outros dispositivos de cavitação, de forma a adicionar maiores faixas de velocidade do fluxo do que as apresentadas na Figura 5-10, ou seja, $V > 30,0$ m/s . Os limites de velocidade identificados como mudanças de comportamento do fenômeno da cavitação foram alicerçados conjuntamente com as percepções cognitivas de ruído associadas a cada vazão e, conseqüentemente, a cada velocidade do escoamento considerada (Figura 5-10).

O início da cavitação incipiente, apresentado na Figura 5-10 como sendo entre as velocidades médias de 16,0 a \cong 17,0 m/s, é próximo aos limites mínimos de 12,0 m/s definidos por Ball (1959) e de 15,0 m/s indicados por Ball (1976); Falvey (1990). Os autores associam esses limites como valores aceitáveis para

a não ocorrência de danos pela cavitação, já atuante em superfícies hidráulicas de concreto com presença de irregularidades que não ultrapassem a relação de declividade de 20:1. A mesma congruência também ocorre quando comparamos a velocidade média máxima de 23,0 m/s, definida como ponto de bloqueio do fenômeno no dispositivo de cavitação, com os limites máximos de 25,0 e 30,0 m/s apresentados por Ball (1959) e Falvey (1990) que afirmam ser a partir dessas velocidades onde podem ser registrados os maiores danos as superfícies de vertedouros de calha lisa e descarregadores de fundo de alta queda (Figura 5-10).

A distinção das zonas de comportamento do escoamento, gerada por meio dos desvios padrão das acelerações e das velocidades médias atribuídas aos acréscimos de Q_w , nos possibilitou concluir que, há uma mudança clara de atuação do fenômeno da cavitação diretamente influenciada pelo acréscimo de velocidade no interior do dispositivo do LOH. E, que os limites de velocidades vinculados a cavitação incipiente, de bloqueio e a zona de transição do escoamento também podem ser utilizados para futuras investigações sobre os efeitos causados em superfícies de concreto quando condicionadas aos diferentes estágios do fenômeno da cavitação.

5.1.2.2 Vibrações – Escoamento com diferentes concentrações de ar.

Como segmento importante desta pesquisa, a inserção de ar no escoamento, como ferramenta de mitigação dos efeitos da cavitação, será abordada como um dos principais aspectos a serem considerados no controle de danos em estruturas hidráulicas de concreto.

Previamente a isto, foram avaliadas as interferências ocasionadas pelo acréscimo de ar no escoamento a dinâmica de formação implosão das cavidades de vapor através da análise das acelerações resultantes transferidas ao aparato experimental.

Sendo assim, serão apresentados os sinais das acelerações aquisitadas no eixo “z” para a vazão de ensaio de 64,32 l/s considerando as demandas relativas (β) de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0% de ar, suas análises estatísticas e seus comportamentos em relação ao ensaio sem a presença de ar no sistema.

Na Figura 5-11 são descritos os sinais das acelerações aqisitadas até o instante $t = 0,10$ s, coletados a uma frequência de 32,0 kHz durante um tempo total de ensaio de 2 segundos. Nela podemos observar que há mudança de comportamento entre os sinais das acelerações a medida em que ocorre a incorporação de ar no escoamento, tendo os maiores picos de aceleração registrados nos sinais aqisitados nas $\beta < 0,75\%$.

O ensaio realizado, sem a presença de ar no sistema ($\beta=0\%$), demonstrou maiores variações em seu sinal do que os demais ensaios verificados. Nessa condição o impacto das bolhas de vapor na superfície interna do dispositivo de cavitação ocorre de forma direta, sem o amortecimento gerado pela presença de ar no escoamento (Figura 5-11).

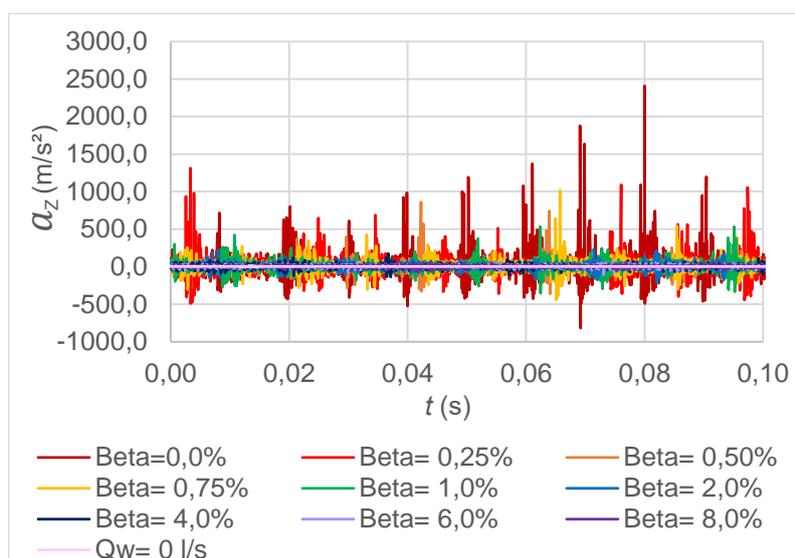


Figura 5-11: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos até o instante $t = 0,10$ s, considerando a vazão de $Q_w = 64,32$ l/s e as demandas relativas de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 % de ar no escoamento.

Na tentativa de detectar quaisquer interferências externas no processo de aquisição das vibrações inicialmente realizou-se a aquisição de uma série amostral com o acelerômetro sem escoamento ($Q_w = 0$ l/s) e sem a inserção de ar no interior do dispositivo de cavitação. Por meio dessa amostra não foram constatadas alterações que pudessem modificar a resposta do equipamento durante os demais ensaios, conforme o expresso na Figura 5-11.

A Figura 5-12 apresenta separadamente os sinais das acelerações extraídos dos ensaios com diferentes percentuais de ar, permitindo a visualização de cada condição ensaiada até o instante $t = 0,10$ s. Para os Betas de 0 (Figura 5-12a); 0,25 (Figura 5-12b) e 0,50 % (Figura 5-12c) as acelerações

registradas foram predominantemente positivas, concentrando as maiores amplitudes, de -500,0 a 2300,0 m/s² para $\beta = 0\%$, e de -500,0 a 1300,0 m/s² para $\beta = 0,25\%$.

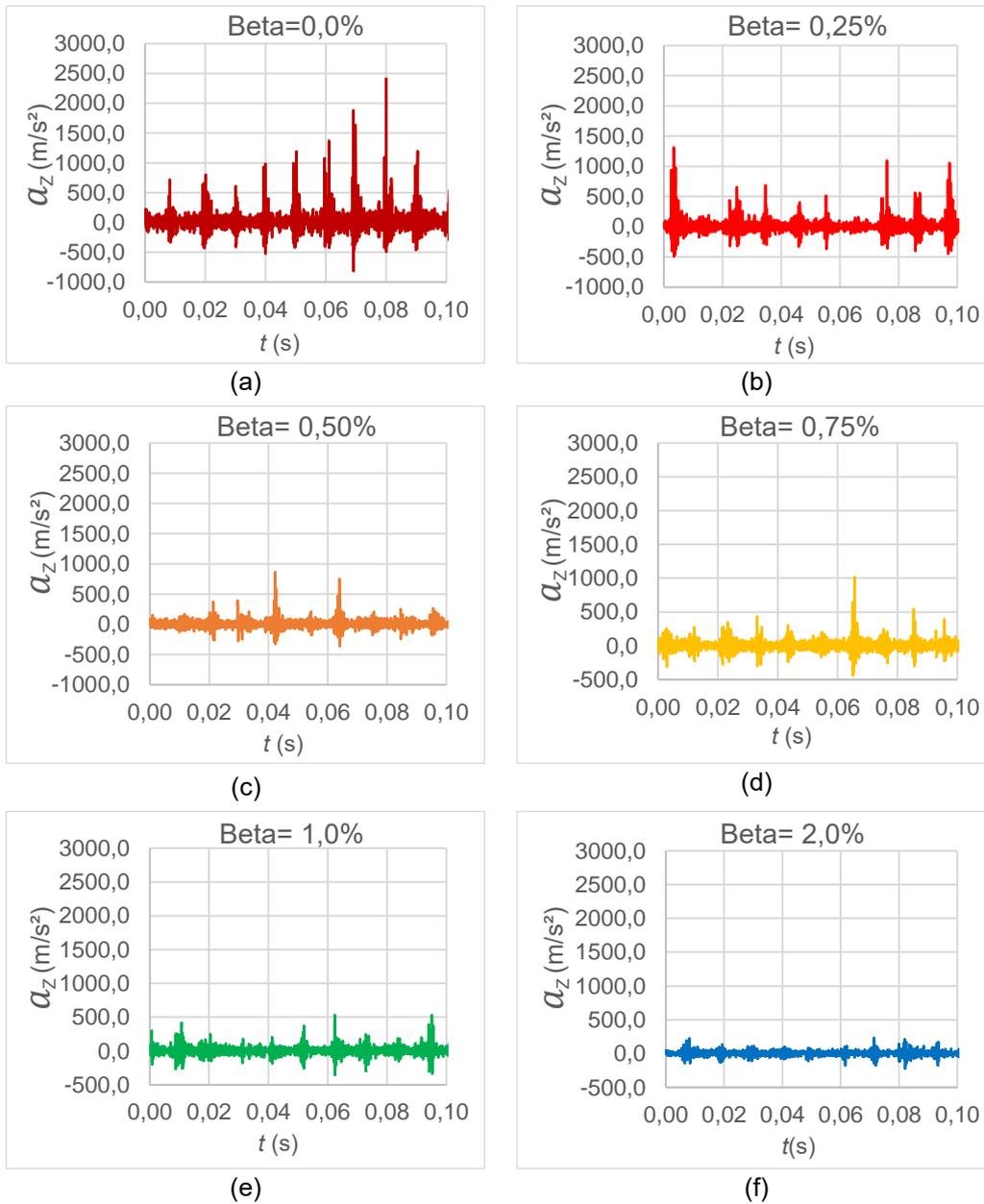
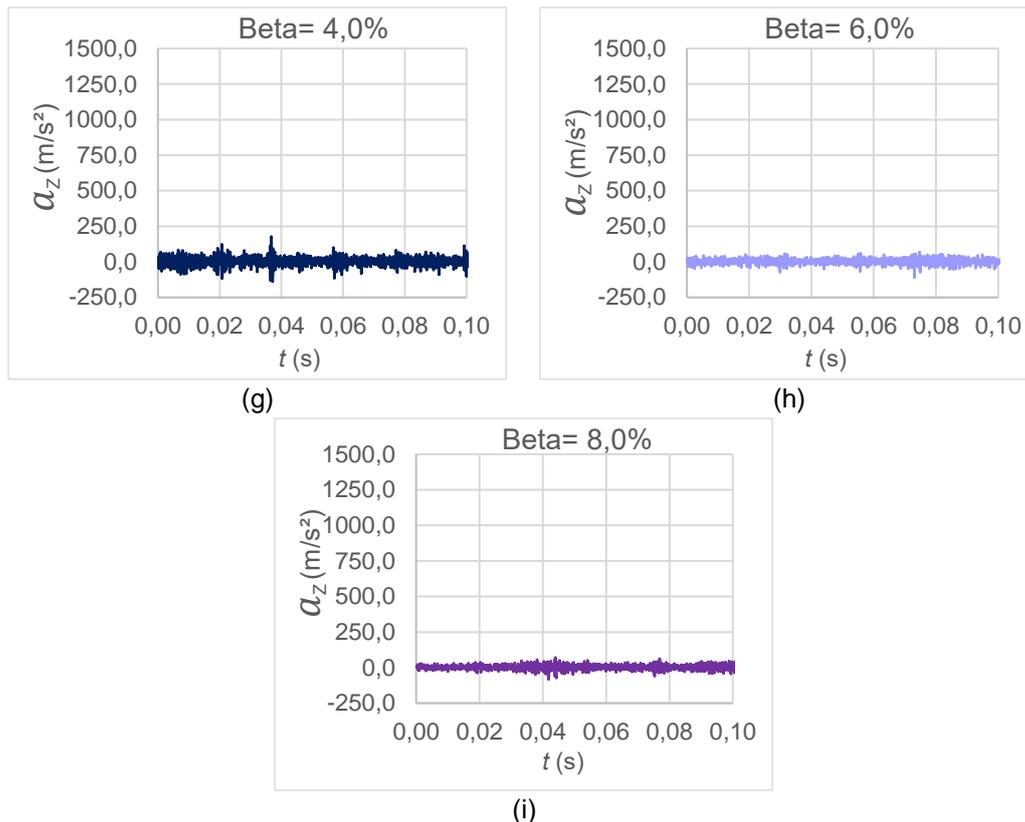


Figura 5-12: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos até o instante $t = 0,10$ s separados para cada demanda de ar avaliada, sendo de: 0 % (a); 0,25 % (b); 0,50 % (c); 0,75 % (d); 1,0 % (e); 2,0 % (f); 4,0 % (g); 6,0 % (h); e 8,0 % (i).



Continuação da Figura 5-12: Sinais das acelerações no eixo “z” obtidos até o instante $t = 0,10$ s separados para cada demanda de ar avaliada, sendo de: 0 % (a); 0,25% (b); 0,50 % (c); 0,75% (d); 1,0 % (e); 2,0% (f); 4,0% (g); 6,0% (h), e; 8,0 % (i).

A partir da demanda de 0,50% (Figura 5-12c) as vibrações ocasionadas pelo fenômeno da cavitação passam a ser suavizadas pelo aumento da presença de ar, tendo os valores máximos e mínimos cada vez mais próximos de acelerações no eixo “z” nulas.

As interferências vibracionais ocasionadas ao escoamento pelo colapso das cavidades de vapor foram reduzidas significativamente até $\beta = 2,0\%$ (Figura 5-12f). Os ensaios realizados com as demandas relativas de 4,0% (Figura 5-12g); 6,0% (Figura 5-12h) e 8,0% (Figura 5-12i) nos permitiram identificar que a adição de ar superiores a 2,0% não representam maiores vantagens quanto à redução de amplitude das acelerações registradas no dispositivo de cavitação.

Observando o desenvolvimento dos sinais das acelerações (Figura 5-12) pode-se concluir que: a inserção de ar no escoamento, além de reduzir as vibrações ocasionadas ao sistema pelo impacto das cavidades, também fornece indícios de que a incorporação de ar, mesmo em baixas concentrações, alteram as condições hidráulicas do escoamento, responsáveis por favorecer a cavitação, e conseqüentemente, a ocorrência de danos as estruturas de concreto.

Na Tabela 5-2 são expressos os resultados da análise estatística dos ensaios com as demandas relativas de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%, além do ensaio sem a presença de ar ou água no sistema ($Q_w = 0$ l/s e $\beta = 0\%$).

A Q_w fixada no início dos ensaios foi de 64,32 l/s (3311 rpm), porém à medida em que ocorreram as adições de ar no escoamento o fluxo de água apresentava reduções significativas em seus valores de vazão, variando de 61,7 a 64,1 l/s. Entendem-se que as leituras realizadas pelo medidor eletromagnético de vazão denotavam variações de leitura, mas todas dentro a precisão fornecida pelo equipamento, o que justificaria as alterações de 64,32 l/s para 64,1 l/s. Entretanto, ficou evidente que, as altas demandas relativas de ar ensaiadas reduziram as vazões de entrada de água, nos permitindo inferir que a inserção de ar no escoamento acaba por gerar localmente uma pequena perda de carga do fluxo pela mistura água + ar.

As maiores flutuações (ν_x) e os maiores valores de aceleração registrados foram apresentados nos ensaios de $\beta = 0$ e 0,25% de ar. Conforme há o acréscimo de ar no sistema, acima de 2,0%, os sinais das acelerações aproximam-se do comportamento de uma distribuição normal, principalmente para os ensaios realizados com 4,0; 6,0 e 8,0% de ar no escoamento (Tabela 5-2).

Tabela 5-2: Parâmetros estatísticos das acelerações obtidas dos ensaios com diferentes demandas relativas de ar, dispositivo do LOH.

β (%)	Q_w (l/s)	V (m/s)	\bar{x} (m/s ²)	ν_x (m/s ²)	A	K	Máximo (m/s ²)*	Mínimo (m/s ²)*
0,0	0	0,0	2,69	0,5	0,3	34,4	14,1	-10,8
0,0	64,1	31,1	2,65	155,5	2,5	25,4	3377,6	-820,9
0,25	64,0	31,1	3,06	116,9	1,8	18,2	1994,7	-533,7
0,50	63,9	31,0	2,76	87,2	1,2	13,7	1338,4	-470,8
0,75	63,8	31,0	2,76	78,6	0,9	10,9	1054,7	-506,3
1,0	63,8	31,0	2,75	65,9	0,8	12,0	1180,4	-439,8
2,0	63,4	30,8	2,73	45,9	0,2	6,3	556,7	-342,5
4,0	62,8	30,5	2,72	25,7	0,0	5,4	397,5	-302,2
6,0	62,1	30,1	2,71	19,4	0,1	5,9	306,8	-220,8
8,0	61,7	30,0	2,71	14,5	-0,1	0,7	90,1	-86,4

Obs.:* Os valores máximos e mínimos aqui apresentados foram obtidos após terem sido subtraídos de cada valor de aceleração, da série original, a média do conjunto amostral avaliado.

Os parâmetros estatísticos extraídos dos ensaios com as demandas relativas de 0,50; 0,75 e 1,0 % de ar apresentaram resultados próximos entre si, tendo unicamente como discrepância o comportamento dos valores de curtose e das acelerações máxima e mínima em $\beta = 0,75\%$ (Tabela 5-2).

Notadamente, a análise estatística das séries amostrais (Tabela 5-2), aqisitadas durante o tempo total de ensaio de 2 segundos, coincide com o apresentado na Figura 5-12, onde as maiores influências geradas aos sinais das acelerações são encontradas nas demandas relativas inferiores a 2,0%. Acima desse limite, não foram registradas maiores vantagens quando avaliadas as reduções das flutuações de aceleração, através dos desvios padrões, e conseqüentemente, e dos valores máximos das vibrações resultantes no dispositivo de cavitação.

De maneira análoga à análise realizada para os ensaios com distintas vazões de água, foram definidas as curvas de densidade de probabilidade para as amostras de aceleração extraídas a partir das diferentes demandas relativas de ar ensaiadas (Figura 5-13). As maiores faixas de acelerações ($> 2000,0 \text{ m/s}^2$) foram registradas no ensaio sem a presença de ar ($\beta = 0\%$) tendo sido associadas especificamente a probabilidade de ocorrência inferiores a 0,01% (Figura 5-13a).

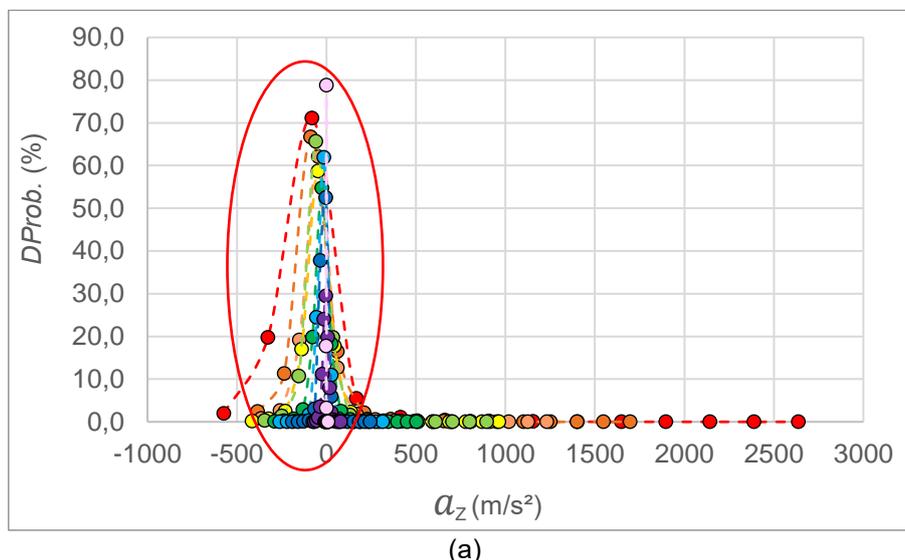
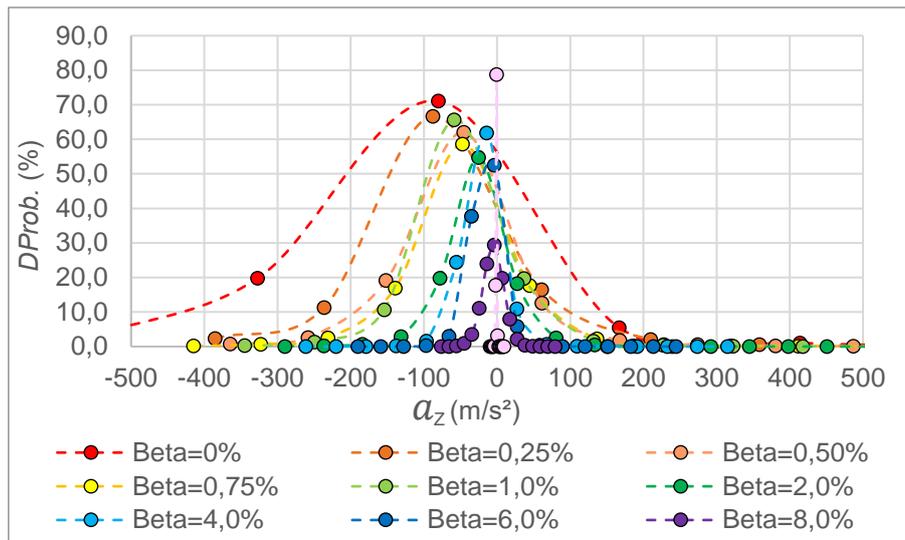


Figura 5-13: Gráfico da função densidade de probabilidade x aceleração no eixo "z", considerando diferentes demandas relativas de ar (a), e; detalhe das curvas de densidade obtidas para as acelerações obtidas (b).



(b)

Continuação da Figura 5-13: Gráfico da função densidade de probabilidade x aceleração no eixo "z", considerando diferentes demandas relativas de ar (a), e; detalhe das curvas de densidade obtidas para as acelerações obtidas (b).

Quando observada a distribuição geral das curvas de densidade de probabilidade, podemos identificar a existência da interação entre a inserção de ar no escoamento e a redução das acelerações máximas ocorridas nos ensaios. Com o acréscimo gradual de 0,25 a 8,0% de ar foram verificados deslocamentos significativos dos picos de maior probabilidade de ocorrência, definidos por acelerações superiores aos $-100,0 \text{ m/s}^2$, tornando as acelerações representativas menores que $-15,0 \text{ m/s}^2$ para $\beta \leq 2,0\%$ e mais próximas a zero para $\beta > 4,0\%$ (Figura 5-13a).

As acelerações de maior recorrência que tangenciam valores nulos nos fornecem indícios de que as vibrações, geradas pelo impacto das cavidades nas paredes do dispositivo de cavitação, podem ser totalmente eliminadas através da inserção $\beta > 6,0\%$. Porém, a utilização de demandas relativas de 0,75 a 2,0% de ar não devem ser descartadas, uma vez que provaram ser boas aliadas na redução dos efeitos da cavitação transferidos pelo escoamento ao aparato experimental (Figura 5-13b).

Devido ao fato de que grande parte das amostras de aceleração, extraídas para $\beta \leq 1,0\%$, serem valores negativos, ou seja, acelerações aquiridas no sentido negativo do eixo "z", nos permitem inferir que: as implosões das bolhas de vapor geram localmente uma possível zona com esforços de tração junto a superfície interna da máquina de cavitação.

Vale ressaltar que, as análises realizadas acerca do comportamento das acelerações e suas alterações em relação a adição de ar no escoamento, forneceram evidências “externas” das características hidráulicas do fenômeno. Visto que, a instalação dos acelerômetros ocorreu sobre um dispositivo metálico e rígido, sendo esses totalmente influenciados pela forma de fixação e contato com as paredes da máquina de cavitação. Sendo assim, devem ser considerados possíveis “amortecimentos” ou mesmo “adições” de aceleração nos sinais coletados junto ao dispositivo, inerentes ao tipo de instalação e aos equipamentos utilizados, porém impossíveis de serem quantificados de maneira direta e precisa por parte do operador.

5.1.3 Pressões Instantâneas (1 MHz) – Dispositivo de Cavitação USBR

Os resultados das pressões adquiridas a frequência de 1 MHz foram extraídos somente no dispositivo de cavitação do USBR, sendo aqui tratados como uma análise adicional pertinente das características de pressões extremas a serem encontradas em um dispositivo análogo ao desenvolvido no LOH.

Considerando os ensaios realizados com as demandas relativas de ar de 0; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 1,05; 1,35; 1,65; 1,95; 2,25; 3,40; 4,25; 5,10 e 8,50% e $Q_w = 60,0$ l/s foram então, extraídos os valores médios, máximos, mínimos, assimetria, curtose e desvios padrão para os dois transdutores (D_1 e D_2) utilizados pelo USBR.

A Tabela 5-3 expressa os parâmetros estatísticos definidos para ambos os sensores de pressão utilizados, estes instalados a 8,45 e 11,32 cm de distância da seção contraída do dispositivo de USBR. Trata-se, portanto, de resultados de pressões instantâneas extraídos diretamente da zona de implosão das cavidades de vapor, sendo as pressões resultantes também representativas do fenômeno da cavitação.

Os resultados apresentados na Tabela 5-3 demonstram que, assim como o encontrado na análise estatística das acelerações, o aumento das demandas relativas de ar no escoamento favoreceu a redução dos valores máximos e dos desvios padrão das pressões principalmente nas séries amostrais do sensor D_1 , mais próximo da seção de formação das bolhas de vapor.

Obviamente que, a análise estatística das pressões instantâneas, principalmente no que tange os valores mínimos das séries amostrais, identificou resultados de representatividade física improváveis, visto que pressões abaixo da pressão de vaporização da água não podem ser esperadas no fluido em questão (Tabela 5-3).

Ao passo que, os picos de pressões máximas estimados nessa análise encontram-se muito abaixo dos limites definidos por Henn (2001), de 60 a 200 MPa, e Tullis (1982), de $\cong 1035,0$ MPa, tendo sido registrado para na condição mais extrema de ensaio a pressão máxima de $\cong 32,0$ MPa ($\beta = 0\%$). Independentemente das diferenças existentes entre os objetos de estudo desses autores, bombas e hélices de embarcações, e o aparato experimental utilizado em laboratório durante essa pesquisa, entende-se que o fenômeno e o processo de colapso das cavidades de vapor sejam os mesmos. E, portanto, os picos de pressão encontrados deveriam “em tese” serem mais próximos dos que os registrados pelos transdutores do USBR.

Quando verificadas as assimetrias e curtoses descritas na Tabela 5-3, foi possível constatar que, o acréscimo de ar no sistema do USBR condicionou as pressões atuantes no interior da máquina a comportamentos cada vez mais próximos de uma distribuição estatística “normal”, tendendo a valores de assimetria e curtose de 0 e 3, respectivamente. (Tabela 5-3).

Os resultados definidos como valores médios das séries de pressões instantâneas de 1MHz devem ser desconsiderados da análise, sendo descritos na Tabela 5-3 somente em caráter de observação. Visto que os mesmos representam, indiretamente, a interação dos valores extremos (máximos e mínimos), os quais não expressam nenhuma representação física, ou ordem de grandeza mensurável do fenômeno.

Na análise estatística realizada foram constatadas alterações benéficas nos parâmetros que a compõem, especialmente para os coeficientes $\beta > 1,05\%$ e $2,25\%$, demandas essas amplamente difundidas nos estudos de Peterka (1953), Kudriashov *et al.*, (1983), May (1987), Gal’perin *et al.*, (1971), Dong (2007); Dong *et al.*, (2008); Mortesen (2020), dentre outros, como sendo o limite em que os efeitos da cavitação tornam-se significativamente reduzidos e passíveis de serem tolerados por parte da estrutura de concreto envolvida.

Tabela 5-3: Parâmetros estatísticos das pressões instantâneas dos sensores D₁ e D₂ para os ensaios com diferentes demandas relativas de ar, dispositivo do USBR.⁵

Sensor	β (%)	\bar{x} (m.c.a.)	Mínimo (m.c.a.)	Máximo (m.c.a.)	υ_P (m.c.a.)	A	K
D ₁	0.00	5.2	-663.1	3189.8	10.3	14.7	2949.7
	0.15	5.2	-546.7	1348.0	9.0	5.0	370.6
	0.30	5.3	-657.9	1817.2	8.8	7.6	855.0
	0.45	5.3	-1245.6	3241.0	8.4	13.6	4462.4
	0.60	5.3	-477.8	1132.5	8.2	3.1	199.4
	0.75	5.4	-210.9	878.2	7.9	2.7	119.4
	1.05	5.4	-395.0	1254.4	7.7	3.1	274.7
	1.35	5.5	-82.3	586.9	7.4	1.3	21.9
	1.65	5.5	-152.8	586.0	7.4	1.3	33.8
	1.95	5.6	-65.8	435.9	7.1	1.0	12.0
	2.25	5.6	-34.9	310.9	7.2	0.8	5.0
	3.40	5.6	-83.2	1159.2	7.3	2.3	206.9
	4.25	5.6	-240.9	896.5	7.2	1.6	83.2
	5.10	5.6	-23.7	143.5	6.6	0.7	3.4
8.50	5.6	-11.3	88.2	5.7	0.6	3.3	
Sensor	β (%)	\bar{x} (m.c.a.)	Mínimo (m.c.a.)	Máximo (m.c.a.)	υ_P (m.c.a.)	A	K
D ₂	0.00	4.6	-347.5	926.5	5.3	6.8	483.6
	0.15	4.7	-206.1	560.9	4.9	4.3	235.1
	0.30	4.7	-65.0	529.1	4.7	2.8	139.4
	0.45	4.7	-181.8	476.5	4.6	1.5	63.9
	0.60	5.0	-227.7	690.6	4.4	2.5	212.9
	0.75	4.9	-72.6	623.4	4.7	2.7	177.5
	1.05	4.9	-116.7	326.8	4.6	0.9	23.6
	1.35	4.9	-18.7	204.5	4.6	0.4	7.5
	1.65	4.9	-91.4	483.9	4.5	0.6	36.5
	1.95	5.1	-102.1	219.1	4.6	0.3	8.5
	2.25	5.0	-13.3	257.1	4.4	0.4	8.8
	3.40	5.1	-15.6	143.8	4.6	0.4	8.0
	4.25	5.0	-22.8	123.2	4.6	0.2	5.2
	5.10	5.2	-20.5	230.0	4.7	0.3	5.3
8.50	5.1	-13.1	36.7	4.6	0.3	4.0	

Entretanto, devemos salientar que, os resultados descritos também sugerem alterações de comportamento infundadas, com aumentos ou reduções inesperadas de assimetria, curtose, ou mesmo dos valores máximos e mínimos

⁵ Os ensaios para coleta dos dados de pressões instantâneas foram realizados no dispositivo de cavitação do USBR e cedidos ao LOH no ano de 2020.

em diferentes séries amostrais de pressão, o que novamente evidencia a inviabilidade de análises mais profundas desses parâmetros (Tabela 5-3).

De todos os parâmetros estatísticos citados anteriormente, e as incertezas atribuídas, em grande parte, pela capacidade de resposta dos sensores de pressão instantânea utilizados, os desvios padrão foram as variáveis que melhor identificam o comportamento oscilatório dos sinais aquisitados nos ensaios do USBR.

Desta forma, para uma melhor análise, a Figura 5-14 apresenta graficamente as flutuações de pressão (P_{vx}) obtidas pelos sensores D₁ e D₂ para todas as demandas relativas de ar observadas. Conforme podemos verificar, as flutuações de pressão extraídas no sensor D₁ foram superiores as determinadas pelo sensor D₂, devido sua proximidade da zona de impacto das cavidades de vapor no dispositivo de cavitação.

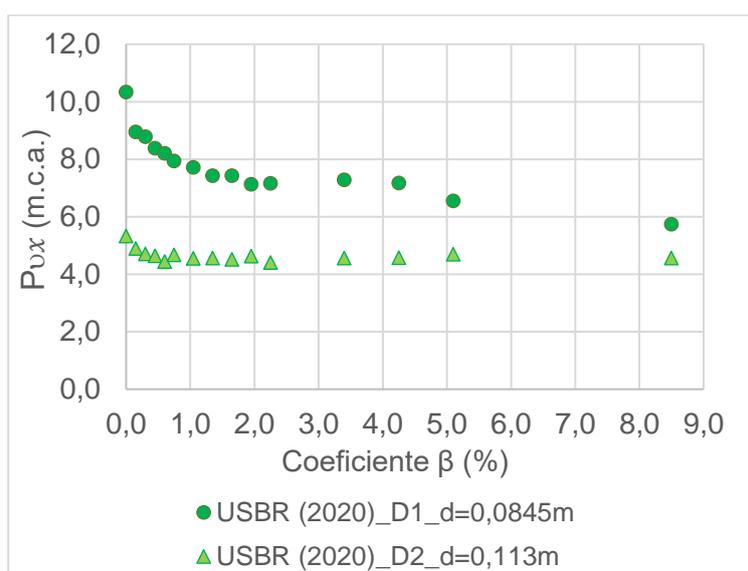


Figura 5-14: Flutuações das pressões instantâneas de 1MHz aquisitadas nos sensores D₁ e D₂ no dispositivo de cavitação do USBR. Fonte: adaptado de Mortesen (2020)⁶.

Os resultados das flutuações de pressão demonstraram que o acréscimo de ar no sistema acabou por favorecer uma uniformização dos desvios padrões, tendendo a valores mais constantes e próximos entre si, principalmente a partir de $\beta \geq 2,0\%$, em ambos os sensores de pressão utilizados. As maiores P_{vx} foram registradas nos ensaios sem a presença de ar no escoamento, de 10,33 m.c.a.

⁶ Os dados referentes às flutuações de pressão aquisitadas no dispositivo de cavitação do USBR no ano de 2020 foram publicados no Report HL- 2020-05. "Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces"

no sensor D₁, e de 5,33 m.c.a. para o sensor D₂, o qual descreveu resultados que variaram de 5,33 a 4,56 m.c.a entre 0 e 8,5% de ar(Figura 5-14).

5.1.4 Análise Comparativa – Dados de Pressão Instantânea (Média e de 1MHz) e das Acelerações

Identificados os comportamentos das pressões médias, em ambos os dispositivos de cavitação (LOH/UFRGS e USBR), das vibrações atuantes no aparato do LOH e das pressões instantâneas de 1MHz do USBR serão apresentados, neste item, a análise comparativa entre esses resultados e as informações disponíveis pela bibliográfica, principalmente no que tange as características hidráulicas.

Considerando que os sensores de pressão D₁ e D₂ (USBR) e os acelerômetros, utilizados no LOH/UFRGS para aquisição das vibrações externas ao dispositivo de cavitação, possuem altas frequências nominais de aquisição (1MHz e 100kHz), foram então, comparadas às flutuações (P_{vx}) desses sinais com o acréscimo de ar no escoamento).

Entendem-se que as variáveis apresentadas na Figura 5-15 descrevem características distintas das condições hidráulicas do escoamento e que, apesar de serem dispositivos de cavitação similares, possuem algumas diferenças dimensionais e de operação que os particularizam. Todavia, ao serem verificados os desvios padrão dessas variáveis pode-se identificar uma mesma tendência de atenuação em suas flutuações com o acréscimo de ar no escoamento.

Ambos os sistemas, LOH/UFRGS e USBR, registraram as maiores flutuações, de aceleração (a_{vx}) e de pressão (P_{vx}) respectivamente, nos ensaios em que $\beta < 2,0\%$, sendo os valores mais críticos, de 155,5 m/s² e de 10,3 e 5,3 m.c.a. (D₁ e D₂) respectivamente, definidos pelos sensores aos escoamentos sem a presença de ar comprimido no sistema (Figura 5-15).

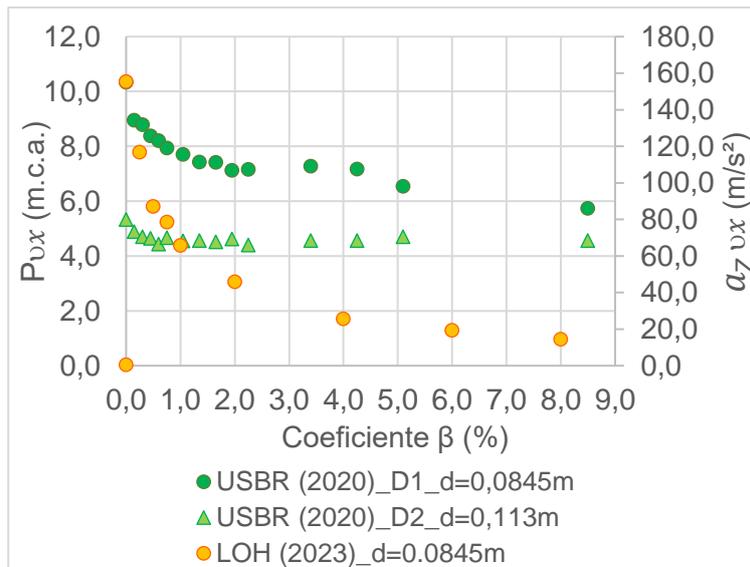


Figura 5-15: Comparativo entre os desvios padrão pressões instantâneas de 1MHz (sensores D1 e D2) e as aceleração no eixo “z” extraídas no dispositivo de cavitação do LOH⁷.

Outro aspecto relevante é que, assim como os valores máximos e mínimos, definidos aos sinais de pressão instantânea (1MHz) adquiridos, as flutuações das acelerações também indicam a existência de valores extremos discrepantes em suas amostras, fortemente ligados a interação de escoamentos com baixos coeficientes β . Isto nos possibilita inferir que, assim como os transdutores de 1MHz, as vibrações, ocasionadas pela ação dinâmica das cavidades de vapor, descreveram valores de magnitude tão variáveis que os sensores de pressão não foram capazes de captar (Figura 5-15).

Além disso, as flutuações das acelerações no dispositivo do LOH/UFRGS refletem a intensidade em que as ondas de choque impactam na vibração do sistema e, portanto, devem ser consideradas como um efeito adicional do fenômeno da cavitação imposto a equipamentos e sensores de medição quando fixados externamente a estrutura do aparato experimental (Figura 5-15).

Devido as especificidades que envolvem a concepção, desenvolvimento e implementação de dispositivos de cavitação similares aos utilizados pelo LOH/UFRGS e USBR, os quais possibilitam estudos sobre o fenômeno da cavitação em condições mais próximas a realidade de sua ocorrência, são

⁷ Os dados referentes às flutuações de pressão aqisitadas no dispositivo de cavitação do USBR no ano de 2020 foram publicados no Report HL- 2020-05. “Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces”

poucas as informações existentes na bibliografia que sejam comparáveis aos dados extraídos nesses dois sistemas. Diante disto, e das exigências necessárias para a construção de dispositivos do tipo *Venturi*, e dos altos custos envolvidos no processo, foram realizadas comparações entre as pressões médias (\bar{P}) adquiridas no LOH/UFRGS e no USBR e as pressões médias, suas variações e índices de cavitação (σ) apresentados nos estudos de Dong (2007) e Dong *et al.*, (2008). Obviamente que devem ser ponderadas as diferenças hidráulicas e geométricas de funcionamento entre os aparatos do LOH/UFRGS e USBR e o utilizado pelos autores, onde o fenômeno é condicionado a um segmento de conduto reto e não uma ampliação busca como a utilizada nos dispositivos avaliados nessa pesquisa.

A Figura 5-16 descreve a evolução das pressões médias (\bar{P}) extraídas nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e USBR, comparando-as aos resultados apresentados por Dong *et al.*, (2007). Nos três experimentos, os autores coletaram dados de pressão na parte superior (teto) dos dispositivos tipo *Venturi*, sendo as distâncias de posicionamento dos sensores vinculadas a seção de maior velocidade do escoamento ($d=0$ m). As velocidades médias observadas nas máquinas de cavitação do LOH/UFRGS e USBR foram da ordem de 30,0 m/s, enquanto Dong *et al.*, (2007) realizaram seus ensaios com uma velocidade de fluxo de 49,6 m/s.

As pressões médias obtidas por Dong *et al.*, (2007) para as distâncias de $x=0,02$; 0,45 e 0,07m, retratam um crescimento acentuado das pressões com o aumento dos coeficientes β , de 120,3 a 419,9 kPa; 75,3 a 345,0 kPa e de 48,8 a 312,2 kPa, respectivamente. Os maiores aumentos descritos pelas pressões médias foram constatados entre os Betas de 0 a 4,0% de ar, acima desse limite há um aumento constante e menos evidente do que o registrado nas primeiras demandas de ar ensaiadas considerando os sensores fixados a partir de $d \leq 0,07$ m (Figura 5-16).

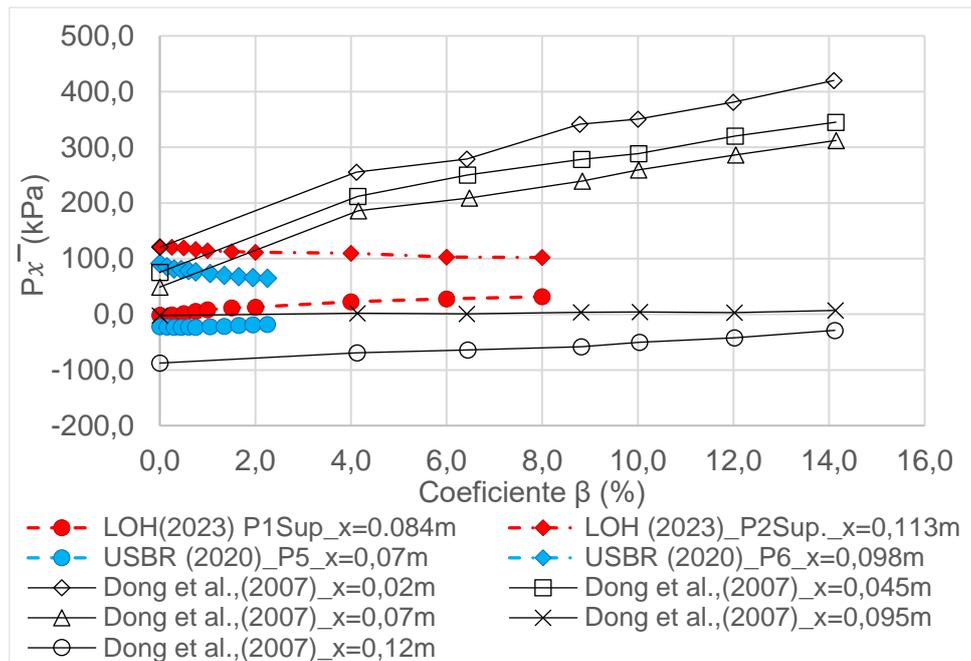


Figura 5-16: Comparativo entre as pressões médias aqisitadas nos dispositivos de cavitação do LOH (2023), USBR(2020) e Dong *et al.*, (2007).⁸

Ao analisar o comportamento das pressões médias nos dispositivos experimentais comparados, pode-se identificar um crescimento das pressões médias em função do acréscimo de ar no escoamento durante a ocorrência do fenômeno da cavitação em todos os sistemas, com exceção dos sensores P6 USBR ($d=0,098m$) e P2Sup LOH/UFRGS ($d = 0,113 m$), até as demandas máximas de ar verificadas (Figura 5-16).

Os menores valores de $P_{\bar{x}}$ observados, e por sua vez mais críticos, que identificam o favorecimento da dinâmica de implosão das cavidades de vapor, foram de $-87,6$ e $-1,69$ kPa descritos por Dong *et al.*, (2007) e USBR nas distâncias de $0,12$ e $0,07m$. Obviamente que, as diferenças entre as velocidades médias do escoamento, de $49,6$ e $30,0$ m/s, e as distintas geometrias dos aparatos experimentais utilizados devem ser bons argumentos para as diferentes ordens de grandeza registradas pelas pressões médias obtidas. Todavia, cabe ressaltar que, ambos os valores apresentados anteriormente descrevem a existência de zonas de possível ocorrência de danos pelo efeito do fenômeno da cavitação nessas estruturas (Figura 5-17).

⁸ Os ensaios para coleta dos dados das pressões médias foram realizados no dispositivo de cavitação do USBR e cedidos ao LOH durante o ano de 2020.

Na tentativa de avaliar os resultados apresentados por LOH/UFRGS, USBR e Dong *et al.*, (2007) foram estimadas as variações entre os valores de pressões médias medidas (ΔP) medidos no LOH/UFRGS e os estimados, por meio de interpolação linear dos dados extraídos pelo USBR e por Dong *et al.*, (2007) para as demandas relativas de ar de 0 e 2,0%.

As demandas relativas de ar (β) foram escolhidas de maneira a expressar os limites de ar amplamente difundidos na literatura, principalmente nos estudos iniciados por Peterka (1953) e Kudriashov *et al.*, (1983) sobre o tema. Na Figura 5-17 são descritas as ΔP em função das distâncias de referência de cada dispositivo tipo Venturi.

As ΔP extraídas para os dados do LOH e do USBR expressaram, obviamente, maior similaridade entre si do que quando comparadas as variações estimadas aos dados de pressão de Dong *et al.*, (2007). Entretanto, com exceção dos resultados extraídos dos sensores P2Sup. (LOH/UFRGS) e o P6 (USBR), instalados em pontos de medição onde a zona de implosão das bolhas não se faz tão marcante. As demais ΔP descrevem valores preponderantemente negativos, fornecendo indícios que a ocorrência do processo de cavitação é de fato favorecida nessas posições e nos três dispositivos avaliados (Figura 5-17).

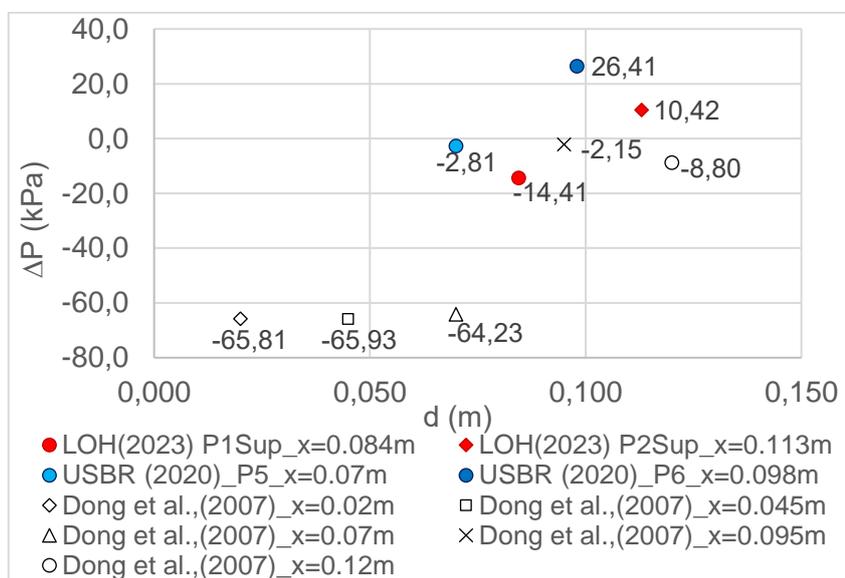


Figura 5-17: Comparativo entre as variações de pressão média extraídas nos dispositivos de cavitação do LOH, USBR e Dong *et al.*, (2007), para β de 0 e 2,0% de ar.⁹

⁹ Os ensaios para coleta dos dados das pressões médias foram realizados no dispositivo de cavitação do USBR e cedidos ao LOH durante o ano de 2020.

Contudo a comparação entre as ΔP não é capaz de expressar a interferência das velocidades de cada escoamento, parâmetro hidráulico importante para os estudos sobre o fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas de concreto (Figura 5-17).

Visando evidenciar o comportamento das pressões médias nos três dispositivos de cavitação, foram então avaliados os resultados de pressão em relação as distâncias de posicionamentos dos sensores para cada demanda relativa de ar, de acordo com o expresso na Figura 5-18.

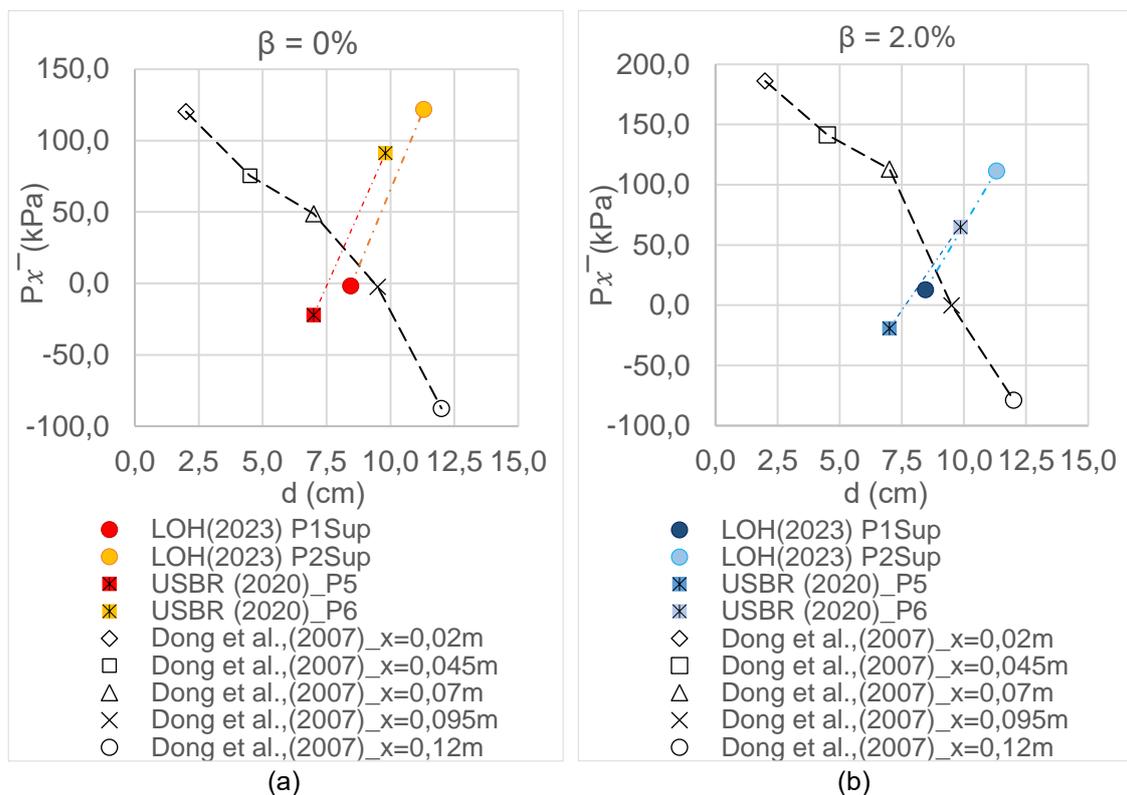


Figura 5-18:Comparativo entre as pressões médias x distâncias da seção de controle, extraídos pelos diferentes autores e dispositivos de cavitação, $\beta = 0$ e 2,0% de ar.

Ao analisarmos os resultados apresentados na Figura 5-18 com $\beta = 0\%$ se verifica que as pressões coletadas em dispositivos de cavitação similares (LOH/UFRGS e USBR), que tem velocidades médias do escoamento na seção contraída e geometria do dispositivo de cavitação semelhante descrevem a mesma tendência de crescimento com o afastamento da zona de formação das cavidades ($d = 0\text{cm}$). As pressões médias medidas foram de -1,69 e 121,8 kPa no dispositivo do LOH/UFRGS e, de -22,0 e 91,1 kPa no dispositivo do USBR (Figura 5-18a).

Em contrapartida, os resultados estimados por meio das interpolações lineares dos dados de Dong et al., (2007), expressaram um comportamento

totalmente inverso daqueles obtidos nos demais dispositivos de cavitação. Um decréscimo foi constatado nas pressões médias estimadas para Dong *et al.*, (2007) conforme há o distanciamento dos transdutores do ponto $d = 0$ m, sendo os menores valores registrados pelos sensores posicionados a 0,095 e 0,12 m da seção de referência de seu sistema, onde as pressões médias registradas foram de -2,38 e - 87,6 kPa (Figura 5-18a).

Quando analisadas as pressões médias dos ensaios de $\beta = 2,0\%$ o comportamento contrastante entre os resultados do LOH/UFRGS e USBR e as pressões médias definidas por Dong *et al.*, (2007) se mantêm. Porém, para os sistemas do LOH/UFRGS e USBR, a presença de 2,0% de ar no fluxo proporciona a aproximação efetiva das pressões médias, fazendo com que ocorra uma confluência desses resultados e um aumento gradual das pressões de maneira a desfavorecer a implosão das cavidades de vapor (Figura 5-18b).

As considerações descritas anteriormente, acerca dos resultados de pressão média para as demandas relativas de 0 e 2,0% de ar, podem ser expandidas aos resultados dos ensaios com a inserção dos demais coeficientes β utilizados em todos os dispositivos. Os comparativos restantes são apresentados no *APÊNDICE B - Comparativo entre as pressões médias aqisitadas por diferentes autores considerando as distancias dos sensores da seção de controle de cada experimento, para os β de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 4,0; 6,0 e 8,0%*.

Dong *et al.*, (2007) também apresentam estimativas dos σ em seus estudos. Eles foram analisados em relação aos coeficientes β e aos índices de cavitação estimados para os dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR a partir da posição das tomadas de pressão nesses sistemas (Figura 5-19).

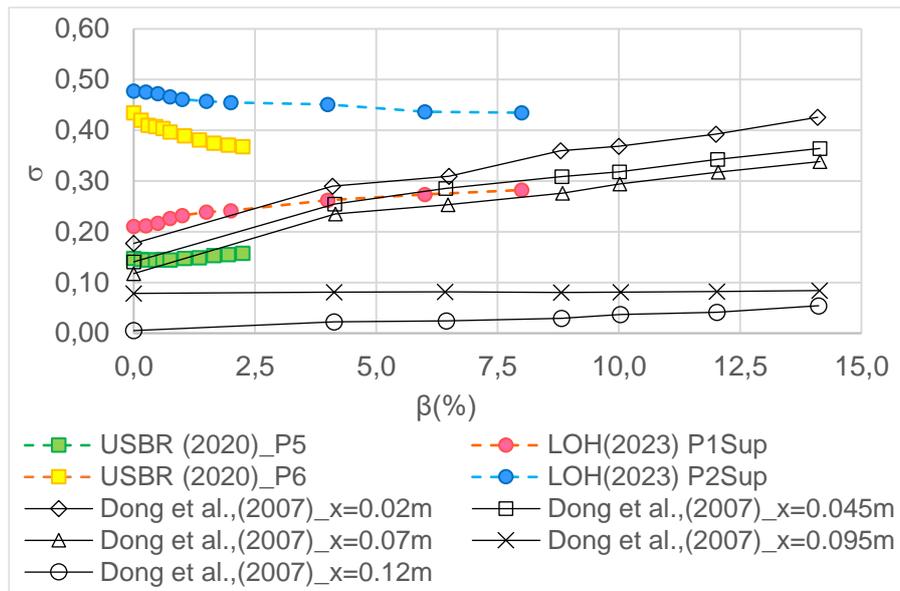


Figura 5-19: Comparativo entre os índices de cavitação (σ) x demanda relativa de ar (β), para os distintos autores.

Os índices críticos, ou seja, inferiores aos limites de 0,30 e 0,20 estabelecidos por Falvey (1990) e Ball (1976), amplamente utilizados por Pinto *et al.*, (1988); Bhate, (2018); Mortensen (2020) e Abreu *et al.*, (2023), foram estimados nos ensaios realizados por Dong *et al.*, (2007), considerando todos os β estudados para os sensores de pressão posicionados nas distâncias de $d = 0,095$ e $0,12$ m (Figura 5-19).

Os σ que comprovam a ocorrência do fenômeno da cavitação, também foram verificados a partir os dados dos transdutores P1 Sup. do LOH e P5 do USBR em todas as demandas relativas ensaiadas consideradas (Figura 5-19).

Já os registros de pressão dos sensores posicionados a $0,02$; $0,045$ e $0,07$ m, utilizados por Dong *et al.*, (2007), somente expressaram índices de cavitação menores que 0,30 nos ensaios em que os β estudados foram de $4,10$; $6,4$ e $10,0\%$. Essa observação permite inferir que, além da aeração induzir aumentos das pressões médias e, conseqüentemente dos índices de cavitação nessas posições, a influência da região da nuvem de cavitação é reduzida consideravelmente com $\beta \geq 6,4\%$ (Figura 5-19).

Assim como a análise desenvolvida nas pressões médias, a Figura 5-20 apresenta um comparativo entre os σ obtidos nos ensaios sem a adição de ar no escoamento, para os dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS, USBR e Dong *et al.*, (2007). De acordo com o observado, os índices de cavitação do LOH/UFRGS e USBR reafirmam o comportamento hidráulico oposto ao descrito

pelos ensaios de Dong *et al.*, (2007), tendo acréscimos em seus valores conforme há o distanciamento da seção de referência, onde a velocidade é de $\cong 30,0$ m/s.

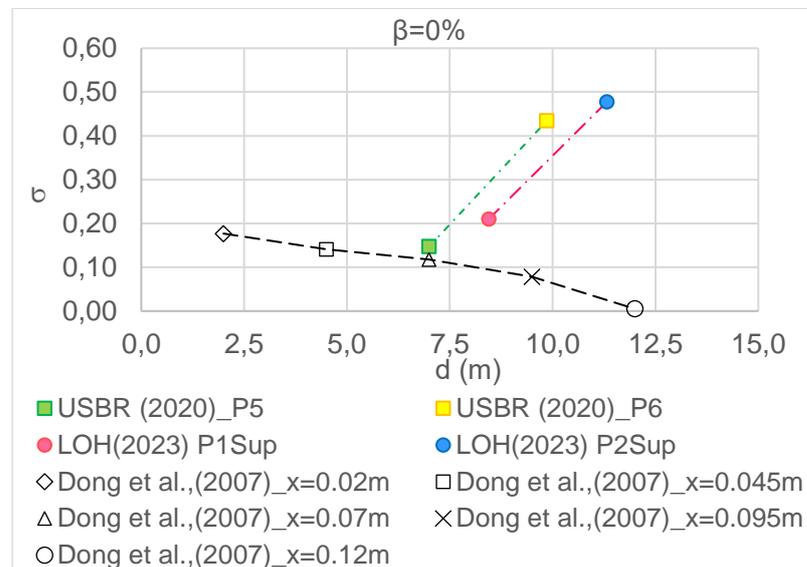


Figura 5-20:Comparativo entre os índices de cavitação x distâncias da seção de controle, extraídos pelos diferentes autores e dispositivos de cavitação, $\beta = 0\%$.

Em continuidade a seus estudos, Dong *et al.*, (2008) descrevem as variações das pressões médias (ΔP), entre os dados coletados no teto e na base de seu dispositivo de cavitação, avaliando a inserção de distintas quantidades de ar (β) no escoamento. Os autores adicionaram ainda um obstáculo ao escoamento de 2,0 mm de altura, modificando os pontos de fixação dos transdutores para as distâncias de - 0,015; 0,01; 0,04; 0,07 e 0,010m, além de reduzir a velocidade do escoamento para 36,1 m/s.

Serão aqui comparadas somente as informações referentes às pressões médias, no teto e na base, do dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS com os dados de Dong *et al.*, (2008), uma vez que os ensaios desenvolvidos pelo USBR não apresentam dados de pressão na parte inferior de seu aparato experimental (Figura 5-21).

A Figura 5-21 descreve a evolução das ΔP com o acréscimo das demandas relativas de ar nos dois sistemas, mostrando que as variações seguem um comportamento semelhante ao verificado pelas pressões médias de Dong *et al.*, (2007), LOH/UFRGS e USBR.

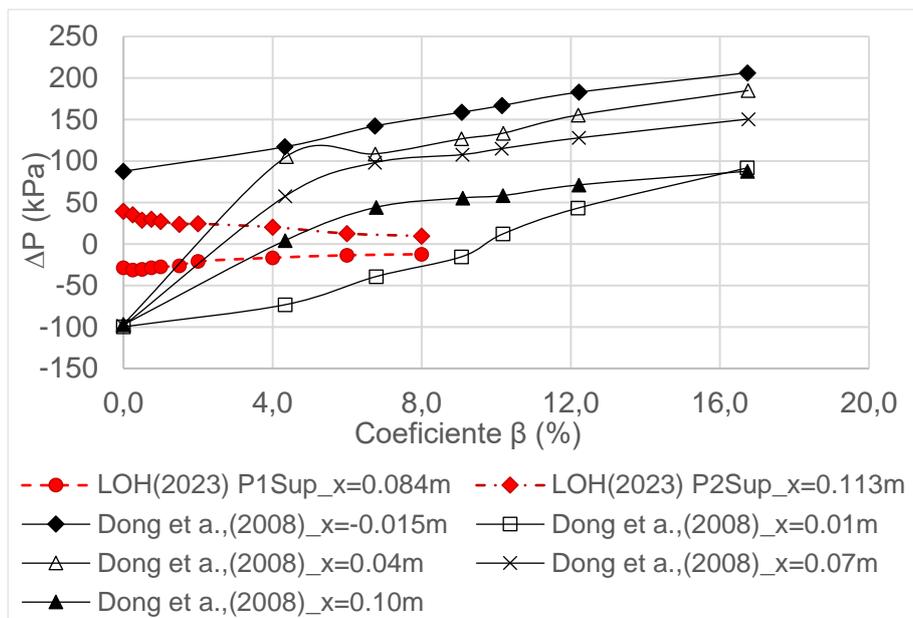


Figura 5-21: Comparativo entre as variações de pressões médias aquisitadas no teto e na base dos dispositivos utilizados pelos autores, para diferentes β .

As variações de pressão medidas por Dong *et al.*, (2008) em $d = -0,015\text{m}$, posição que antecede o obstáculo ($d = 0\text{ cm}$), não demonstraram condições favoráveis para o desenvolvimento do fenômeno nesse ponto do dispositivo de cavitação, indicando que a nuvem de cavitação não atinge esse trecho do conduto. Para as demais tomadas de pressão, principalmente em $\beta = 0\%$, foram verificadas ΔP negativas, e menores do que as registradas nos pontos P1 e P2 do LOH/UFRGS (Figura 5-21).

Outro aspecto relevante é que ao comparar as variações de pressão dos ensaios realizados com velocidades médias do escoamento de mesma ordem de grandeza, ou seja, de 30,0 e 36,1 m/s, as diferenças entre os resultados apresentados por Dong *et al.*, (2008) e pelo LOH/UFRGS tornam-se ainda maiores do que as relatadas na Figura 5-17. Esse comportamento, possivelmente pode ser atribuído a interferências causadas pela presença do obstáculo que claramente afeta o desenvolvimento das pressões no interior do dispositivo experimental utilizado por Dong *et al.*, (2008).

Ao verificar a intensificação das pressões negativas após as modificações propostas por Dong *et al.*, (2008), é possível afirmar que a presença de um obstáculo frente ao escoamento cavitante acaba por favorecer o fenômeno, principalmente nas tomadas de pressão próximas a ele em $d = 0,01\text{ m}$ (Figura 5-21).

Resumidamente, a análise desenvolvida entre as flutuações de pressão de 1MHz e as acelerações, definidas em dispositivos de cavitação similares, indicou a existência de valores extremos discrepantes em ambas as amostras adquiridas, profundamente ligados aos escoamentos com baixa ou nenhuma demanda relativa de ar inserida nesses sistemas. As vibrações acabaram por retratar a ação dinâmica de colapso das cavidades de vapor, tão variável que os transdutores de pressão não conseguiram, possivelmente, captar tal efeito devido suas limitações de leitura.

Contudo, se pode afirmar que os desvio padrão identificados nas acelerações configuram o comportamento das ondas de choque geradas pelo fenômeno da cavitação ao dispositivo, proporcionado um efeito adicional que deve ser considerado durante a utilização de outros equipamentos ou sensores que venham a ser utilizados nesses aparatos experimentais.

No que tanque as análises comparativas realizadas entre as informações apresentadas na bibliografia, por Dong *et al.*, (2007; 2008), e os resultados extraídos dos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR, se pode concluir que, consideradas as limitações e diferenças estruturais de seus dispositivos, a inserção de $\beta > 0\%$ são os melhores meios de elevar as pressões médias do escoamento, e assim, reduzir os efeitos danosos gerados pelo fenômeno da cavitação.

Evidentemente que a limitação de dados disponíveis na literatura que possibilitem abordagens mais diretas no comparativo entre os resultados apresentados pelos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR, fizeram com que a análise referente as condições hidráulicas desses escoamentos fossem elaboras de maneira indireta. O dispositivo utilizado por Dong *et al.*, (2007; 2008), apesar de gerar as condições favoráveis para a ocorrência do fenômeno possui um comportamento hidráulico mais semelhantes a um conduto curto conduzindo um fluxo de alta velocidade, enquanto que os demais experimentos podem ser avaliados como uma ampliação brusca, limitando a uma pequena região a influência da nuvem de cavidades formada.

5.2 Danos no Concreto

Considerando a capacidade de resistência do concreto quando exposto a escoamentos de alta velocidade, foram realizados ensaios no dispositivo de cavitação, com o objetivo de estabelecer relações existentes entre as principais características do concreto e o fenômeno da cavitação.

Desta forma, através da utilização de diferentes composições de concreto, foram avaliados os danos ocasionados pela cavitação sobre a superfície de corpos de prova. A interação do concreto com o fenômeno da cavitação foi determinada por meio da evolução dos danos e dos registros de perda de massa e volume dos blocos avaliados após a realização dos ensaios em laboratório.

Os parâmetros de caracterização dos danos por cavitação dos corpos de prova utilizados neste estudo serão apresentados a seguir por meio da análise qualitativa e quantitativa das fossas de erosão formadas nas superfícies de contato do concreto com o escoamento.

5.3 Análise de Danos no Concreto

As análises qualitativa e quantitativa da ocorrência e intensidade dos danos gerados aos diferentes traços de concreto foram desenvolvidas por intermédios dos registros fotográficos dos corpos de prova, antes e após exposição ao fenômeno da cavitação, das perdas de massa, área e volume estimadas através de diferentes metodologias.

Os resultados apresentados a seguir foram analisados de acordo com as peculiaridades e limitações de cada sistema (LOH/UFRGS e USBR), sendo descritas as evoluções das erosões ocasionados pelo fenômeno da cavitação considerando os diferentes traços dos concretos estudados, bem como, os efeitos ocasionados aos corpos de prova quando adicionadas diferentes demandas relativas de ar ao fluxo cavitante.

Os dados referentes aos ensaios com blocos de concreto foram extraídos a partir da investigação experimental desenvolvida nos dispositivos de cavitação do LOH/UFRGS e do USBR, e serão abordados nos itens: *5.3.1 - Ensaio de Concreto - Dispositivo LOH* ao *5.3.4 - Análise das Perdas de Área e Volume – Metodologia do Perfilador a Laser, Escâner “3D” e Pesagem*.

5.3.1 Ensaios de Concreto - Dispositivo LOH/UFRGS

Os ensaios com corpos de prova e blocos de concreto no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS foram realizados considerando as relações água/cimento (a/c) de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 durante um período de exposição de, aproximadamente, 2 (duas) horas. Os blocos eram retirados do aparato experimental em intervalos de 30 min, para que os mesmos fossem fotografados e pesados com o objetivo de determinar a evolução dos danos ao longo do tempo.

As demandas relativas de ar (β) utilizadas nos ensaios foram de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 2,0; 6,0 e 8,0%. As características gerais dos ensaios assim como os respectivos β considerados são apresentados na Figura 5-22.

a/c	n° Blocos Moldados	n° Blocos Perdidos	n° Blocos Ensaados	Demanda Relativa de Ar (%)
0,35	39	12	24	0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50 e 2,0%
0,45	39	15	22	0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50 e 2,0%
0,50	39	25	14	0; 1,0; 2,0; 3,0 e 8,0 %
0,65	39	25	13	0; 0,5; 1,0; e 2,0 %

Obs: cada condição de ensaio foi repetida, no mínimo, 3 (três) vezes.

Figura 5-22: Desenho esquemático dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação LOH.

Devido aos esforços gerados aos blocos durante a fixação e início da operação no dispositivo de cavitação, das 156 unidades moldadas, 74 delas foram danificadas durante esse processo, sendo, portanto, descartadas. Desta forma, a quantidade de ensaios englobou 73 blocos de concreto não avariados.

Em paralelo aos ensaios com a presença dos blocos de concreto no dispositivo de cavitação, foram determinadas as resistências a compressão dos concretos em estudo, através do rompimento dos corpos de prova cilíndricos (CPs) em prensa hidráulica. A Tabela 5-4 e a Figura 5-23, apresentam os resultados das resistências à compressão para as relações a/c de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 considerando as idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 91 dias de cura em câmara úmida.

Tabela 5-4: Resistências médias à compressão, extraída para os concretos utilizados no dispositivo do LOH/UFRGS.

Dias	$f_{cm,j}$ (MPa)			
	0,35	0,45	0,50	0,65
3	41,2	28,3	29,7	16,8
7	49,0	34,5	33,8	21,9
14	54,8	38,0	35,0	26,1
28	62,4	43,6	38,0	27,4
63	61,5	44,6	37,2	29,5
91	64,5	47,9	40,4	32,7*

* valor estimado a partir dos aumentos ocorridos entre as resistências médias a compressão entre 3°, 7°, 14°, 28° e 63° dias.

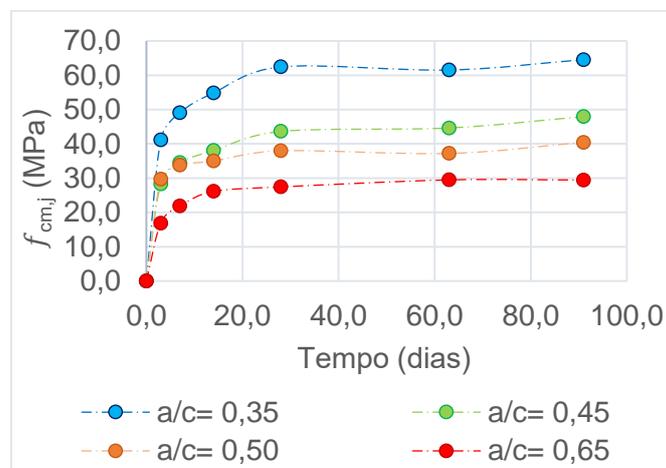


Figura 5-23: Curvas de resistência a compressão ($f_{cm,j}$) x tempo para os concretos expostos ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Na Figura 5-23 se pode observar que as menores resistências foram encontradas para as maiores relações de a/c (0,50 e 0,65), justificado essencialmente pela utilização de baixos teores de cimento nessas misturas.

Diferentemente das resistências médias à compressão adotadas para os concretos ensaiados no USBR, onde foram consideradas as idades em que cada concreto foi exposto ao dispositivo de cavitação. Para os concretos investigados no LOH/UFRGS foram adotadas como f_{cm} as resistências obtidas aos 91 dias de cura dos compostos já endurecidos.

Inicialmente foram realizadas comparações entre os danos causados pelo fenômeno da cavitação nos blocos de diferentes relações água/cimento sem a presença de ar no escoamento (Figura 5-24). Os resultados apresentados na Figura 5-24 foram obtidos de ensaios com tempos de duração distintos, visto que alguns dos blocos de relações a/c de 0,50 e 0,65 não resistiam com a integridade

necessária para manutenção do contato entre o corpo de prova e o dispositivo de cavitação para que completassem o período de exposição pré-estabelecido de 2 horas.

Conforme se observa na Figura 5-24, a remoção de material menos expressiva ocorreu na superfície do bloco de maior resistência média à compressão ($f_{cm,91} = 64,5$ MPa - $a/c = 0,35$). De acordo com o aumento das relações a/c as perdas de concreto tornam-se cada vez mais significativas, sendo apresentados nas relações 0,50 e 0,65 danos de maior extensão com remoção dos agregados, essencialmente miúdos para $a/c = 0,50$, e graúdos para $a/c = 0,65$.

Em contrapartida, para os blocos de relação a/c de 0,35 e 0,45, mesmo tendo sido expostos a um período maior de tempo na máquina de cavitação, foram extraídas somente as camadas mais superficiais de revestimento desses concretos, representadas pela argamassa – cimento + água + areia - do composto (Figura 5-24).

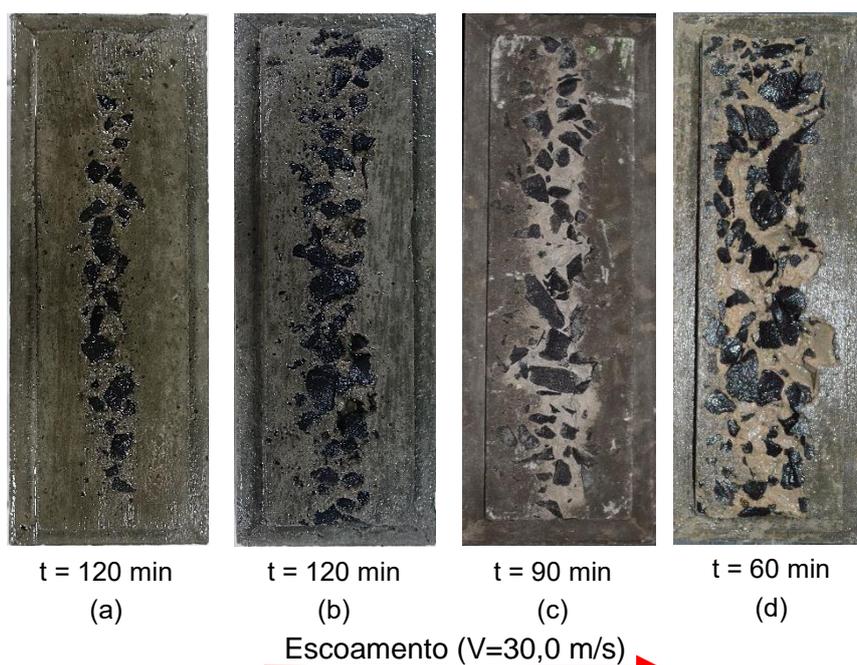


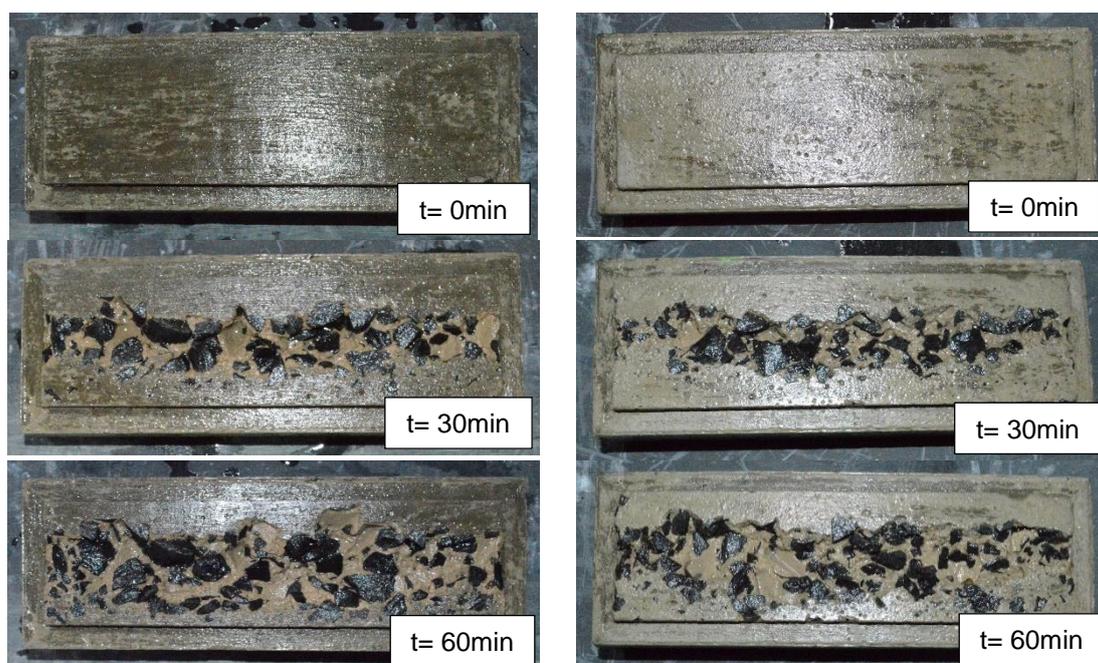
Figura 5-24: Blocos de concreto após exposição a máquina de cavitação do LOH/UFRGS sem a inserção de ar no escoamento ($\beta = 0\%$), relações a/c de: 0,35 (a); 0,45 (b); 0,50 (c), e; 0,65 (d).

A Figura 5-25 permite avaliar os efeitos mais severos registrados pelo fenômeno da cavitação dentre todos os ensaios realizados. Os danos foram obtidos através da exposição de blocos de concreto com baixa resistência média a compressão ($f_{cm,91} = 32,7$ MPa) e relação a/c de 0,65. Os ensaios realizados

com esse tipo de concreto e sem a presença de ar no escoamento favorecem o desenvolvimento do processo erosivo intenso, com remoção de material até a completa inviabilização dos blocos utilizados.

Um aspecto relevante observado na Figura 5-25, é a intensa atividade da cavitação já nos primeiros 30 minutos de ensaio, onde entende-se que a remoção de material foi favorecida principalmente pela baixa coesão das partículas que compõem o concreto, e não pela da presença de possíveis irregularidades existentes na superfície de contato dos blocos com o escoamento cavitante.

A partir da erosão já estabelecida, os danos avançaram em extensão e profundidade, sendo os efeitos da cavitação visivelmente intensificados pela crescente exposição dos agregados graúdos utilizados na composição do concreto (Figura 5-25).



Escoamento $V = 30,0 \text{ m/s}$

Figura 5-25: Evolução dos danos em blocos de relação $a/c = 0,65$, sem a inserção de ar no escoamento durante 1 hora de ensaio.

Evidentemente que, os resultados expressos na Figura 5-25 representam as condições mais extremas possíveis de ocorrência de danos que um concreto de baixa resistência a compressão, após ter sido exposto a ação do fenômeno da cavitação sem a incorporação de ar no escoamento, apresentaria. Portanto, concretos de composição e relação a/c de 0,65, não devem, em hipótese alguma serem utilizadas em estruturas hidráulicas, e principalmente em superfícies de

concreto submetidas a escoamentos de alta velocidade, ou seja, a fluxos superiores ao limite de 15,0 m/s estabelecido por Falvey (1990) (Figura 5-25).

Na Figura 5-26, Figura 5-27, Figura 5-28 e Figura 5-29, são identificados os danos pela implosão das cavidades de vapor para as relações a/c de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65, considerando a influência de diferentes demandas relativas de ar no escoamento. A Figura 5-26 e Figura 5-27 demonstram, de maneira qualitativa, que inserções de ar em baixas concentrações ($\beta = 0,25\%$) reduzem expressivamente concretos efeitos erosivos nos blocos de relação a/c de 0,35 e de 0,45.

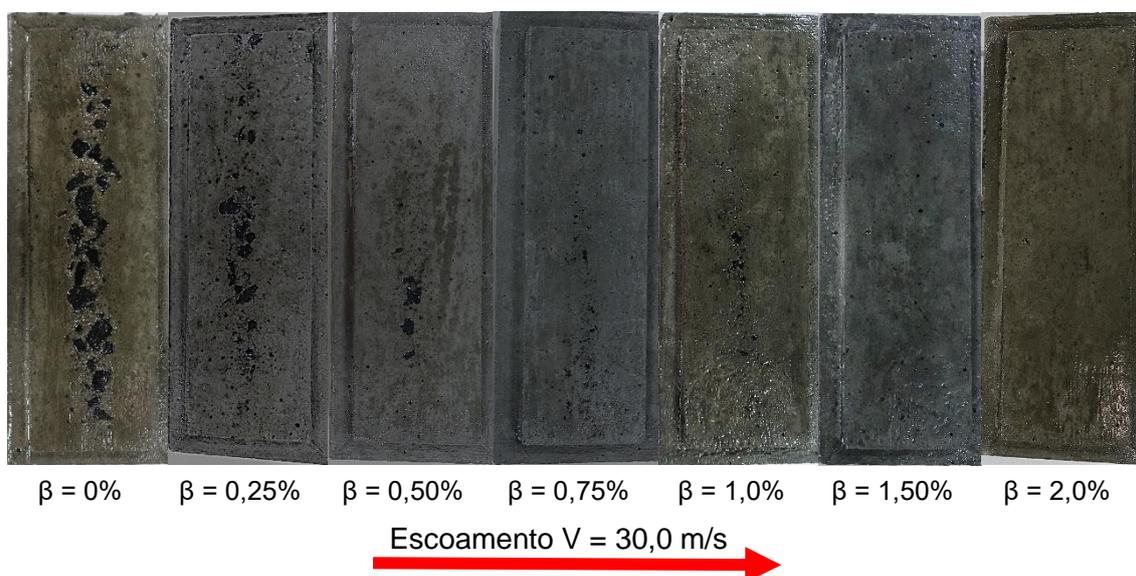


Figura 5-26: Blocos de concreto de relação a/c= 0,35, após 2 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, para diferentes demandas relativas de ar.

Os limites mínimos de inserção de ar para a proteção total de danos nos blocos de concreto utilizados, podem variar em função da suscetibilidade do concreto a ação do escoamento, definida essencialmente pela relação a/c e o $f_{cm,j}$ do concreto. Porém, para as relações a/c de 0,35 e de 0,45 as demandas relativas de ar necessárias para eliminar os efeitos causados pelo fenômeno da cavitação foram semelhantes e iguais a 1,0%.

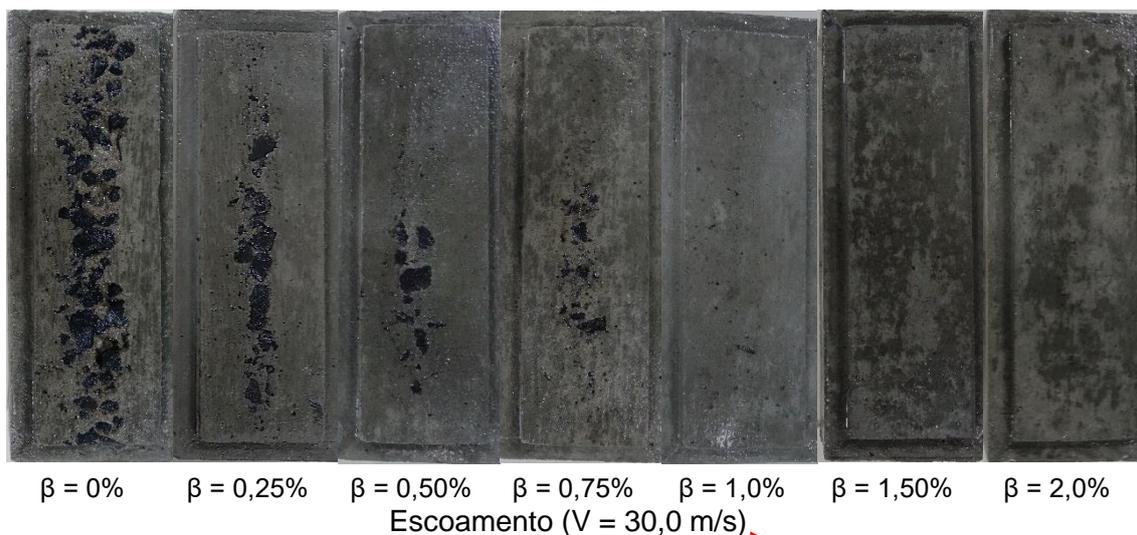


Figura 5-27: Blocos de concreto de relação $a/c = 0,45$, após 2 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do LOH, para diferentes demandas relativas de ar.

Quando analisados os resultados apresentados na Figura 5-28 e Figura 5-29 podemos observar que a adição de ar comprimido possibilitou que concretos de menor resistência (a/c de 0,50 e de 0,65) ficassem expostos a escoamentos sob ação do fenômeno da cavitação durante períodos maiores de tempo sem que tivessem sua integridade comprometida.

A Figura 5-28 demonstra que o limite mínimo de ar a ser utilizado como proteção a danos em concretos de relação a/c de 0,50 encontra-se, possivelmente, entre $0 < \beta \geq 1,0\%$, visto que não foram verificadas reduções graduais das erosões nos corpos de prova utilizados.

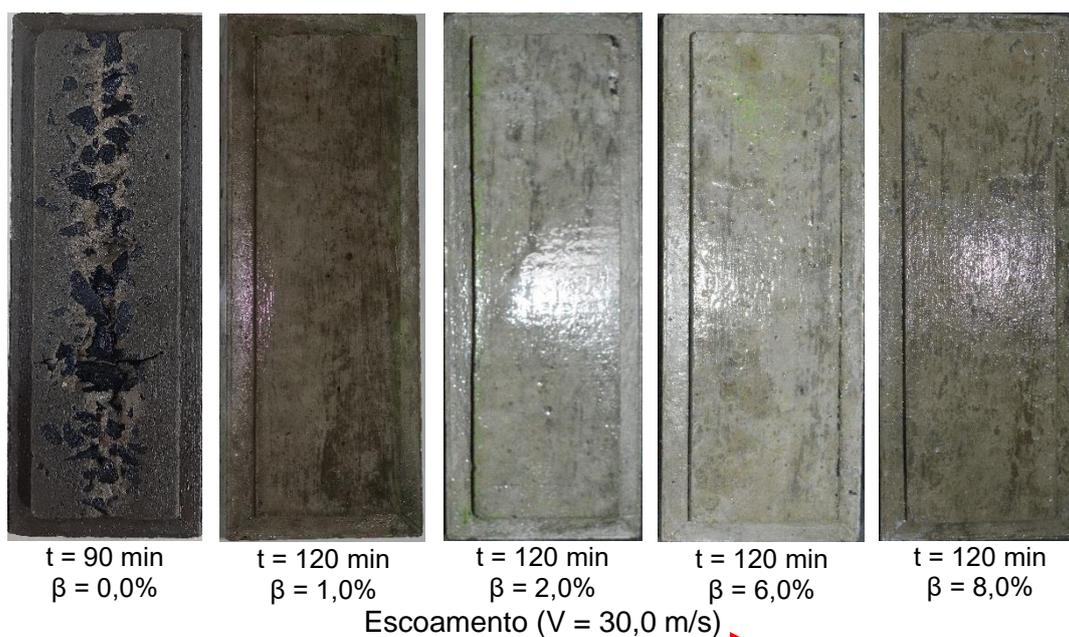


Figura 5-28: Blocos de concreto de relação $a/c = 0,50$, após ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Outro aspecto relevante, é que para as β de 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% os resultados obtidos foram semelhantes, indicado que acréscimos de ar superiores a 1,0% deixam de fazer diferença significativa quanto à proteção de danos pelo fenômeno da cavitação nos blocos de a/c 0,50 (Figura 5-28).

Já na Figura 5-29 foi constatado que o aumento das demandas relativas de ar reduziu, além da intensidade do dano, a área de atuação do fenômeno da cavitação, restringindo a profundidade final das erosões localizadas na superfície desses blocos. A inserção de $\beta = 0,50\%$ ao escoamento fornece benefícios significativos na diminuição de perdas do concreto de a/c 0,65 quando comparados aos ensaios sem a utilização de ar no escoamento.

Por se tratar de um concreto de baixa resistência média a compressão ($f_{cm,91} = 32,7$ MPa) torna-se prudente a utilização de demandas relativas de ar $\geq 2,0\%$ quando esses são expostos a escoamentos de $V = 30,0$ m/s, de forma a evitar que o processo de remoção do material seja se quer iniciado nos blocos de concreto de baixa resistência (a/c = 0,65) (Figura 5-29).

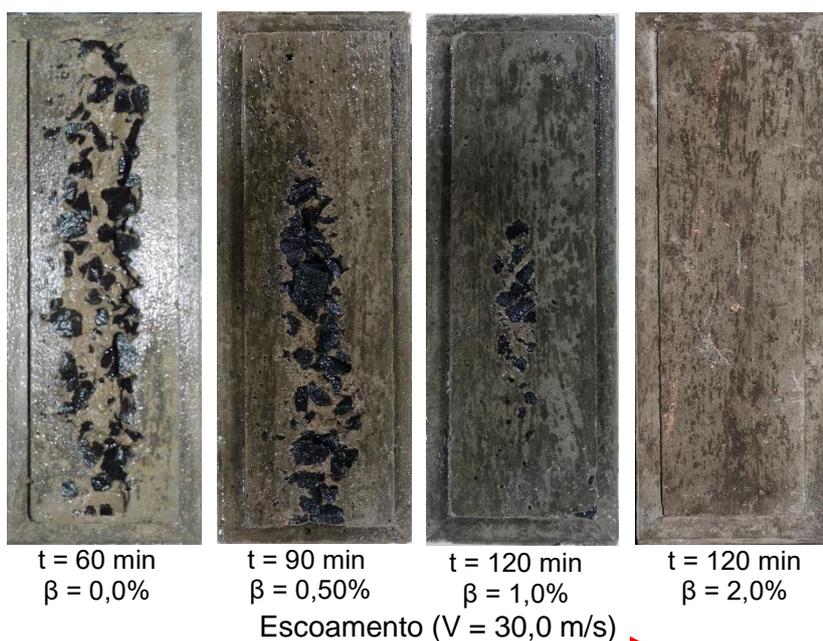


Figura 5-29: Blocos de concreto de relação a/c= 0,65, após ensaios no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Com o objetivo de verificar a evolução dos danos ocasionados pela cavitação para um tempo de exposição superior as 2h adotadas como padrão nessa pesquisa, foi realizado um ensaio de longa duração, totalizando o período de 6 (seis) horas de exposição de um corpo de prova sem a adição de ar no

escoamento. Os registros fotográficos foram realizados em intervalos de 60 min cada e os resultados são expressos na Figura 5-30, a seguir.

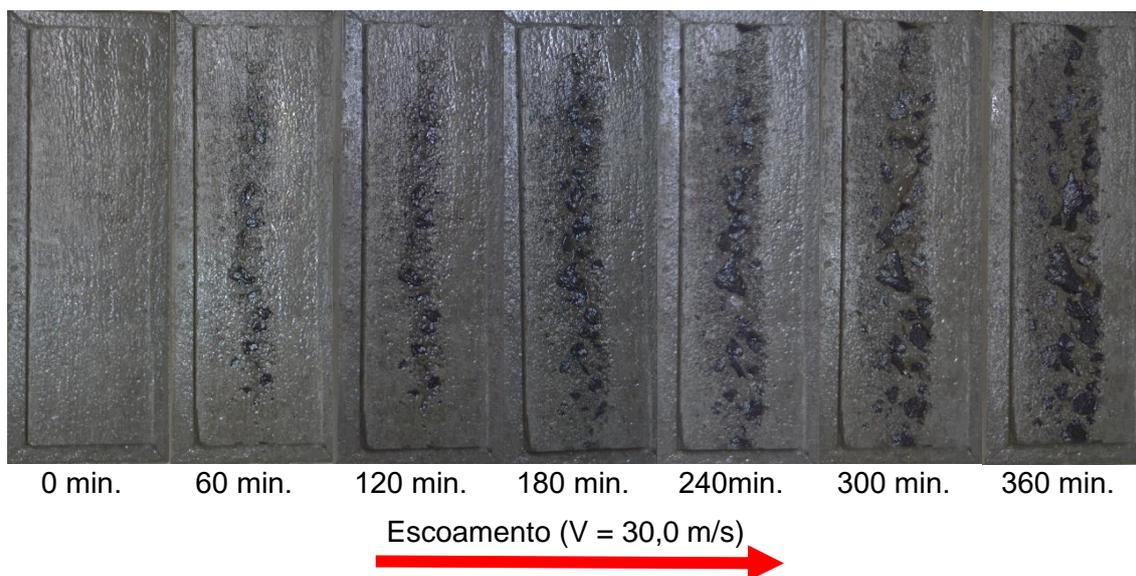


Figura 5-30: Ensaio de longa duração em bloco de concreto com relação a/c de 0,35, sem a inserção de ar no escoamento.

Por se tratar de um concreto de baixa relação água/cimento (0,35) a remoção do material de revestimento do corpo de prova tornou-se acentuada, em profundidade e exposição de agregados graúdos, somente a partir dos 180 minutos de ensaio. Para intervalos de tempo menores que 120min, os danos ocasionados foram superficiais, correspondendo a retirada da camada mais externa (argamassa) do bloco de concreto avaliado (Figura 5-30).

A partir dos 240 minutos de ensaio foi constatado o aumento da profundidade da erosão e o avanço, em área, dos danos mais severos registrados, culminando por fim na interrupção do ensaio e na inviabilidade de investigações experimentais com tempos de exposição superiores a 6 horas, para o traço de concreto utilizado (Figura 5-30).

Em geral, quando avaliados os ensaios sem a inserção de ar no escoamento, os menores danos por cavitação foram associados aos concretos de maior resistência média à compressão correspondendo às relações a/c de 0,35 ($f_{cm,91} = 64,5$ MPa) e 0,45 ($f_{cm,91} = 47,9$ MPa).

Em síntese, os registros fotográficos tornaram perceptíveis o avanço dos danos e da erosão pelo fenômeno da cavitação nos diferentes concretos investigados. Além de favorecer a identificação dos limites em que determinadas demandas relativas de ar venham (de fato) a contribuir no controle dos danos

por cavitação, sendo esses limites dependentes principalmente das relações água/cimento observadas.

A realização de ensaios com diferentes demandas relativas de ar comprovou que a aeração do escoamento é uma excelente ferramenta de controle ou total extinção dos danos por cavitação, até mesmo para os concretos de a/c 0,65, extremamente vulneráveis as implosões das cavidades de vapor. As demandas relativas de ar mínimas para a proteção dos concretos variam de acordo com as relações água/cimento utilizadas, sendo $\beta \geq 1,0\%$ para concretos com a/c de 0,35; 0,45 e 0,50, e $\beta \geq 2,0\%$ para a/c de 0,65, considerando o tempo de 2h de exposição dos concretos aos efeitos da cavitação.

Os registros fotográficos de todos os blocos de concreto antes e após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH são apresentados no seguintes Itens:

- *APÊNDICE C - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,65 do LOH, para β de 0; 0,50; 1,0 e 2,0% de ar.*

- *APÊNDICE D - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,50 do LOH, para β de 0; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% de ar.*

- *APÊNDICE E - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,45 do LOH, para β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50 e 2,0% de ar.*

- *APÊNDICE F: Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,35 do LOH, para β de 0; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% de ar.*

5.3.2 Comparativo Ensaio de Concreto – LOH/UFRGS x USBR

Considerando as análises anteriores acerca dos registros fotográficos e dos parâmetros característicos dos corpos de prova em concreto após ação da cavitação, serão apresentadas, a seguir, as principais descrições dos danos registrados nos concretos estudados pelo USBR e pelo LOH/UFRGS, bem como os efeitos das demandas relativas de ar adotadas e eventuais disparidades existentes entre ensaios semelhantes (USBR x LOH).

As demandas relativas de ar ensaiadas no dispositivo de cavitação do USBR foram de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0%, sendo os concretos avaliados caracterizados pelas relações água/cimento de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70.

A Figura 5-31 e a Tabela 4-8: Resistências médias à compressão, extraídas para os concretos utilizados nos dispositivos do LOH/UFRGS e do USBR. descrevem o comparativo entre os resultados de $f_{cm,j}$ em relação ao tempo de cura dos concretos utilizados nos estudos do LOH/UFRGS e do USBR.

As resistências médias à compressão definidas aos concretos utilizados no USBR descrevem o comportamento dos $f_{cm,j}$ entre o 26° e 37° dia de cura, período no qual os mesmos foram submetidos ao dispositivo de e aos efeitos do fenômeno da cavitação. Para os concretos ensaiados no LOH/UFRGS foram consideradas as resistências médias à compressão extraídas aos 91° dias de cura, visto que nenhum dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação brasileiro ocorreu em período inferior a esse.

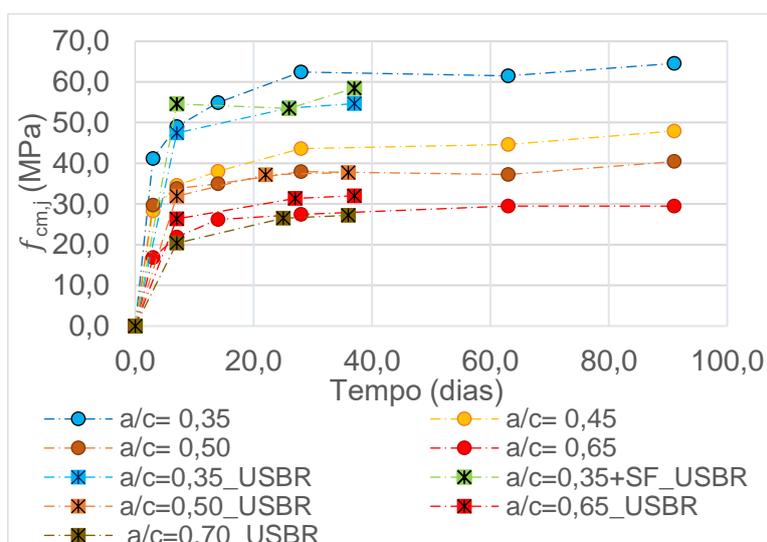


Figura 5-31: Comparativo entre as curvas de resistência média a compressão ($f_{cm,j}$) obtidas para os concretos utilizados nos ensaios do USBR e do LOH/UFRGS.¹⁰

¹⁰ Os dados referentes as curvas de resistência a compressão dos concretos ensaiados no dispositivo de cavitação do USBR, obtidos durante o ano de 2020, foram publicados no Report HL- 2020-05. "Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces".

Tabela 4-8: Resistências médias à compressão, extraídas para os concretos utilizados nos dispositivos do LOH/UFRGS e do USBR.

Local	Dias	$f_{cm,j}$ (MPa)					
		0,35	0,35+SF	0,45	0,50	0,65	0,70
LOH/UFRGS	3	41,2	-	28,3	29,7	16,8	-
	7	49,0	-	34,5	33,8	21,9	-
	14	54,8	-	38,0	35,0	26,1	-
	28	62,4	-	43,6	38,0	27,4	-
	63	61,5	-	44,6	37,2	29,5	-
	91	64,5	-	47,9	40,4	32,7*	-
f_{cm}		55,6		39,5	35,6	25,2	
USBR	7	47,4	54,5	-	31,9	26,3	20,3
	25	53,5	53,4	-	37,2	31,3	26,4
	36	54,6	58,4	-	37,7	32,0	27,2
	$f_{cm,26-37}$ ¹¹	54,1	55,9	-	37,5	31,7	26,8

* valor estimado a partir dos aumentos de resistência média a compressão entre 63° e 91° dias para as demais relações água/cimento utilizadas.

Analisando os $f_{cm,j}$ da Figura 5-31 é possível constatar o mesmo comportamento entre as curvas de resistência média à compressão das relações a/c de 0,50 do USBR e do LOH, principalmente a partir do 7° dia de idade desses concretos. Apesar das diferenças inerentes aos materiais adotados (tipo de cimento, agregados graúdos e miúdos) os $f_{cm,j}$ se mantiveram semelhantes entre si.

Os concretos de relação a/c de 0,65 do LOH e USBR e de a/c 0,70 do USBR apresentaram valores que variaram de 21,8; 26,3 e 20,3 MPa nos primeiros dias de cura (7° dia). As discrepâncias de $f_{cm,j}$ reduzem significativamente após 25° dia para os concretos de a/c de 0,65 do LOH/UFRGS e de 0,70 do USBR o que pode indicar, preliminarmente, a ocorrência de danos com intensidade e disposição similares nas superfícies desses corpos de prova (Figura 5-31).

As resistências médias à compressão do concreto de a/c de 0,35 do LOH/UFRGS (64,5 MPa) foram superiores aos $f_{cm,j}$ definidos para os blocos de

¹¹ As resistências médias à compressão finais atribuídas aos concretos do USBR foram estimadas a partir das resistências extraídas entre os dias de início e término de cada ensaio no dispositivo de cavitação, coincidindo normalmente entre os 26° e 37° dias de cura ($f_{cm,26-37}$) desses.

a/c de 0,35 e de 0,35+SF do USBR (54,6 e 58,4 MPa respectivamente). Novamente, devido a essa análise espera-se que os efeitos ocasionados pelo fenômeno da cavitação sejam menores nos blocos de a/c 0,35 do LOH quando comparados aos demais blocos de a/c 0,35 do USBR (Figura 5-31).

Os f_{cm} característicos dos concretos do USBR foram de 55,4; 51,8; 35,6; 29,9; 24,6 MPa para as relações a/c de 0,35+SF; 0,35; 0,50; 0,65 e 0,70, respectivamente.

É importante ressaltar que as resistências médias finais à compressão dos corpos de prova do USBR foram estimadas através da média entre todos os valores de (f_{cm}) que compõem as curvas de resistência dos traços de concreto considerados. Entretanto, os resultados extraídos durante o rompimento dos CPs não apresentaram diferenças tão acentuadas entre as resistências conforme há o avanço do processo de cura desses concretos.

Já para os blocos de concreto moldados no LOH, os f_{cm} finais foram atribuídos como sendo os resultados das resistências médias dos CPs rompidos aos 91 dias de cura ($f_{cm,91}$), quando os ganhos de resistência média à compressão são pouco relevantes ao longo da vida útil desses materiais.

Através dos registros fotográficos de descrição dos danos nos blocos de concreto do USBR e do LOH/UFRGS, foram realizados comparativos entre os efeitos ocasionados nas superfícies de concreto em contato com o fenômeno da cavitação. Esta análise foi elaborada somente para os concretos de relação água/cimento e para as demandas relativas de ar semelhantes. Os demais registros fotográficos dos danos apresentados pelos blocos de concreto do USBR, considerando as β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0% após as 4 horas de ensaio são descritos no *APÊNDICE G - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70 do USBR, para β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0% de ar.*

A partir da Figura 5-32, Figura 5-33 e Figura 5-34 foram demonstrados os comparativos realizados entre os danos causados nas superfícies dos concretos de a/c 0,35; 0,50 e 0,65 do LOH/UFRGS e de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70 do USBR.

Local	LOH/UFRGS	USBR	
β	a/c = 0,35	a/c = 0,35+SF	a/c = 0,35
0%			
0,25%			
0,50%			
1,0%			
2,0%			
	t = 120 min.; V = 30,0 m/s	t = 240 min.; V = 30,0 m/s	
	(a)	(b)	(c)

Figura 5-32: Danos registrados nos blocos de a/c 0,35 do LOH (a); blocos de a/c 0,35+SF (b), e; 0,35 (c), ambos do USBR.

De acordo com a Figura 5-32, os blocos de a/c 0,35 do LOH/UFRGS apresentaram os maiores danos quando comparados aos corpos de prova de 0,35+SF e 0,35 do USBR, contrariando o esperado devido ao $f_{cm,91}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS (64,5 MPa) ter sido superior ao f_{cm} dos blocos do USBR (55,4 e 51,8 MPa).

O concreto dos blocos de a/c de 0,35+SF diferem dos corpos de prova de a/c de 0,35 do USBR devido exclusivamente a presença do aditivo “SF - Superfluidizing” (superfluidificante), utilizado na mistura do composto ainda em estado fresco, com o intuito de favorecer a trabalhabilidade do concreto sem que as propriedades físicas, tais como, resistência e tempo de cura, fossem alteradas. Entretanto, os concretos de a/c de 0,35+SF apresentaram um f_{cm} maior do que os blocos de a/c de 0,35 do USBR sem o aditivo. Quando avaliados os danos entre esses concretos foram detectadas diferenças quase imperceptíveis nos registros fotográficos das $\beta \geq 0,50$ %, onde foram observados pequenos pontos de desgaste somente nos blocos de a/c de 0,35 (Figura 5-32c).

A verificação dos efeitos ocasionados aos blocos de concreto de a/c de 0,35 do LOH/UFRGS demonstrou que, mesmo detendo maior f_{cm} e um menor tempo de exposição ao fenômeno de cavitação ($t = 120$ min), quando comparados aos demais concretos do USBR ($t = 240$ min), a remoção de material foi mais intensa e de maior extensão do que os demais concretos. Além disso, pode-se observar pequenas zonas de remoção até nos ensaios com a presença de $\beta = 1,0\%$, sendo os efeitos da cavitação praticamente inexistentes quando $\beta = 2,0\%$ (Figura 5-33a).

Uma provável justificativa pode ser atribuída ao arranjo interno dos agregados graúdos (britas) dos corpos de prova do LOH, os quais apresentaram uma maior quantidade desse componente próximo a fase de contato dos blocos com o escoamento. A presença de britas próximas à camada externa dos corpos de prova acaba por favorecer a ação da cavitação devido, primeiramente a redução do aglomerante, que fornece união entre as partículas do composto, que quando removido expõem uma superfície mais rugosa, responsável por intensificar ainda mais a ação erosiva do escoamento cavitante.

Outro aspecto que não pode ser descartado seria o aumento dos pontos de ruptura entre a pasta e a superfície de contato com os agregados graúdos, que mais próximos, poderiam ocasionar conexões internas entre os pontos de fragilidade do concreto, eventualmente justificando a perda excessiva de material dos blocos de a/c 0,35 do LOH/UFRGS quando comparado aos blocos do USBR de mesma relação a/c (Figura 5-32). Essa análise pode ser estendida aos danos registrados nos blocos de relação a/c = 0,50 do USBR e do LOH/UFRGS apresentados na Figura 5-33.

Diferentemente do constatado nos ensaios do LOH, para se obter proteção semelhante nos corpos de prova de a/c 0,50 do USBR, torna-se necessário aumentar a demanda relativa de ar no escoamento para $\beta = 2,0\%$, uma vez que foram registrados desgastes pontuais desses concretos quando utilizados apenas 1,0% de ar no aparato experimental do LOH/UFRGS (Figura 5-33b).

Local	LOH/UFRGS	USBR
β	a/c = 0,50	a/c = 0,50
0%	 t = 90 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
1,0%	 t = 120 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
2,0%	 t = 120 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
	(a)	(b)

Figura 5-33: Danos registrados nos blocos de concreto de relação a/c 0,50 após exposição ao dispositivo de cavitação, do LOH/UFRGS (a), e; do USBR (b).

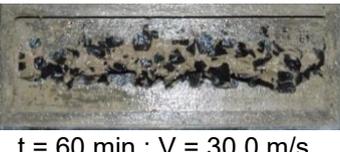
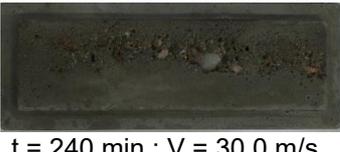
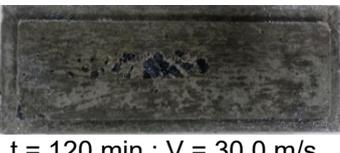
Local	LOH/UFRGS	USBR	
β	a/c = 0,65	a/c = 0,65	a/c = 0,70
0%	 t = 60 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
1,0%	 t = 120 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
2,0%	 t = 120 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s	 t = 240 min.; V = 30,0 m/s
	(a)	(b)	(c)

Figura 5-34: Danos registrados nos blocos de concreto de relação a/c 0,65 após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS (a); do USBR (b), e; os danos definidos aos blocos de a/c 0,70 do USBR (c).

Devido à proximidade entre o $f_{cm,91}$ de 32,7 MPa, dos blocos de a/c de 0,65 do LOH/UFRGS, e os f_{cm} de 29,9 e 24,6 MPa dos concretos de a/c 0,65 e 0,70 do USBR, esperava-se que os danos identificados nos registros fotográficos fossem semelhantes em extensão e intensidade. Porém, a maior intensidade, definida aqui como sendo os blocos com maior exposição dos agregados graúdos, foi apresentada pelos corpos de prova de a/c de 0,65 do LOH/UFRGS nas β de 1,0 e 2,0% de ar (Figura 5-34a).

Os danos dos blocos de a/c de 0,70 do USBR apresentaram maior extensão do que os demais concretos (a/c de 0,65 do LOH/UFRGS e USBR), tendo sua ocorrência estendida inclusive aos blocos expostos a $\beta = 2,0\%$. A existência de desgastes superficiais nessas condições de ensaio torna-se aceitável, pois os blocos avariados são caracterizados por um alto teor de água em sua composição e, portanto, um elevado número de vazios após sua cura.

De acordo com isto, o traço de a/c de 0,70 possui em sua constituição um maior número de vazios em seu interior que adições de $\beta = 2,0\%$ não conseguem, mesmo amortecendo as ondas de choque ocasionadas pelas implosões das cavidades de vapor, anular por completo os danos gerados aos corpos de prova dessa relação água/cimento (Figura 5-34c).

Por fim, a análise comparativa dos registros fotográficos, em conjunto com os f_{cm} , para os concretos de relação água/cimento semelhantes (LOH/UFRGS e USBR) fortaleceu o indicativo de que mesmo adotando procedimentos e materiais similares, fatores externos vinculados a fabricação e moldagem dos corpos de prova podem vir a alterar consideravelmente os danos a serem verificados nos blocos de concreto em estudo, reforçando a necessidade de avaliação individualizada de cada concreto especificado.

5.3.3 Perdas de Massa e Volume – Metodologia de Pesagem

Os danos ocasionados pelo fenômeno da cavitação nos corpos de prova em concreto foram analisados em função das perdas de massa (P_{em}) e volume apresentadas para cada relação água/cimento avaliada através da metodologia de pesagem dos blocos.

Com os resultados obtidos foi possível quantificar também as perdas sutis de material, imperceptíveis nos registros fotográficos, mas evidentes ao

observador devido a formação de irregularidades superficiais detectadas pela inspeção visual e de tato dos blocos de concreto após exposição ao dispositivo do LOH/UFRGS. A metodologia de quantificação das perdas de massa e volume por pesagem também oportunizou a verificação da influência da aeração na formação dos danos de diferente intensidade sobre blocos de concreto.

Inicialmente foram analisados os resultados das perdas de massa dos blocos de concreto obtidas nos intervalos de tempo de 30, 60, 90 e 120 min, ou seja, a cada 30 min de exposição ao fenômeno de cavitação, em relação as demandas relativas de ar e as relações a/c investigadas.

Na Figura 5-35 e Figura 5-36 são apresentadas as perdas de massa dos corpos de prova de a/c 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65 para β de 0; 0,50; 1,0 e 2,0% de ar. Nelas são expressos resultados de P_{em} de todos os blocos de concreto ensaiados, incluindo suas repetições, previamente estabelecidas na busca de variabilidade do conjunto amostral. Entretanto, como a metodologia de pesagem hidrostática adotada descreveu variações de peso inconsistentes, isto é, perdas de massa extremamente baixas, indicadas nessas condições como sendo valores negativos de massa, os mesmos foram desconsiderados durante esta análise.

Os demais resultados de perda de massa para β de 0,25; 0,75; 1,50; 6,0 e 8,0% são apresentados no *APÊNDICE H - Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min, durante os ensaios de 2h de exposição dos blocos de concreto ao dispositivo de cavitação do LOH.*

Analisando a Figura 5-35 e Figura 5-36 se pode identificar reduções das perdas de massa dos concretos verificados com o acréscimo de $\beta = 0,50\%$ de ar no escoamento, principalmente para as relações a/c de 0,50 e 0,65. A inserção das demandas relativas de 1,0 e 2,0% não forneceram alterações significativas nas perdas de massa ao longo dos ensaios, o que permite afirmar que adições superiores a 1,0% tornam-se desnecessárias quando prioriza-se a redução das perdas de massa dos corpos de prova avaliados.

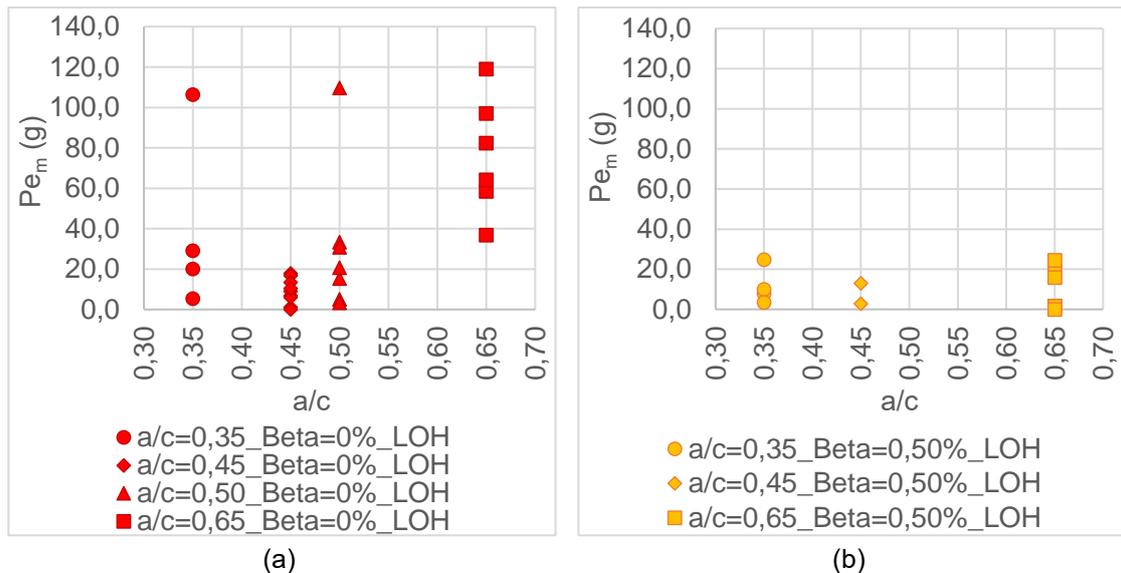


Figura 5-35: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 0%, e; (b) 0,50%.

As maiores discrepâncias entre as perdas de massa medidas, quando avaliadas condições de ensaio semelhantes, ou seja, mesma relação água/cimento e β , foram verificadas nos ensaios sem a adição de ar para a/c de 0,35; 0,50 e 0,65 (Figura 5-35 e Figura 5-36).

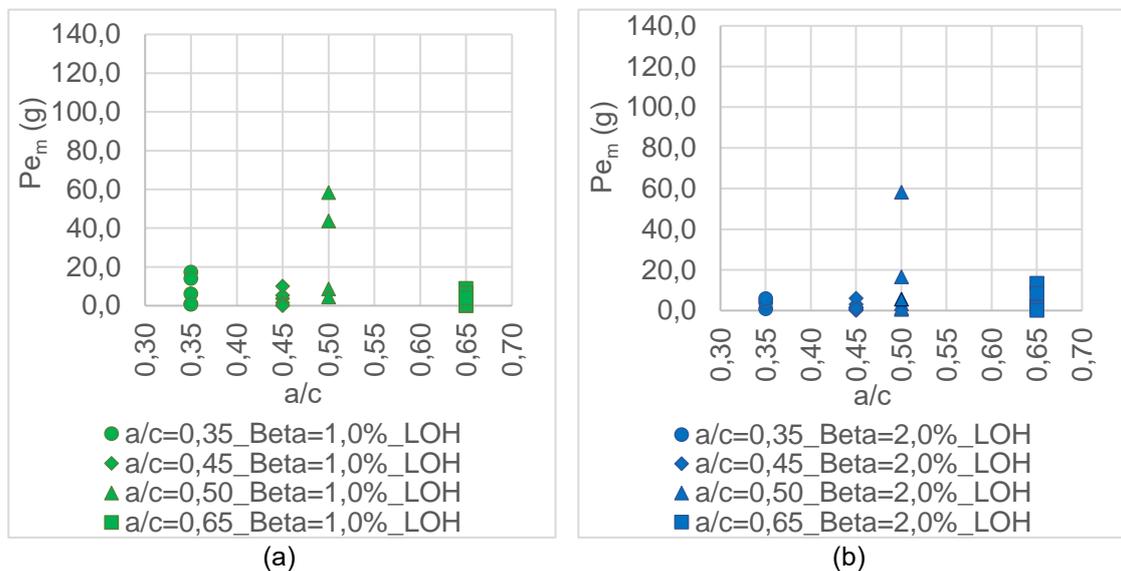


Figura 5-36: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 1,0%, e; (b) 2,0%.

Além disso, os resultados da Figura 5-35 e Figura 5-36 não expressam o comportamento dos danos por cavitação de maneira objetiva, visto que para as relações a/c de 0,35 e 0,50 as perdas de massa observadas foram superiores àquelas verificadas para os blocos de menor resistência, 0,45 e 0,65,

respectivamente, contrariando o esperado devido as características de resistência desses materiais.

Na tentativa de observar a existência de uma evolução temporal dos danos através das perdas de massa (P_{em}), foram analisados os resultados agrupando-os em segmentos iguais de tempo (30 min.), e de forma cronológica, conforme foram registrados os danos pela metodologia adotada.

Desta forma, a Figura 5-37 e Figura 5-38 apresentam os resultados de P_{em} referentes a separação em intervalos de 0 a 30 min, 30 e 60 min, 60 a 90 min e 90 a 120 min para as demandas relativas de ar no escoamento de 0,0% e 2,0%.

Os resultados dos ensaios realizados com β de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 6,0 e 8,0% são apresentados no *APÊNDICE I - Resultados das perdas de massa registradas para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de 0,25, 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 6,0 e 8,0%*.

Ao observarmos a Figura 5-37 podemos concluir que, para o concreto de relação $a/c = 0,35$, as P_{em} demonstraram um aumento expressivo das erosões ocasionadas pela ação cavitante do escoamento. Os danos registrados de 5,4 g atingiram valores de perda de até 106,4 g entre os intervalos de tempo de 30 a 90 min. de exposição ao fenômeno. A partir do último intervalo avaliado a perda de massa retrocede a um valor de 20,0 g, mesmo com a presença de irregularidades na superfície desses concretos, devido ao tempo de exposição de 2h ao fluxo sem inserção de ar ($\beta = 0,0\%$).

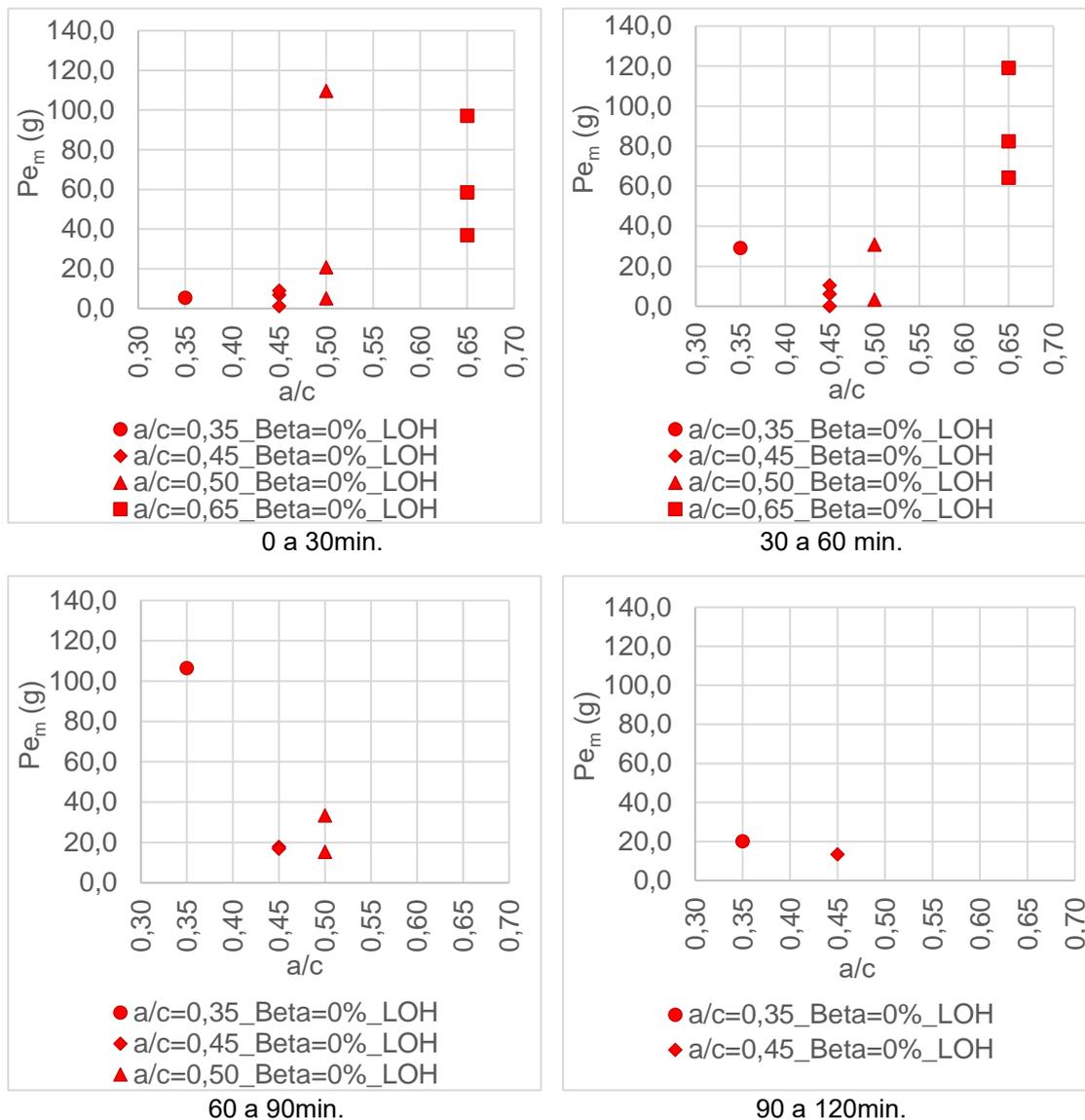


Figura 5-37: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 0%.

Apesar das discrepâncias entre os valores de perdas de massa apresentados nos ensaios dos concretos de a/c 0,50 e 0,65, quando avaliados os mesmos períodos de exposição ao dispositivo de cavitação (0 – 30min. e 30-60 min.), foram constatados: acréscimos, de perda de material, nos blocos de a/c 0,65, entre 30 min. $\leq t \leq 60$ min., e; reduções para os $a/c = 0,50$, a partir dos 30 min. de ensaio (Figura 5-37).

Para os blocos de relação $a/c = 0,45$ as erosões formadas mantiveram-se praticamente constantes ao longo dos 4 intervalos observados, com perdas de massa abaixo dos 20 g de material (Figura 5-37).

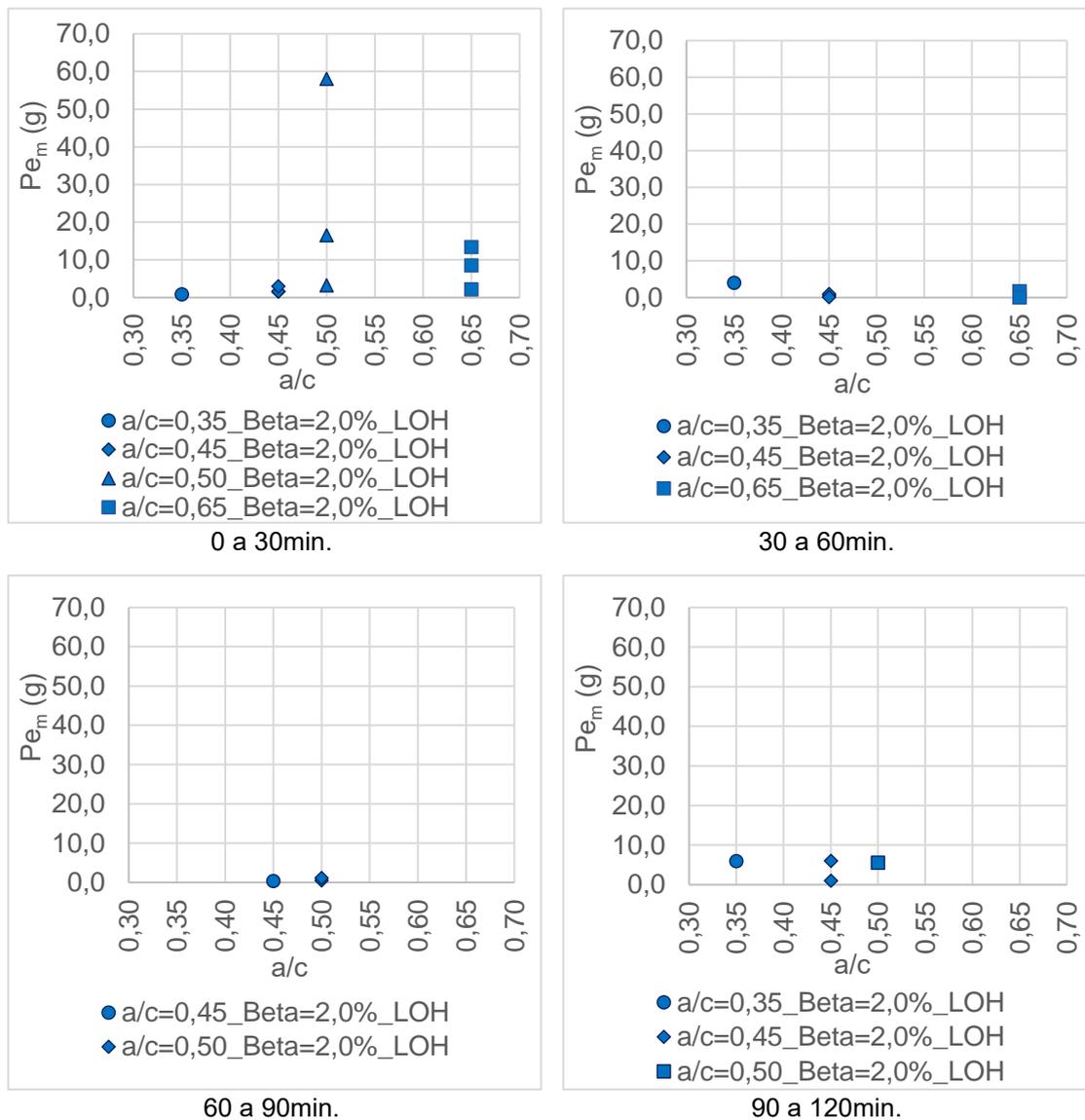


Figura 5-38: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 2,0%.

Os resultados de Pe_m descritos nos diferentes intervalos de tempo, nos ensaios com $\beta = 2,0\%$ (Figura 5-38), descreveram reduções significativas das erosões, principalmente para os concretos de a/c 0,65 e 0,50 e nos intervalos de 0 a 30 min e de 30 a 60 min. A demanda relativa de ar de 2,0%, inserida ao escoamento manteve praticamente constante as erosões para as demais relações água/cimento investigadas, e em valores inferiores a 10 g de material.

Essa análise também nos permitiu identificar que o acréscimo de ar no sistema, além de promover a redução das perdas de massa, acaba por antecipar o intervalo de tempo, de 90 para 30 minutos, onde não há registros de aumento dos danos significativos pelo fenômeno da cavitação (Figura 5-38).

A discretização das perdas de massa em segmentos de 30 min indicou que: os maiores danos ocasionados pela cavitação concentram-se nos primeiros 90 min. de ensaio sem a presença de ar no escoamento ($\beta = 0,0\%$), e; a adoção de $\beta = 2,0\%$, além de reduzir as dispersões dos resultados de Pe_m , restringe a formação das erosões dos blocos de concreto ao primeiro intervalo de tempo avaliado, de 0 a 30 min (Figura 5-37 e Figura 5-38).

Contudo, mesmo tendo sido observadas diferenças de comportamento entre as perdas de massa dos corpos de prova em cada segmento de tempo observado, os resultados expressos na Figura 5-37 e Figura 5-38 não permitiram interpretações que justifiquem a dispersão dos valores extraídos das repetições de cada ensaio ou as altas Pe_m dos concretos de a/c 0,35 e 0,45, de elevado $f_{cm,91}$ quando comparados aos demais concretos em questão.

Por fim, foram analisadas as taxas das perdas de massa totais pelo tempo de exposição à cavitação (Pe_m/t), extraídas a partir da diferença entre os pesos iniciais e finais dos corpos de prova, antes e logo após o término de cada ensaio, comparando-as aos resultados apresentados pelos blocos de concretos testados pelo USBR. O tempo foi adicionado a esta análise uma vez que os ensaios realizados no LOH/UFRGS foram desenvolvidos durante, no máximo, 2 horas (120 min), enquanto que, os testes do USBR, com a presença dos corpos de prova em concreto, foram realizados em períodos de 4 horas (240 min).

Os resultados das Pe_m/t foram relacionados com as resistências médias a compressão ($f_{cm,j}$) para permitir a distinção entre os dados do LOH/UFRGS e do USBR, pois apesar da mesma composição (traço) e relação água/cimento os concretos diferenciaram-se principalmente pelos $f_{cm,j}$ finais.

Na Figura 5-39, Figura 5-40 e Figura 5-41 são apresentados os comparativos entre os ensaios com as demandas relativas de ar de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0%. As demandas relativas de ar (Beta) de 0,75; 1,50; 6,0 e 8,0%, embora tenham sido avaliados nos ensaios com a máquina de cavitação do LOH/UFRGS, não possuem representação nos dados do USBR, sendo desta forma apresentados somente através do *APÊNDICE J - Comparativo entre as perdas de massa totais por minuto de ensaio extraídas dos blocos de concreto, após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, β de 0,75; 1,50; 6,0 e 8,0%*.

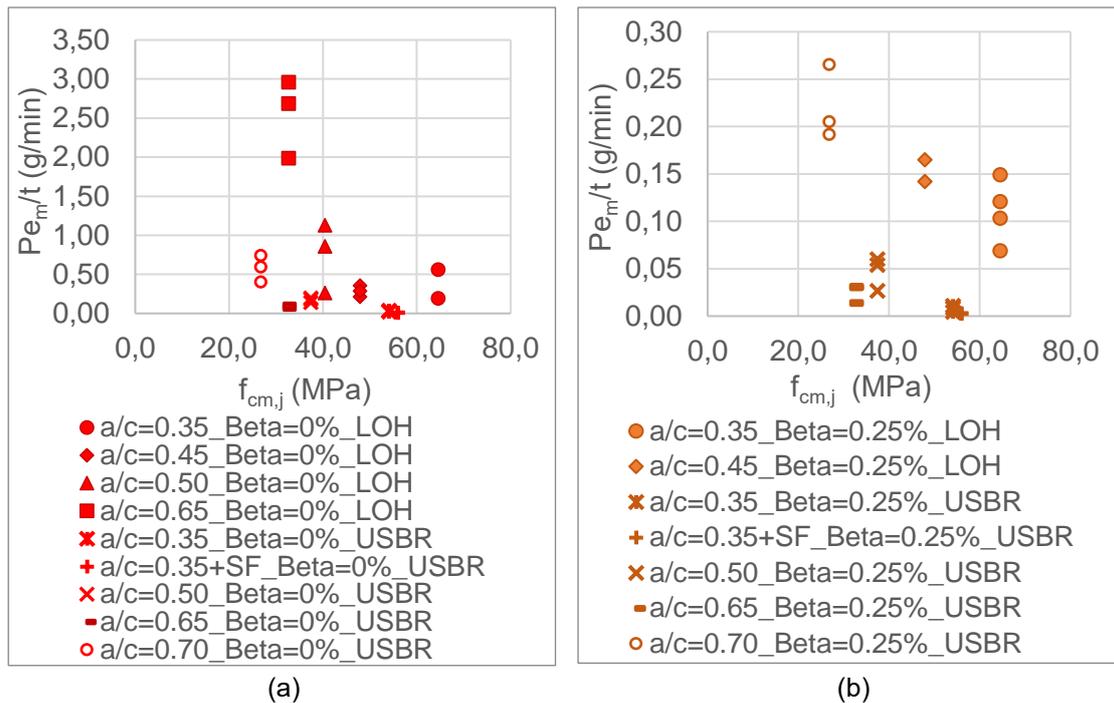


Figura 5-39: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 0\%$ (a), e; $\beta = 0,25\%$ (b).^{12;13}

As relações de P_{e_m}/t obtidas dos ensaios no USBR não demonstram variações tão expressivas quanto os resultados dos corpos de prova do LOH/UFRGS. Os concretos de 0,35 e 0,35+SF do USBR registraram menores danos do que os blocos de a/c 0,35 do LOH, caracterizados por maiores f_{cm} , após exposição ao fenômeno da cavitação sem a inserção de ar ao escoamento ($\beta = 0,0\%$). Essas diferenças podem ser atribuídas a eventuais disparidades nos processos de concretagem ou vibração dos compostos adotados em cada um dos laboratórios, o que poderia acarretar na presença de bolhas de ar ou na segregação indesejada do concreto, os quais alterariam a resistência final dos blocos confeccionados (Figura 5-39).

Adições de 0,25% e 0,50% de ar no escoamento diminuíram expressivamente as P_{e_m}/t em todas as relações água/cimento avaliadas, independente do dispositivo de cavitação utilizado, com exceção dos corpos de

¹² Resistência média à compressão atribuída aos concretos do USBR de acordo com a idade dos blocos no dia de realização dos ensaios no dispositivo de cavitação do US Reclamation.

¹³ Os $f_{cm,j}$ definidos aos concretos do LOH/UFRGS foram atribuídos de acordo com suas resistências médias apresentadas aos 91° dias de cura, visto que nenhum dos ensaios realizados nos dispositivo de cavitação brasileiro ocorreu antes desse período.

prova de 0,35 e 0,35+SF do USBR que mantiveram constantes suas perdas em comparação aos demais concretos verificados (Figura 5-39b e Figura 5-40a).

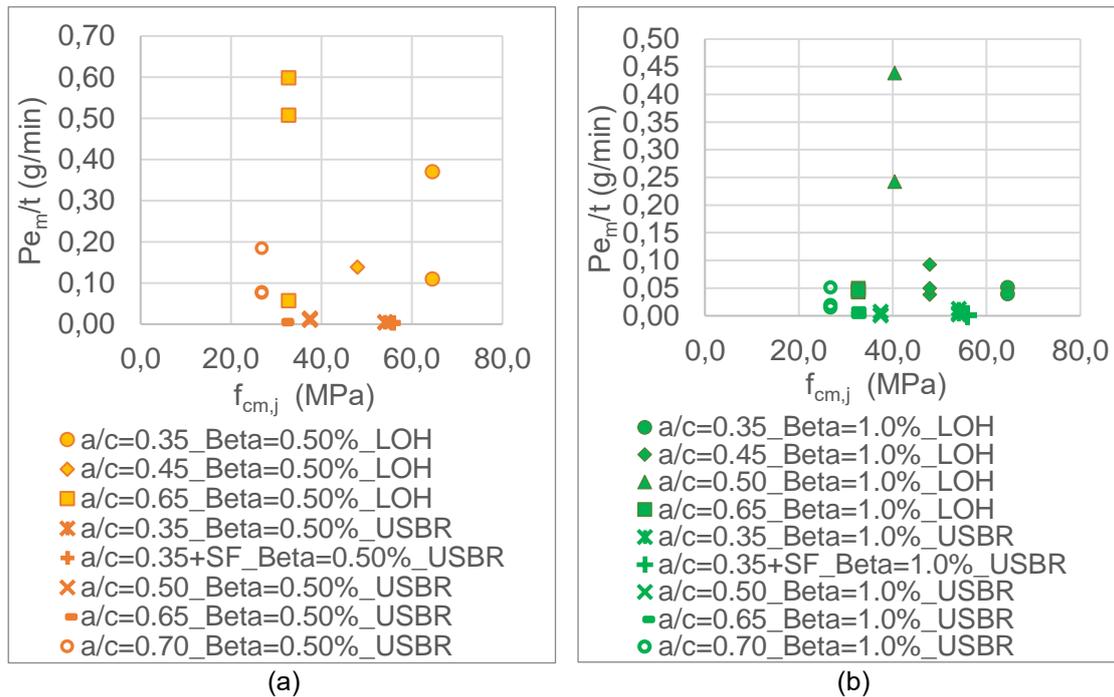


Figura 5-40: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 0,50\%$ (a), e; $\beta = 1,0\%$ (b).^{14;15}

Considerando $\beta \geq 1,0\%$, as Pe_m/t deixam de ser influenciadas pelos parâmetros de $f_{cm,j}$ e relação água/cimento dos concretos, transformando a aeração do escoamento no principal agente de controle da ocorrência de danos por cavitação nas superfícies dos blocos avariados (Figura 5-40b e Figura 5-41).

Os resultados apresentados na Figura 5-41 indicam que o uso de $\beta = 2,0\%$ reduzem significativamente as perdas de massa totais em função do tempo a valores constantes e menores que 0,14 g/min de material removido.

¹⁴ Resistência média à compressão atribuída aos concretos do USBR de acordo com a idade dos blocos no dia de realização dos ensaios no dispositivo de cavitação do US Reclamation.

¹⁵ Os $f_{cm,j}$ definidos aos concretos do LOH/UFRGS foram atribuídos de acordo com suas resistências médias apresentadas aos 91° dias de cura, visto que nenhum dos ensaios realizados nos dispositivos de cavitação brasileiro ocorreu antes desse período.

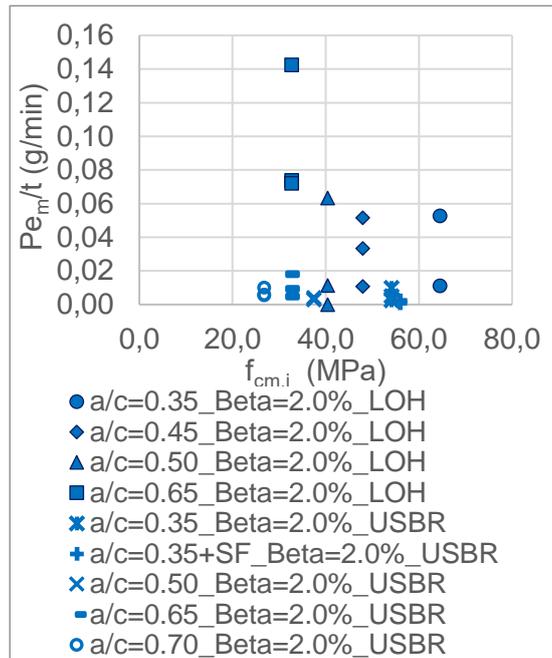


Figura 5-41: Comparativo entre as relações de perda de massa totais pelo tempo x a resistência média a compressão dos blocos de concreto após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, $\beta = 2,0\%$.^{16;17}

Como a determinação dos volumes erodidos (V_{eMP}), através da metodologia da pesagem, baseia-se nas perdas de massa apresentadas pelos blocos após os ensaios, o comportamento desse parâmetro não será abordado de maneira similar aos resultados descritos na Figura 5-39, Figura 5-40 e Figura 5-41, dado que o comportamento seria idêntico e repetitivo.

Desta forma, optou-se por verificar os volumes erodidos através de seus valores médios, na tentativa de promover a compreensão de uma tendência mais abrangente dos dados obtidos pelo LOH/UFRGS e USBR. Sendo assim, a Figura 5-42 apresenta um comparativo entre os volumes médios dos danos para os concretos de relação 0,35; 0,50 e 0,65, adotadas nos ensaios de ambos os dispositivos de cavitação.

Por meio da Figura 5-42 se identifica que os volumes médios erodidos (V_{eMP}) nos blocos do LOH/UFRGS foram superiores aos resultados apresentados no USBR. Os maiores volumes médios, de $63,3 \text{ cm}^3$ e $41,7 \text{ cm}^3$,

¹⁶ Resistência média à compressão atribuída aos concretos do USBR de acordo com a idade dos blocos no dia de realização dos ensaios no dispositivo de cavitação do US Reclamation.

¹⁷ Os $f_{cm,j}$ definidos aos concretos do LOH/UFRGS foram atribuídos de acordo com suas resistências médias apresentadas aos 91° dias de cura, visto que nenhum dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação brasileiro ocorreu antes desse período.

foram vinculados aos $a/c = 0,65$, para o dispositivo do LOH, e de $a/c 0,50$, para o sistema do USBR.

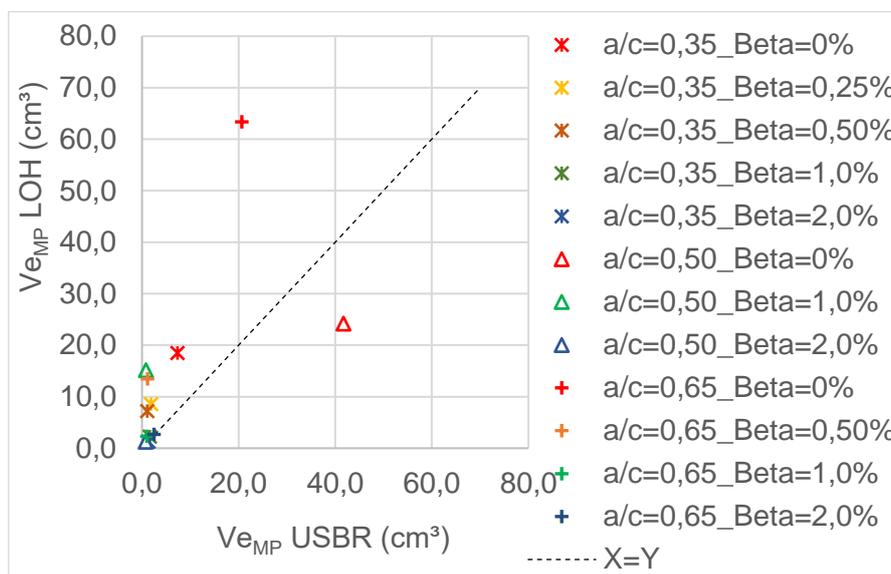


Figura 5-42: Comparativo entre os resultados dos volumes erodidos do USBR x LOH, definidos pela metodologia da pesagem.

Em suma, a análise dos V_{eMP} , estimados pelo método da pesagem não promoveram a parametrização esperada entre os conjuntos de resultados atribuídos aos ensaios nos dois dispositivos de cavitação, tornando ainda mais evidente as disparidades dos danos do que quando analisadas as perdas de massa dos corpos de prova em concreto.

Por fim, fundamentado nas análises anteriores, optou-se por considerar somente os valores médios das perdas de massa apresentadas para os blocos de relação 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65, com o intuito de minimizar a variabilidade dos resultados apresentados e oportunizar o comparativo com os ensaios realizados por Peterka (1953) e USBR.

A Figura 5-43 apresenta os resultados das perdas de massa médias dos blocos de concreto ensaiados no LOH/UFRGS, os dados obtidos no USBR para as a/c de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70, publicados por Mortensen (2020), além dos danos determinados experimentalmente por Peterka (1953). As perdas de massa foram então avaliadas em função das demandas relativas de ar adicionadas ao escoamento e das curvas de ajuste estabelecidas por Peterka (1953).

O comparativo entre as perdas de massa observadas nos blocos de concreto do LOH e USBR, descrito graficamente na Figura 5-43, também é

apresentado na Tabela 5-5 em ordem decrescente de perda de massa, conforme os coeficientes Beta, as relações a/c e os $f_{cm,j}$ característicos.

Tabela 5-5: Perdas de massa médias, em ordem decrescente, blocos ensaiados no LOH/UFRGS e USBR.^{18,19}

n°	β (%)	Perda de Massa (g)	a/c - Local	$f_{cm,j}$ (MPa)	n°	β (%)	Perda de Massa (g)	a/c - Local	$f_{cm,j}$ (MPa)
1°	0,00	148,4	0.65 (LOH)	32,7	25°	0,75	6,5	0.45 (LOH)	47,9
2°	0,00	127,3	0.70 (USB)	26,8	26°	0,75	3,7	0.35 (LOH)	64,5
3°	0,00	59,1	0.50 (LOH)	37,4	27°	1,00	37,2	0.50 (LOH)	40,4
4°	0,00	45,2	0.35 (LOH)	64,5	28°	1,00	6,7	0.70 (USB)	26,8
5°	0,00	41,7	0.50 (USB)	37,4	29°	1,00	5,7	0.45 (LOH)	47,9
6°	0,00	27,3	0.45 (LOH)	47,9	30°	1,00	5,6	0.65 (LOH)	32,7
7°	0,00	20,7	0.65 (USB)	31,7	31°	1,00	5,5	0.35 (LOH)	64,5
8°	0,00	7,3	0.35 (USB)	54,1	32°	1,00	1,6	0.35 (USB)	54,1
9°	0,00	2,8	0,35+SF(USB)	55,9	33°	1,00	1,0	0.65 (USB)	31,7
10°	0,25	53,0	0.70 (USB)	26,8	34°	1,00	0,8	0.50 (USB)	37,4
11°	0,25	12,8	0.45 (LOH)	47,9	35°	1,00	0,3	0,35+SF(USB)	55,9
12°	0,25	11,7	0.35 (LOH)	64,5	36°	1,50	7,5	0.35 (LOH)	64,5
13°	0,25	10,7	0.50 (USB)	37,4	37°	1,50	3,0	0.45 (LOH)	47,9
14°	0,25	6,0	0.65 (USB)	31,7	38°	2,00	6,5	0.65 (LOH)	32,7
15°	0,25	1,9	0.35 (USB)	54,1	39°	2,00	3,0	0.35 (LOH)	64,5
16°	0,25	0,7	0,35+SF(USB)	55,9	40°	2,00	3,0	0.50 (LOH)	40,4
17°	0,50	32,9	0.65 (LOH)	32,7	41°	2,00	2,8	0.45 (LOH)	47,9
18°	0,50	17,7	0.35 (LOH)	64,5	42°	2,00	2,5	0.65 (USB)	31,7
19°	0,50	13,8	0.70 (USB)	26,8	43°	2,00	1,7	0.70 (USB)	26,8
20°	0,50	12,5	0.45 (LOH)	47,9	44°	2,00	1,4	0.35 (USB)	54,1
21°	0,50	2,9	0.50 (USB)	37,4	45°	2,00	0,8	0.50 (USB)	37,4
22°	0,50	1,2	0.65 (USB)	31,7	46°	2,00	0,4	0,35+SF(USB)	55,9
23°	0,50	1,1	0.35 (USB)	54,1	47°	6,00	0,0	0.50 (LOH)	40,4
24°	0,50	0,7	0,35+SF(USB)	55,9	48°	8,00	4,6	0.50 (LOH)	40,4

¹⁸ As perdas de massa descritas na Tabela 5-5 foram obtidas em diferentes tempos de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

¹⁹ Os $f_{cm,j}$ característicos dos blocos de concreto do LOH/UFRGS se referem as resistências médias extraídas aos 91° dias de cura. Enquanto que, o $f_{cm,j}$ apresentado para os concretos do USBR foram estimados de acordo com a idade que os mesmos possuíam durante os ensaios no dispositivo de cavitação do USBR, normalmente entre o 26° e 37° dias de cura.

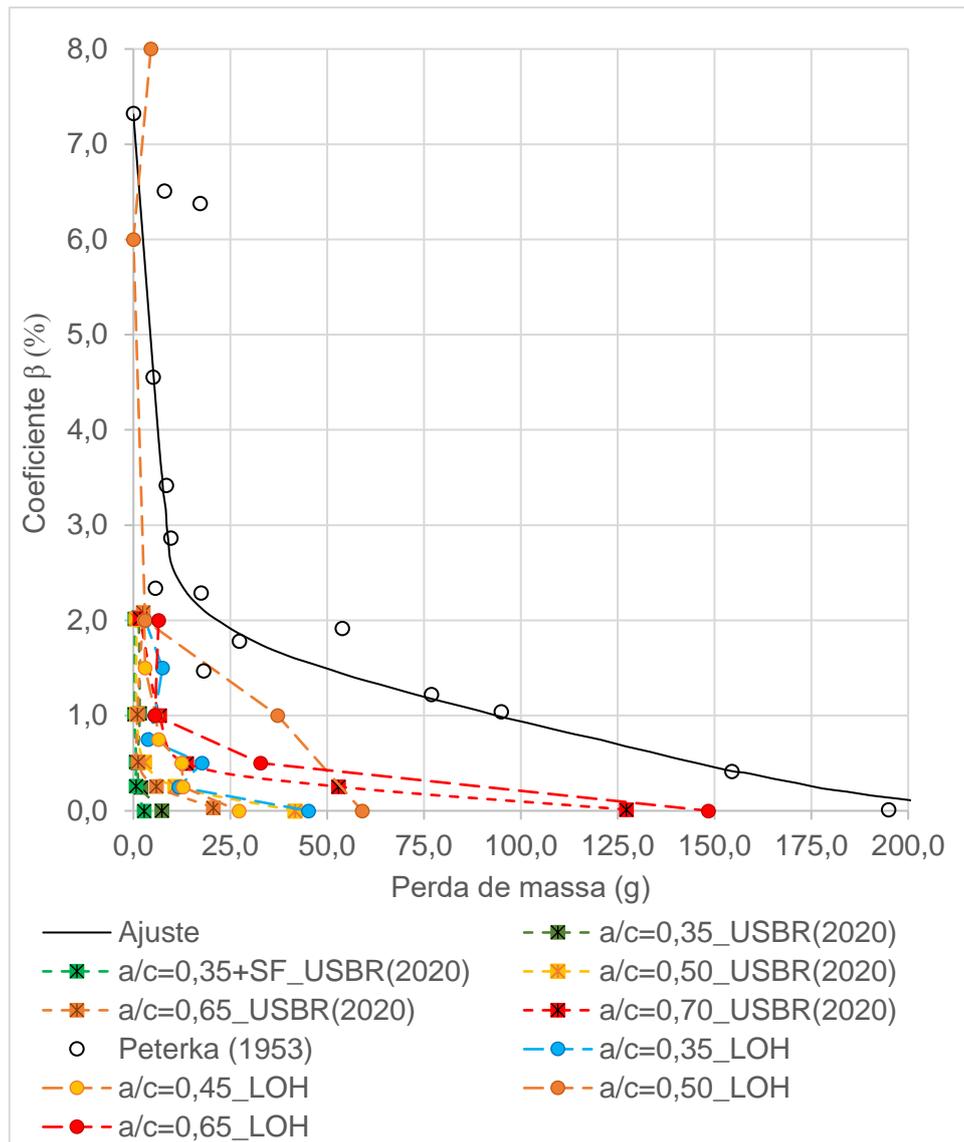


Figura 5-43: Gráfico de perda de massa x coeficiente Beta, adaptado de Peterka (1953) e Mortesen (2020).^{20,21,22,23}

²⁰ Os dados de perda de massa x coeficiente Beta do USBR foram publicados no publicados no Report HL- 2020-05. "Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces"

²¹ Peterka (1953) não define em seus estudos o f_{cm} dos concretos investigados, porém informa que os blocos eram compostos exclusivamente de argamassa, sem presença de agregados graúdos, tendo sido todos produzidos através de um processo de pega acelerada com cura antecipada para 7 dias após a moldagem.

²² Os resultados de perda de massa apresentados aos blocos de concreto do USBR foram obtidos após 4 horas de exposição ao dispositivo de cavitação e a uma velocidade do escoamento de 30,0 m/s. Os f_{cm} representativos considerados foram definidos de acordo com a idade no dia de cada ensaio.

²³ Os ensaios de exposição dos blocos de concreto no LOH/UFRGS ao fenômeno da cavitação foram realizados durante o período de 2 horas e $V = 30,0$ m/s. As resistências médias à compressão consideradas para esses concretos foram referentes aos $f_{cm,j}$ obtidos aos 91 dias de cura.

Ao avaliar a Figura 5-43, se observa que a inserção de 1,0% de ar no escoamento, além de reduzir significativamente as perdas de massa dos concretos avariados, aproximou os valores médios do LOH/UFRGS aos do USBR, variando as perdas a aproximadamente 5,7 g para as relações de 0,35 e 0,45 (LOH), e de 0,3 a 6,7 g para as amostras de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70 do USBR.

Diferentemente das demais relações de água/cimento, ou seja, para as a/c de 0,50 e 0,65 do LOH/UFRGS, as perdas de massa apresentadas foram superiores aos limites descritos anteriormente, sendo caracterizadas pelos valores de 32,9 e 37,2 g de material removido (Figura 5-43).

Ainda que os tempos de exposição dos concretos ao fenômeno da cavitação tenham sido distintos, de 2 horas nas instalações experimentais do LOH/UFRGS e de Peterka (1953), e de 4 horas no dispositivo de cavitação do USBR(2020), a disposição dos resultados de perda de massa determinados pelos autores são semelhantes e diretamente influenciados pelos valores de f_{cm} . Essa afirmativa pode ser atribuída aos concretos adotados pelo LOH/UFRGS e USBR e não aos resultados de Peterka (1953), visto que esse autor não define o f_{cm} dos corpos de prova utilizados em sua pesquisa (Figura 5-43).

Apesar da visível correlação existente entre as perdas de massa e o parâmetro de resistência a compressão dos concretos, os corpos de prova do LOH/UFRGS exibiram maiores danos do que os blocos do USBR de menor f_{cm} . Essas incoerências pontuais reforçam a possibilidade de que diferenças nos processos de moldagem e cura dos corpos de prova, mesmo que adotados procedimentos laboratoriais semelhantes, podem vir a gerar alterações no concreto já endurecido (Figura 5-43).

A diferença constada entre as perdas de massa médias dos blocos de relação a/c de 0,65 do LOH (148,2 g) e a/c de 0,70 do USBR (127,2 g) nos ensaios de $\beta = 0\%$, poderia ser justificada pela presença de um número maior de irregularidades na superfície do concreto exposto ao fenômeno da cavitação, o que facilitaria na posterior remoção local do concreto após a implosão das cavidades de vapor. Essa consideração pode ser associada a incorporação excessiva de ar no composto ainda fresco formando vazios na fase de contato dos corpos de prova após a cura do concreto (Figura 5-43).

Dos resultados apresentados na Figura 5-43, as perdas de massa médias descritas pela relação a/c 0,35 do LOH ($f_{cm,j} = 64,5$ MPa) foram inesperadamente superiores as relações de 0,50 (USBR) e 0,45 (LOH/UFRGS) caracterizadas pelo f_{cm} de 35,6 e $f_{cm,j}$ de 47,9 MPa. Durante a moldagem dos blocos de a/c 0,35 (LOH/UFRGS) não foram detectadas alterações no composto que justificassem as perdas de massa maiores do que os concretos de menor resistência a compressão. A única particularidade vinculada a esse traço é a baixa trabalhabilidade do composto o que acabou por acrescentar uma dificuldade extra já esperada na fabricação dos corpos de prova.

Ao serem comparadas as perdas de massa (P_{em}) nos ensaios do LOH/UFRGS com os resultados descritos pelo USBR e por Peterka (1953), todos definidos nos testes considerando as demandas relativas de ar de 2,0 % no escoamento, percebeu-se uma redução acentuada das P_{em} , com resultados muito próximos de 0,40 e 1,40 g expressos pelos corpos de prova de 0,35 e 0,35 + SF do USBR (Figura 5-43).

Embora tenha sido constatada a semelhança de comportamento das perdas de massa do LOH/UFRGS e do USBR com as informações expressas por Peterka (1953), os danos descritos pelo autor são referentes a corpos de prova sem a presença de agregados graúdos em sua composição, o que teoricamente resultaria em uma maior resistência a ocorrência de danos em seus concretos e não o oposto. Uma vez que a adoção de maiores teores de cimento e areia no composto final reduzem a formação de possíveis pontos de fragilidade, comumente encontrados na interfase entre o agregado graúdo e a pasta, os resultados de perda de massa descritos por Peterka (1953) são superiores aos verificados neste estudo (Figura 5-43).

Ainda que Peterka (1953) não tenha determinado o f_{cm} do concreto estudado para um comparativo mais aprofundado, a antecipação do período de cura, de 28 dias, mesmo que apropriadamente realizado em câmara úmida e temperatura adequadas, para 7 dias, pode ter sido um dos fatores que contribuiriam para que suas perdas massa sejam superiores às registradas nos ensaios de LOH/UFRGS e USBR (Figura 5-43).

A análise das perdas de massa e volume, desenvolvida através da metodologia de pesagem dos corpos de prova, não vinculam as respostas de cada tipo de concreto às características de relação água/cimento e resistência

dos blocos verificados. O principal aspecto detectado foi a interação do escoamento, através das demandas relativas de ar inseridas no sistema, que favoreceram, de fato, na redução das perdas de massa e, conseqüentemente, na diminuição dos volumes médios erodidos.

As disparidades retratadas pela metodologia de pesagem, entre os dados do LOH/UFRGS e do USBR, não condizem com os cuidados empregados na adoção dos traços e das propriedades dos materiais que compõem os concretos utilizados. Os componentes dos corpos de prova do LOH/UFRGS foram os mais semelhantes possíveis aos usados no USBR, sendo preservadas a origem basáltica e o diâmetro máximo de 19,0 mm do agregado graúdo, a utilização de areias oriundas de depósitos fluviais, as relações a/c de 0,35; 0,50 e 0,65, além da adequação do tipo de cimento, de ASTM C150 Tipo I para CPV ARI. Essas foram algumas das particularidades adotadas durante a concepção dos concretos do LOH, com o intuito de restringir possíveis interferências na composição que pudessem refletir em alterações de resistência indesejáveis.

Um detalhe importante, é que as maiores relações de P_{em}/t e volumes perdidos foram vinculadas aos ensaios de 2 horas do LOH/UFRGS, mesmo quando comparadas aos danos determinados para os blocos do USBR e de Peterka (1953), expostos a períodos de 4 e 2 horas de ensaio em seus dispositivos de cavitação.

Em suma, a adoção dos valores médios das perdas de massa se tornou a forma mais eficiente de análise dos danos, uma vez que os resultados obtidos pela metodologia da pesagem foram caracterizados por uma grande dispersão e sem um comportamento previsível mesmo quando avaliados intervalos menores de tempo ($t = 30\text{min}$).

5.3.4 Análise das Perdas de Área e Volume – Metodologia do Perfilador a Laser, Escâner “3D” e Pesagem

Os dados extraídos pelo uso do Perfilador a Laser e do Escâner “3D” possibilitaram a realização de análises adicionais aos danos identificados nos corpos de prova do LOH/UFRGS, para todas as relações água/cimento e demandas relativas de ar ensaiadas.

As informações definidas pelas curvas de nível, extraídas durante o escaneamento dos blocos de concreto, permitiram a determinação das curvas cota x área e cota x volume das erosões formadas pela remoção do material exposto a ação do escoamento. Os volumes erodidos resultantes foram então, comparados aos dados do levantamento “topográfico”, baseado na coleta de pontos coordenados (x, y, z) das fossas erodidas pelo Perfilador a Laser, após processamento e determinação dos volumes via software *MatLab*®.

As curvas cota x área e cota x volume, elaboradas a partir dos dados de interpolações sucessivas das imagens retiradas pelo Escâner “3D”, são descritas na Figura 5-44. As áreas dos danos foram determinadas através da projeção horizontal das curvas de nível, de forma que a cota $y = 0$ cm coincida com a superfície do bloco sem danos por cavitação (Figura 5-44a). Para a estimativa dos volumes erodidos (V_{ME}) foram consideradas as áreas das curvas de nível em intervalos constantes entre curvas de 0,5 mm (Figura 5-44b).

Os maiores danos representaram áreas superficiais que variaram entre 10.048,0 mm² a 14.607,0 mm², vinculadas aos concretos de a/c 0,65 sem a adição de ar no escoamento (Figura 5-44a). A área correspondente a uma superfície de um bloco de concreto sem danos, para compreensão dos valores citados anteriormente, é de aproximadamente, 22.000,00 mm². Ou seja, os maiores danos comprometerem entre 47,6 a 66,7% de toda a superfície exposta ao escoamento cavitante.

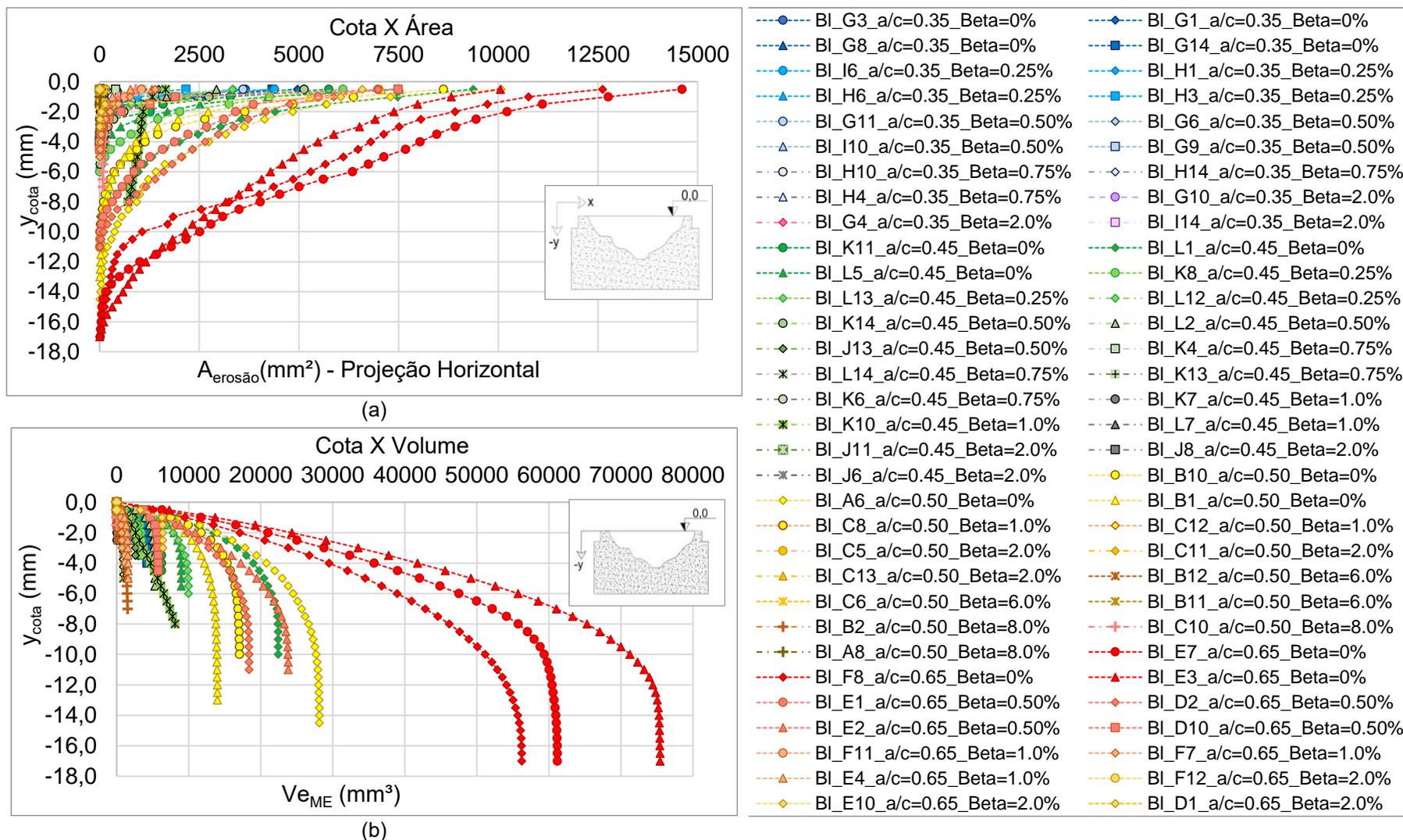


Figura 5-44: Curvas cota x área (a) e cota x volume (b) dos danos gerados nas superfícies dos blocos de concreto através do Escâner "3D", após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS

Conforme se observa na Figura 5-44, a adoção de crescentes demandas relativas de ar nos ensaios com os blocos de relação 0,65 ($\beta = 0,50; 1,0$ e $2,0\%$) fez com que os formatos das fossas de erosão, as áreas e 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 cavitante acaba por proteger até os concretos mais “frágeis” do ponto de vista de resistência (Figura 5-44), conforme a análise qualitativa do item 5.3- *Análise de Danos no Concreto* já havia demonstrado.

Na Figura 5-45 são descritos os volumes erodidos estimados pela metodologia do Perfilador a Laser (V_{ePL}), onde se pode observar que há uma redução expressiva dos volumes com a utilização de $\beta = 0,25\%$ para os blocos de a/c 0,35 e 0,45, e de $\beta = 1,0\%$ para os concretos de 0,50 e 0,65.

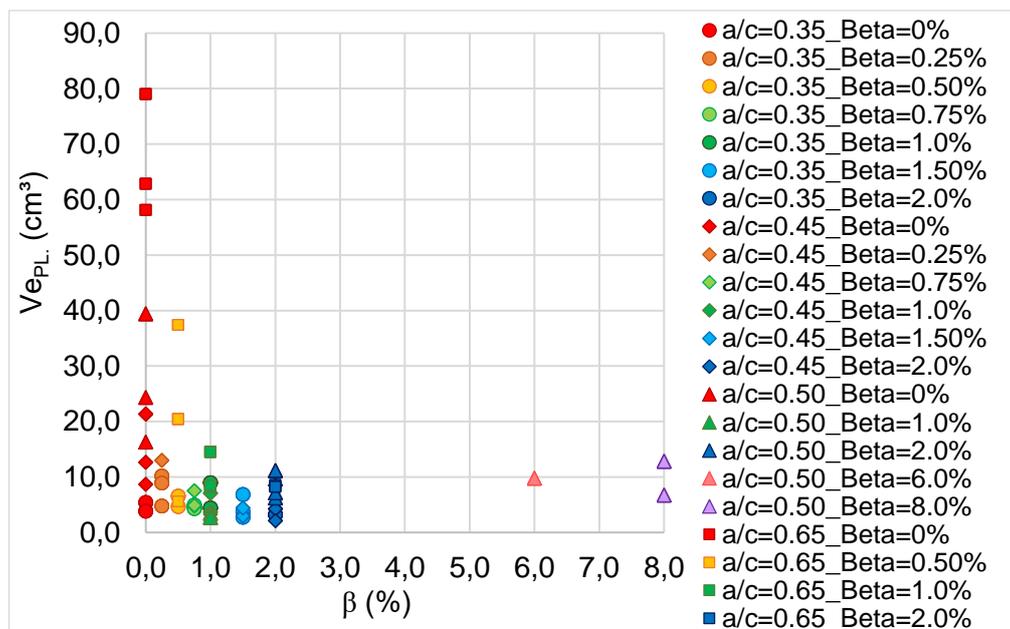


Figura 5-45: Volumes erodidos dos blocos de concreto após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, metodologia do Perfilador a Laser.

Estranhamente, os volumes estimados para os ensaios realizados com β de 0,75% e 1,50%, definidos pela metodologia do Perfilador a Laser, foram inferiores aos resultados associados as demandas relativas de 1,0 e 2,0%, respectivamente. As diferenças constatadas apesar de extremamente pequenas quando avaliadas em função de seus valores médios, demonstram a dispersão natural dos dados, justificada por remoções pontuais de seus componentes, tais como, uma brita ou agregados miúdos locais, por exemplo. (Figura 5-45).

Como foram utilizadas 3 (três) diferentes metodologias para estimativa dos danos causados pelo fenômeno da cavitação, devido principalmente às variações detectadas durante as três repetições de cada ensaio, foram realizadas comparações entre os volumes erodidos extraídos pelo método indireto da Pesagem (V_{eMP}), pelo uso do Perfilador a Laser (V_{ePL}) e do Escâner “3D” (V_{eME}) (Figura 5-46 e Figura 5-47).

Através dos resultados da Figura 4-43 verifica-se que os V_{eMP} possuem maior discrepância quando comparados aos volumes extraídos pelo Escâner “3D” (V_{eME}), principalmente para os blocos expostos a ação do escoamento sem a presença de ar. A metodologia do Escâner “3D” não identificou perdas de volumes acentuadas nos concretos de a/c 0,50 e $\beta = 1,0\%$, assim como os volumes de concreto extraídos pelo método da pesagem.

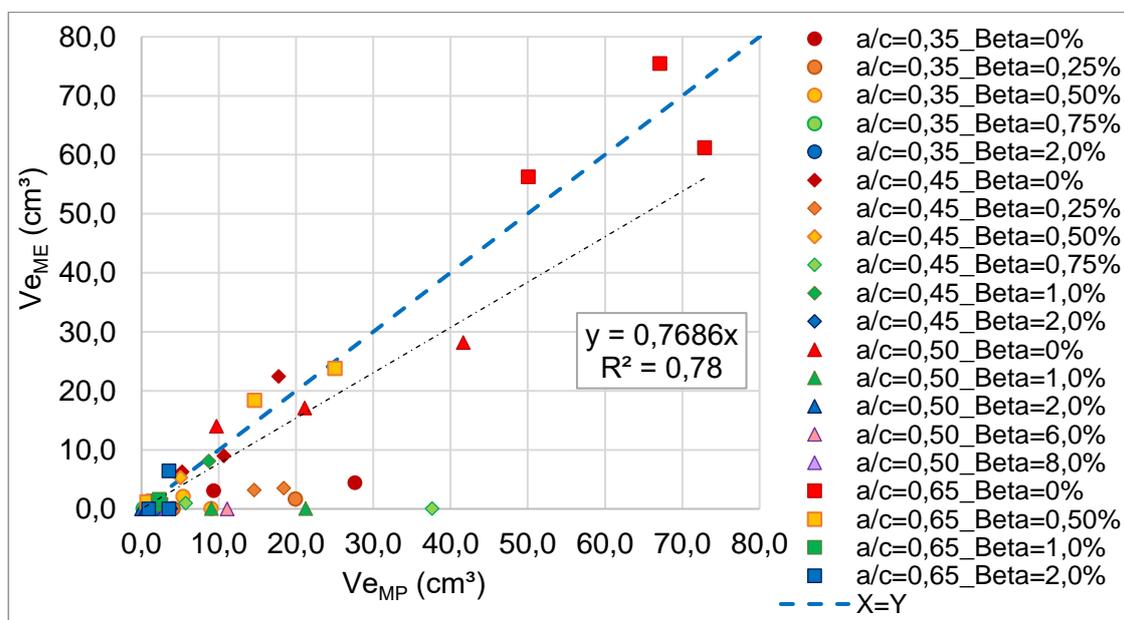


Figura 5-46: Comparativo entre os volumes erodidos, Escâner “3D” x Pesagem, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH.

Conforme apresentado na Figura 5-47 as estimativas dos volumes erodidos pela metodologia do Escâner “3D” (V_{eME}) e do Perfilador a laser (V_{ePL}),

demonstram maior proximidade entre si do que quando comparados aos volumes oriundos das perdas de massa. Novamente, as maiores diferenças entre os volumes estimados são vinculadas aos danos registrados nos blocos de a/c de 0,50 para todas as demandas relativas de ar avaliadas.

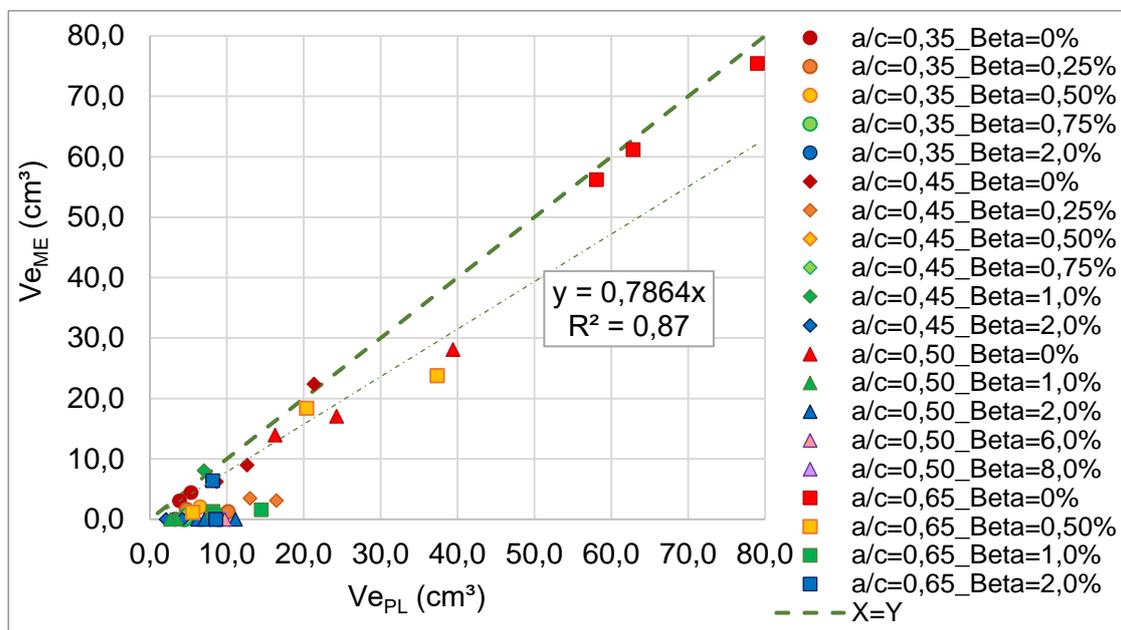


Figura 5-47: Comparativo entre os volumes erodidos, Escâner “3D” x Perfilador a laser, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH.

Os volumes de material erodidos sem a presença de ar no escoamento exibem uma melhor relação entre as estimativas definidas pelos métodos do Escâner “3D” e do Perfilador a Laser do que os demais ensaios com diferentes β . Portanto, para as condições mais críticas submetidas aos concretos em questão, ambas as metodologias de discretização dos danos por cavitação representariam, de maneira semelhante, as perdas volumétricas de cada traço exposto ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS (Figura 5-47).

Como a metodologia de quantificação dos danos pelo uso do Escâner “3D” nos permitiu uma melhor discretização das fossas formadas pela erosão nos blocos de concreto, foram então avaliadas as médias dos volumes máximos erodidos ($Ve_{máx.}$), entre as repetições de cada ensaio, e extraídas as profundidades máximas ($hmáx.$) e as relações entre profundidade máxima em função do tempo de exposição ao dispositivo de cavitação ($hmáx./t$), para os blocos de concreto do LOH/UFRGS.

A Figura 5-48 apresenta os resultados obtidos para os $Ve_{máx.}$ considerando as resistências a compressão de 64,5; 47,9; 40,4 e 32,7 MPa dos concretos de relação a/c 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65. Foram analisados os

comportamentos dos volumes de material removido de todos os ensaios realizados no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, porém somente os testes efetuados com as demandas relativas de 0; 0,25; 0,50 e 1,0% de ar no sistema é que estabeleceram funções de correlação com o $f_{cm,j}$ (Figura 5-48).

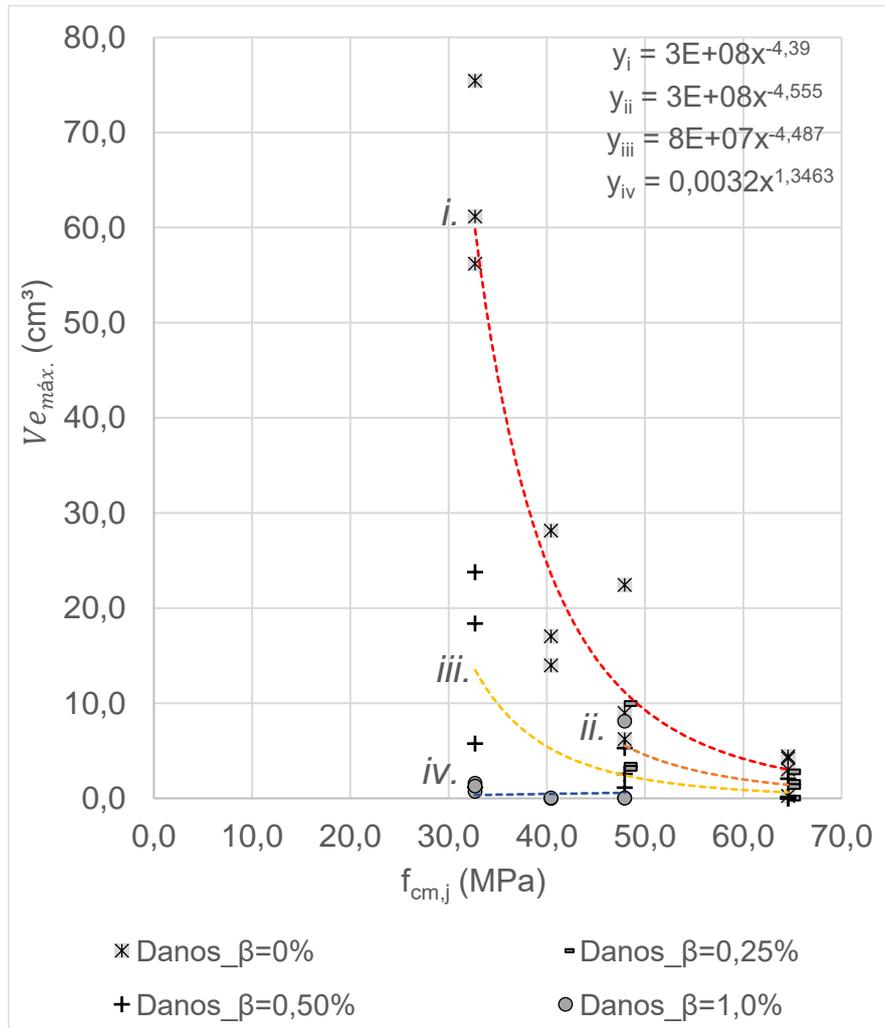


Figura 5-48: Resultados dos volumes máximos erodidos ($V_{e_{máx.}}$) x resistência a compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH/UFRGS, para os coeficientes β de 0; 0,25; 0,50 e 1,0%.

Os maiores $V_{e_{máx.}}$ seguem sendo vinculados aos blocos de menor resistência a compressão e as condições de ensaio com baixas demandas relativas de ar (0 e 0,25%). Conforme há o acréscimo de ar no escoamento (0,50 e 1,0%) as funções de ajuste descrevem reduções favoráveis ao $f_{cm,j}$ dos concretos avaliados (Figura 5-48).

Além de fornecer possibilidades de mudança ou adaptação aos $f_{cm,j}$ definidos aos concretos, quando expostos ao fenômeno da cavitação, a Figura 5-48 também demonstra indicativos de quais demandas relativas de ar devem

ser adicionadas ao escoamento para que os volumes erodidos previstos sejam limitados a uma valores constantes entre si.

Vale salientar que, as correlações expressas entre os resultados dos $V_{e_{máx.}}$, os $f_{cm,j}$ característicos e os β ensaiados são vinculados exclusivamente aos traços de concretos expostos ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, conseqüentemente a escoamentos onde a velocidade média do fluxo seja próxima aos 30,0 m/s. Para relações a/c ou composições de concretos diferentes das abordadas nesse estudo, devem ser realizados novos ensaios, de maneira a confirmar o comportamento apresentado pelas fossas erodidas e assim, verificar as funções de ajuste fornecidas pela Figura 5-48.

Para os ensaios desenvolvidos com a inserção de 0,75 e 2,0% de ar no escoamento, as $V_{e_{máx.}}$ registradas foram menores que 1,0 cm³ (para $\beta = 0,75\%$) ou muito próximas à zero (para $\beta = 2,0\%$), justificando a ausência de ajustes que representem as pequenas variações de volume encontradas. Já os volumes erodidos, descritos para os ensaios realizados com os coeficientes β de 6,0 e 8,0% de ar, por terem sido realizados ensaios com blocos de concreto apenas com a/c de 0,5 não podem ser analisados da mesma forma que a Figura 5-48.

Os resultados de $V_{e_{máx.}}$ extraídos para as demandas de 0,75 e 2,0% são descritos no *APÊNDICE K - Resultados dos volumes máximos erodidos ($V_{e_{máx.}}$) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para os coeficientes β de 0,75 e 2,0% de ar.*

Ao serem analisados os perfis das fossas de erosão, descritos pelas curvas cota x área e cota x volume (Figura 5-44), tornou-se possível a obtenção das profundidades máximas ($h_{máx.}$) de cada dano registrado.

A Figura 5-49 expressa o comportamento entre as profundidades máximas e as resistências médias a compressão dos blocos de concreto ensaiados. Foram adicionados ao escoamento as β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0%.

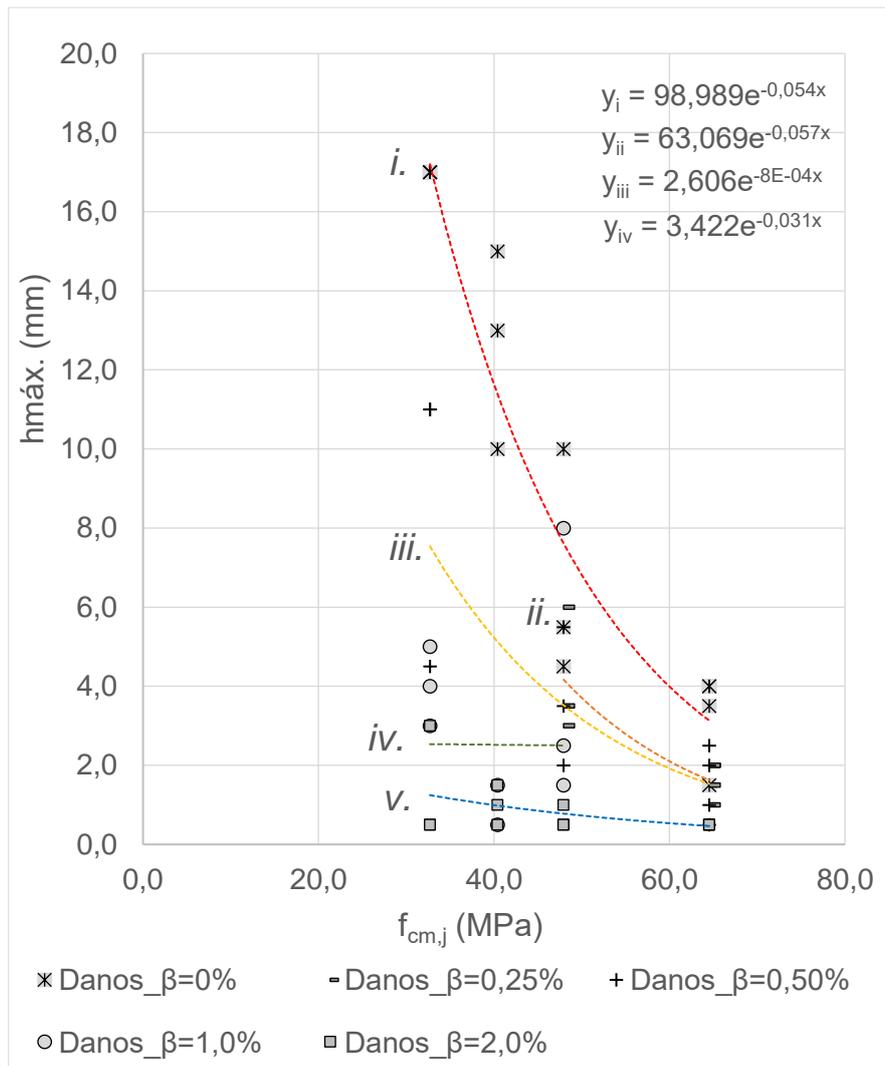


Figura 5-49: Profundidade máxima (hmáx.) das fossas de erosão x resistência média a compressão, blocos de concreto expostos ao dispositivo de cavitação do LOH, distintos β.

As relações entre as hmáx. e o parâmetro de resistência a compressão permitiram estabelecer funções de correlação para estimativa das profundidades a serem atingidas pelas fossas de erosão, após 2 horas de exposição a ação do fenômeno da cavitação (Figura 5-49).

A Figura 5-49 forneceu novas evidências de que a adoção de $\beta \geq 1,0\%$ reduzem cerca de 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 ($\beta = 0\%$).

Notadamente, as funções de ajuste estabelecidas pelas hmáx, atribuídas aos danos formados pelo fenômeno da cavitação em escoamentos com a presença de Betas 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 5-49, devem ser consideradas durante a aplicabilidade dessas funções como ferramenta de análise na previsão das $h_{máx.}$ em outros concretos que não apresentam os $f_{cm,j}$ limitantes de 64,5; 47,9; 40,4 e 32,7 MPa.

Os dados de $h_{máx.}$ são apresentados separadamente, de acordo com as demandas de ar inseridas ao escoamento no *APÊNDICE L - Resultados das profundidades máximas dos danos ($h_{máx.}$) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para os coeficientes β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0 e 2,0% de ar.*

A partir das informações de $h_{máx.}$ e avaliando a interferência que o tempo de exposição dos blocos ao fenômeno da cavitação venha a proporcionar na formação das fossas erodidas, foram analisadas as relações entre os valores médios das profundidades máximas ($h_{máx.méd.}$), a duração dos ensaios (t) e as proporções água/cimento investigadas (Figura 5-50).

A Figura 5-50 evidencia a evolução das $h_{máx.méd.}/t$ com o acréscimo de diferentes demandas relativas de ar ao escoamento. Nela se verifica que a taxa de evolução das fossas erodidas reduz bruscamente para os a/c de 0,50 e 0,65 com o acréscimo de $\beta = 1,0\%$. Acima desse limite, as $h_{máx.méd.}/t$ aproximam-se entre si para os distintos a/c, tornando esse parâmetro irrelevante, visto que os efeitos da cavitação passam a ser anuladas pela presença de acentuada de ar ao fluxo.

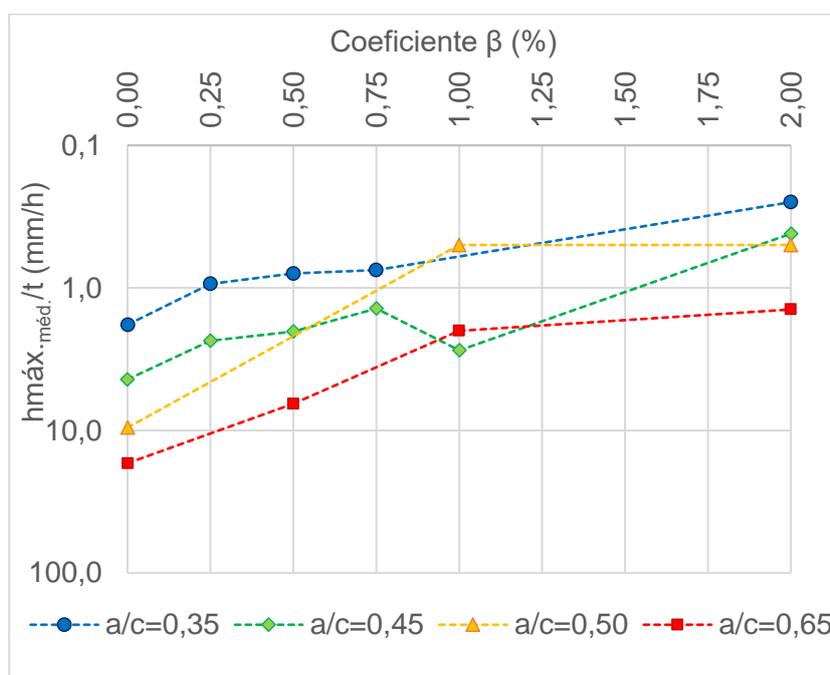


Figura 5-50: Valores médios das profundidades máximas dos danos em função do tempo de exposição ao fenômeno da cavitação ($h_{máx.méd.}/t$), considerando a inserção de distintos β .

Por fim, conclui-se que as 3 (três) metodologias de estimativa dos volumes erodidos, Perfilador a Laser (V_{ePL}), Escâner “3D” (V_{eME}) e pesagem (V_{eMP}), descreveram bons resultados quando comparados entre si, principalmente para os danos de maior intensidade, ou seja, para os ensaios de $\beta = 0\%$ de todas as relações água/cimento consideradas.

Conforme há o acréscimo de ar no escoamento e, portanto, a redução dos danos pela ação da cavitação, os volumes estimados passam a ser de difícil detecção por parte dos equipamentos utilizados, apresentando diferenças relevantes em seus valores finais. Como por exemplo, os volumes estimados para os blocos de $a/c = 0,45$ ($\beta = 0,25\%$), que registraram os volumes de $18,4 \text{ cm}^3$ de V_{eMP} , $3,49 \text{ cm}^3$ de V_{eME} e de $13,4 \text{ cm}^3$ de V_{ePL} .

É evidente que independentemente da metodologia adotada sempre ocorreram imprecisões nos volumes extraídos, sendo assim, os resultados que melhor descrevem os danos, devido a possibilidade de discretização em curvas de nível e a extração das áreas danificadas dos blocos, são os obtidos pela metodologia do Escâner “3D” sendo esses os volumes dos concretos removidos pela ação do escoamento.

As comparações realizadas entre as variações dos volumes removidos entre os dados do LOH/UFRGS e USBR, mesmo considerando as diferenças dos tempos de exposição dos concretos em cada dispositivo de cavitação (2 e 4 horas), não identificaram correlações que expressassem redução entre os volumes observados. Os resultados encontrados pelo USBR para $\Delta V/t$ ainda são menores que os expressos para os dados do LOH.

A análise estabelecida entre os volumes máximos erodidos ($V_{e_{m\acute{a}x.}}$) e o $f_{cm,j}$ dos concretos investigados permitiram a obtenção de funções de correlação que possibilitem mudanças ou adaptação das características desses concretos, para que os volumes erodidos previstos sejam limitados a uma faixa de danos aceitável, de acordo com a β avaliada (Figura 5-48). Obviamente que, as funções de ajuste obtidas são vinculadas aos traços de concreto utilizados, aos coeficientes β considerados e a escoamentos em que a velocidade do fluxo seja $\cong 30,0 \text{ m/s}$.

Através das informações de profundidade máxima dos danos, definidas pelas curvas cota x área e cota x volume (Figura 5-44), foi possível também definir funções de correlação entre $h_{m\acute{a}x.}$ e os $f_{cm,j}$ dos concretos ensaiados,

para os coeficientes β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0% (Figura 5-49). As funções de ajuste apresentadas na Figura 5-49 permitiram estabelecer estimativas das $h_{m\acute{a}x.}$ a serem atingidas pelas fossas de erosão, após 2 horas de exposição ao fenômeno, fornecendo novas evidências de quais β devem ser adotados para os danos sejam “condicionados” a $h_{m\acute{a}x.}$ seguras do ponto de vista da integridade do concreto.

Os resultados extraídos entre as profundidades máximas médias das fossas erodidas em função do tempo de exposição a cavitação ($h_{m\acute{a}x.m\acute{e}d./t}$) (Figura 5-50), salientaram a acentuada redução da perda de material, através do acréscimo de $\beta = 1,0\%$ principalmente para os a/c de 0,50 e 0,65. Para coeficientes β acima desse valor, as $h_{m\acute{a}x.m\acute{e}d./t}$ 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 funções de correlação descritas na Figura 5-48 e Figura 5-49, foram desenvolvidas para as condições específicas de escoamento cavitante gerado pelo dispositivo de cavitação do LOH e, para os parâmetros característicos específicos dos concretos investigados, não sendo indicada suas aplicações em situações adversas as consideradas nesse estudo.

5.4 Proposta de Gal’perin et al., (1971) - Modificado

Estudos como os realizados por Peterka (1953), Gal’perin et al., (1971), e Kudriashov et al., (1983), que permitiam uma aplicabilidade direta em estruturas hidráulicas como uma boa ferramenta de análise ou mitigação de danos oriundos do fenômeno da cavitação, são escassos, e, portanto, amplamente utilizados pelos profissionais da área.

Porém, devido à dificuldade na obtenção de dados, experimentais ou de protótipo, ainda existem lacunas de informações no que tangem as características do concreto – resistência a compressão, relações água-cimento, altura máxima do dano, etc.- e os parâmetros do escoamento que ocasionam o fenômeno da cavitação, tais como, pressão média, velocidade do escoamento, dentre outros.

Desta forma, esse item visa identificar as limitações de uso da metodologia desenvolvida por Gal’perin et al., (1971) e propor novas funções de

correlação que possibilitem ampliar seu uso a diferentes condições de contorno das estabelecidas em seus estudos.

Um aspecto relevante a se destacar, é que as relações descritas por Gal'perin *et al.*, (1971), e reiteradas por Kudriashov *et al.*, (1983), associam a ocorrência de danos pela ação do fenômeno da cavitação as superfícies de concreto que tenham sido expostas a escoamento de altas velocidades durante um período de 48 horas.

Desta forma, para que seus dados sejam relacionados as informações obtidas também em laboratório, em que os concretos analisados foram expostos a um período de 2 horas ao escoamento cavitante, foram realizadas adaptações aos dados expressos por Gal'perin *et al.*, (1971) através da Equação 3-31 definida por Kudriashov *et al.*, (1983) para escoamentos com tempos de ocorrência inferiores ao período estabelecido pelo autor (48horas).

As regiões limítrofes determinadas por Gal'perin *et al.*, (1971), de ocorrência e de não ocorrência do fenômeno da cavitação, foram delimitadas levando em consideração a demanda relativa de ar do escoamento (β) (Equação 3-16).

Os autores descrevem graficamente “áreas” de influência para seus resultados considerando as demandas relativas de 0; 4,0 e 8,0% de ar, conforme o apresentado na . Já nos ensaios realizados no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, utilizando blocos de concreto, foram avaliadas as β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% de ar no escoamento cavitante, para os concretos com fator a/c de 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65.

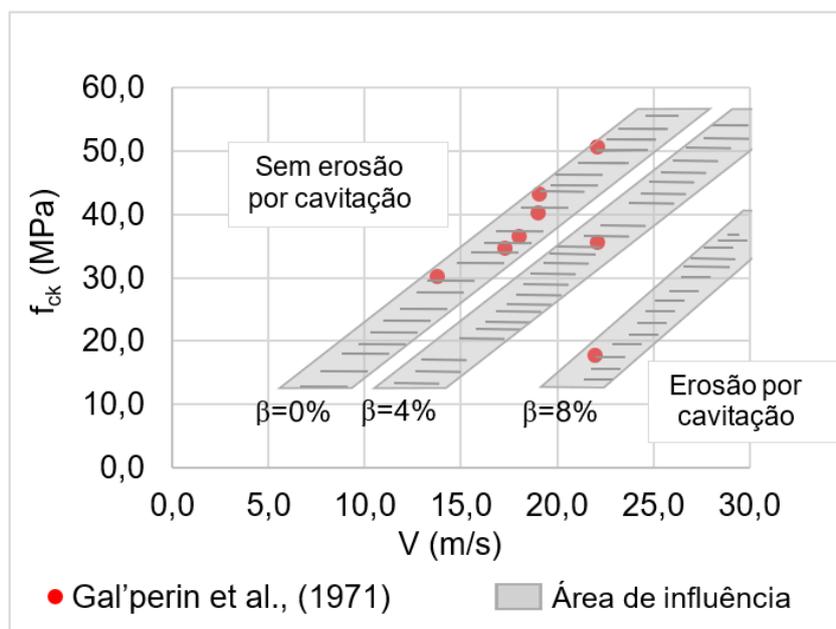


Figura 3-41: Relação entre as velocidades, a resistência a compressão e a aeração do escoamento. Fonte: adaptado de Gal'perin *et al.*, (1971).²⁴

Portanto, serão realizadas análises comparativas entre os resultados encontrados por Gal'perin *et al.*, (1971) e os dados extraídos no LOH para $\beta = 0\%$, devido essencialmente a ausência de informações desses autores para demandas relativas entre $0 < \beta \leq 2,0\%$. Todavia, serão abordados os comportamentos referentes aos demais β , mesmo sem comparações diretas com Gal'perin *et al.*, (1971). De maneira a expandir os conhecimentos adquiridos sobre o tema e fomentar investigações sobre os efeitos da inserção de demandas relativas de mais fácil geração, por parte dos mecanismos de proteção, aeradores naturais e/ou artificiais.

Além das resistências médias à compressão ($f_{cm,j}$) foram verificadas as relações entre os limites de profundidade máximas dos danos ($h_{máx.}$), estimados indiretamente para os dados de Gal'perin *et al.*, (1971) e os extraídos, a partir dos danos verificados diretamente nos blocos de concreto do LOH/UFRGS. Foram considerados nessa análise somente os blocos em que as

²⁴ Gal'perin *et al.*, (1971) propôs em seus estudos relações entre a velocidade média do escoamento e a resistência média à compressão de projeto, de maneira a auxiliar na definição de possíveis traços para os concretos de revestimento de estruturas hidráulicas em concepção. A partir das informações do autor e, possibilitando futuras comparações com os dados de $f_{cm,j}$, definidos aos blocos de concreto do LOH/UFRGS, as resistências médias à compressão serão descritas graficamente também como resistência média à compressão de projeto (f_{ck}).

relações a/c e as demandas relativas de ar possibilitassem a remoção de material das superfícies desses concretos.

A Figura 5-51 apresenta a proposta de modificação realizada aos dados obtidos por Gal'perin *et al.*, (1971) para $\beta = 0\%$, considerando a inserção dos limites de velocidade $\times f_{ck}$, definidos por esses autores e adaptados ao tempo de exposição de 2 horas ao fenômeno por meio da Equação 3-31.

$$V_T = \frac{V}{2} \left[1 + \left(\frac{48}{T} \right)^{1/8} \right]$$

Equação 3-31

As $h_{máx.}$ estimadas de 5,2 e 4,4 mm para Gal'perin *et al.*, (1971) foram definidas como sendo os limites, máximo e mínimo, considerados pelos autores para que as irregularidades formadas pelo processo da cavitação ao concreto, seja equivalente a dano de fato as superfícies de concreto (Figura 5-51b).

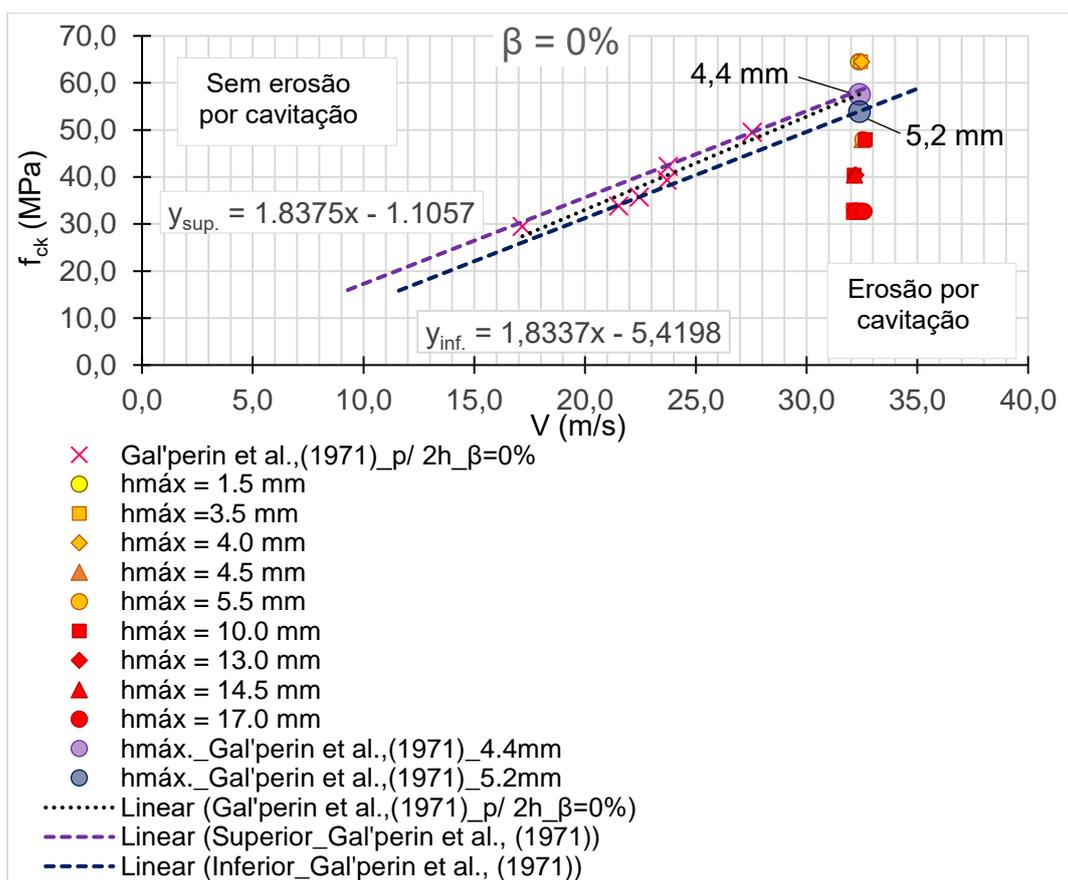


Figura 5-51:Proposta de modificação aos dados de Gal'perin *et al.*, (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0\%$.²⁵

²⁵ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin *et al.*, (1971), também servindo de indicativos do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

A adaptação na base temporal apresentada na Figura 5-51 permitiu incluir nesta figura os valores de profundidade máxima de erosão para os blocos com diferentes $f_{cm,j}$ ensaiados no LOH/UFRGS. A partir dos dados de profundidades máximas de erosão, estabeleceu-se, na Figura 5-52, uma função de ajuste que permite estimar a profundidade máxima de erosão para concretos com diferentes resistências à compressão.

Segundo a Figura 5-52 os maiores valores de $h_{máx.}$ (médios) encontradas foram de 17,0 mm, definidos aos blocos de a/c 0,65. A medida em que há aumento das resistências, a profundidade dos danos reduz para valores da ordem de 12,50; 6,7 e 3,25 mm para as relações de a/c de 0,50; 0,45 e 0,35, respectivamente.

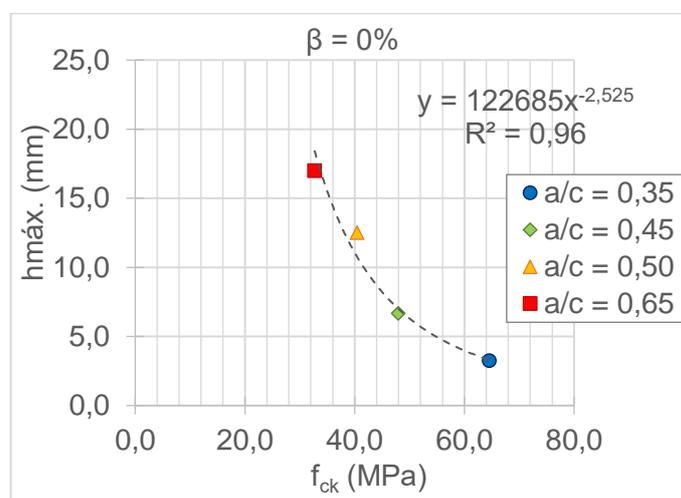


Figura 5-52: Relações entre as $h_{máx.}$ (médias) x resistências médias à compressão de projeto (f_{ck}) dos concretos ensaiados no LOH, para $\beta = 0\%$.

Tomando, agora, como referência, as envoltórias lineares superiores e inferiores da Figura 5-51 e o ajuste proposto na Figura 5-52, foi possível determinar as $h_{máx.}$ estimadas de 5,2 e 4,4 mm para Gal'perin *et al.*, (1971), considerado o tempo de exposição do concreto à cavitação de 2 horas

Estes valores podem ser considerados, então, como irregularidades formadas pelo processo da cavitação do concreto entendidas como um dano, de fato, às superfícies de concreto avaliadas (Figura 5-51).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5-51, foi possível identificar que, todos os blocos de concreto caracterizados pelos f_{ck} s de 47,9; 40,2 e 32,7 MPa, quando expostos a cavitação sem adições de ar ao escoamento, exibem $h_{máx.} > 5,2$ mm. Nessas condições, os concretos de

relação a/c 0,45; 0,50 e 0,65 são sujeitos a danos significativos por cavitação se expostos ao fenômeno por um período inferior a 2 horas.

Os blocos constituídos pelo $f_{ck} = 64,5$ MPa, em que as $h_{máx.}$ extraídas foram de 1,5; 3,5 e 4,0 mm, após o mesmo período de exposição ao dispositivo de cavitação, obtiveram um desempenho melhor que as demais relações a/c citadas anteriormente. Isto nos indica que, a relação a/c de 0,35 não desenvolveu erosões de profundidade relevante que venham a ser classificadas como danos pelo fenômeno da cavitação até o $t = 2h$ (Figura 5-51).

A Figura 5-53 até a Figura 5-58 descrevem as correlações desenvolvidas para os resultados obtidos no LOH/UFRGS e para as demandas relativas de ar de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% sem correspondência equivalente nos ensaios realizados por Gal'perin *et al.*, (1971).

Como os dados experimentais desses autores caracterizam o comportamento de fluxos de alta velocidade sem aeração e para concentrações de ar de 4,0; 6,0 e 8,0%, os resultados a seguir abordados não poderão ser confrontados aos limites de $h_{máx.}$ estabelecidos pela bibliografia, uma vez que além das possíveis comparações entre pesquisas já realizadas, este estudo visa, também, a compreensão dos efeitos da cavitação para faixas de Q_{ar} inferiores a 2,0% (Figura 5-53 a Figura 5-57).

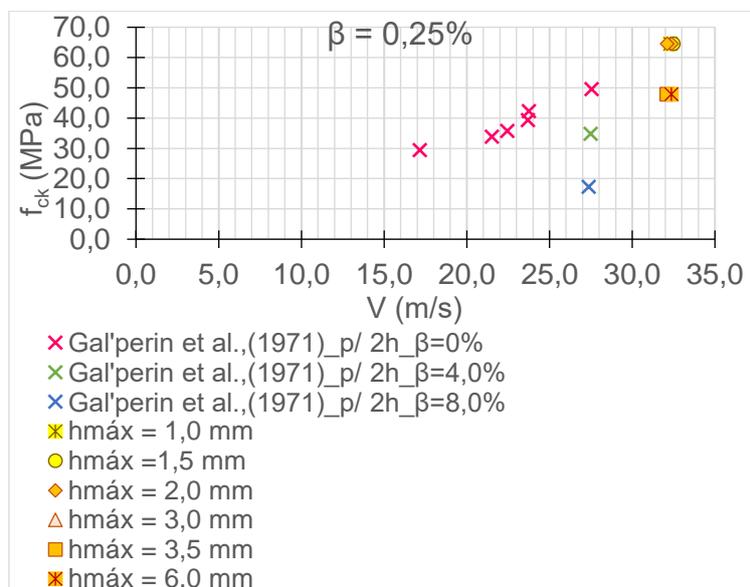


Figura 5-53: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin *et al.*, (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h (a) e $\beta = 0,25\%$.²⁶

²⁶ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin *et al.*, (1971), também servindo de indicativos do

Os resultados expostos na Figura 5-53 demonstram profundidades máximas de dano inferiores às verificadas para as mesmas relações água/cimento, 0,35 e 0,45, quando submetidas ao fenômeno da cavitação sem qualquer adição de ar ao escoamento. As hmáx. extraídas foram de 1,0; 1,5 e 2,0 mm, para o f_{ck} de 64,5 MPa e de 3,0; 3,5 e 6,0 mm para os corpos de prova de 47,9 MPa.

Por se tratarem de concretos de alta resistência, se pode considerar que a inserção de 0,25% de ar ao escoamento cavitante já fornece bons indícios de redução aos danos gerados nas superfícies dos blocos. Todavia a demanda relativa de 0,25% não garante, necessariamente, proteção semelhante aos concretos mais “fracos” do ponto de vista de resistência a compressão, a/c de 0,50 e 0,65, já que estes retratam perdas de material bem acentuadas durante os ensaios com $\beta = 0\%$ (Figura 5-53).

Nos ensaios realizados com a demanda relativa de 0,50% também foram verificadas diferentes hmáx. para os concretos de a/c 0,35; 0,45 e 0,50 (Figura 5-54). Através da Figura 5-54 pode-se avaliar que, o acréscimo de ar condicionado a esses ensaios manteve as perdas de material, para as a/c de 0,35 e 0,45, próximas as definidas pela Figura 5-53. Contudo, para os blocos de a/c 0,65 as hmáx. obtidas descreveram uma maior proteção para essa relação, onde a adição de 0,50% de ar acabou por permitir que as profundidades máximas de 17,0 mm (Figura 5-51) fossem reduzidas aos hmáx. de 3,0; 4,5 e 11,0 mm (Figura 5-54).

comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

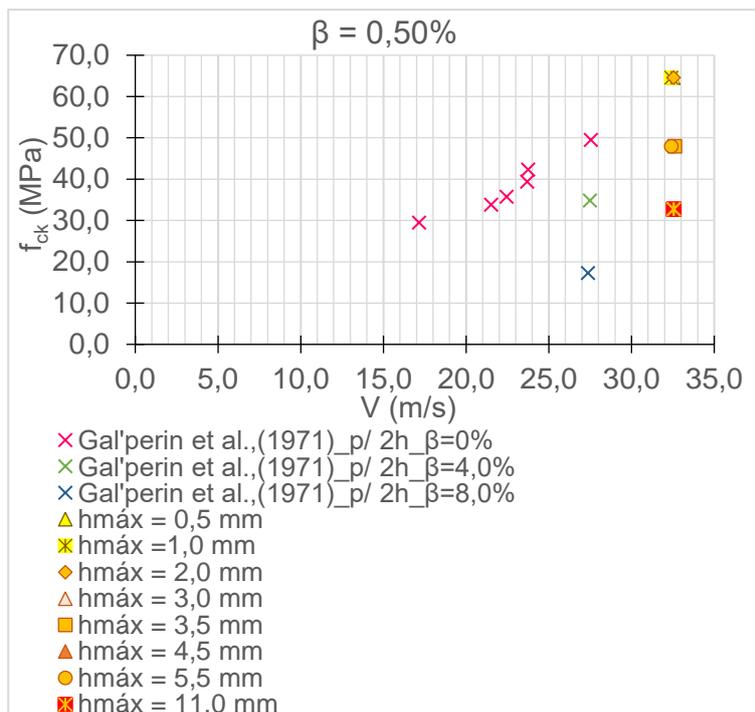


Figura 5-54: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin *et al.*, (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0,50\%$.²⁷

Ao serem analisados os danos apresentados pela Figura 5-55, após exposição ao escoamento com $\beta = 0,75\%$, e os resultados apresentados pelos blocos de mesma relação água/cimento condicionados aos efeitos da cavitação na ausência de ar e com os coeficientes β de 0,25 e 0,50%, são observadas reduções mais evidentes nas $h_{máx}$. do concreto de maior f_{ck} ensaiado, 64,5 MPa. (Figura 5-55).

²⁷ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin *et al.*, (1971), também servindo de indicativos do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

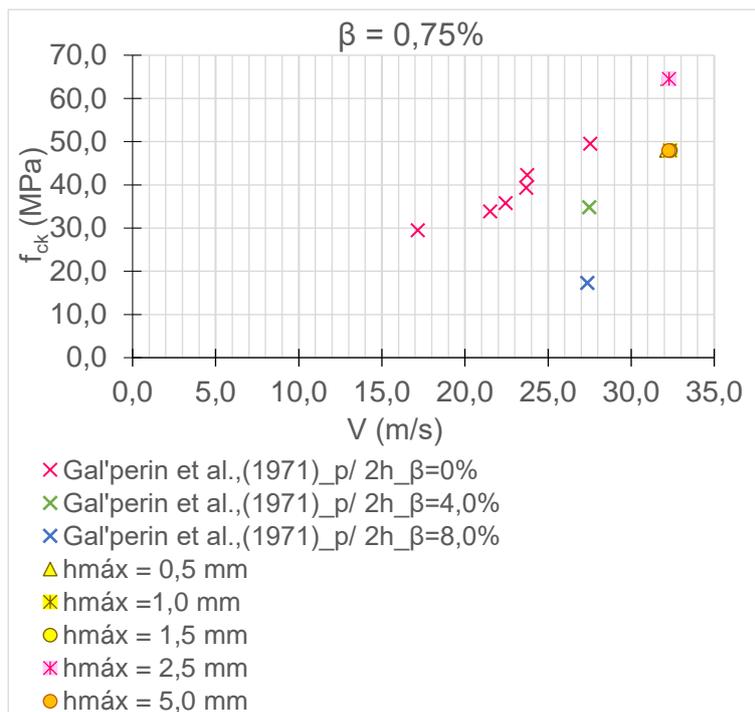


Figura 5-55: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin et al., (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 0,75\%$.²⁸

Quando comparados os danos descritos pelos concretos de a/c de 0,45; 0,50 e 0,65, alterando os coeficientes β de 1,0% (Figura 5-56) para 2,0% (Figura 5-57), demanda está amplamente difundida na literatura como sendo o limite de ar em que a cavitação deixaria de registrar danos significativos as estruturas hidráulicas – segundo Peterka (1953); Gal'perin et al., (1971); Kudriashov et al., (1983); Dong et al., (2006; 2007;2008;2010;2023); Mortesen (2020); Priebe (2020); Ferla et al., (2021), dentre outros – pode-se constatar de uma redução brusca entre as h_{máx}. registradas após os ensaios.

Os concretos de relação a/c de 0,45 e 0,65 foram os maiores beneficiados pelo efeito reduzido da cavitação através do uso de $\beta = 2,0\%$, tendo sido registradas as reduções de h_{máx}. de 1,5; 2,5 e 8,0 mm para 0,5 e 1,0 mm, a/c de 0,45, e de 3,0; 4,0 e 5,0 mm para 0,5 e 3,0 mm, a/c de 0,65 (Figura 5-56 e Figura 5-57).

No concreto de relação a/c de 0,50 (40,4 MPa), os danos registrados em suas superfícies não demonstraram diferenças em seus valores, estando todos

²⁸ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin et al., (1971), também servindo de indicativos do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

inseridos entre os valores de 0,5; 1,0 e 1,5 mm, para as demandas relativas de 1,0 e 2,0% (Figura 5-56 e Figura 5-57).

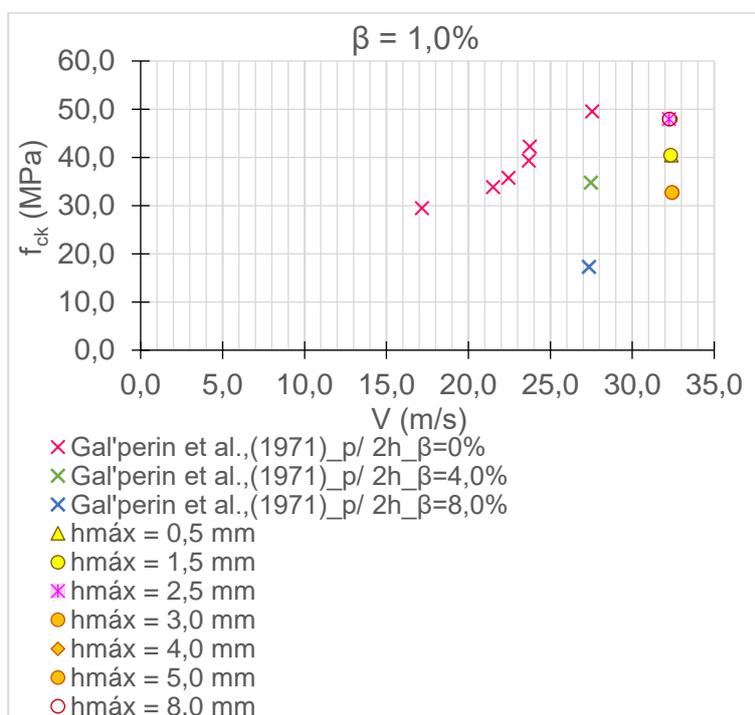


Figura 5-56: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin et al., (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 1,0\%$.²⁹

Em geral, as profundidades máximas dos danos atribuídos aos ensaios com $\beta = 2,0\%$ definem uma menor dispersão entre seus valores, independentemente da resistência a compressão (f_{ck}) avaliada, quando comparadas aos resultados extraídos com a inserção de β de 1,0% ao escoamento. Essa variabilidade, detectada entre os ensaios de 1,0 e 2,0%, possivelmente pode estar associada ao processo estocástico do fenômeno da cavitação, mais evidente no escoamento de menor β , em que os efeitos das implosões das cavidades de vapor são mais intensos nesse escoamento (Figura 5-56 e Figura 5-57).

²⁹ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin et al., (1971), também servindo de indicativos do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

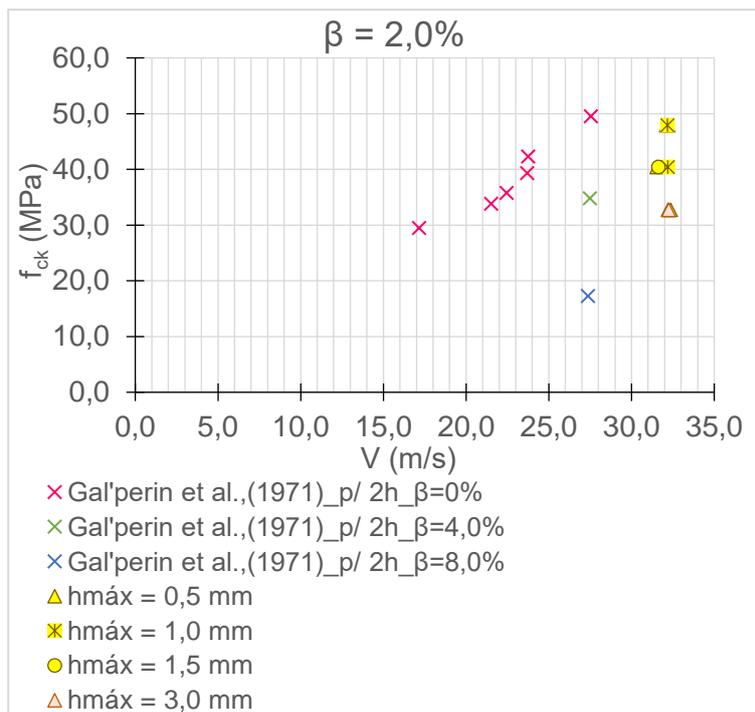
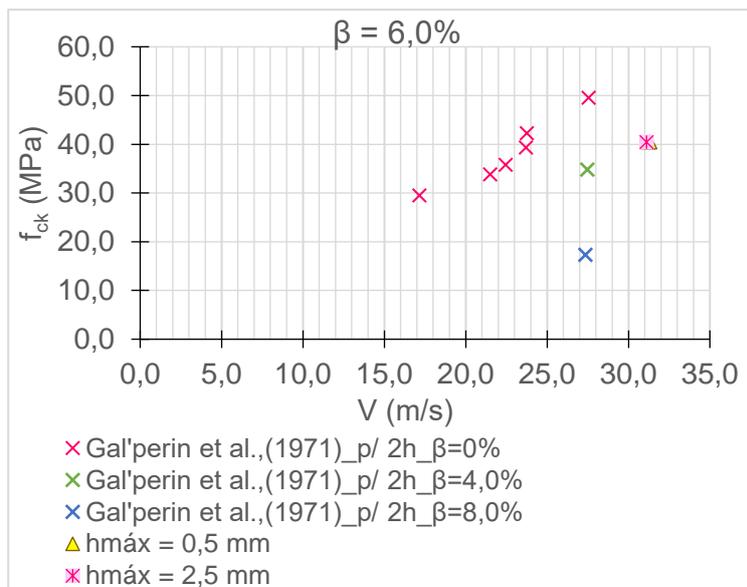


Figura 5-57: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin et al., (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 2,0\%$.³⁰

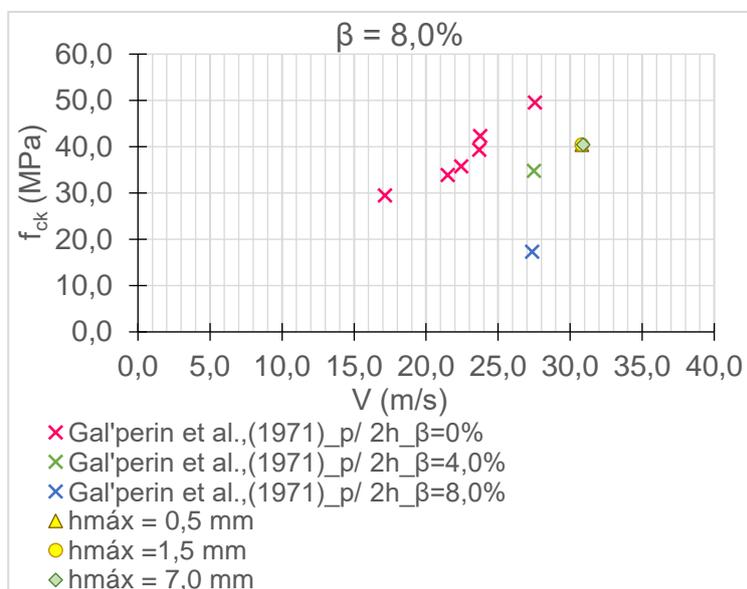
Apesar da existência de informações ligadas aos ensaios do LOH/UFRGS, com as demandas relativas de ar 6,0 (Figura 5-57) e 8,0% (Figura 5-58), foram conduzidos testes com apenas um dos traços de concreto ($a/c = 0,50$ e $f_{ck} = 40,4$ MPa), devido principalmente ao grande número de corpos de prova inutilizados pela ocorrência de fissuras durante o processo de fixação desses ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

As profundidades máximas dos danos para $a/c = 0,50$ foram de 0,5 e 2,5 mm e de 0,5; 1,5 e 7,0 mm para os β de 6,0 e 8,0% de ar. A $h_{máx}$. medida de 7,0 mm, destoante das demais, pode também estar associada a alterações provocadas no processo de moldagem do concreto ainda em estado fresco, excesso ou falta de vibração, ou mesmo uma provável remoção localizada de uma brita ou de agregados miúdos próximos a superfície do bloco de (Figura 5-58).

³⁰ Os $f_{cm,j}$ dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin et al., (1971), também servindo de indicativos do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.



(a)



(b)

Figura 5-58: Proposta de modificação aos dados de Gal'perin et al., (1971), para escoamentos com tempos de ocorrência de 2h e $\beta = 6,0\%$ (a), e; para $\beta = 8,0\%$.³¹

Como Gal'perin *et al.*, (1971) apresentam em seus estudos apenas um resultado atribuído a demanda relativa de 8,0 %, tornou-se inviável a estimativa de uma h_{máx.} de referência, visto que essa informação é dependente da existência de dois ou mais dados medidos ou da descrição de funções de ajuste definidas por parte dos autores (Figura 5-58b).

³¹ Os f_{cm,j} dos blocos de concreto do LOH/UFRGS foram descritos graficamente como f_{ck} para fins de comparação com os dados de Gal'perin *et al.*, (1971), também servindo de indicadores do comportamento esperado pelas resistências médias à compressão avaliadas após exposição ao fenômeno da cavitação.

Em sua maioria, as profundidades máximas das fossas erodidas descreveram uma redução gradual em seus resultados, para todas as relações água/cimento, em função do aumento das demandas relativas de ar. Esse efeito pode ser associado a “atenuações” das ondas de choque geradas pelo fenômeno da cavitação, uma vez que há diminuição do número das cavidades de vapor, formadas e posteriormente implodidas, durante os ensaios no dispositivo de cavitação do LOH.

O decréscimo do número de implosões das bolhas de vapor com a adição crescente de ar ao escoamento cavitante também é justificado pelo aumento das pressões médias no interior do dispositivo, conforme o afirmado na análise do item *5.1.1 Pressões Médias – Dispositivo de Cavitação LOH/UFRGS e USBR*.

Contudo, os resultados obtidos através dos ensaios no LOH, e as adaptações definidas aos dados experimentais apresentados por Gal'perin *et al.*, (1971), para escoamentos com tempo de 2h, corroboraram para o desenvolvimento de novos limites associados as profundidades máximas dos danos, os quais também descrevem a evolução a ser esperada das fossas de erosão formadas pela ação da cavitação nos concretos analisados.

6 APLICABILIDADE PRÁTICA

De todos os resultados analisados, os que melhor evidenciam a ocorrência de danos nas superfícies de concreto através do fenômeno da cavitação, foram as estimativas das profundidades máximas ($h_{m\acute{a}x.}$) e as interferências nelas ocasionadas devido à presença de diferentes demandas relativas de ar no escoamento (β).

Considerando as $h_{m\acute{a}x.}$ dos danos observados, as relações água/cimento (a/c), resistências médias a compressão - que caracterizam o concreto - e os β inseridos ao escoamento, foi possível elaborar uma versão preliminar de um ábaco/tabela que possibilite a análise prática dos efeitos da cavitação em uma estrutura existente ou mesmo durante o processo de concepção de um projeto (Figura 6-1).

Segundo os critérios definidos graficamente por Gal'perin *et al.*, (1971) e adequados por Kudriashov *et al.*, (1983) foram fixados como limites, inferior e superior, os $h_{m\acute{a}x.}$ de 4,4 e 5,2 mm obtidos a partir dos resultados experimentais dessa tese e dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS. Essas profundidades limites foram atribuídas a escoamentos sem a inserção de ar ($\beta = 0\%$) e melhor detalhados no item: 5.4 - *Proposta de Gal'perin et al., (1971)* - Modificado .

Desta forma, a Figura 6-1 apresenta os dados experimentais extraídos em laboratório, dos danos geradas às superfícies dos blocos de concreto, após terem sido expostos ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

a/c	0,35	0,45	0,50	0,65
β (%)	h _{máx.} (mm)			
0,0	1,50	4,50	10,00	17,00
0,0	3,50	5,50	13,00	17,00
0,0	4,00	10,00	14,50	17,00
0,0	4,00	-	-	-
0,25	1,00	3,00	-	-
0,25	1,50	3,50	-	-
0,25	2,00	6,00	-	-
0,25	2,00	-	-	-
0,50	0,50	2,00	-	3,00
0,50	1,00	3,50	-	4,50
0,50	2,00	5,50	-	11,00
0,50	2,50	-	-	11,00
0,75	0,50	0,50	-	-
0,75	1,50	1,00	-	-
0,75	2,50	1,50	-	-
0,75	-	5,00	-	-
1,0	-	1,50	0,50	3,00
1,0	-	2,50	1,50	4,00
1,0	-	8,00	-	5,00
2,0	-	0,50	0,50	0,50
2,0	-	0,50	1,00	0,50
2,0	-	1,00	1,50	3,00
6,0	-	-	0,50	-
6,0	-	-	0,50	-
6,0	-	-	2,50	-
8,0	-	-	0,50	-
8,0	-	-	1,50	-
8,0	-	-	7,00	-
f_{cm} (MPa)	64,5	47,9	40,4	32,7

Legenda:

	Situação Ideal: Erosão por Cavitação pouco significativa
	Situação de Atenção: Limite Gal'perin <i>et al.</i> , (1971)
	Situação a ser Evitada: Com erosão por Cavitação

Figura 6-1: Ábaco das correlações estabelecidas entre os h_{máx.}, os Betas e os principais parâmetros característicos dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS.³²

³² As h_{máx.} foram obtidas experimentalmente após exposição dos concretos ao dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS, e referem-se exclusivamente a ocorrência do fenômeno da cavitação em condições controladas e no interior de um conduto forçado (V = 30,0 m/s).

Em uma situação hipotética, onde a superfície de revestimento de um dado vertedouro seja constituída, por exemplo, de um concreto de $a/c = 0,45$ e $f_{cm} = 49,7$ MPa, e a qual, tenha sido submetida a um escoamento de $V = 30,0$ m/s, durante um evento hidrológico de 2h. E, que a estrutura extravasora não possua instalado em sua calha dispositivos aeradores, ou seja, $\beta = 0\%$ durante o evento em questão. Logo após seu acionamento foram detectados danos em sua superfície com $h_{m\acute{a}x.}$ que variaram de 3,8 a 5,0 mm.

Podemos afirmar que, o vertedouro analisado apresentou erosões por cavitação, sem que haja dados de pressão?

Ao inserirmos as informações existentes sobre a estrutura hidráulica hipotética, de acordo com o apresentado na Figura 6-2, podemos observar que:

- As $h_{m\acute{a}x.}$ de 3,8 a 5,0 mm se enquadrariam em um intervalo limite, onde as profundidades máximas descritas no ábaco através dos dados experimentais correspondentes, descrevem, segundo a proposta de Gal'perin *et al.*, (1971) – Modificado, uma “zona de transição” em que os danos ocasionados pelo evento em questão podem ser classificados como sendo de “Situação de Atenção - Limite”, devendo os mesmos serem observados com cautela por parte do operador;

- Por se tratar de uma condição desfavorável de operação, indica-se como ferramenta de apoio para a conservação das superfícies de concreto dessa estrutura a inserção de aeradores ao longo de sua calha, visto que a adição de ar no escoamento, conforme o exposto pelos dados experimentais desta pesquisa, reduz significativamente a ação cavitante do escoamento.

a/c	0,35	0,45	0,50	0,65
β (%)	h _{máx.} (mm)			
0,0	1,50	4,50	10,00	17,00
0,0	3,50	5,50	13,00	17,00
0,0	4,00	10,00	14,50	17,00
0,0	4,00	-	-	-
0,25	1,00	3,00	-	-
0,25	1,50	3,50	-	-
0,25	2,00	6,00	-	-
0,25	2,00	-	-	-
0,50	0,50	2,00	-	3,00
0,50	1,00	3,50	-	4,50
0,50	2,00	5,50	-	11,00
0,50	2,50	-	-	11,00
0,75	0,50	0,50	-	-
0,75	1,50	1,00	-	-
0,75	2,50	1,50	-	-
0,75	-	5,00	-	-
1,0	-	1,50	0,50	3,00
1,0	-	2,50	1,50	4,00
1,0	-	8,00	-	5,00
2,0	-	0,50	0,50	0,50
2,0	-	0,50	1,00	0,50
2,0	-	1,00	1,50	3,00
6,0	-	-	0,50	-
6,0	-	-	0,50	-
6,0	-	-	2,50	-
8,0	-	-	0,50	-
8,0	-	-	1,50	-
8,0	-	-	7,00	-
f_{cm} (MPa)	64,5	47,9	40,4	32,7

Legenda:

- Situação Ideal: Erosão por Cavitação pouco significativa
- Situação de Atenção: Limite Gal'perin et al., (1971)
- Situação a ser Evitada: Com erosão por Cavitação

Figura 6-2: Detalhamento da utilização do ábaco/tabela para determinação da ocorrência do erosões que sejam oriundas do fenômeno da cavitação.^{33,34}

³³ Uso do Ábaco/Tabela é indicado somente como avaliação preliminar dos danos, para condições de escoamento caracterizados pela $V = 30,0$ m/s, e para os concretos de f_{cm} e a/c semelhantes aos ensaiados no dispositivo de cavitação do LOH/UFRGS.

Vislumbra-se ainda, como futura aplicação prática dos dados experimentais, a utilização das características dos concretos (f_{cm} , a/c e $h_{máx.}$) e do escoamento - principalmente no que tange a proteção efetiva dos dispositivos de segurança das barragens – no processo de especificação dos traços de concreto a serem implementados em novas estruturas hidráulicas ou mesmo em reparos de superfícies em que há ocorrência do fenômeno da cavitação.

Obviamente que, novos estudos devem ser realizados a fim de permitir uma melhor compreensão da influência da aeração em uma faixa mais ampla de velocidades de escoamento e em diferentes resistências médias a compressão (f_{cm}). De maneira que, a probabilidade de ocorrência de danos por cavitação seja reduzida ou mesmo compreendida segundo os danos apresentados na superfície da própria estrutura de concreto.

Por fim, vale salientar que o ábaco/tabela (Figura 6-1) trata-se de uma versão preliminar que deve ainda ser aprimorada com novos estudos e ensaios em laboratório, servindo inicialmente como indicativo do comportamento do escoamento cavitante nos concretos de f_{cm} de 32,7; 40,4; 47,9 e 64,5 MPa.

³⁴ Novos estudos devem ser realizados a fim de se obter o comportamento dos danos ocasionados pela cavitação para velocidades diferentes da considerada, para que assim, seja ampliada a utilização do presente ábaco/tabela a estruturas e condições reais de operação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fundamentado na análise dos resultados e discussões desenvolvida até o presente momento e, baseado nas informações bibliográficas sobre o tema cavitação e suas interações com as superfícies de concreto, pode-se constatar preliminarmente que:

Pressões Médias – Dispositivo de Cavitação LOH/UFRGS e USBR

- Há diferenças entre o comportamento das pressões médias ($P\bar{x}$) registradas no teto e na base do dispositivo de cavitação. Os valores médios ($P\bar{x}$) e desvios padrão (σ_P) evidenciaram que a inserção de crescentes demandas relativas de ar (β) resultam em acréscimos nas pressões médias;

- Os maiores aumentos de $P\bar{x}$ foram verificados para as $\beta \geq 2,0$;

- A evolução das $P\bar{x}$ ao longo de ambos os dispositivos de cavitação (USBR e LOH), demonstrou a existência de interações em comum entre as duas máquinas de cavitação;

- Foram detectadas correlações entre a pressão circundante do escoamento e os diferentes Betas;

- Inserções de ar em $\beta > 2,0\%$ podem não gerar ganhos significativos na proteção de estruturas hidráulicas pelo fenômeno da cavitação, quando avaliadas as pressões médias do escoamento.

Vibrações – Dispositivo de Cavitação do LOH

- Os sinais de aceleração no eixo “z”, aquisitados nos ensaios com diferentes vazões de água (Q_w), sem a adição de ar no escoamento, apresentam aumentos consideráveis com o acréscimo de Q_w ;

- Por se tratar de um fenômeno estocástico de eventos aleatórios, a cavitação e os efeitos ocasionados ao escoamento resultaram em acelerações de comportamento estatístico semelhante. Com o aumento das vazões e, conseqüentemente, das vibrações impostas ao dispositivo, as séries amostrais distanciaram-se do padrão de distribuição normal, comprovado a partir do aumento das assimetrias determinadas para $Q_w > 38,7$ l/s;

- Avaliando as velocidades do fluxo e os v_P das acelerações para as Q_w ensaiadas foi possível identificar a existência de 3 (três) distintas zonas de comportamento do escoamento na máquina de cavitação do LOH/UFRGS, como sendo:

i) *Cavitação Incipiente* (16,0 a \cong 17,0 m/s);

ii) *Cavitação de Bloqueio* (23,2 m/s), e;

iii) *Zona de Transição* (17,0 m/s < V > 23,2 m/s);

- Quando avaliadas as vibrações definidas pelos ensaios com a $Q_w \cong 60,0$ l/s, e as β de 0 a 8,0%, os maiores picos de aceleração foram detectados nas demandas relativas de ar inferiores a 0,75%.

Vale ressaltar que, as análises realizadas acerca do comportamento das acelerações e suas alterações forneceram evidências “externas” das características hidráulicas do fenômeno. Visto que, a instalação dos acelerômetros ocorreu sobre um dispositivo metálico e rígido, sendo esses totalmente influenciados pela forma de fixação e contato com as paredes da máquina de cavitação. Sendo assim, devem ser considerados possíveis “amortecimentos” ou mesmo “adições” de aceleração nos sinais coletados junto ao dispositivo, inerentes ao tipo de instalação e aos equipamentos utilizados.

Pressões Instantâneas (1 MHz) – Dispositivo de Cavitação USBR

- Os resultados da análise estatística das pressões instantâneas aquisitadas no dispositivo de cavitação do USBR, não apresentaram valores de representatividade física confiável. Das informações obtidas, somente os resultados de flutuação de pressão, ou seja, dos desvios padrões dessas amostras podem ser considerados como sendo dados reais das condições do escoamento;

- As assimetrias e curtoses extraídas dos dados de pressão instantânea do USBR reafirmaram a condição estocástica e aleatória do fenômeno da cavitação;

- Notadamente, o acréscimo de ar no sistema do USBR condicionou as pressões atuantes a comportamentos cada vez mais próximos de uma distribuição estatística “normal”, tendo os efeitos da turbulência

gerados pelas cavidades de vapor suprimidos em função da capacidade de atenuação fornecida ao fluxo pela presença de ar no sistema.

A análise das pressões máximas e mínimas dos sensores (D_1 e D_2), apesar de não descreverem o comportamento representativo da amostra, serviram de subsídio para enfatizar que introdução de ar em um fluxo cavitante (confinado) também amortece as pressões pontuais de grande magnitude, auxiliando na manutenção de danos imprevistos das estruturas em contato com o escoamento.

Análise Comparativa – Dados de Pressão Instantânea (Média e de 1MHz) e das Acelerações

A limitação de dados disponíveis na literatura, que possibilitassem um comparativo mais representativo com os resultados apresentados pelos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR, fizeram com que a análise referente as condições hidráulicas desses escoamentos fossem elaboradas de maneira complementar a esse estudo.

O único dispositivo possível de ser comparado (Dong *et al.*, 2007; 2008), apesar de gerar as condições favoráveis para a ocorrência do fenômeno da cavitação possui o comportamento hidráulico mais semelhantes a um conduto curto conduzindo um fluxo de alta velocidade. Enquanto que, os dispositivos de cavitação aqui apresentados (LOH/UFRGS e USBR) podem ser avaliados como uma sendo uma ampliação brusca, a qual limita a uma pequena região a influência da nuvem de cavidades formada.

Análise de Danos no Concreto

- A remoção mais expressiva de material foi constatada nos blocos de menor $f_{cm,j}$, registrada principalmente nos a/c de 0,65 e 0,50 e $\beta = 0\%$. Para as relações de 0,35 e 0,45 foi constatado somente a remoção das camadas superficiais de revestimento desses concretos;

- Os limites mínimos de inserção de ar, para a total proteção de danos nos corpos de prova do LOH/UFRGS, variaram em função da suscetibilidade dos concretos a ação do escoamento, sendo:

i) Para a/c de 0,35 e 0,45, $\beta = 1,0\%$;

ii) Para a/c = 0,50, entre $\beta \geq 1,0\%$;

iii) Para $a/c = 0,65$, $\beta \geq 2,0\%$.

Quando comparados os concretos de relação a/c semelhantes foram verificados que os maiores danos estão vinculados aos corpos de prova do LOH/UFRGS. Uma provável justificativa foi ser atribuída ao arranjo interno dos agregados graúdos, que ao se concentrarem próximos a face de contato com o escoamento, acabaram por facilitar a remoção da camada mais fina da pasta de cobertura dos corpos de prova.

Outro aspecto a ser considerado seriam o aumento dos pontos de ruptura entre a pasta e a superfície de contato com os agregados graúdos, que mais próximos entre si acarretariam em conexões internas entre os pontos de fragilidade dos concretos do LOH/UFRGS.

Por fim, a análise comparativa dos registros fotográficos, em conjunto com os $f_{cm,j}$ e as relações a/c de concretos semelhantes (LOH/UFRGS e USBR), fortaleceu o indicativo de que mesmo adotando procedimentos e materiais similares, fatores externos vinculados a fabricação e moldagem dos corpos de prova podem vir a alterar consideravelmente os danos a serem verificados nos blocos de concreto em estudo.

Análise das Perdas de Área e Volume – Metodologia do Perfilador a Laser, Escâner “3D” e Pesagem

- Os resultados obtidos nas estimativas dos volumes erodidos, pela metodologia do Escâner “3D” e do Perfilador a Laser, demonstraram maior proximidade entre si do que quando comparados aos volumes oriundos das perdas de massa;

- As 3 (três) metodologias de estimativa dos volumes removidos, Perfilador a Laser (V_{ePL}), Escâner “3D” (V_{eME}) e Pesagem Hidrostática (V_{eMP}), descreveram bons resultados quando comparados entre si, principalmente para os danos de maior intensidade, ou seja, para os ensaios de $\beta = 0\%$ em todas as relações a/c consideradas;

- Os dados de profundidade máxima dos danos (hm_{\max}) tornou possível a definição de funções de correlação entre hm_{\max} e os $f_{cm,j}$ dos concretos ensaiados, para β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0%. As funções de ajuste estabelecem a possibilidade de estimativa das hm_{\max} ., fomentando novas evidências de quais β devem ser adotados para os danos sejam

“condicionados” a $h_{m\acute{a}x.}$ seguras do ponto de vista da integridade do concreto.

Proposta de Gal’perin et al., (1971) – Modificado

- A adequação dos dados apresentados por Gal’perin et al., (1971), para $\beta = 0\%$ e $t = 2h$, permitiu a estimativa dos limites, máximo e mínimo, definidos pelos autores como sendo as profundidades que caracterizariam as erosões oriundas do fenômeno da cavitação;

- As profundidades ($h_{m\acute{a}x.}$) atribuídas aos dados de Gal’perin et al., (1971), foram de 4,4 a 5,2 mm, acima desses limites as condições do escoamento e de resistência do concreto devem ser revistas;

- Os resultados de $h_{m\acute{a}x.}$ extraídos dos concretos de a/c 0,35; 0,45; 0,50 e 0,65, quando submetidos a escoamentos sem a presença de ar no fluxo, descreveram danos por cavitação acima dos limites estabelecidos de Gal’perin et al., (1971). Com exceção do concreto de a/c 0,35, que registrou $h_{m\acute{a}x.}$ que variaram de 1,5 a 4,0 mm.

Por fim, podemos concluir que, a utilização dos parâmetros pré-estabelecidos por Gal’perin et al., (1971), quando atrelados aos $h_{m\acute{a}x.}$, fornecem boas ferramentas para a tomada de decisões por parte do usuário para evitar ou mesmo controlar os danos pelo fenômeno da cavitação.

Alguns aspectos importantes que devem ser ressaltados:

- A variabilidade dos danos detectados durante as repetições dos ensaios, mesmo considerando traços de concreto e β semelhantes, mostrou ser algo inerente ao tipo de material estudado. Uma vez que o composto utilizado é constituído de materiais de densidades distintas, quando expostos a ação erosiva da cavitação são removidos de maneiras diferentes pelo escoamento tornando o processo de difícil uniformização.

- Devido às limitações construtivas impostas pelo tipo de dispositivo de cavitação utilizado, os resultados obtidos referem-se exclusivamente a escoamento de $V = 30,0$ m/s. Para velocidades diferentes da adotada devem ser realizadas novos estudos a fim de estabelecer, ou confirmar, os parâmetros indicados no item 5.4 *Proposta de Gal’perin et al., (1971) - Modificado*.

- O uso das ferramentas gráficas desenvolvidas a partir da modificação dos estudos descritos por Gal'perin *et al.*, (1971), deve ser realizado para concretos de composição semelhante as atribuídas para os corpos de prova e para Betas verificados. Condições adversas as consideradas nesse estudo devem ser avaliadas em laboratório.

- As informações apresentadas originalmente por Gal'perin *et al.*, (1971), apesar de sua aplicabilidade prática, devem ser utilizadas com a devida parcimônia, uma vez que seus resultados são atribuídos a escoamentos com tempo de ocorrência de 48 h. Para períodos de exposição diferentes desse os dados descritos pelos autores devem ser modificados segundo o indicado por Kudriashov *et al.*, (1983).

8 RECOMENDAÇÕES E CONTRAINDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao avaliar os resultados e conclusões acerca dos ensaios realizados no dispositivo de cavitação do LOH, e os percalços inerentes a toda a pesquisa em desenvolvimento, serão descritas a seguir algumas das recomendações e contraindicações propostas para o segmento de trabalhos sobre o tema.

- Desenvolver novos estudos com resistências médias à compressão diferentes das adotadas para os ensaios no LOH, com o intuito de ampliar os limites estabelecidos as propostas de modificação de Gal'perin et al., (1971);

- Realizar pesquisas que avaliem diferentes tipos de reparos em concretos com danos pelo fenômeno da cavitação;

- Ampliar as faixas de demandas relativas de ar investigadas, principalmente entre os limites de 1,0 e 2,0%, 3,0 e 4,0% de ar.

- Realizar ensaios com a presença de blocos de concreto para as vazões de água inferiores aos 60,0 l/s (\cong 30,0 m/s), considerando as Q_w adotadas durante a investigação das vibrações do dispositivo de cavitação do LOH, ou seja, de 38,7; 41,9; 45,3; 50,3; 57,3 e 59,0 l/s, sem a adição de ar no sistema;

- Avaliar o desempenho de concretos com relações água/cimento entre 0,48 e 0,55, de maneira a abranger as características dos concretos das superfícies extravasoras de algumas das usinas brasileiras;

- Consideraria a realização de ensaios com corpos de prova moldados com a presença de "Strain Gauges" em seu interior, objetivando a aquisição de informações dos esforços ocasionados aos corpos de prova pelo fenômeno da cavitação plenamente desenvolvida com $\beta = 0\%$;

- Aquisitar as pressões médias no dispositivo de cavitação, para $Q_w = 60,0$ l/s, alterando as demandas relativas de ar durante os ensaios, de forma a obter o s decréscimos ou acréscimos das pressões no interior do dispositivo;

- Propor novas adaptações aos dados de Gal'perin *et al.*, (1971), considerando tempos de exposição a velocidades representativas de eventos de cheias ocorridos em algumas das UHEs brasileiras, onde tenha-se dados de protótipo (concreto x escoamento);

- Não indicaria a coleta de dados de pressões médias com tempos superiores a 2 min e frequências de aquisição próximas aos 2.000 Hz, devido às dificuldades de processamento e análise de uma variável da qual será considerado somente os valores médios;

- Não recomendaria a realização de novos ensaios com concretos de a/c 0,35 e $f_{cm,j}$ próximos aos 64,5 MPa, devido à falta de representatividade em estruturas hidráulicas reais que tenham adotado tal composição. O extremo oposto também deve ser desconsiderado, $a/c = 0,65$ e $f_{cm,j}$ de 32,7 MPa, pelo mesmo motivo citado anteriormente;

- Apesar da dificuldade de produção e logística dos blocos de concreto, não aconselharia reduzir o número de repetições dos ensaios, mantendo em no mínimo 3 (três) para cada concreto e demanda relativa de ar investigada, devido essencialmente a variabilidade espacial do composto quando endurecido.

- A realização de ensaios de longa duração no dispositivo de cavitação ($t > 2h$) do ponto de vista prático não se fazem necessários, visto que as maiores remoções de material ocorrem nos primeiros 30 min de cada ensaio.

- O desenvolvimento de testes com blocos de concreto compostos exclusivamente de argamassa, com distintos $f_{cm,j}$, devem ser considerados, uma vez que já existem estudos priorizando somente a camada mais externa de revestimento das superfícies hidráulicas, tais como as pesquisas de Dong. et al., (2023);

Referências Bibliográficas

- ABDUL KHADER, M. H.; ELANGO, K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, v. 12, n. 4, p. 469–489, 1974.
- ABREU, A. S., NOVAKOSKI, C. K., PRIEBE, P. dos S., TRIERWEILER NETO, E. F., TEIXEIRA, E. D., MARQUES, M. G., DAI PRA, M. Analysis of hydraulic parameters in determining the occurrence of cavitation in the spillways of the Furnas, Luiz Carlos Barreto de Carvalho and Batalha hydroelectric power plants. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 2023.
- AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: **International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures**. Coventry: 1982
- AMADOR, António; SÁNCHEZ-JUNY, Martí; DOLZ, Josep. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 12, p.1092-1100, dez. 2009
- AMADOR, A. T. **Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado**. Tese (Doctorado en Ingeniería) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
- AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F. e PUERTAS, J. Estudo experimental no campo de pressões e de velocidades num descarregador de cheias em degraus. **7º Congresso de Água de Portugal. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**, 2004.
- ANDRÉ, M. e MATOS, J. S. G. Característica da onda estacionária oblíqua do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com paredes convergentes. **7º Silusba**. 2005.
- ANDRÉ, S. **High velocity aerated flow on stepped chutes with macro-roughness elements**. Tese de doutoramento. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004. Meio Magnético
- ARNDT, R. E. A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 13, p.273-326, 1981
- ARNDT, R.E.A., Holl, J. W., Bohn, J. C., Bechtel, W. T., Influence of Surface Irregularities on Cavitation Performance. **Journal of Ship Research**, vol. 23, No. 3, pp. 157-170, September 1979.

BALL, J. W. Cavitation from surface irregularities in high velocity. **Journal of the Hydraulic Division, ASCE**. No. HY9, Setember, 1976. pp. 12435-1297

BALL, J. W. Cavitation and vibration for a cylinder gate designed for high heads. In: Eighth Congress of the International Association, **Hydraulic Research**, 1959, Montreal, Canada. 24-29 p.

BHATE, R. R., BHAJANTRI, M. R., BHOSEKAR, V. V. (2018). Mitigating cavitation on high head orifice spillways. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, DOI:10.1080/09715010.2018.1547990

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 9, p.661-670. 2003.

BOWERS, C. E.; TSAI, F. Y. Fluctuating pressures in spillway stilling basins. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 95, n. 6, p. 2071–2080, 1969.

BRITO, ROMUALDO JOSÉ ROMÃO. **Análise da aeração em escoamentos de altas velocidades em calhas de vertedores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - São Carlos: Universidade de São Paulo, 2011

CAMPBELL, F.F.; COX, R.G.; BOYD, M. B. (1965) Boundary layer and spillway energy losses. **Journal of Hydraulic Division - ASCE**, New York, v91, HY3, proc. Paper 4331. p. 149-163.

CANELLAS, Alba Valéria Brandão. **Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

CARVALHO, E. **Grandes Vertedouros Brasileiros**. In: **CBDB**. O vertedouro de Porto Colômbia - Desempenho e recuperação da bacia de dissipação. 1ª ed. 2010. p. 129 - 138

CARVALHO, P. D. (1997). **Aeração de escoamentos de alta velocidade em canais de forte declividade**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, S.P.

CHANSON, H. e GONZALEZ, C. – Interactions between free-surface, free-stream turbulence and cavity recirculation in open channel flows measurements and turbulence manipulation. **5th International Conference on Multiphase Flow**, Yokohama, Japão, 30 de maio a 4 de junho, 2004.

CHANSON, H. e TOOMBES, L. - Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, p.145-156, 2002.

CHANSON, H. (1996). Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows. London: **Academic Press**. 348 p.

CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 32, n. 2, p. 213- 218, 1994

CHANSON, H. – Stepped Spillways Flows and Air Entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, jun., 1993.

CHANSON, H. (1991). Aeration of a free jet above a spillway. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v.29, n.5, p.655-667.

CHANSON, H. (1988). **A study of air entrainment and aeration devices on a spillway model**. PhD. (Thesis)- Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, New Zealand.

CHENG, C.L.; WEBSTER, C.T. e WONG J.Y. Cavitation resistant coatings for concrete hydraulic structures. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.87, n.6, p.594-601, nov-dec 1990.

CHOI, Sokhwan; BOLANDER, John E. A topology measurement method examining hydraulic abrasion of high workability concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 771-778, 2012.

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, 7º**, 1984, Ottawa. Jet Cutting Technology. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, june,1984. p.1-12.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 131-137, jan./mar. 2015.

DAI PRÁ, M. PRIEBE, P. S. SANAGIOTTO, D. G. MARQUES, M. G. (2016). Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. **Ingeniería del Agua**. v. 20, n. 1, p. 1-12.

DAI PRÁ, Maurício. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. 172 f. 2011. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

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, José Gilberto; GENOVEZ, Ana IB. Métodos para avaliação do desgaste em amostras de concreto submetidas à abrasão e à cavitação. **Ingeniería del Agua**, v. 11, n. 4, p. 389-396, 2004.

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., XU, X., LI, Y. (2023) Effect of sand grain size on cavitation erosion of concrete induced by high velocity sand carrying water flow, **Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection**, 43:1, 166-172. DOI 10.11902/1005.4537.2022.083

DONG, Z., WU, Y., ZHANG, D. (2010) Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration, **Journal of Hydraulic Research**, 48:1, 74-80.

DONG, Z., LIU, Z., WU, Y., ZHANG, D. (2008). An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration. **Journal of Hydrodynamics** 20(1), 60–66

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.

ENDRES, L. A. M.; SCHUMACHER, A; CANELLAS, A. V. B., DA SILVA, F. A. Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus. Comitê Brasileiro de Barragens, **XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Salvador – BA – 20 a 23 de Maio de 2019

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

FALVEY, H. T. Predicting cavitation in tunnel spillways. **Water Power & Dam Construct.**, v. 34, n. 8, p. 13-15, 1982.

FERLA, Rute. **Vertedouro em degraus com aeração induzida: Análise do escoamento com sistema aerador de diferentes posições**. 260 f. 2022. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

FERLA, R.; NOVAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. dos S.; DAI PRÁ, M.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D. Stepped spillways with aerators: hydrodynamic pressures and air entrainment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.26, 2021.

FERNANDO, A. M.; RICO, J. R. (2002). On the incipiente aerated flow in chutes and spillways. **Journal of Hydraulic Research**. Delft, v.40, n. 1, p. 95-7

FIOROTTO, V.; RINALDO, A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 30, n. 4, p. 499–520, 1992.

FRIZELL, K. W., RENNA, F. M., e MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 6, p. 630-636, jun. 2013.

GAL'PERIN, R. S. et al. Cavitation in Hydraulic Structures. **Energia Publishing House**, Moscow (in Russian). 1977

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

GOMES, J. F. **Campo de pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H**. 2006. 195 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

HAGER, H.W.; (1991) Uniform aerated chute flow. **Journal of Hydraulic Engineering-ASCE**, New York, v. 117, n.4, p.528-533

HAGER, H.W.; BLASER, F. (1998) Drawdown curve and incipient aeration for chute flow. **Canadian Journal Civil Engineering**. Ottawa, v25, p.467-473

HAMPE, Roberta Ferão. **Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. Dissertação (Mestrado)

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

HENN, E. L. **Máquinas de Fluido**. Santa Maria: UFSM, 2001.

HOULSTON, R.; VICKERS, G.W. Surface cleaning using water jet cavitation and droplet erosion. In: **International Symposium on Jet Cutting Technology**, 4, 1978.

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.

KÖKPINAR MA AND GÖGÜS M. (2002). High-speed Jet Flows Over Spillway Aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v. 29, p. 885–898. DOI:[10.1139/102-088](https://doi.org/10.1139/102-088)

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.

Kudriashov, G. V. et al., (1983). Cavitation and cavitation erosion of members of water outlet structures. Proc. **XXth IAHR Congress**, Moscow, v. 3, p. 453-461.

LOPARDO, R. A.; LOPARDO, M. C. Model-prototipe correlation of pressure fluctuations on baffle blocks. In: IAHR World Congress, 38, 2019, Panama. **Anais...** Panama, IAHR, 2019.p. 1-7.

LOPARDO, R. A. Modelación física de flujo macroturbulento en estructuras hidráulicas. **Apuntes de Ingeniería**, v. 19, n. 2, p. 5-20, Santiago, Chile, 1996.

LOPARDO, R. A. Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. São Paulo: **Curso n. 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenomenos hidráulicos**, 1986.

LOPES, G. L. A.; A **Cavitação nas Turbinas Hidráulicas**. 1944. 100f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Porto, Porto - Portugal. 1944

MACINTYRE, A. J.; **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997. 206 - 207 p.

MATEOS IGUÁCEL, C. e ELVIRO GARCIA, V. - Initiation of aeration in stepped spillways. **Anais do 27º IAHR**, San Francisco (EUA) – volume D, páginas 589-594, 1997

MATOS, J., NOVAKOSKI, C. K., FERLA, R., MARQUES, M. G., DAI PRA, M., CANELLAS, A. V. B., TEIXEIRA, E. D. Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams. **Water**, Jan, 2022.

MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. e RAMOS, C. M. - Sobre a protecção contra erosão de cavitação em descarregadores de cheias em degraus. **Recursos Hídricos**, 2001

MATOS, J. (2000). Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams. **Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways**, Eds. H.E. Minor and W.H. Hager, Balkema, pp. 187-194.

MATOS, J. S. G. **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1999.

MATOS, J. S. G. **O arejamento como medida de protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1990.

MAY, R. Cavitation in hydraulic structures: Occurrence and prevention. Hydraulic Research Wallingford. **Report n° SR-79**. Mar, 1987.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concrete, Microstructure, Properties and Materials**. Fourth Edition, 2014.

MEIRELES, I., RENNA, F., MATOS, J., BOMBARDELLI, F. Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, Inglaterra, 2012.

MIRZA J.; MIRZA M.S.; LAPOINTE R. Laboratory and Field Performance of Polymer-Modified Cement-Based Repair Mortars. **In: Cold Climates Construction Building Material**, v.,16, pages. 365-374, 2002.

MOMBER, Andreas W. Short-time cavitation erosion of concrete. **Wear**, v. 241, n. 1, p. 47-52, 2000.

Mortesen, J. (2020). Collaborative Studies to Reduce Flow – Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces. **Report (HL- 2020-05)**. Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratory, Denver, Colorado, EUA.

Mortesen, J. (2017). Cavitation Detection – Method development to detect damaging cavitation. **Report (HL – 2017-10)**. Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratory, Denver, Colorado, EUA.

NEVILLE, A. Maintenance and durability of structures. **Concrete International, Farmington Hills**, v. 19, n.11, p.52-56, nov. 1997.

NOVAKOSKI, Carolina Kuhn. **Análise da macroturbulência do escoamento sobre vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2021.

NOVAKOSKI, Carolina Kuhn et al. Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways. In: Third International Dam World Conference. **Anais...Foz do Iguaçu**: 2018.

OLINGER, J. C. e BRIGHETTI, G. - Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus. **Boletim Técnico**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.

OLINGER, J. C. **Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus**. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, 2001.

OSMAR, F. M.; CANELLAS, A. V. B.; PRIEBE, P. S.; SARAIVA, L. S.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. (2018). Analysis of the longitudinal distribution of pressures near the ends of the vertical and horizontal faces in stepped spillway of slope 1V: 0.75H. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, e. 4, 2018.

OSMAR, FABRÍCIO MACHADO. **Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2016. 84 f., Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

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.

PFISTER, M.; BOES, R. M. Discussion of “Skimming, Non-aerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams” by Inês Meireles, Floriana Renna, Jorge Matos, and Fabián Bombardelli. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 10, out. 2014.

PFISTER, Michael. Chute Aerators: Steep Deflectors and Cavity Subpressure. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 10, p.1208-1215, oct. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000436.

PFISTER, Michael; HAGER, Willi H.; MINOR, Hans-erwin. Bottom Aeration of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 8, p.850-853, ago. 2006a.

_____. Stepped chutes: Pre-aeration and spray reduction. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, n. 2, p.269-284, fev. 2006b.

PINTO, L. C. S.; VASCONCELLOS, J. E.; SEYSSEL, R. L. Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado. In: **Congresso Latinoamericano de Hidraulica**, 13., Havana, 1988. Memórias... Havana: IAHR, 1988. v. 2, p. 182-194.

PINTO, N. L. de S.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Aeration at high velocity flows. **Water Power and Dam Construction**, [s. l.], p. 34–38, 1982.

PRIEBE, Priscila dos Santos. **Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M; Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério de Habilitação e Obras Públicas. Lisboa, 1980.

ROSA, Agnus Rogério. **Análise comparativa de concretos simples e armado modificados e revestidos com resinas epóxi**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

RUSSEL, S. O.; SHEEHAN, G. J. Effect of entrained air on cavitation damage. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 1, p.97-107, 1974.

RUTSCHMANN, P. **Belüftungseinbauten in Schussrinnen**. In Vischer, D., editor, VAW Mitteilungen 97. ETH Zürich. (1988) (apud TERRIER 2016)

SANAGIOTTO, Daniela Guzzon. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

SÁNCHEZ JUNY, M. **Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormigón compactado: análisis del campo de presiones.** (2001). Tese (Doutorado em engenharia civil) – Programa de Doctorado em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2001.

SCHULZ, H. E. et al. (2010), Modelos teóricos para análise de aeração em aeradores de fundo utilizando princípios físicos. **In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, 24., Punta del Este, Uruguay

SEMENKOV, V. M.; LENTYAEV, L. D. Spillway with nappe aeration. **Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo**, p.436-441, Mai, 1973.

SENTÜRK, F., Hydraulics of dams and reservoirs. **Water Resources Publications**, 788p., 1994.

SERRA, P. C. G. **O uso de dispositivos de aeração em vertedouros para o controle da erosão por cavitação.** Dissertação (Mestrado) - São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986.

TEIXEIRA, E. D. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.** 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2003

TERRIER, Stéphane. Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features. **Communication 63**, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2016.

TOSO, J. W.; BOWERS, E. Extreme Pressures in Hydraulic-Jump Stilling Basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 8, p. 829–843, 1988.

TOZZI, Marcos José. **Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus.** 302 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

TULLIS, J. P. **Cavitation in Hydraulic Systems.** São Paulo: USP Escola Politécnica, 1982.

US BUREAU OF RECLAMATION - **Design and Construction of New Cavitation Machine-** 1963.

VOLKART, P; RUTSCHMANN, P. **Air Entrainment Devices (Air Slots).** Zurich: 1984.

WAHL, T.L. FALVEY, H.T. SpillwayPro: Integrated Water Surface Profile, Cavitation, and Aerated Flow Analysis for Smooth and Stepped Chutes. **Water** 2022, 14, 1256. <https://doi.org/10.3390/w14081256>

WAHL, T. L., FRIZEL, K. W., FALVEY, H. T. Uplift Pressures below Spillway Chute Slabs at Unvented Open Offset Joints. **Journal of Hydraulic Engineering**. v.145, n.11, p.1-11, set. 2019a. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001637](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001637).

WAHL, T. L., FRIZEL, K. W., FALVEY, H. T. SpillwayPro – Tools for Analysis of Spillway Cavitation and Design of Chute Aerators. **Report (HL-2019-03)**. Bureau of Reclamation: Hydraulic Laboratory, Denver, CO, EUA, 2019b.

WHITE, F. M.; **Mecânica dos Fluidos**. Porto Alegre: Editora Bookman Companhia Editora Ltda, 2011; 6º Ed. 880 p.

WOOD, I. R. Free surface air entrainment on spillways. In: **Air entrainment in free-surface flows**. Ed. Wood, I. R. Balkema: Rotterdam; p. 55 – 84, 1991.

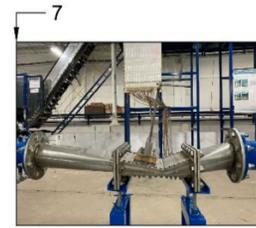
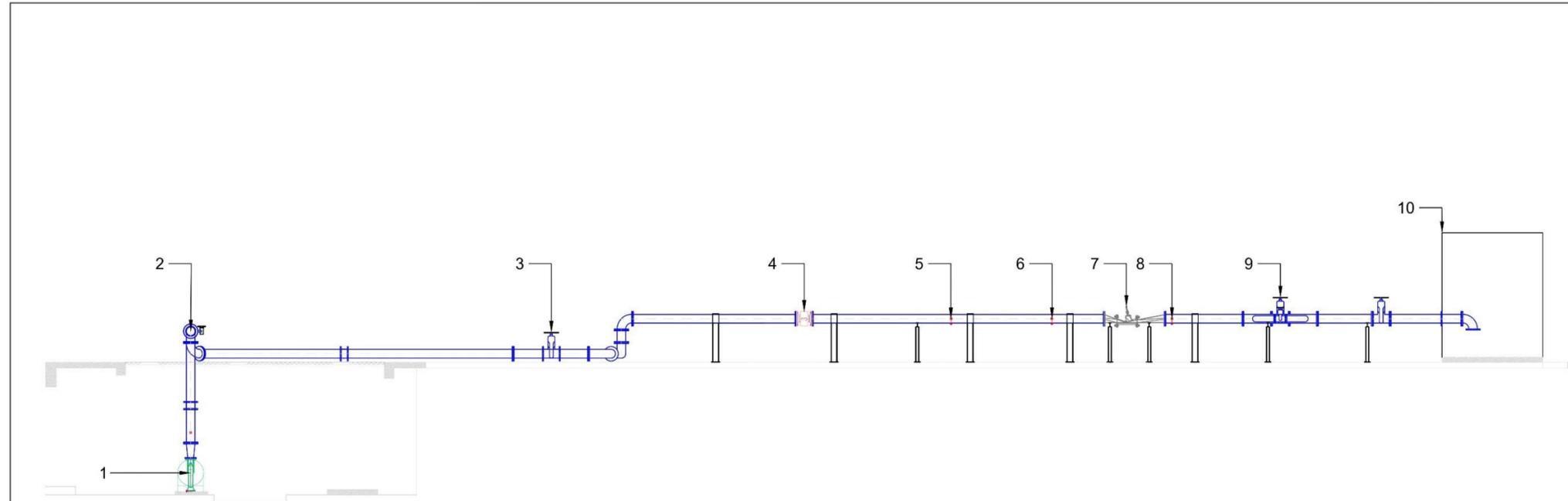
WOOD, I. R.; ACKERS, P.; LOVELESS, J. (1983). General method for critical point on spillway. **Journal of Hydraulics Engineering- ASCE**, New York, v.109, n.2, p. 308-312

WU, JIAN-HUA; LUO, CHAO (2011). Effects of entrained air manner on cavitation damage. **Journal of Hydrodynamics**, v. 23, n.3, p. 333-338, Apr. 2011.

ZAMORA, Anina Schiess et al. Hydraulic Performance of Step Aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 2, p.127-134, fev. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Descrição do aparato experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas.



Item	Descrição
1	Conjunto motobomba
2	Barrilete DN150mm
3	Bypass montante DN100mm
4	Medidor de vazão eletromagnético
5	Ponto de inserção de ar
6	Manômetro montante
7	Dispositivo de cavitação
8	Manômetro jusante
9	Bypass jusante DN100mm
10	Reservatório superior

	DESCRÇÃO		
	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL (VISTA LATERAL)		
UNIDADE	DATA	FOLHA	
m	31/01/2022	ANEXO II	

APÊNDICE B - Comparativo entre as pressões médias aquisitadas por diferentes autores considerando as distancias dos sensores da seção de controle de cada experimento, para os β de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 4,0; 6,0 e 8,0%.

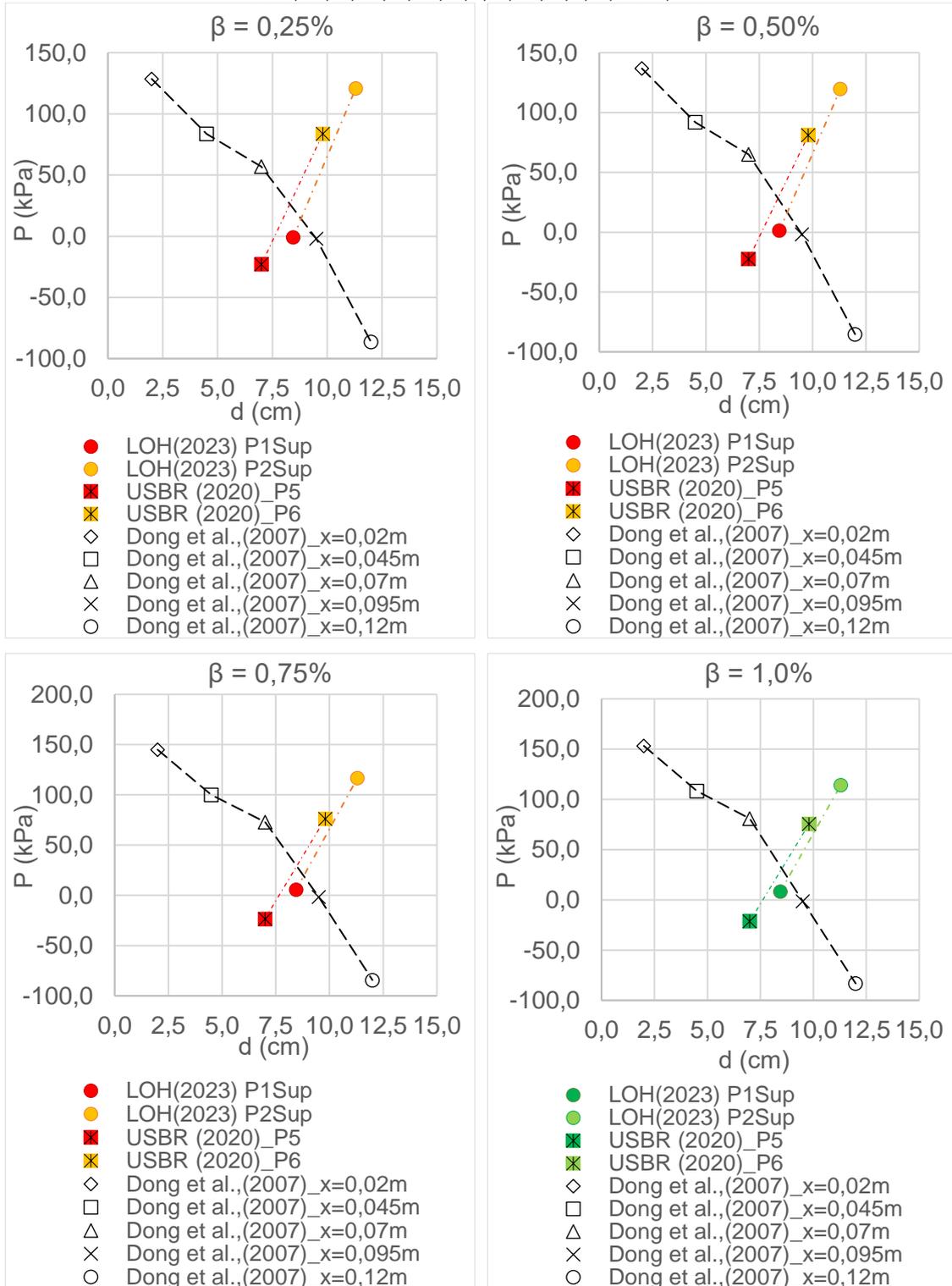


Figura B- 1:Comparativo entre as pressões médias x distâncias da seção de controle, para diferentes autores e dispositivos de cavitação.

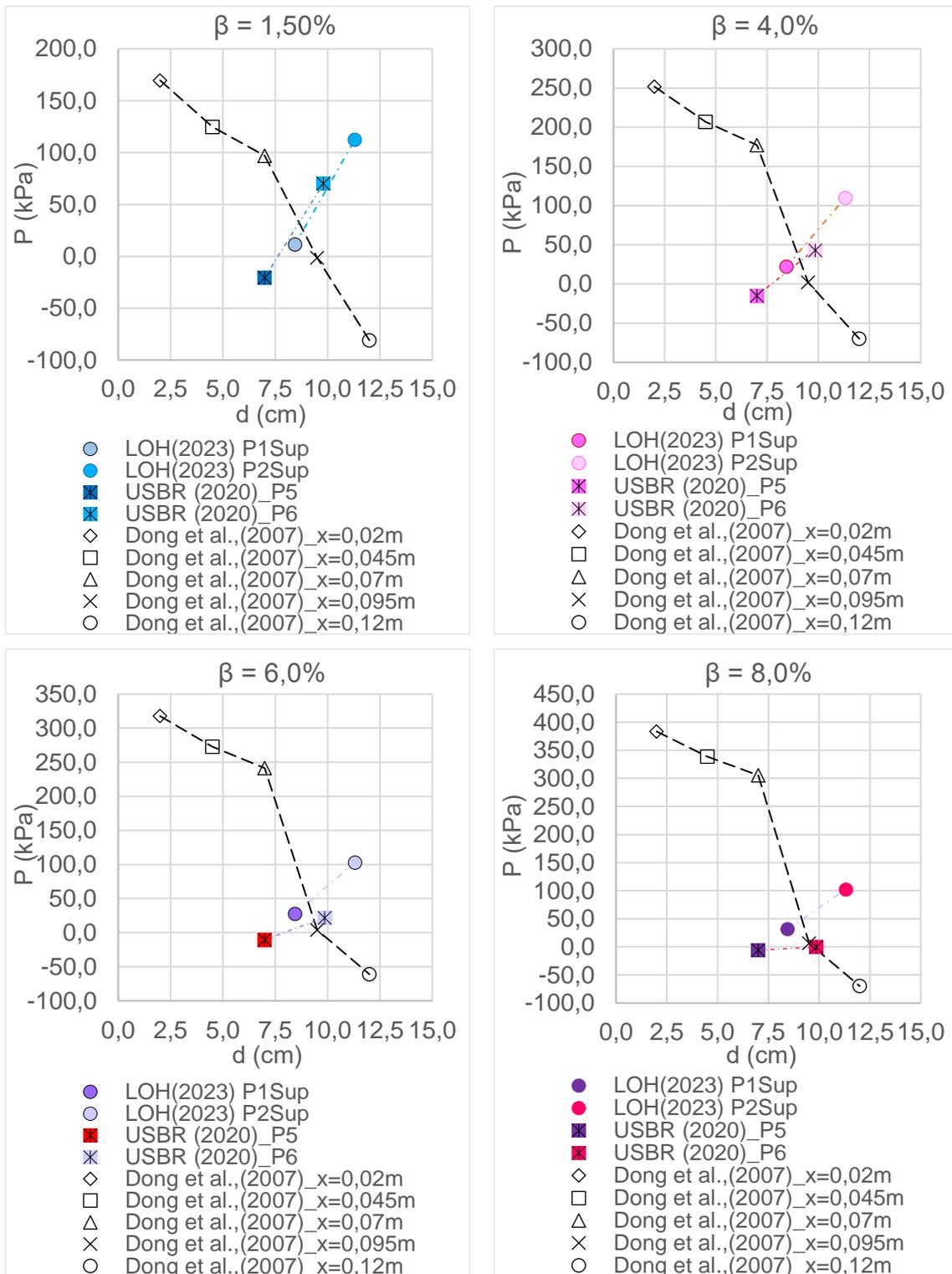


Figura B- 2:Comparativo entre as pressões médias x distâncias da seção de controle, para diferentes autores e dispositivos de cavitação.

APÊNDICE C - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,65 do LOH, para β de 0; 0,50; 1,0 e 2,0% de ar.

Figura C- 1: Bloco E3 – a/c = 0,65 – β = 0% - 60 min.

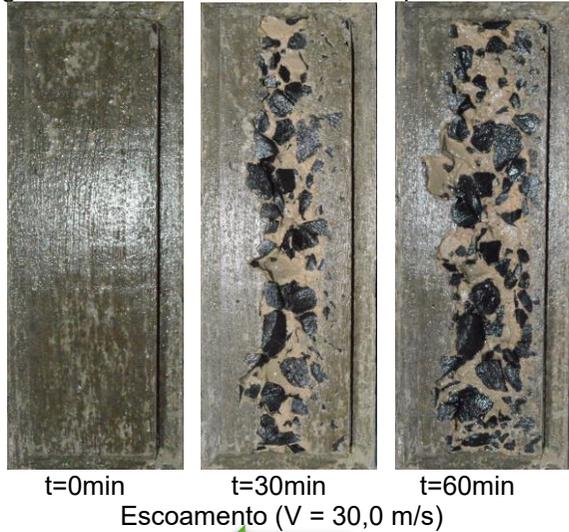


Figura C- 2: Bloco E7 – a/c = 0,65 – β = 0% - 60 min.

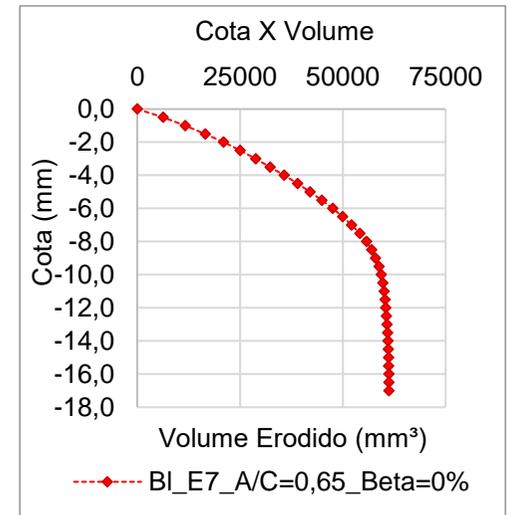
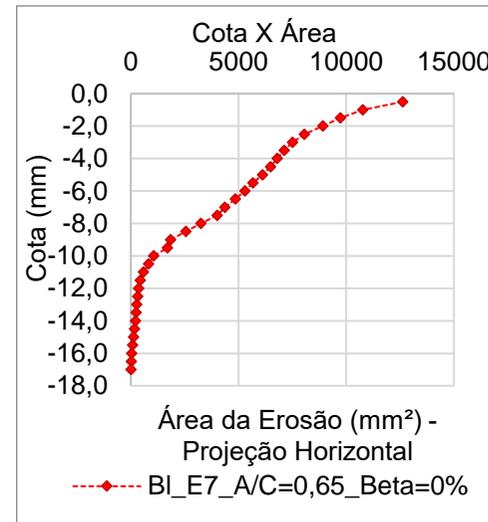
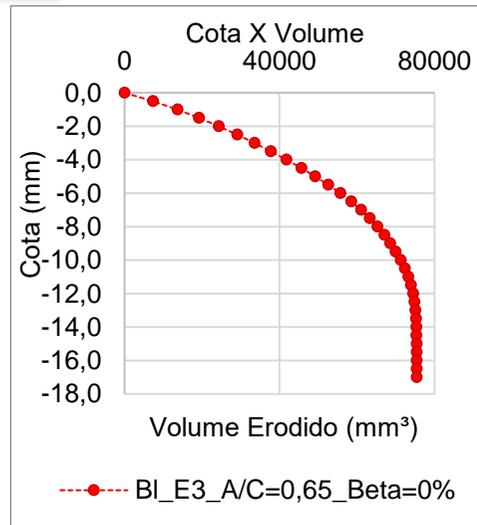
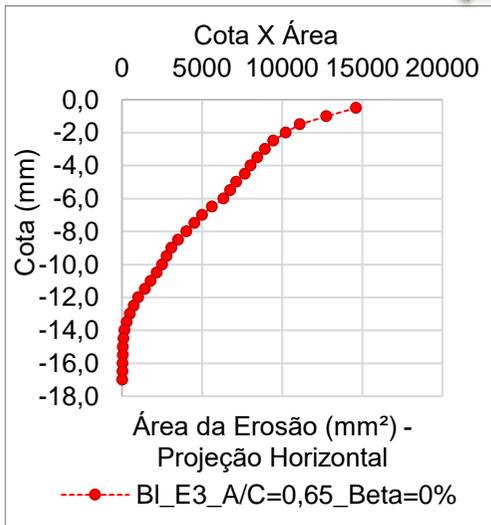
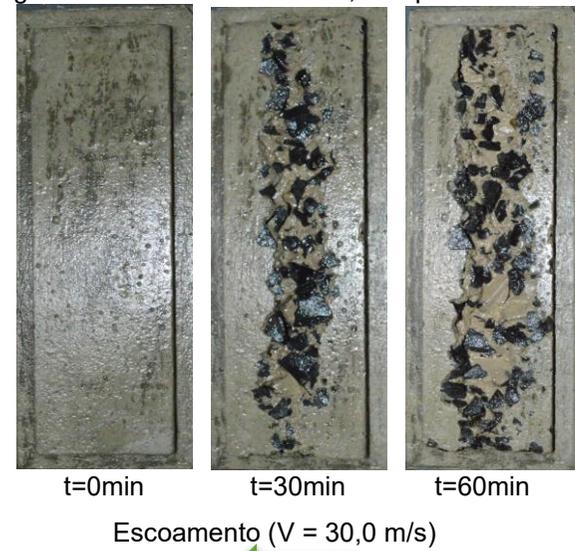
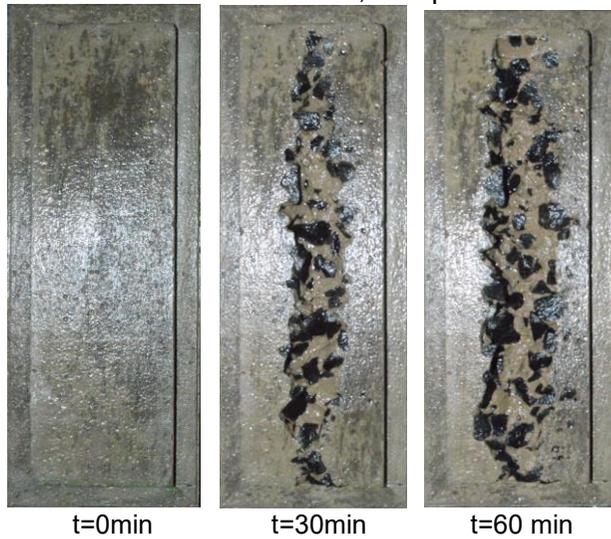


Figura C- 3: Bloco F8 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 0\%$ - 60 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

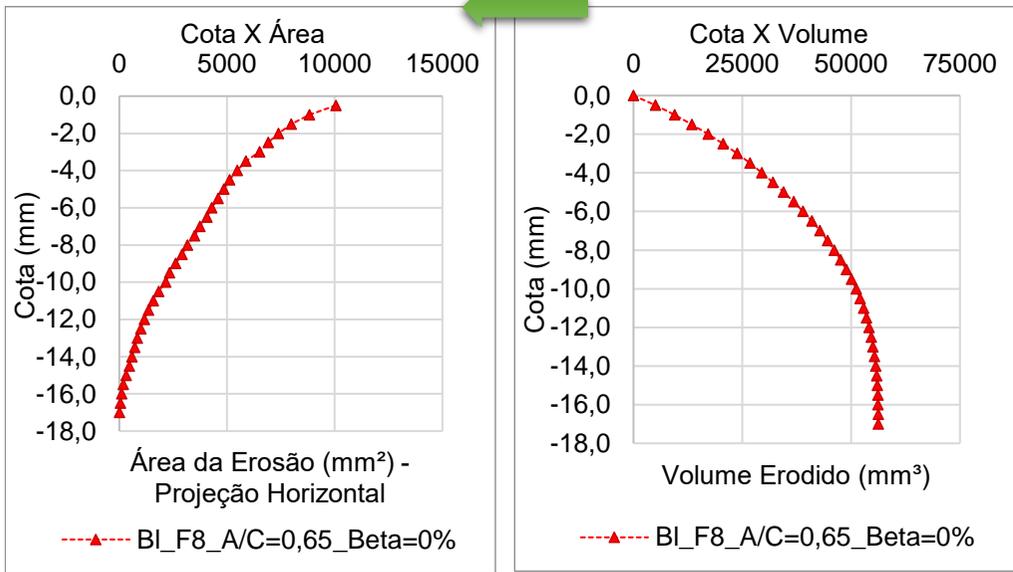
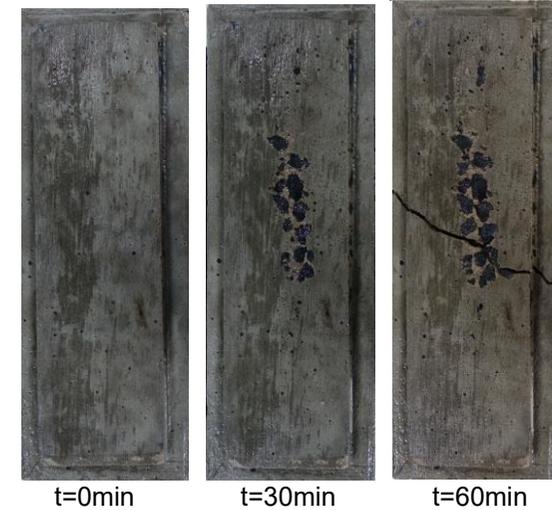


Figura C- 4: Bloco D10 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 0,50\%$ - 49 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

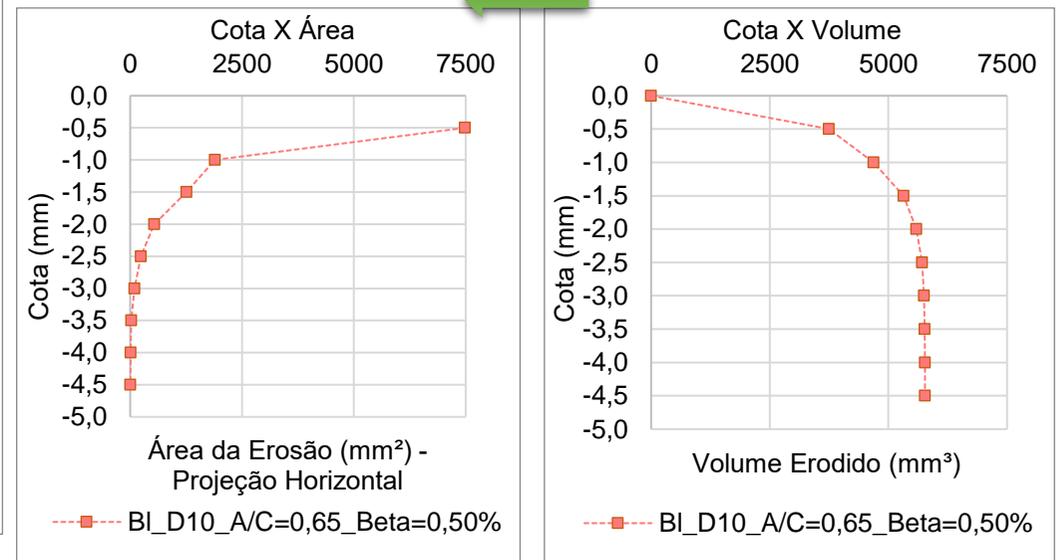
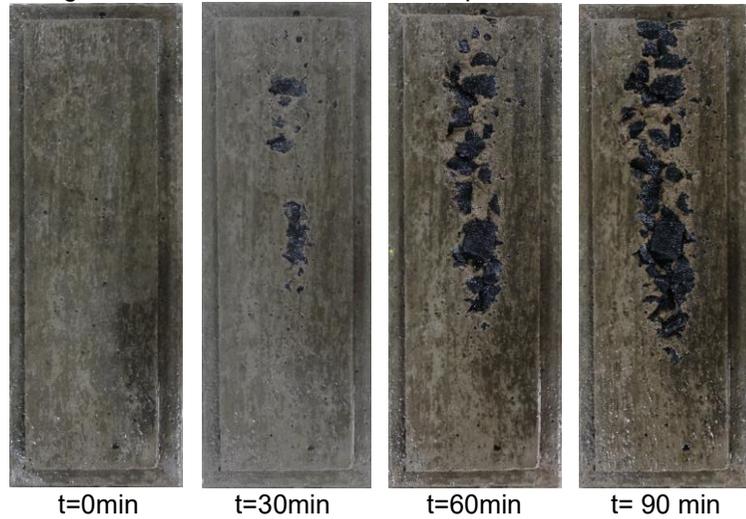


Figura C- 5: Bloco E2 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 0,50\%$ - 90 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

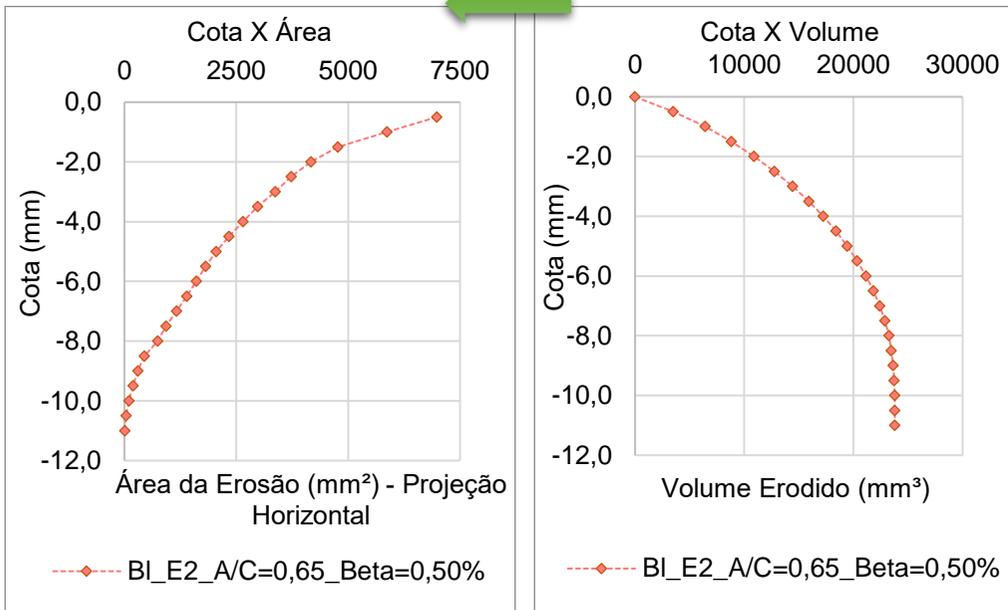
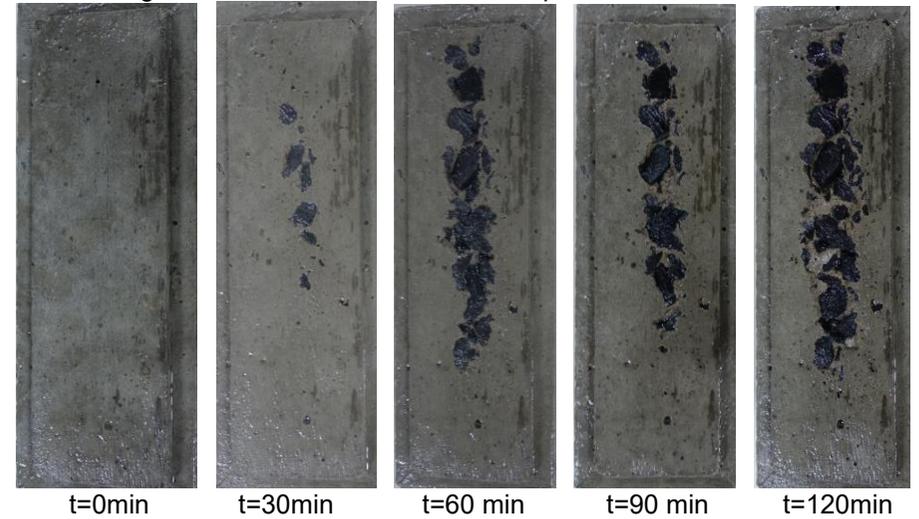


Figura C- 6: Bloco D2 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

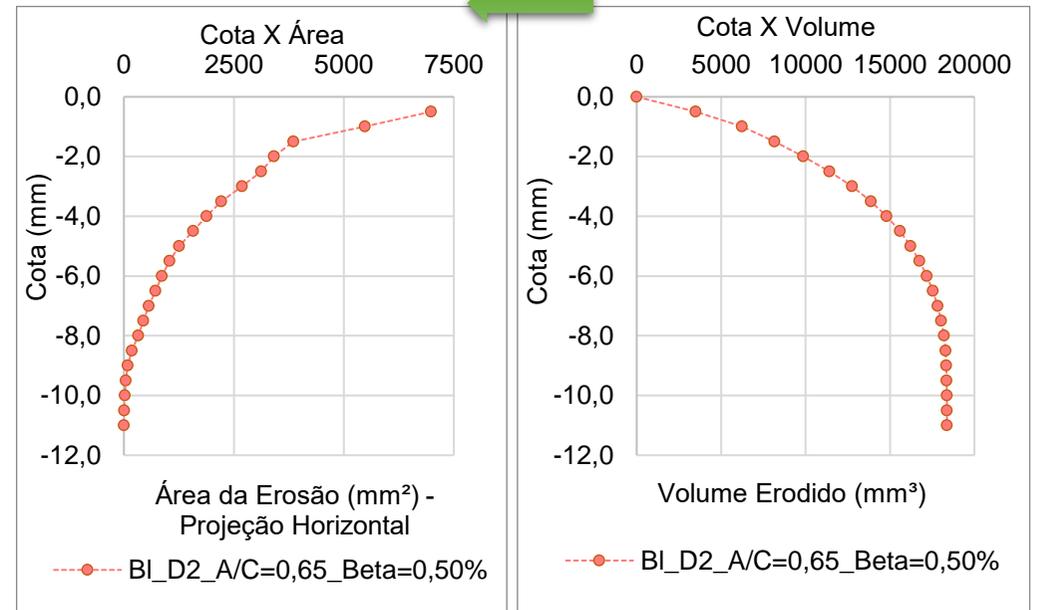
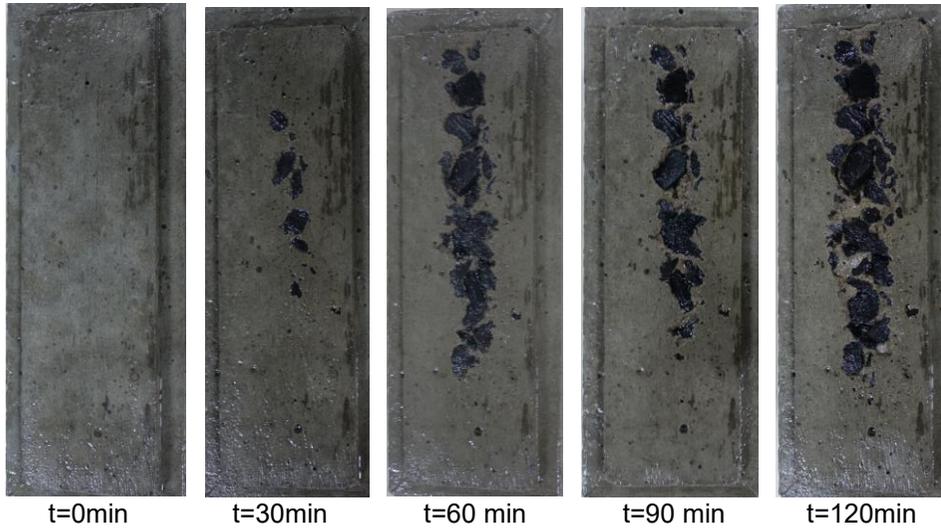


Figura C- 7: Bloco E4 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

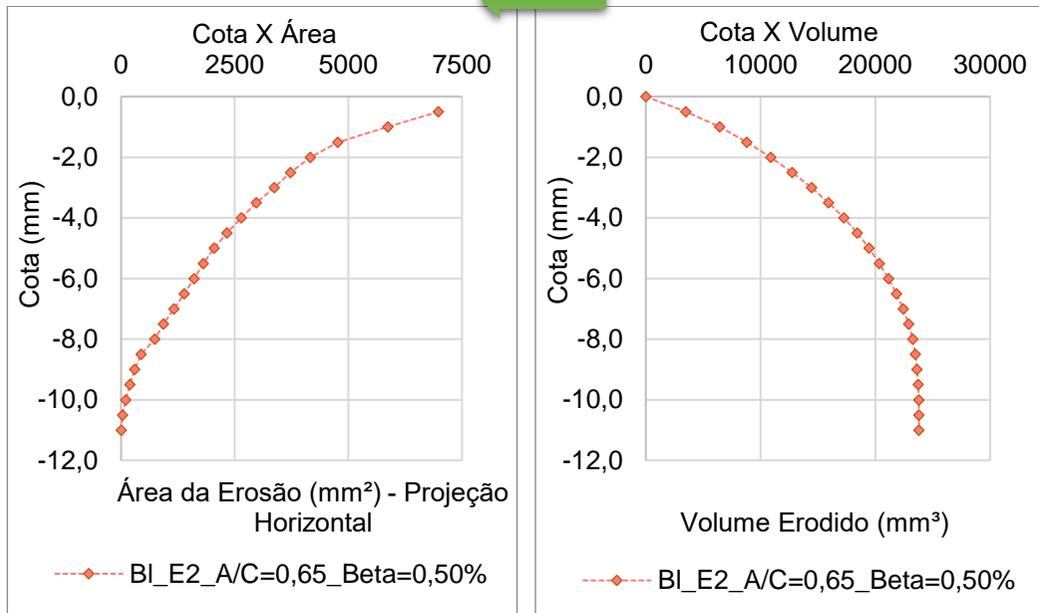
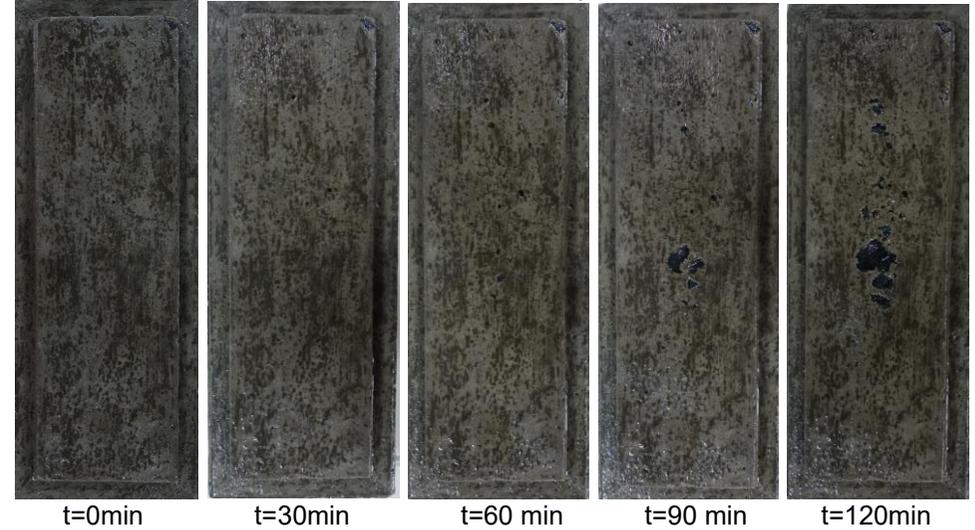


Figura C- 8: Bloco F7 – $a/c = 0,65$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

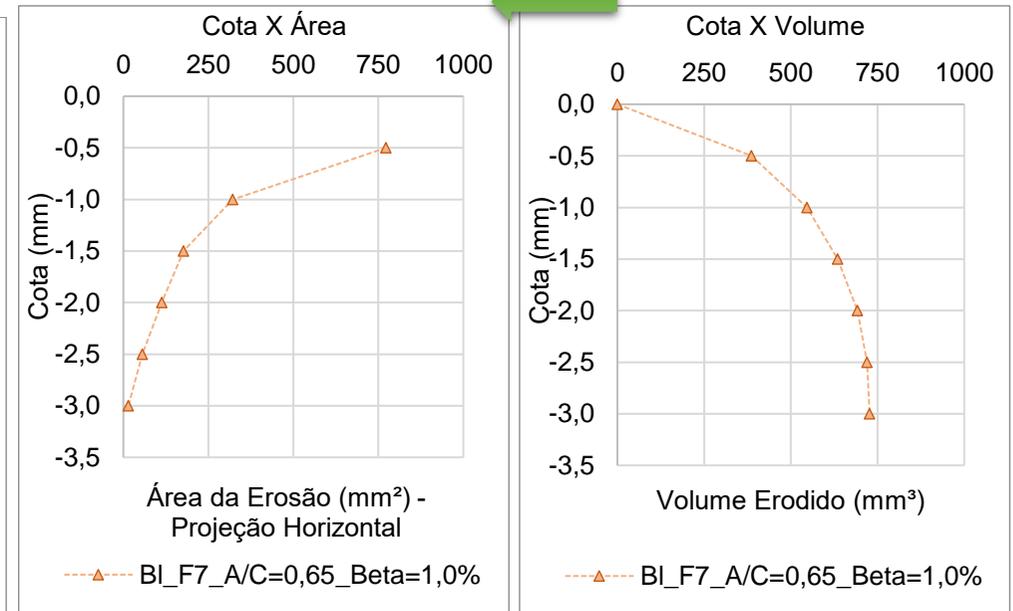


Figura C- 9: Bloco F11 – $a/c = 0,65 - \beta = 1,0\% - 120 \text{ min.}$

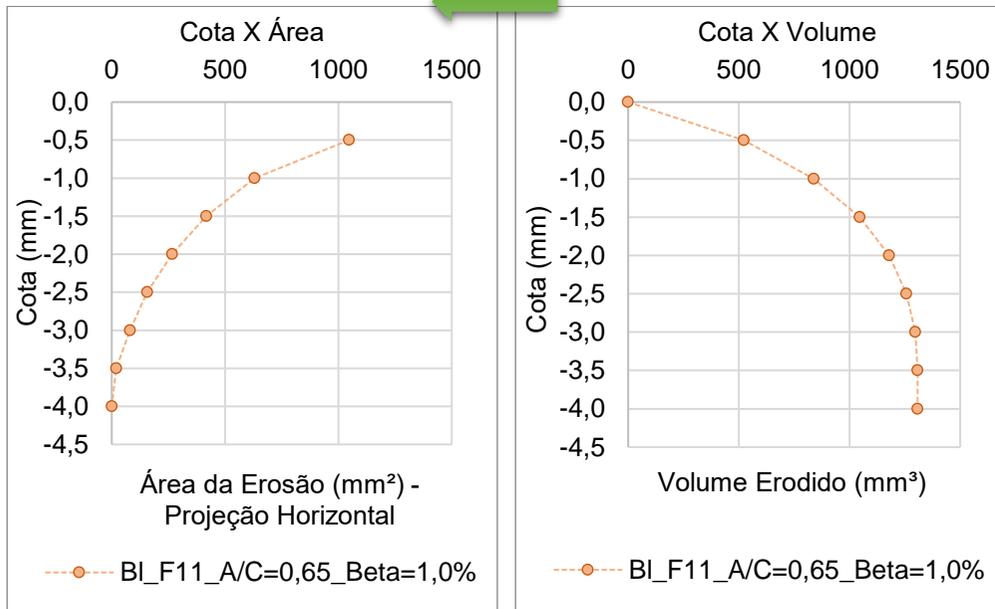
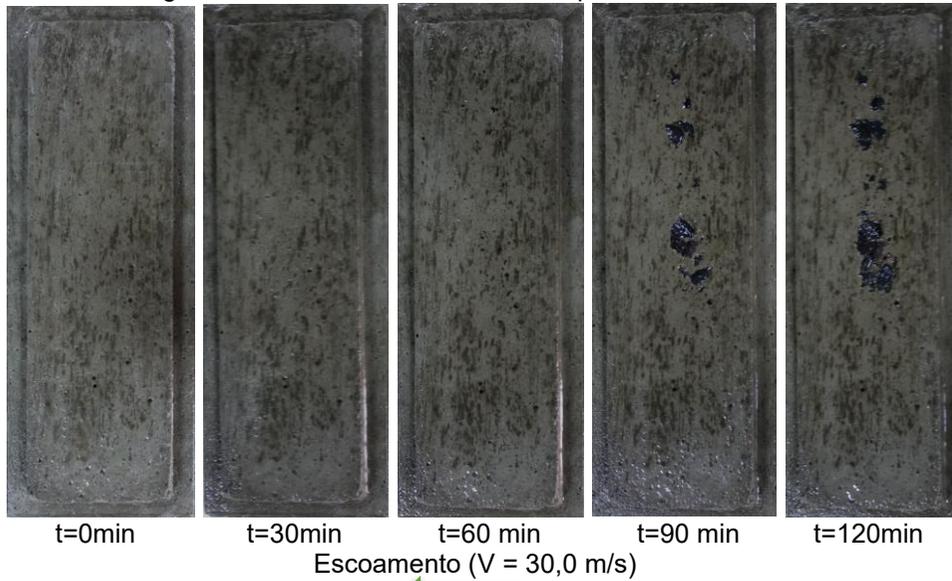


Figura C- 10: Bloco F12 – $a/c = 0,65 - \beta = 2,0\% - 120 \text{ min.}$



Obs.: Não apresentou danos na superfície do concreto após o ensaio.
Escoamento ($V = 30,0 \text{ m/s}$)

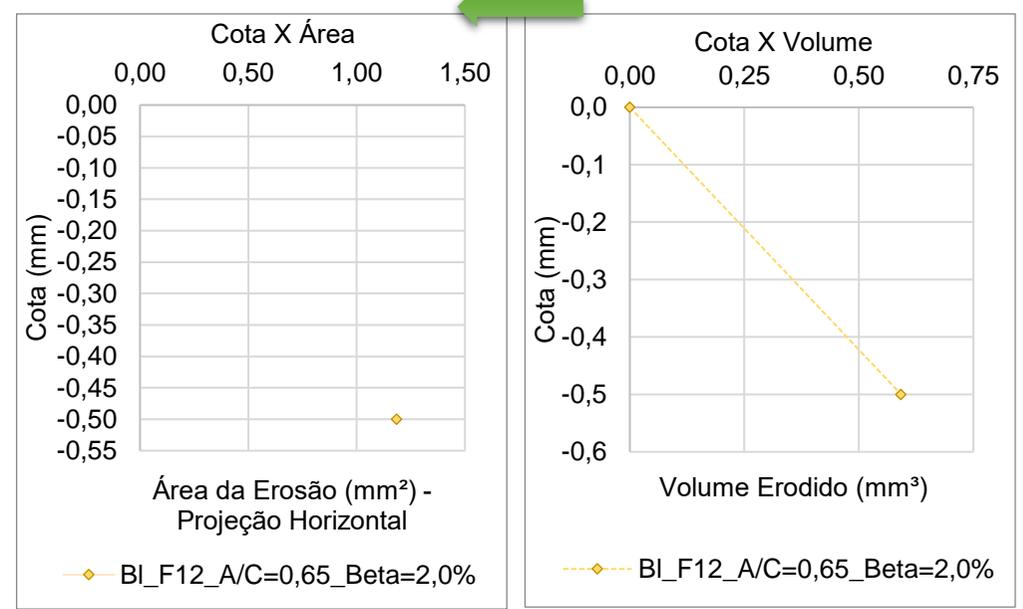


Figura C- 11: Bloco D1 – a/c = 0,65 – β = 2,0% - 30 min.



t=0min t=30min
Escoamento (V = 30,0 m/s)

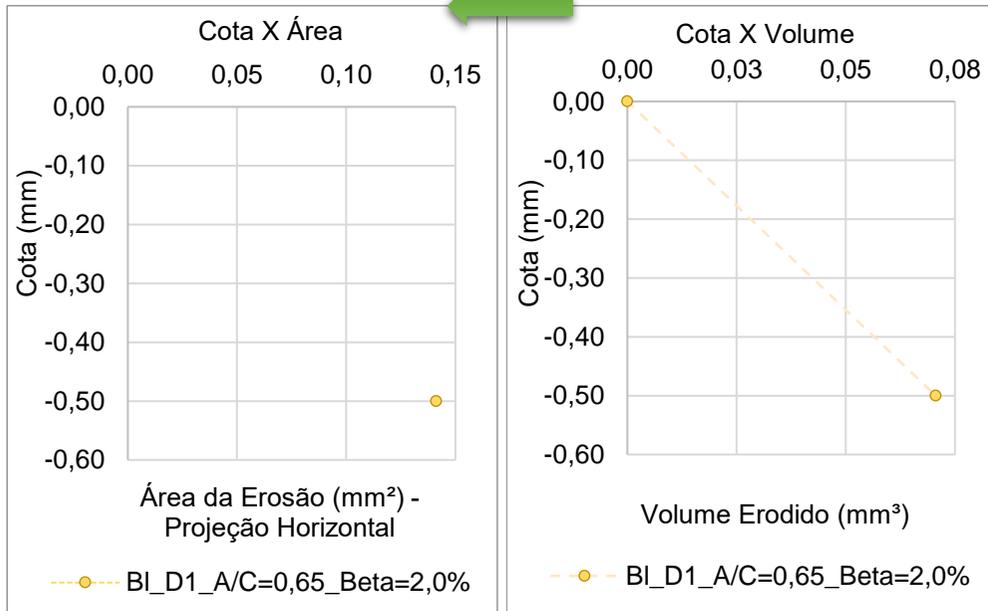
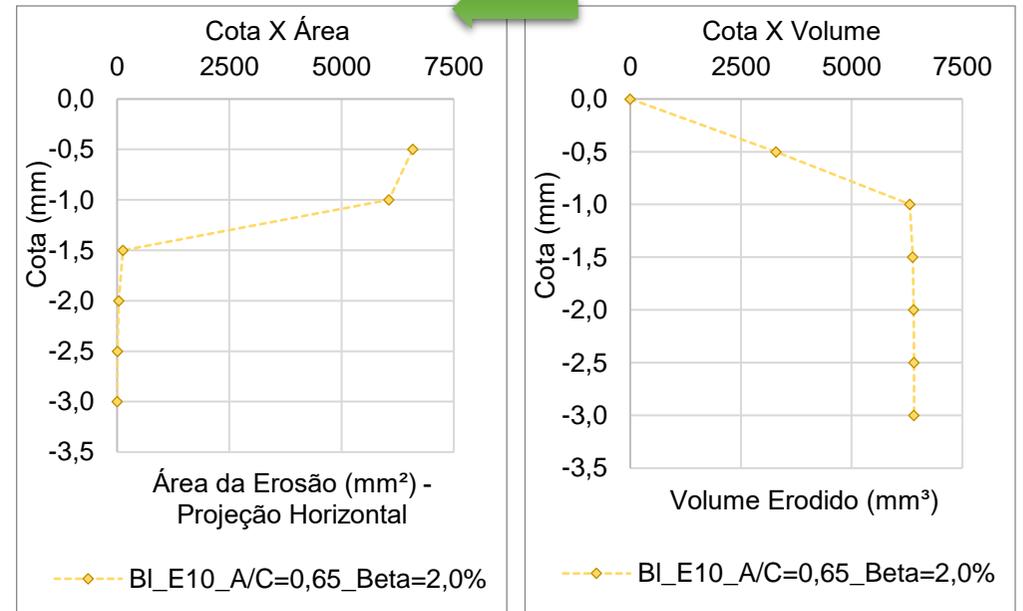


Figura C- 12: Bloco E10 – a/c = 0,65 – β = 2,0% - 60 min.



t=0min t=30min t=60 min
Escoamento (V = 30,0 m/s)



APÊNDICE D - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,50 do LOH, para β de 0; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% de ar.

Figura D- 1: Bloco B10 – a/c = 0,50 – β = 0% - 60min.

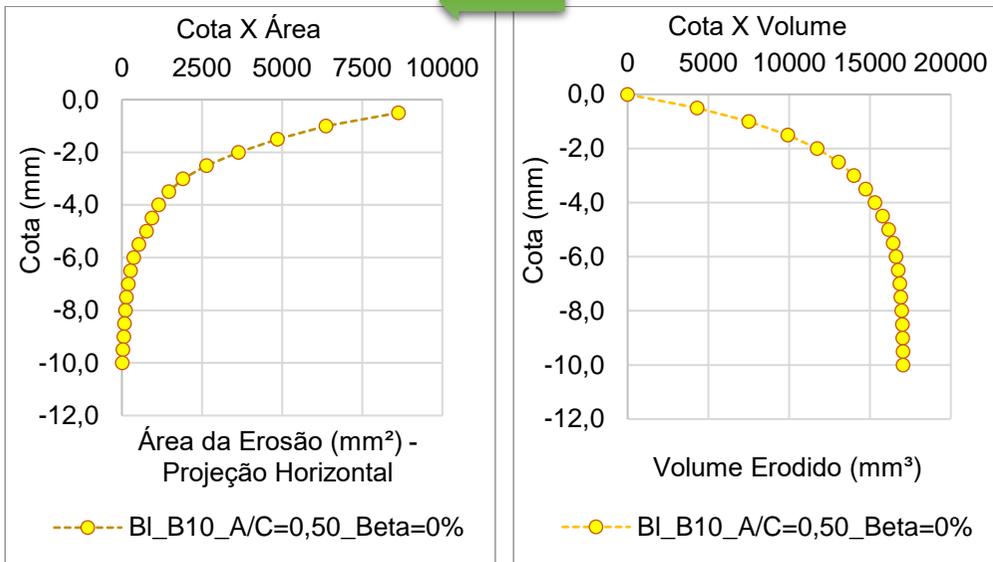
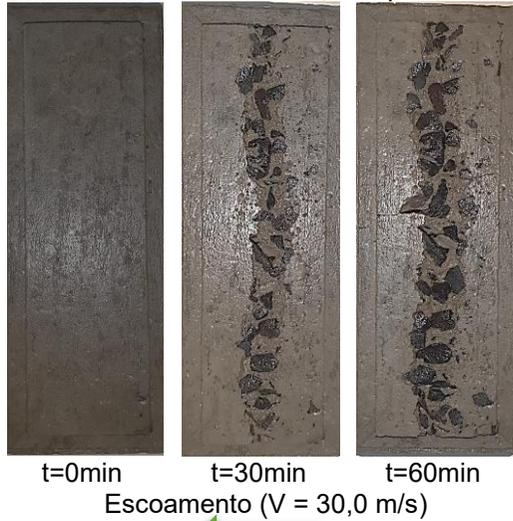


Figura D- 2: Bloco A6 – a/c = 0,50 – β = 0% - 60 min.



Escoamento (V = 30,0 m/s)

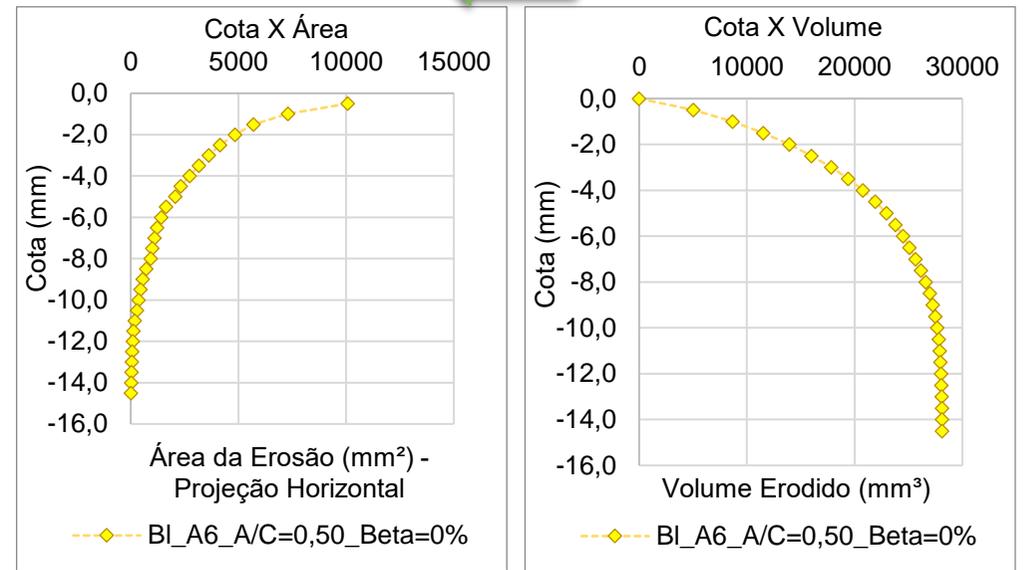


Figura D- 3: Bloco B1 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 0\%$ - 60 min.

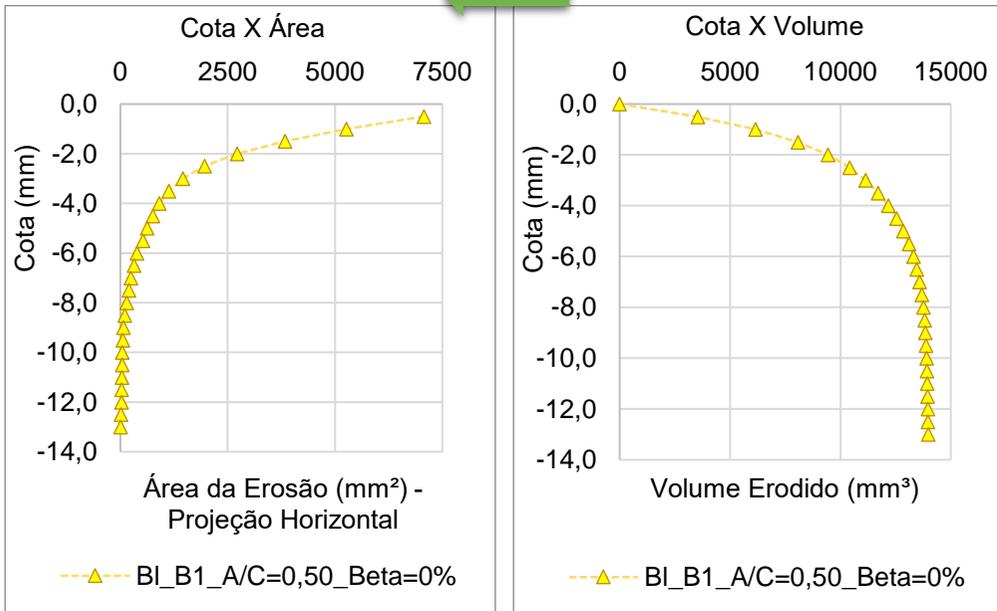
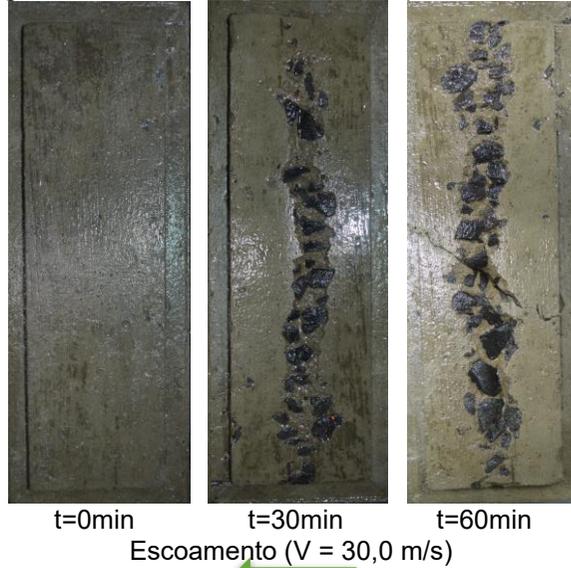


Figura D- 4: Bloco C12 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.

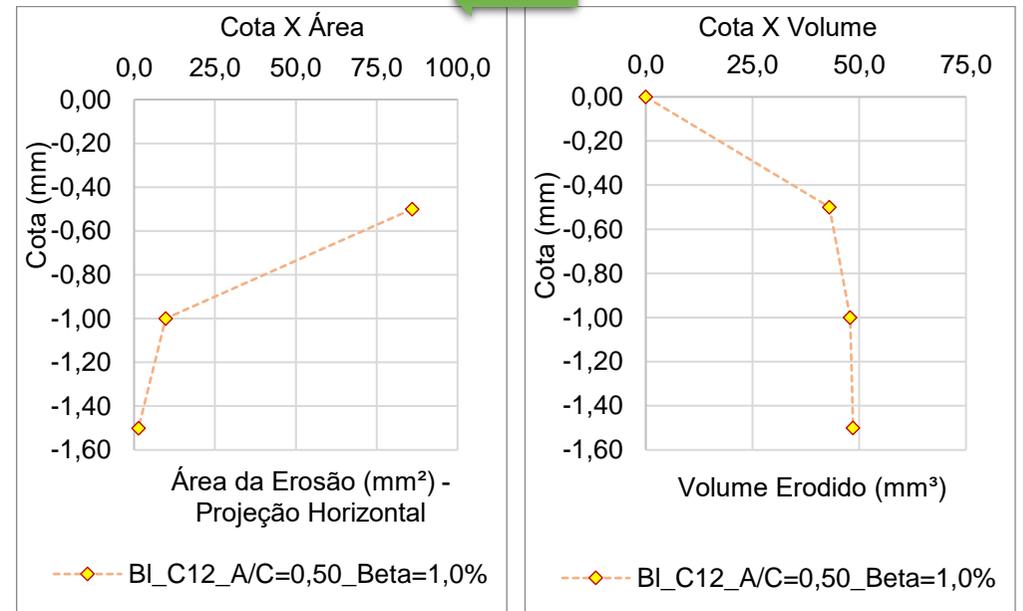
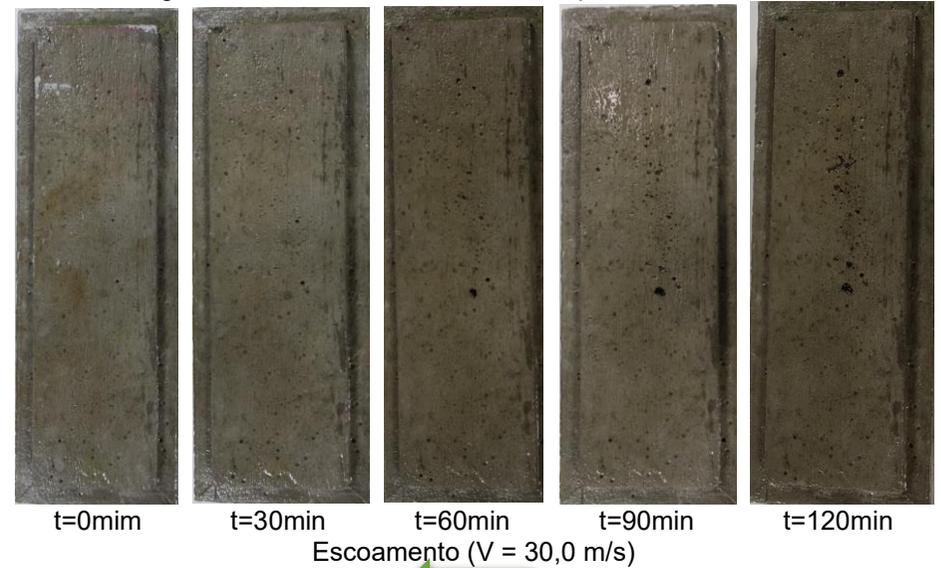


Figura D- 5: Bloco C8 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.

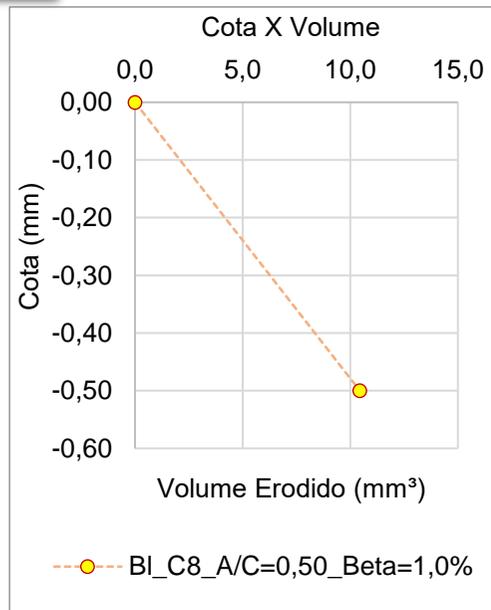
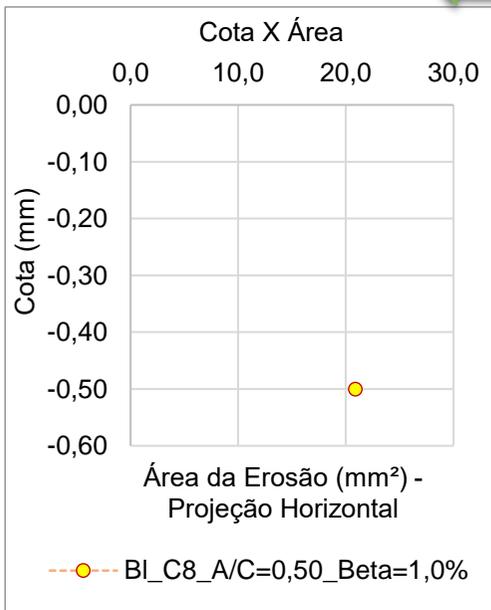
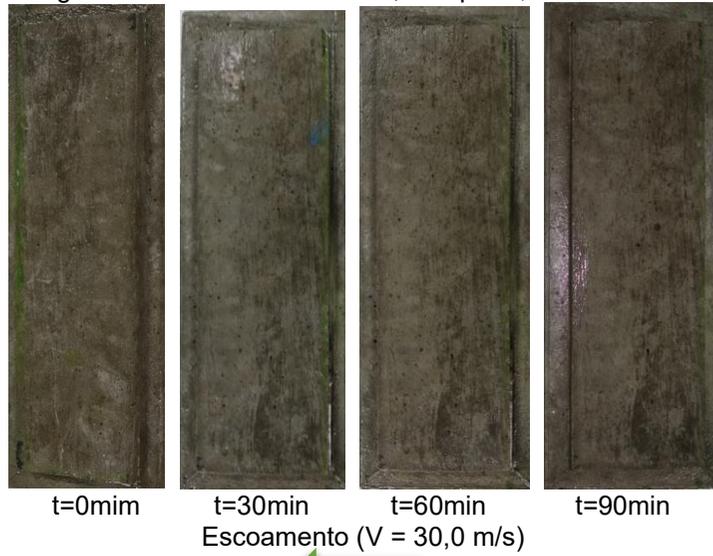


Figura D- 6: Bloco C5 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 2,0\%$ - 120 min.

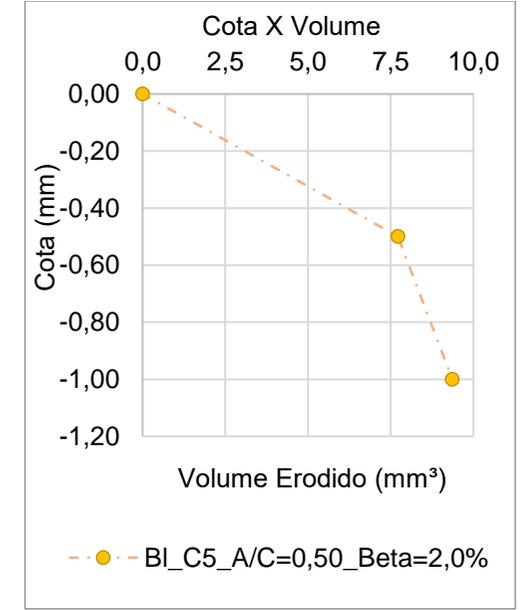
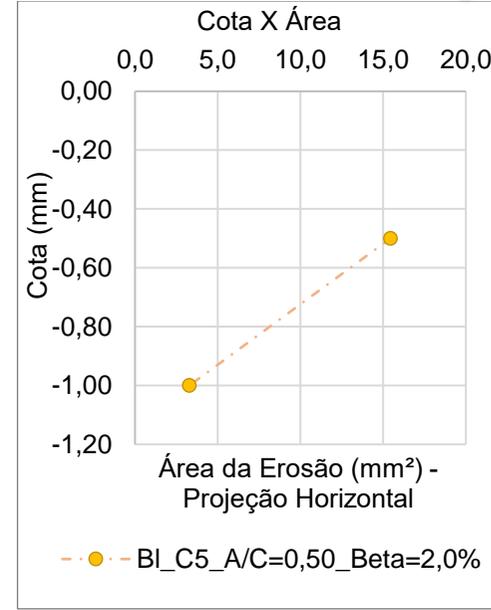
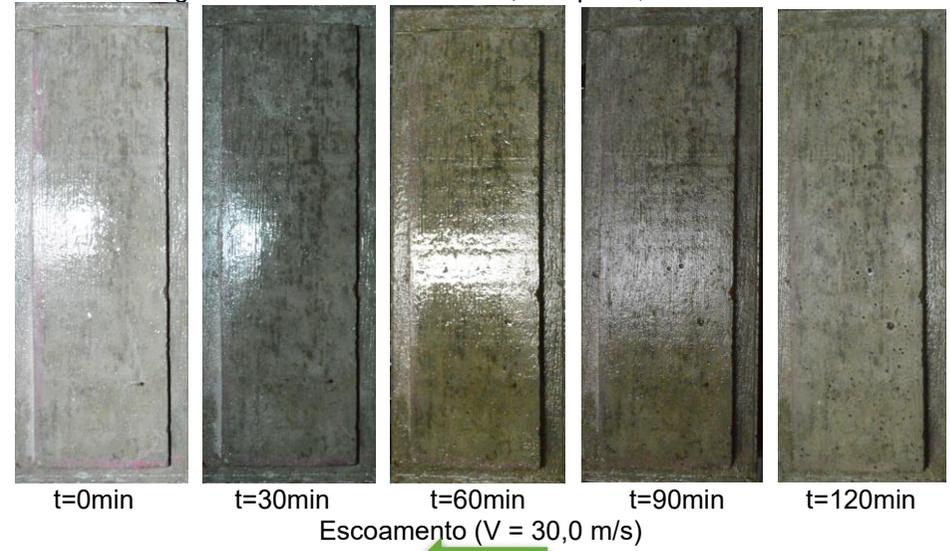


Figura D- 7: Bloco C13 – a/c = 0,50 – β = 2,0% - 120 min

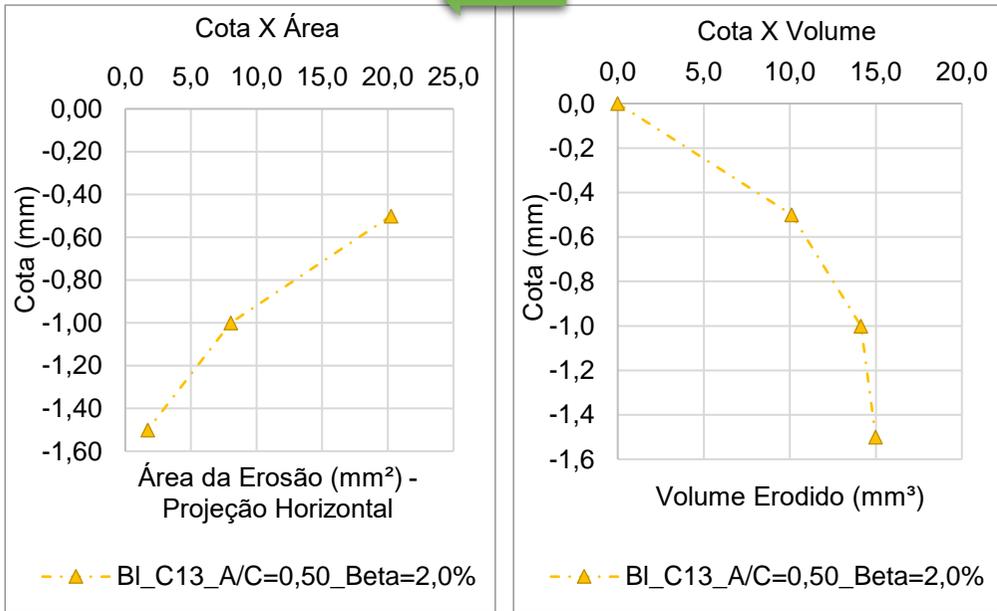
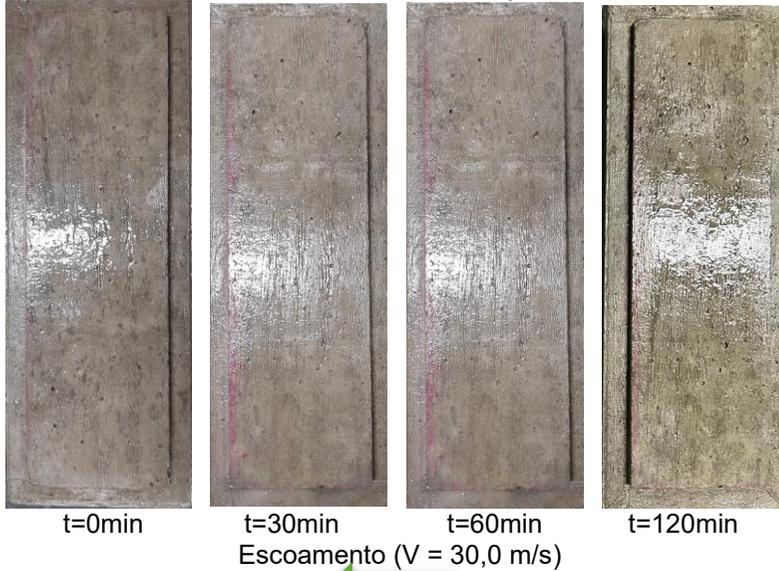


Figura D- 8: Bloco C11 – a/c = 0,50 – β = 2,0% - 120 min.

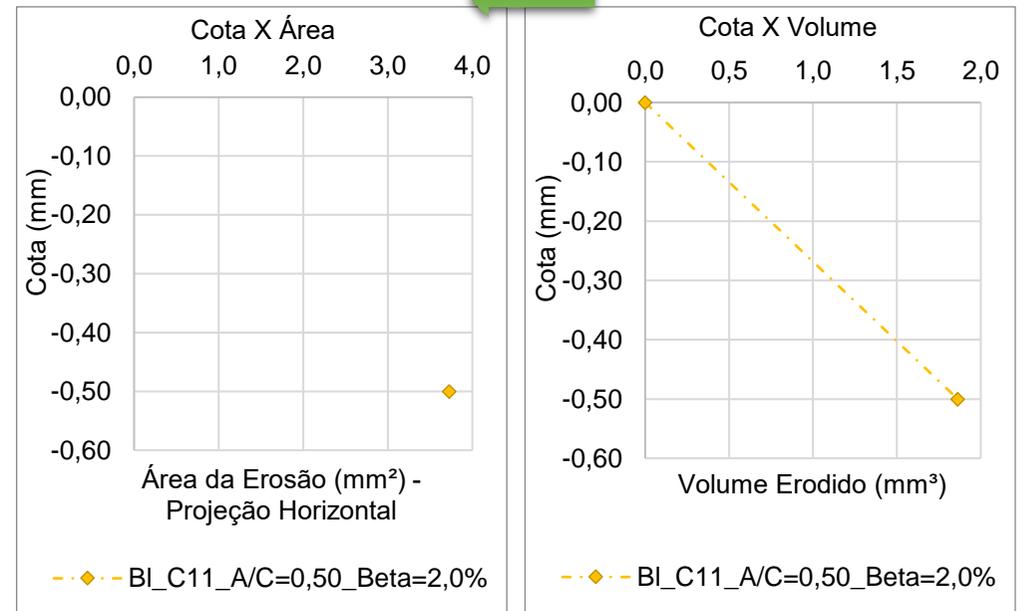
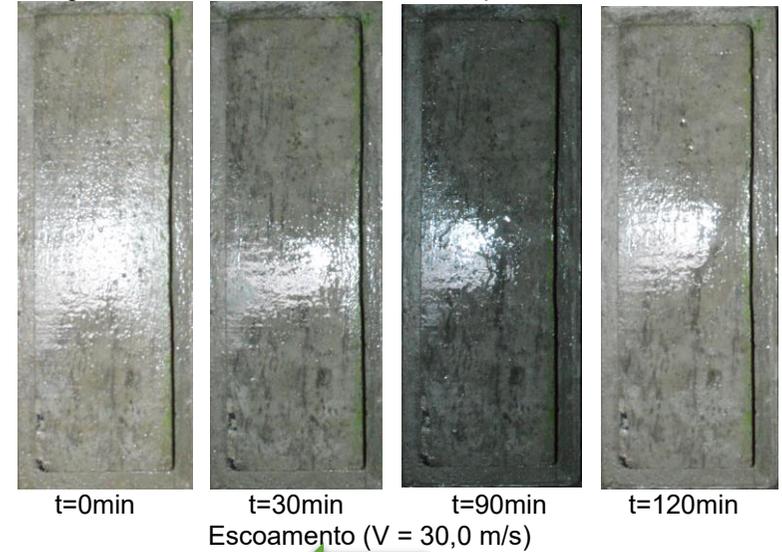


Figura D- 9: Bloco C6 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 6,0\%$ - 120 min

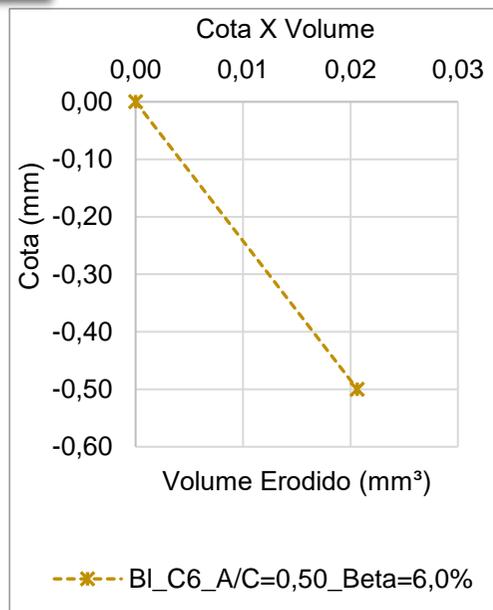
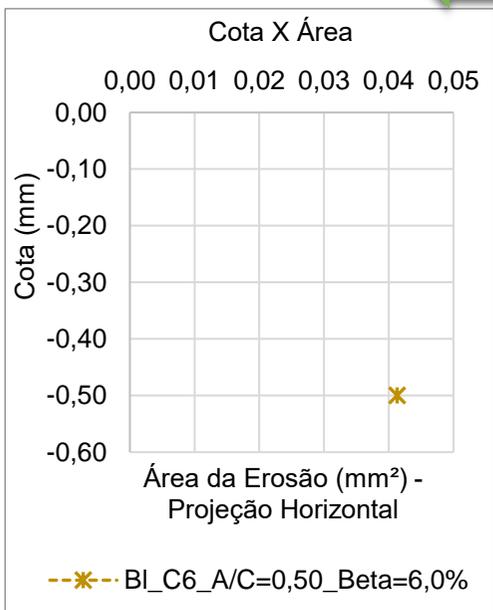
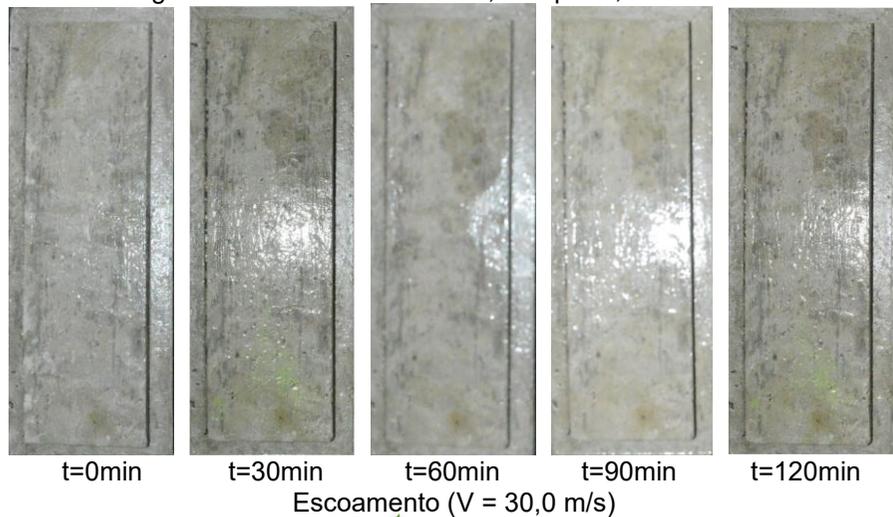


Figura D- 10: Bloco B12 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 6,0\%$ - 60 min.

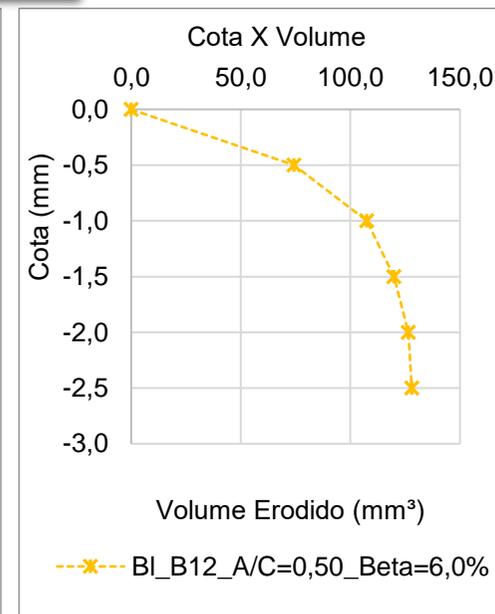
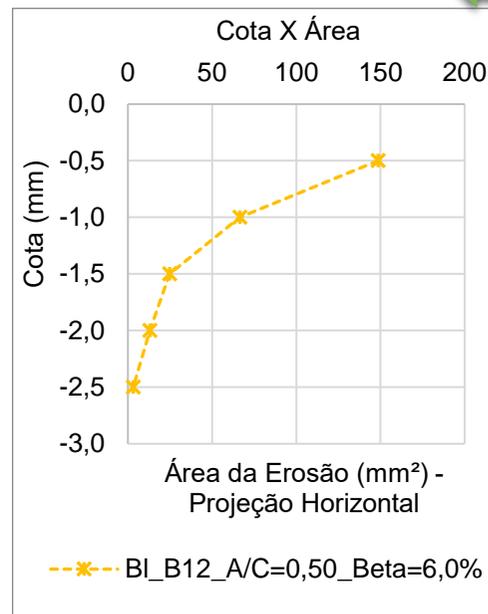
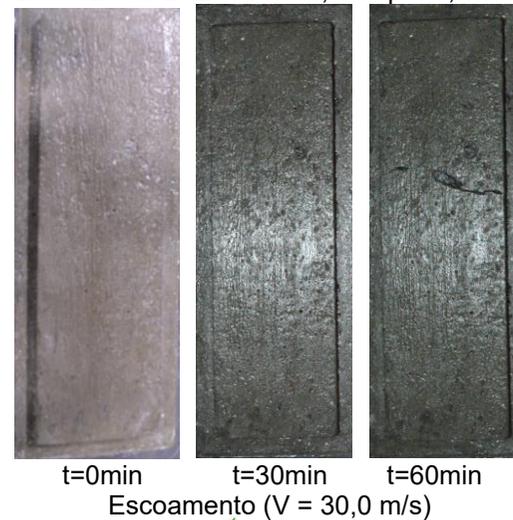


Figura D- 11: Bloco B11 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 6,0\%$ - 30 min.



t=120min

Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

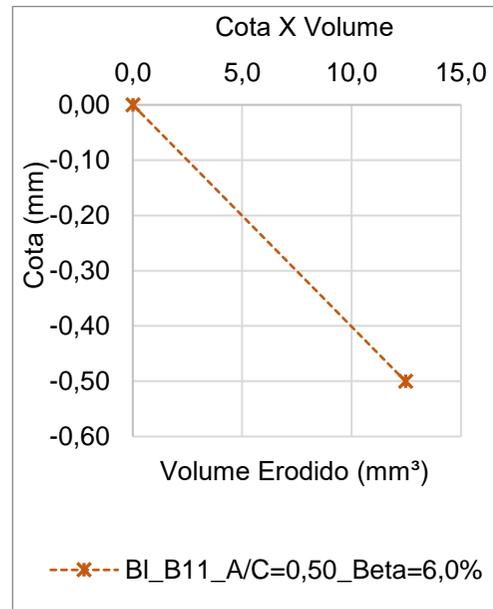
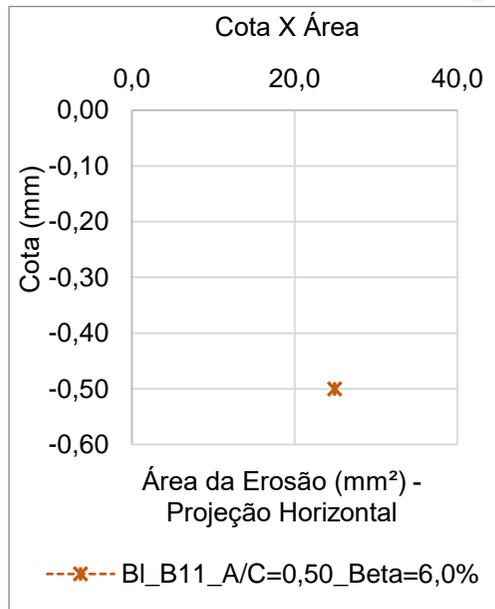


Figura D- 12: Bloco B2 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 8,0\%$ - 120 min.



t=0min

t=30min

t=60min

t=90min

t=120min

Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

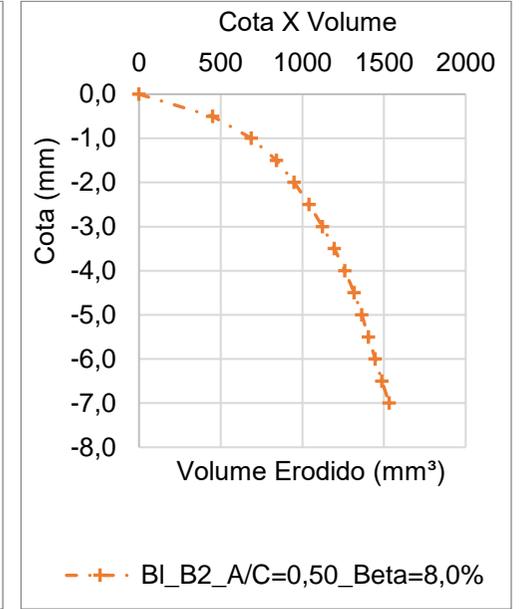
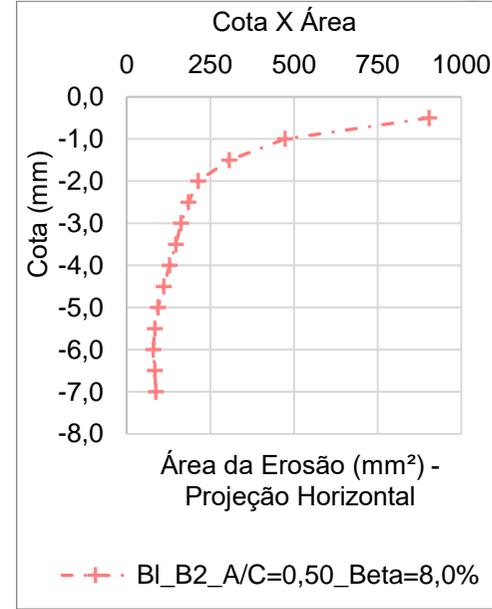
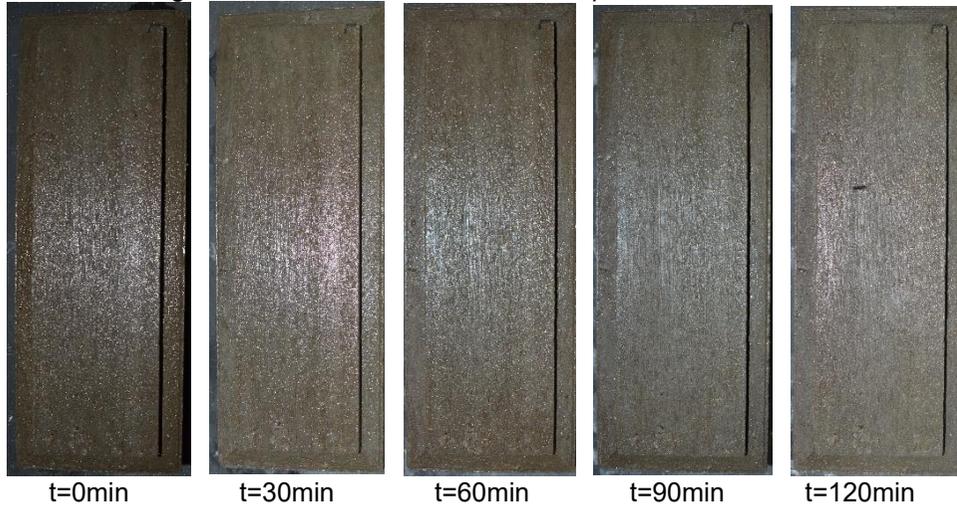


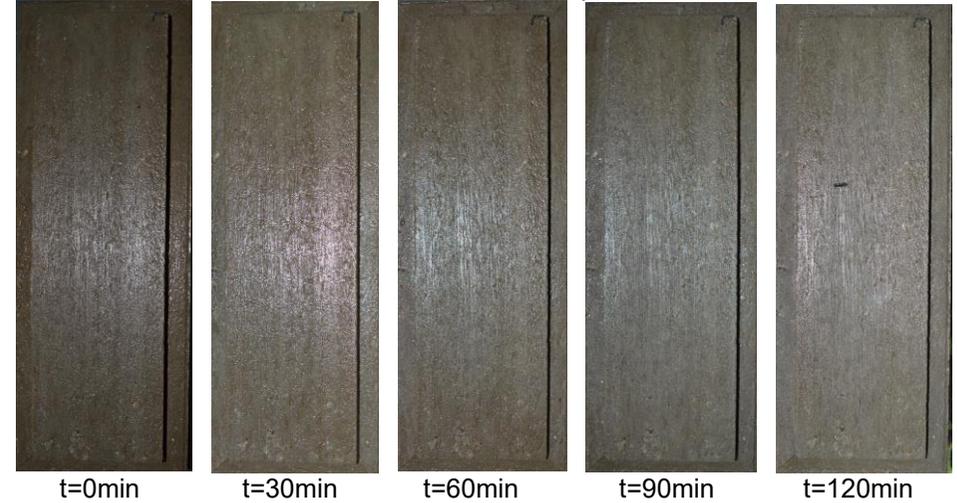
Figura D- 13: Bloco I12 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 8,0\%$ - 120 min.



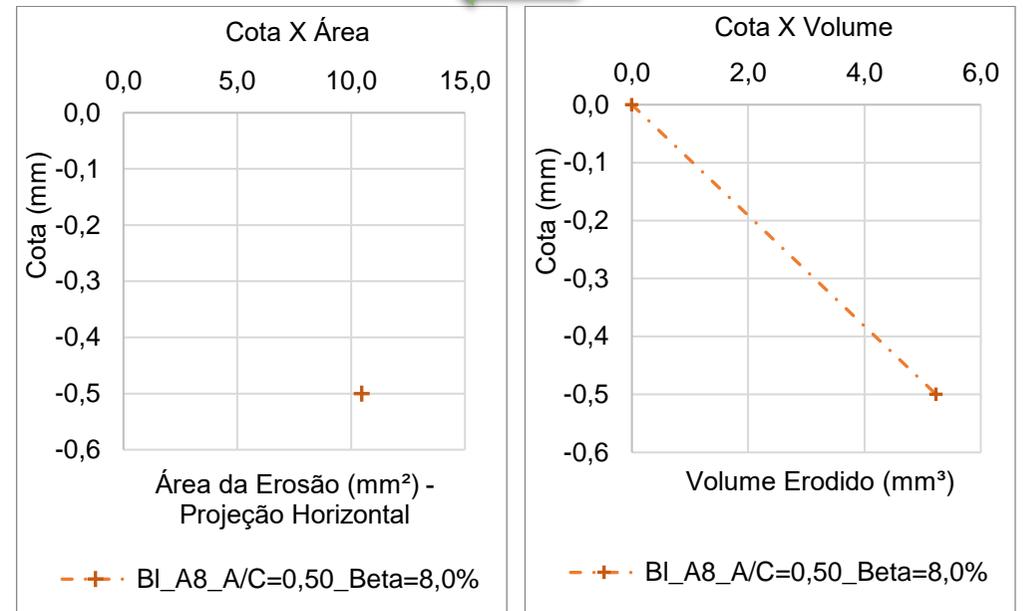
Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

Obs.: Sem danos na superfície do concreto durante a realização do ensaio.

Figura D- 14: Bloco A8 – $a/c = 0,50$ – $\beta = 8,0\%$ - 120 min



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)



APÊNDICE E - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,45 do LOH, para β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,50 e 2,0% de ar.

Figura E- 1: Bloco K11 – a/c = 0,45 – β = 0% - 60 min.

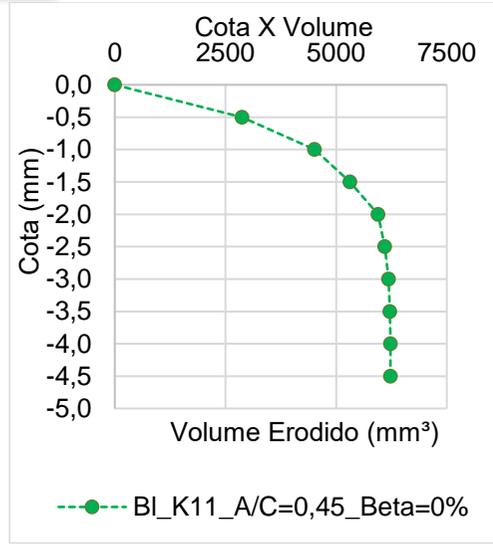
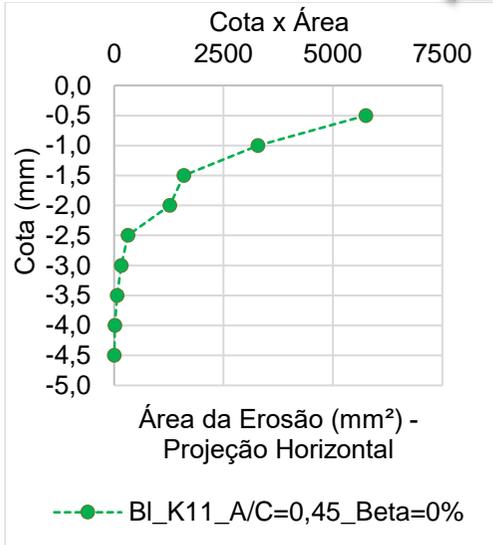
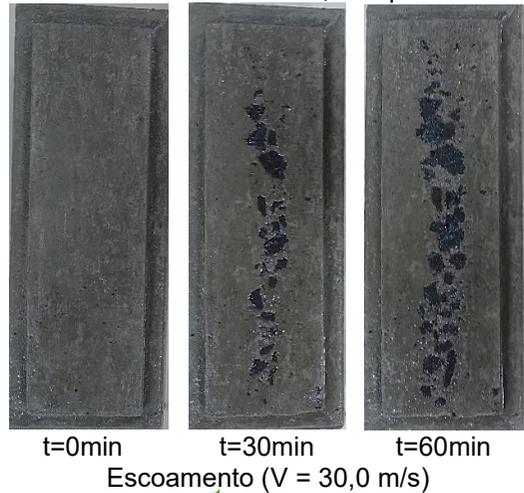


Figura E- 2: Bloco L1 – a/c = 0,45 – β = 0% - 120 min.

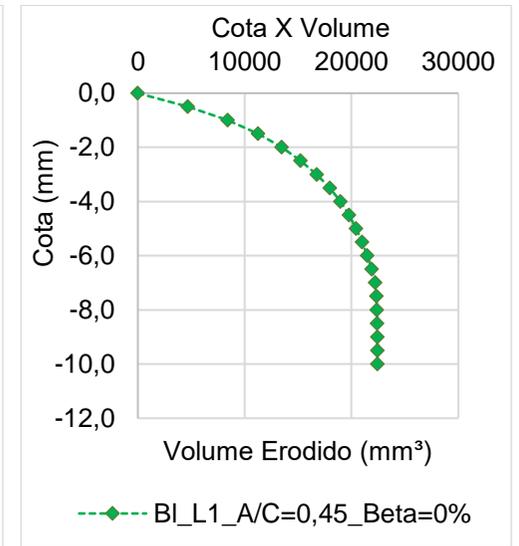
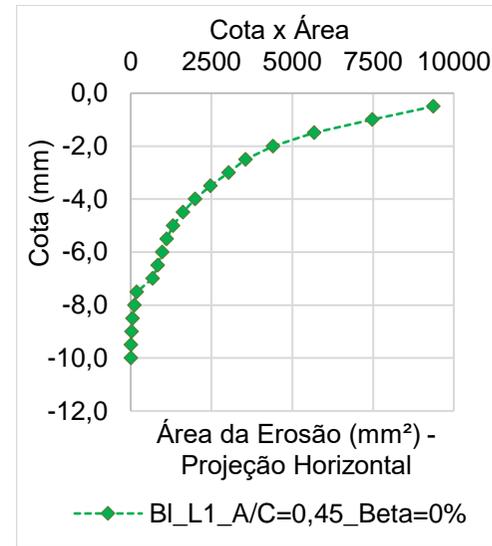
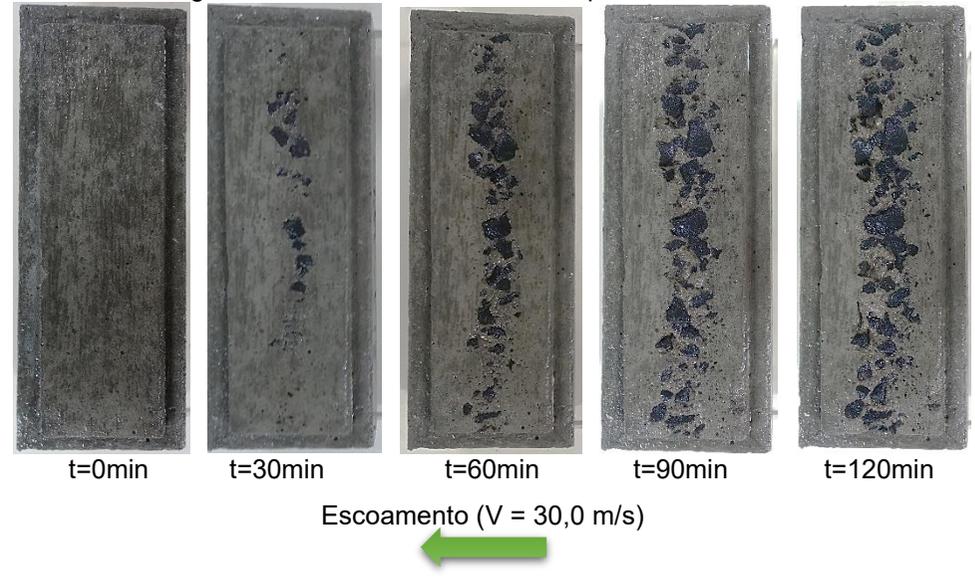


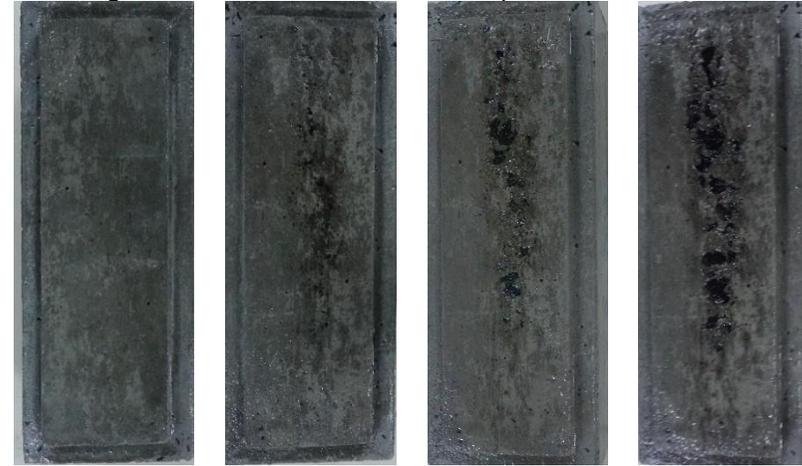
Figura E- 3: Bloco L5 - $a/c = 0,45\%$ - $\beta = 0\%$ - 60 min.



t=0min t=30min t=60min
Escoamento ($V = 30,0$ m/s)



Figura E- 4: Bloco K8 - $a/c = 0,45\%$ - $\beta = 0,25\%$ - 90 min.



t=0 min t=30 min t=60min t=90min
Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

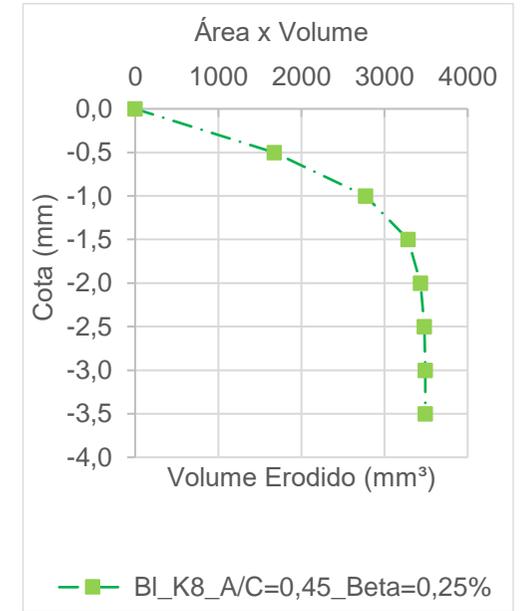
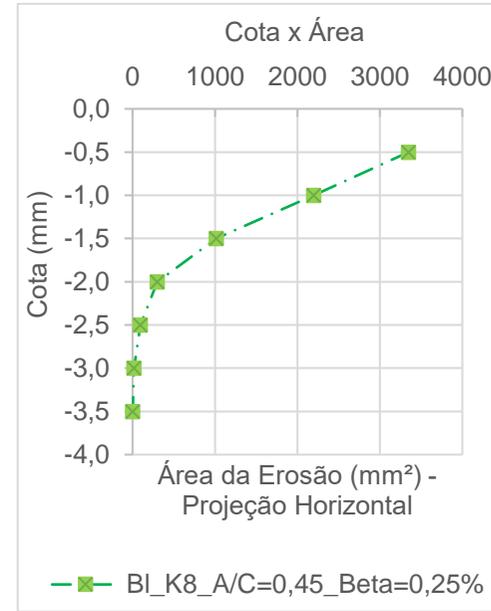
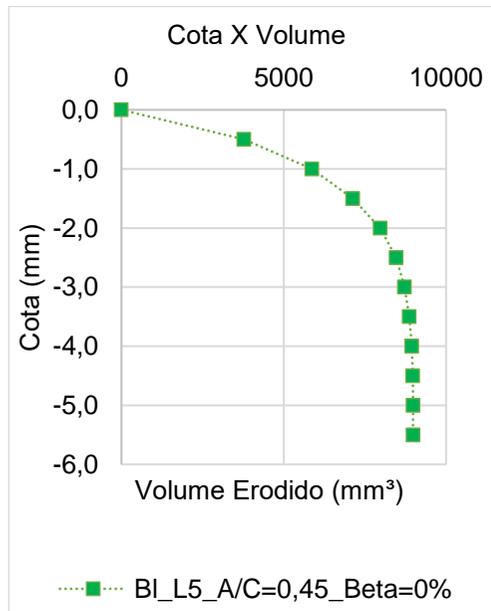
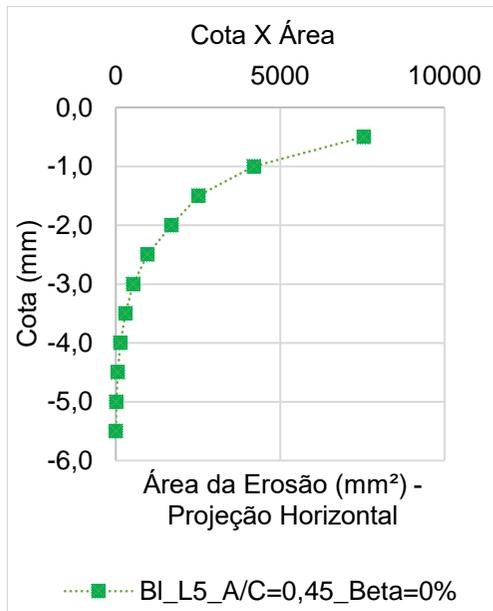
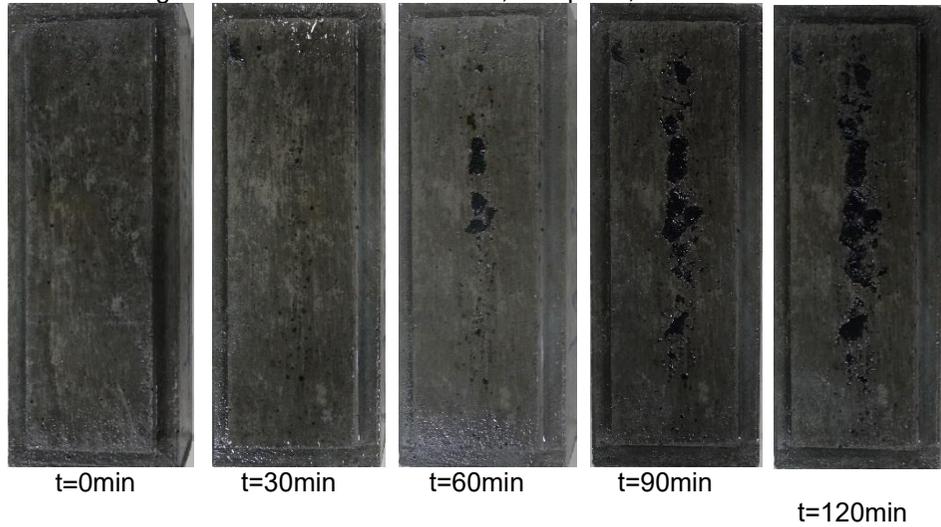


Figura E- 5: Bloco L13 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,25\%$ - 120 min



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

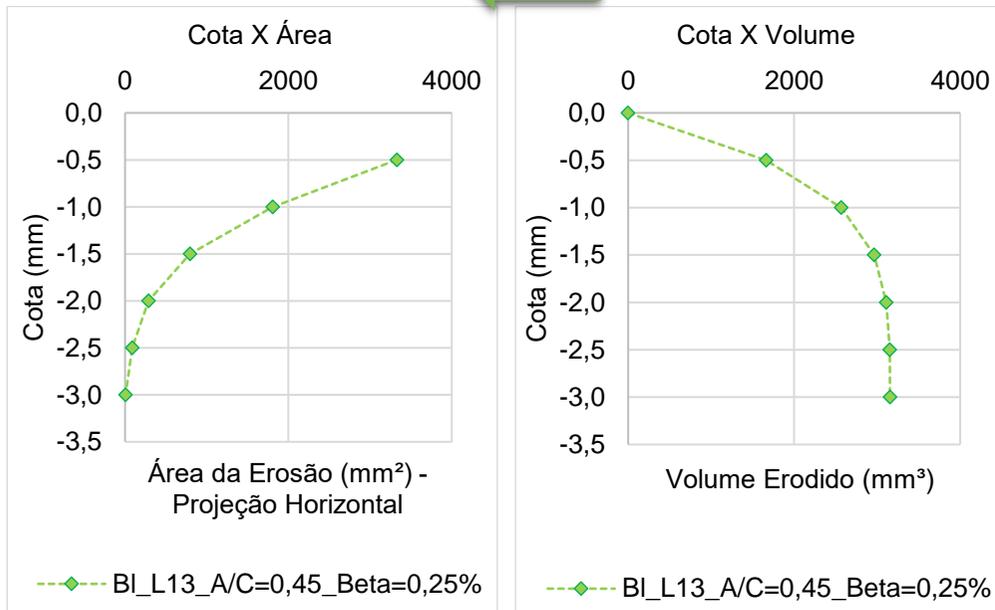
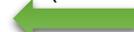
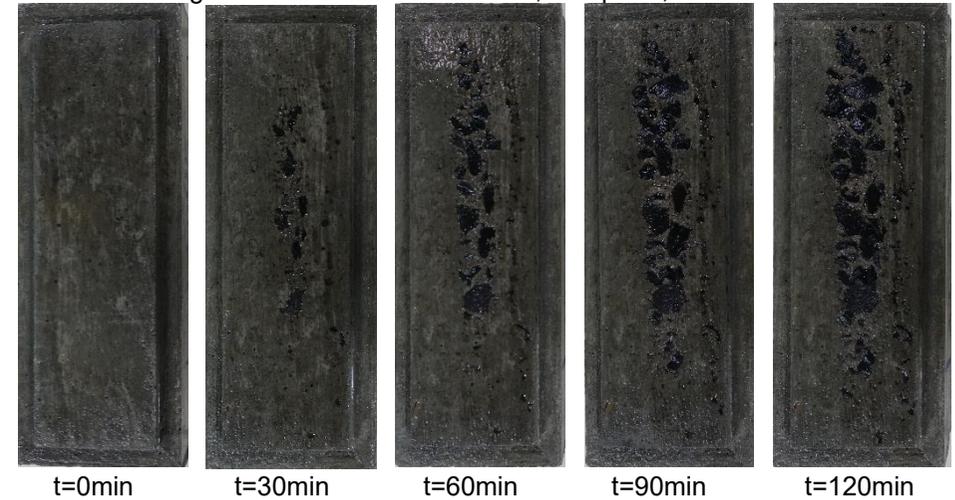


Figura E- 6: Bloco L12 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,25\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

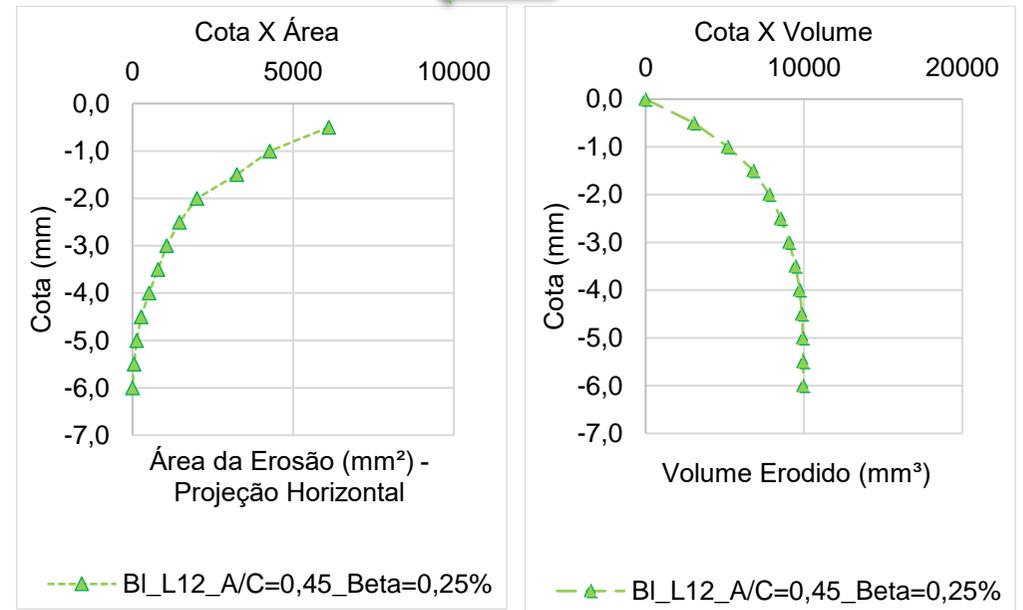
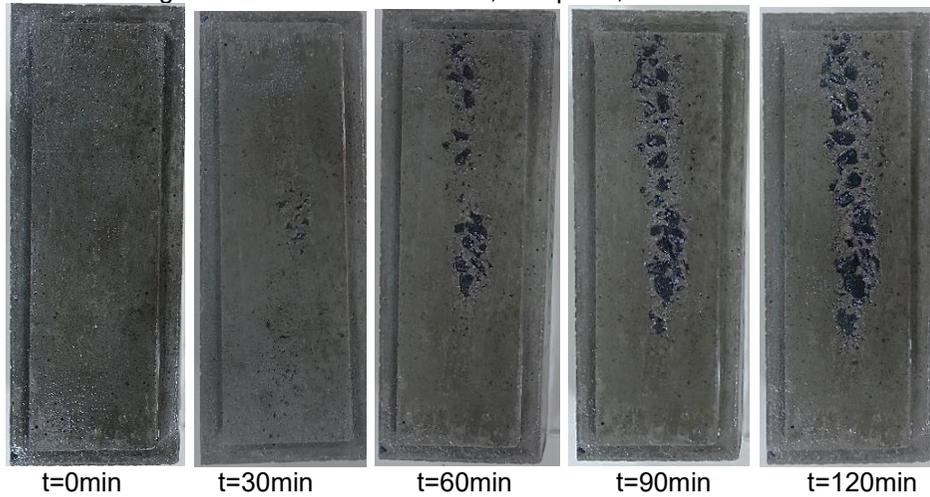


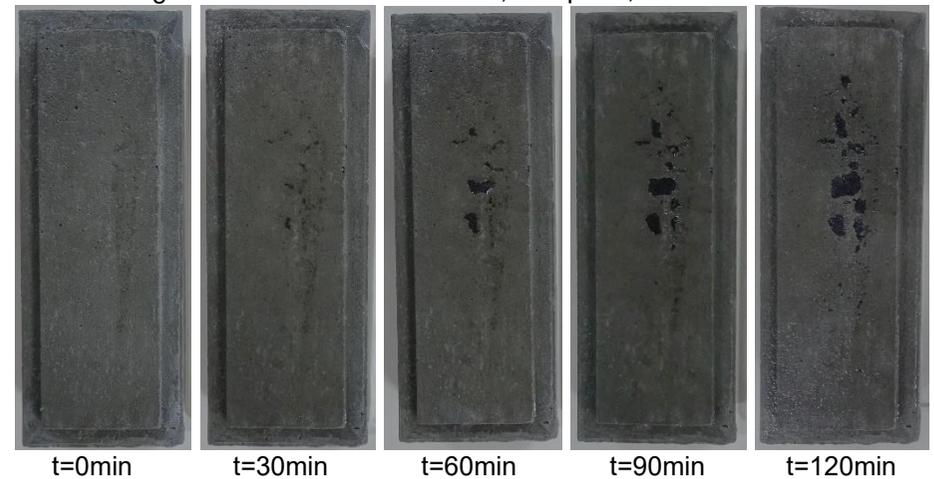
Figura E- 7: Bloco L2 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)



Figura E- 8: Bloco K14 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.



Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

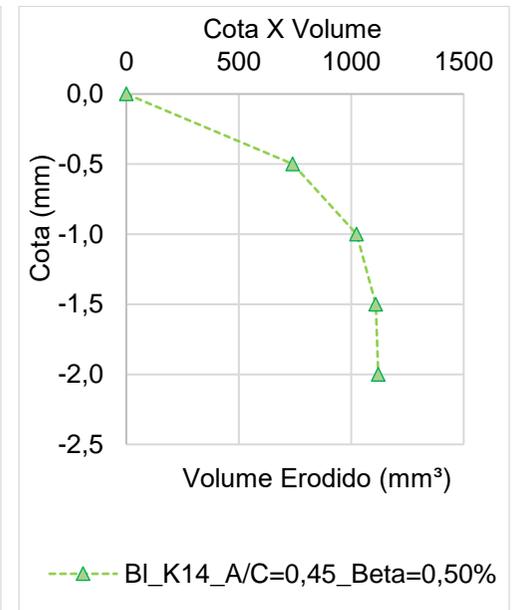
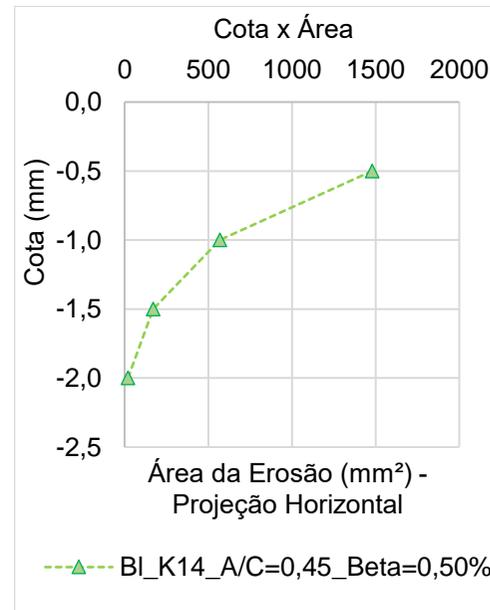
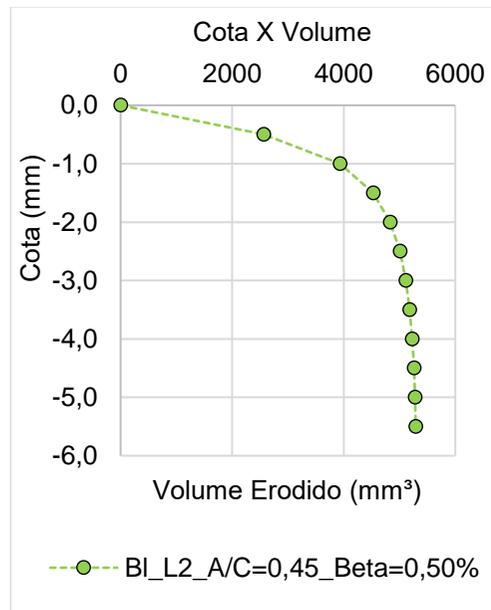
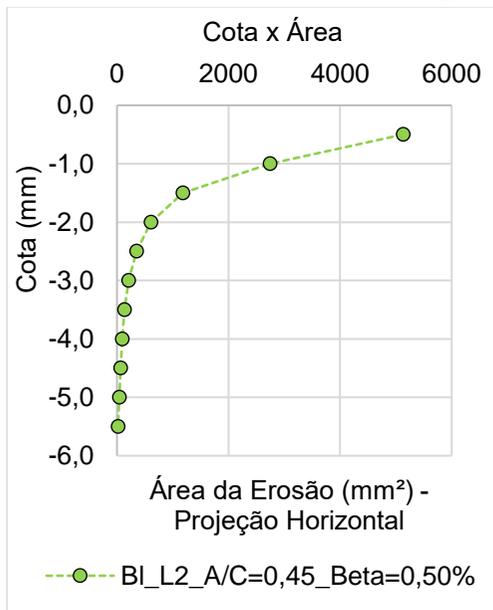
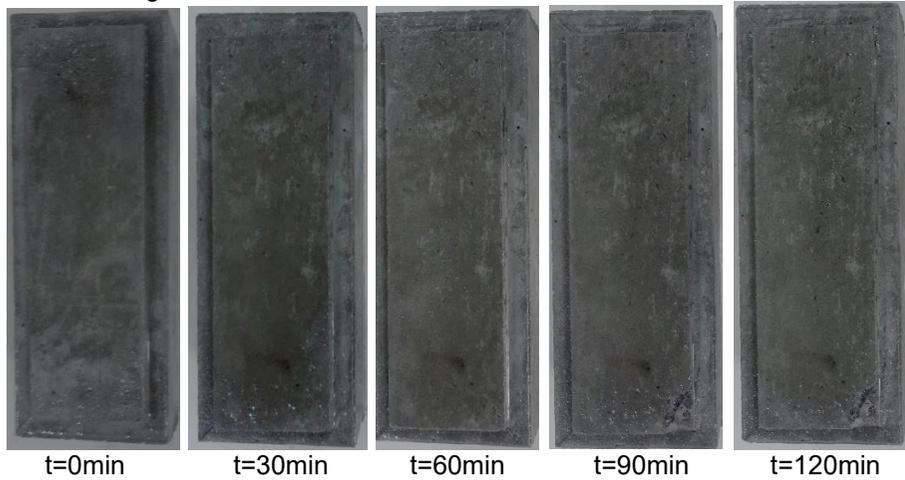


Figura E- 9: Bloco K10 – a/c = 0,45 – B = 0,50% - 120min



Escoamento (V = 30,0 m/s)

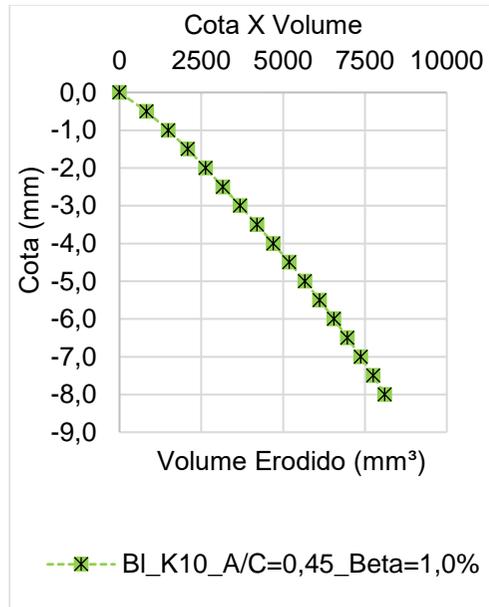
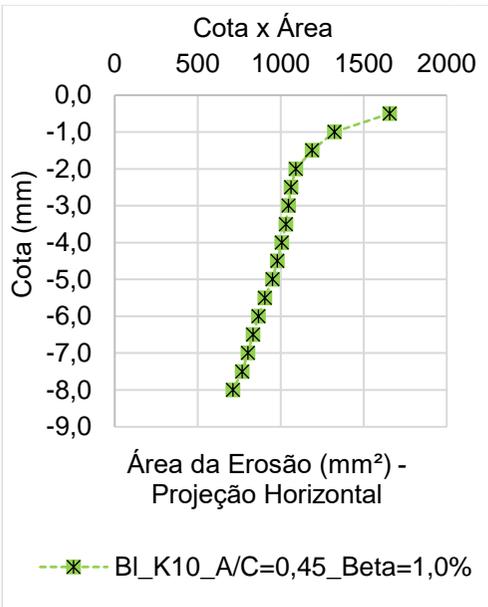
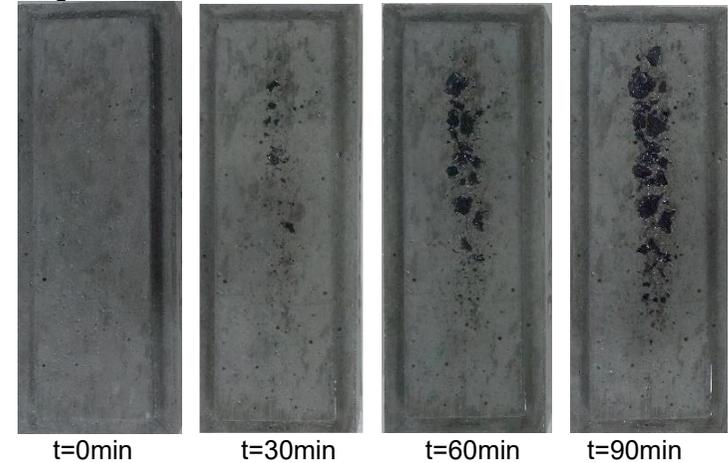


Figura E- 10: Bloco J13 – a/c = 0,45 – B = 0,50% - 90 min.



Escoamento (V = 30,0 m/s)

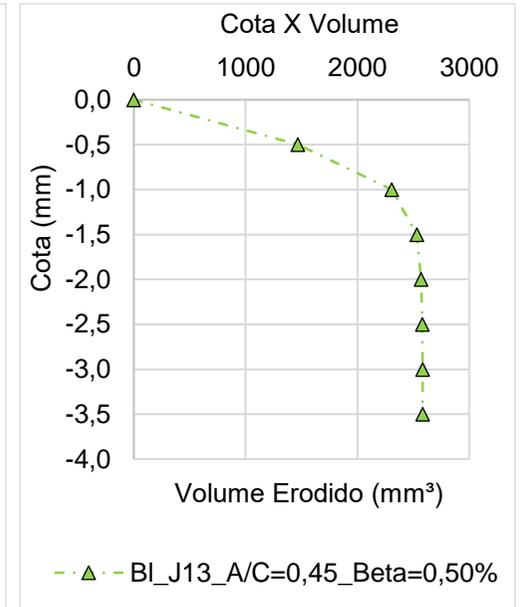
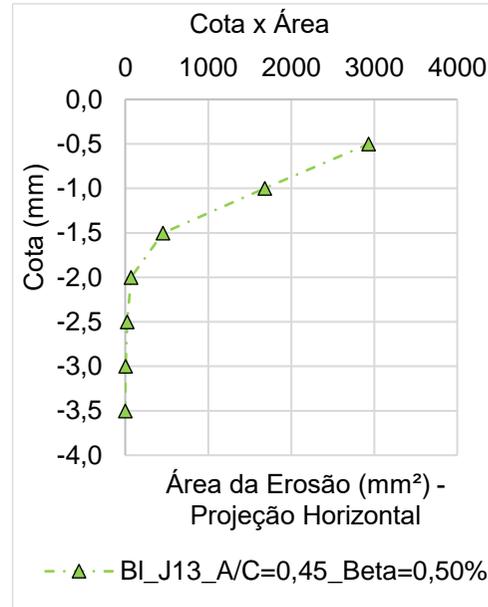


Figura E- 11: Bloco K6 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,75\%$ - 60 min.



Figura E- 12: Bloco L14 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,75\%$ - 120 min.

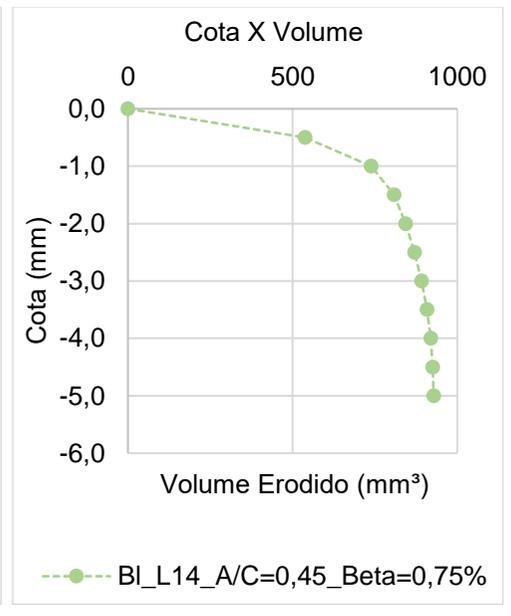
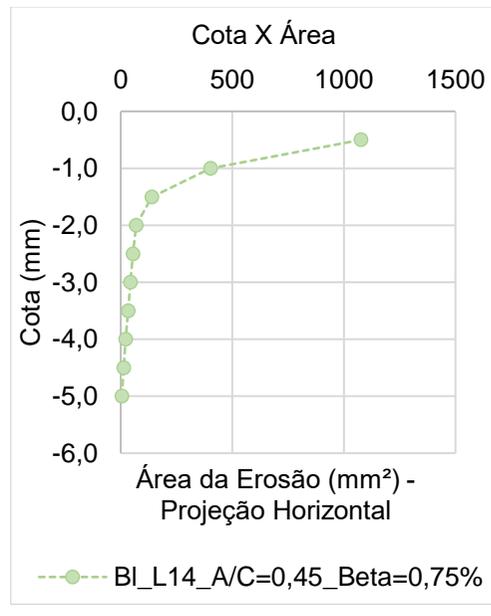
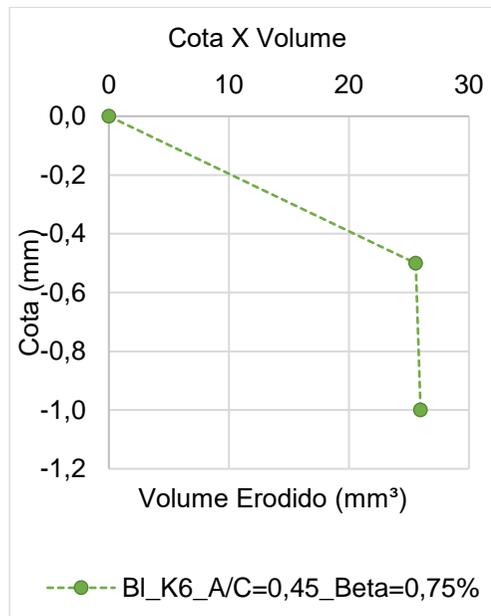
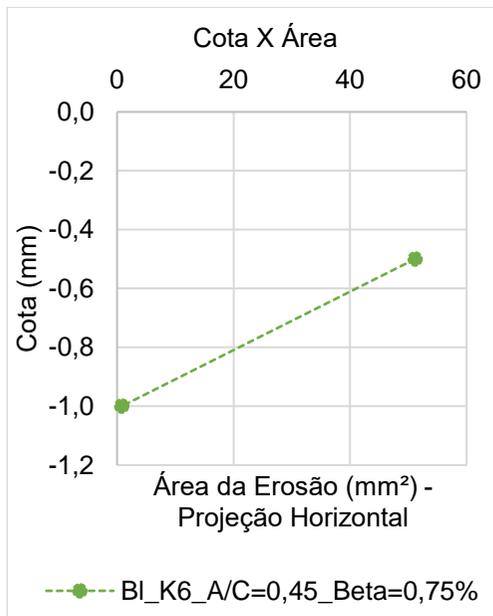
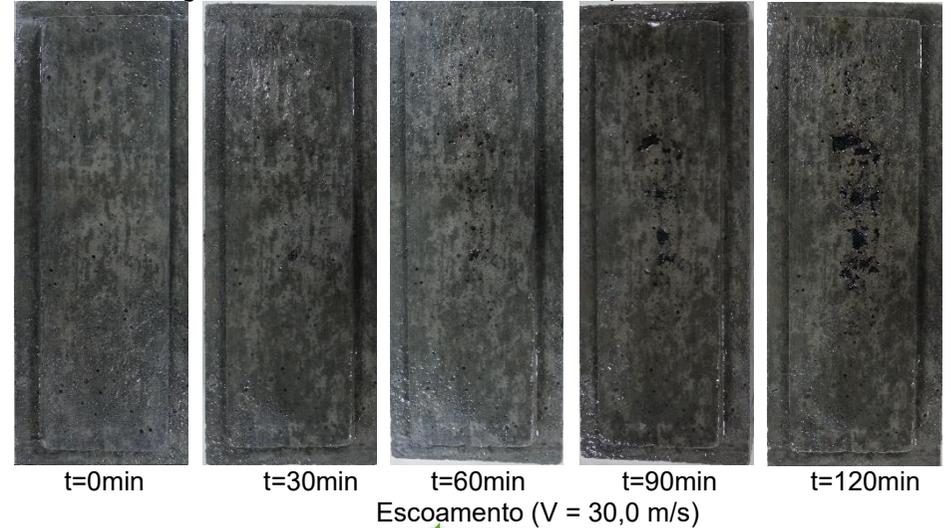


Figura E- 13: Bloco K4 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 0,75\%$ - 120 min.



t=0min t=30min t=60min t=90min t=120min

Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

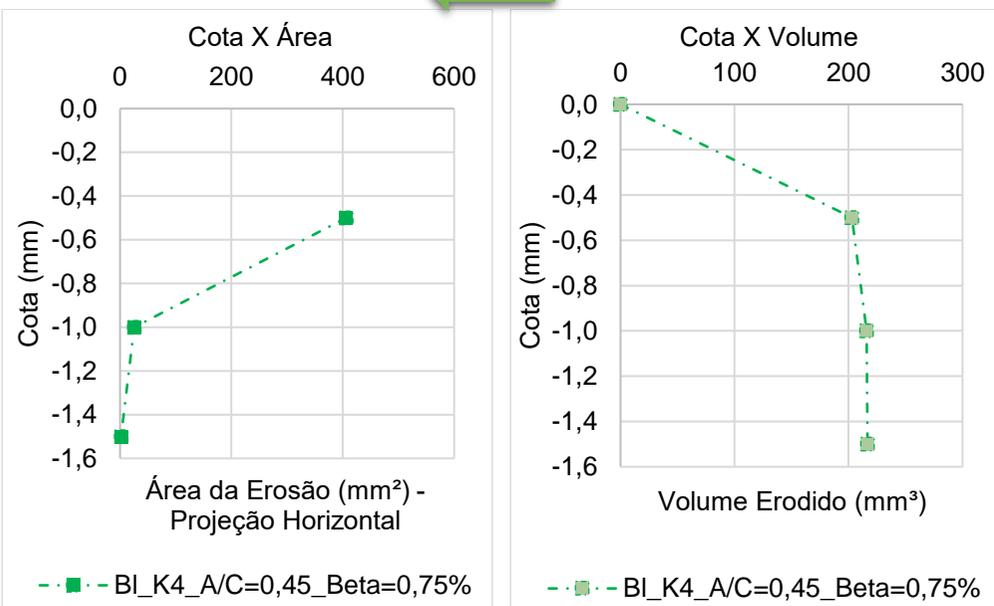
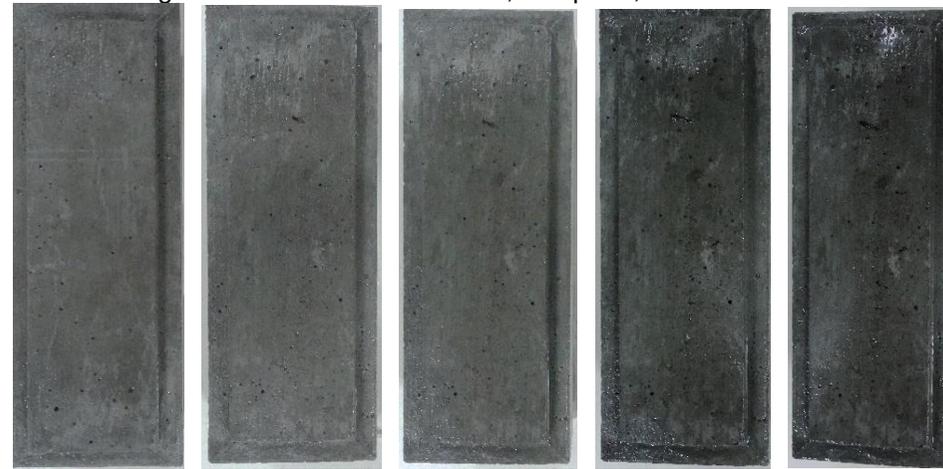


Figura E- 14: Bloco K7 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.



t=0min t=30min t=60min t=90min t=120min

Escoamento ($V = 30,0$ m/s)

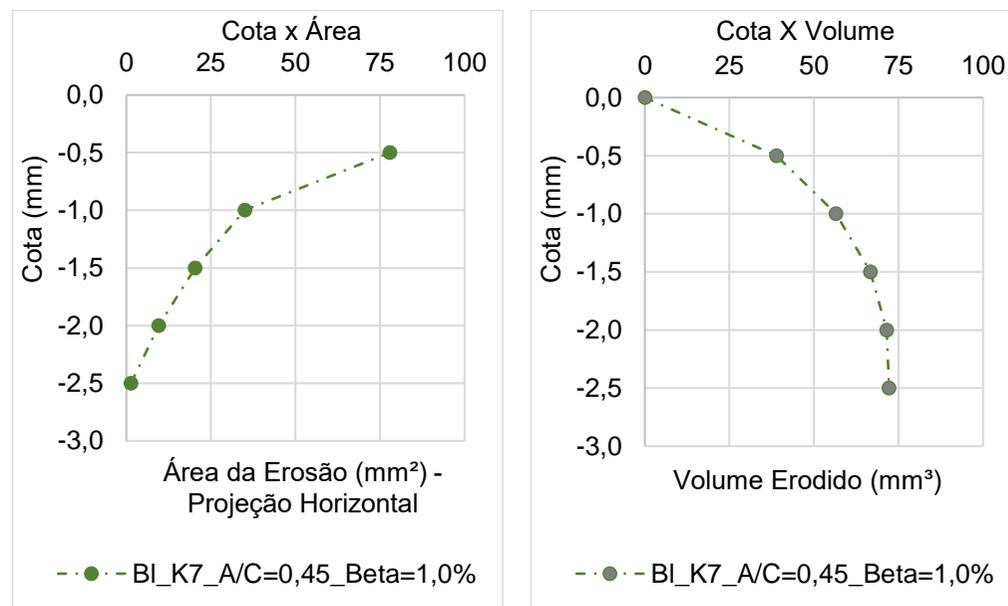


Figura E- 15: Bloco L7 – $a/c = 0,45 - \beta = 1,0\%$ - 60 min.

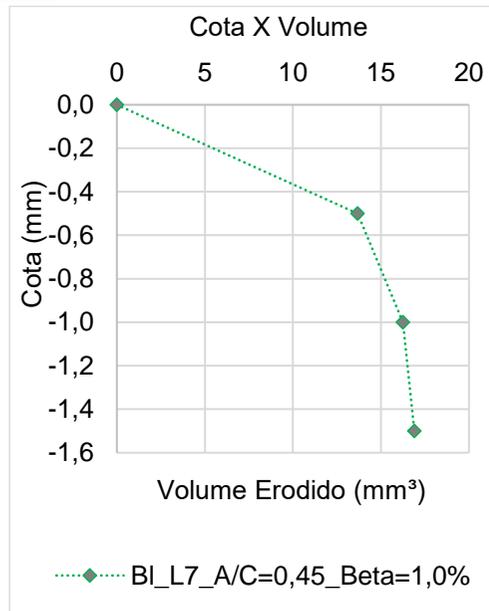
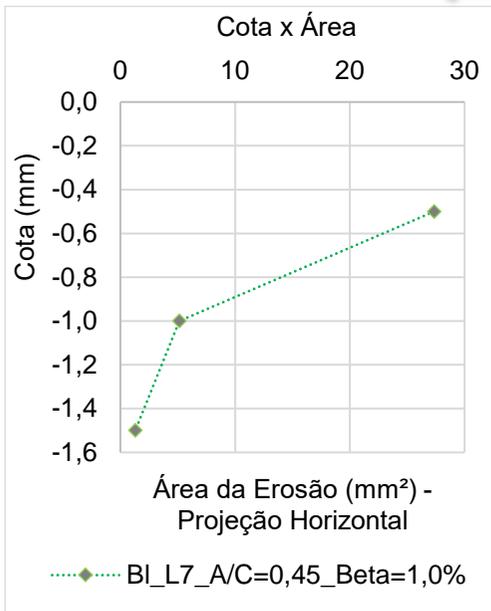


Figura E- 16: Bloco J5 – $a/c = 0,45 - \beta = 1,50\%$ - 120 min.

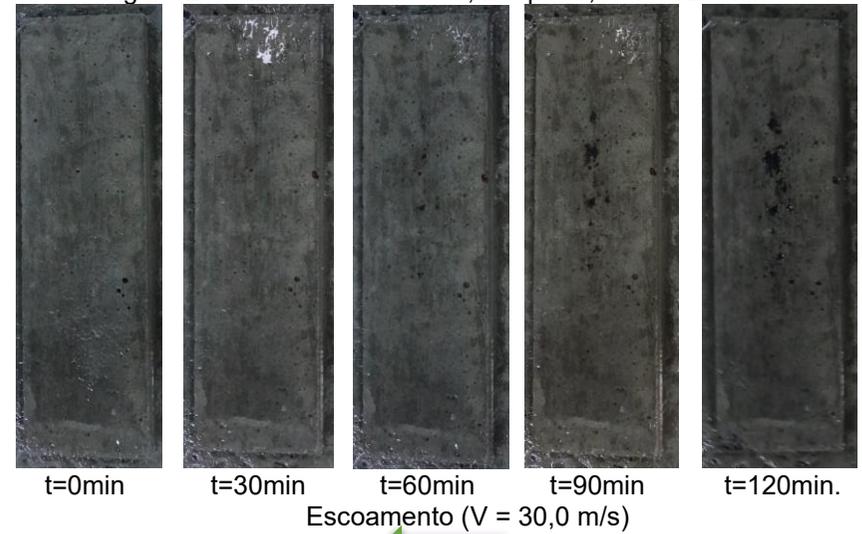
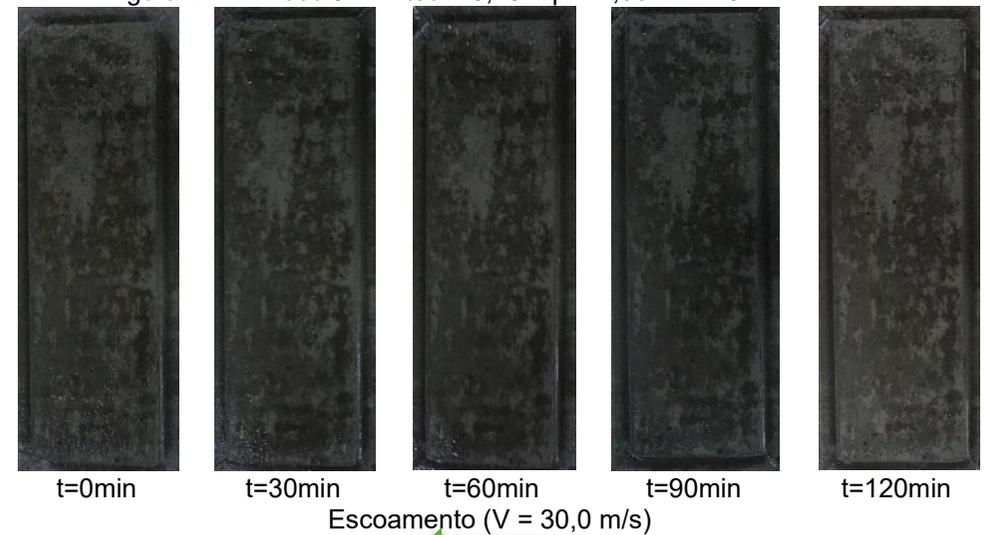


Figura E- 17: Bloco J12 – $a/c = 0,45 - \beta = 1,50\%$ - 120 min.



Obs.: Os blocos J5 e J12 não apresentam informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura E- 18: Bloco J1 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 1,50\%$ - 90 min.

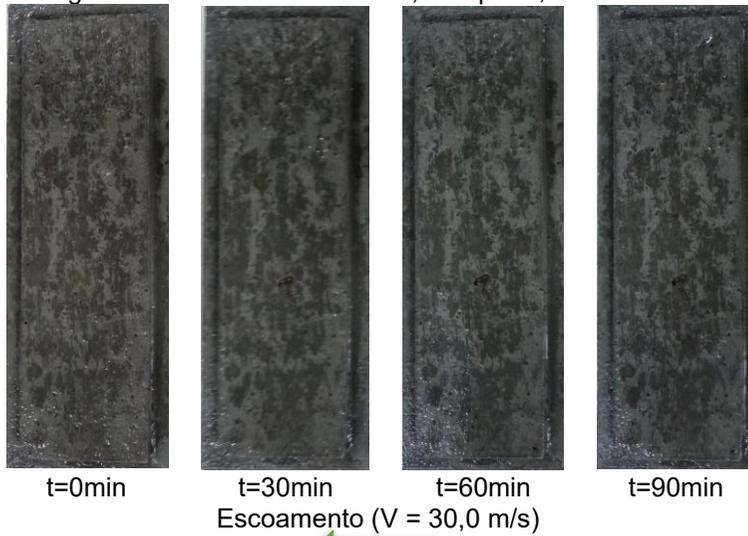
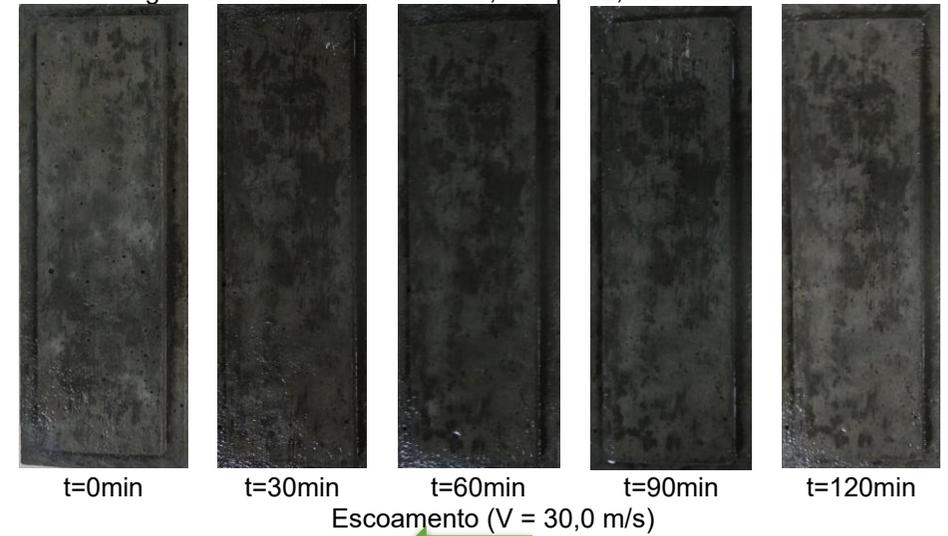
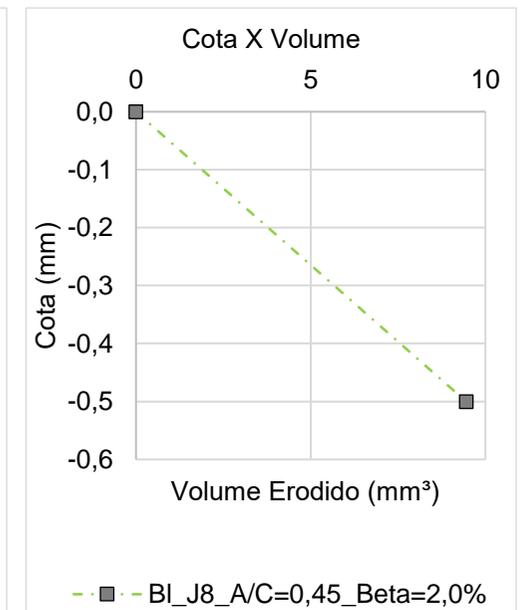
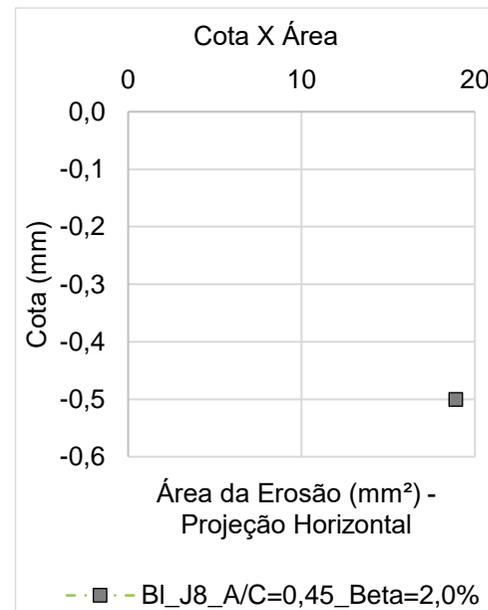


Figura E- 19: Bloco J8 – $a/c = 0,45$ – $\beta = 2,0\%$ - 120 min.



Obs.: O bloco J1 não apresenta informações sobre o levantamento das curvas de nível.



APÊNDICE F: Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,35 do LOH, para β de 0; 1,0; 2,0; 6,0 e 8,0% de ar.

Figura F- 1: Bloco G1 – a/c = 0,35 – β = 0% - 120 min.

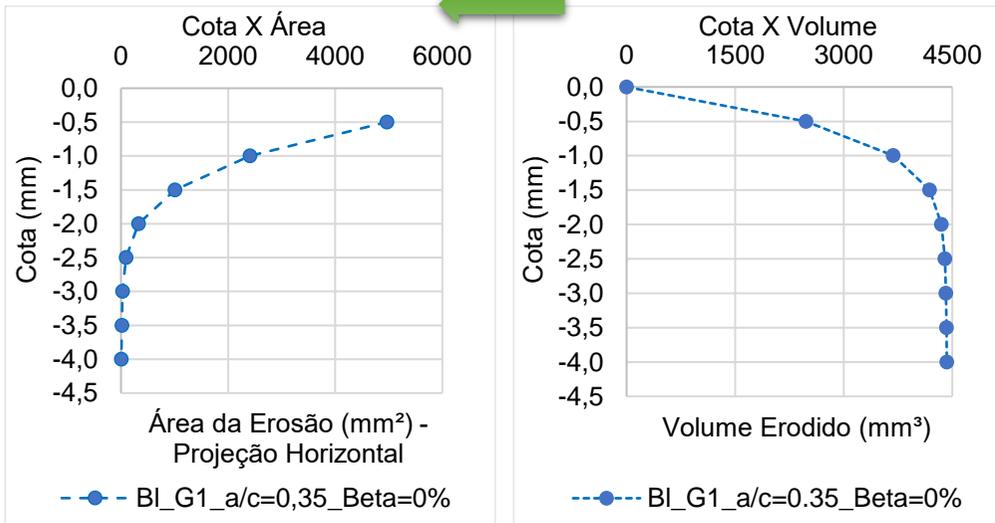
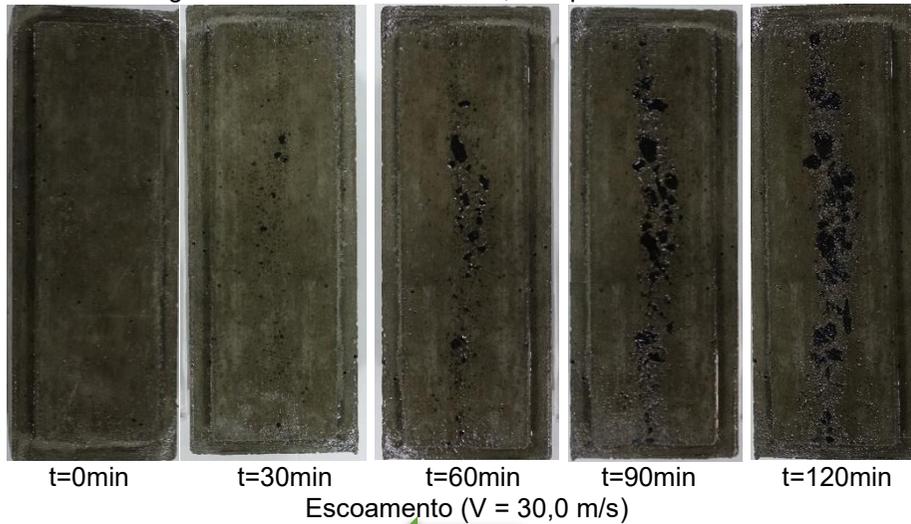


Figura F- 2: Bloco G3 – a/c = 0,35 – β = 0% - 120 min.

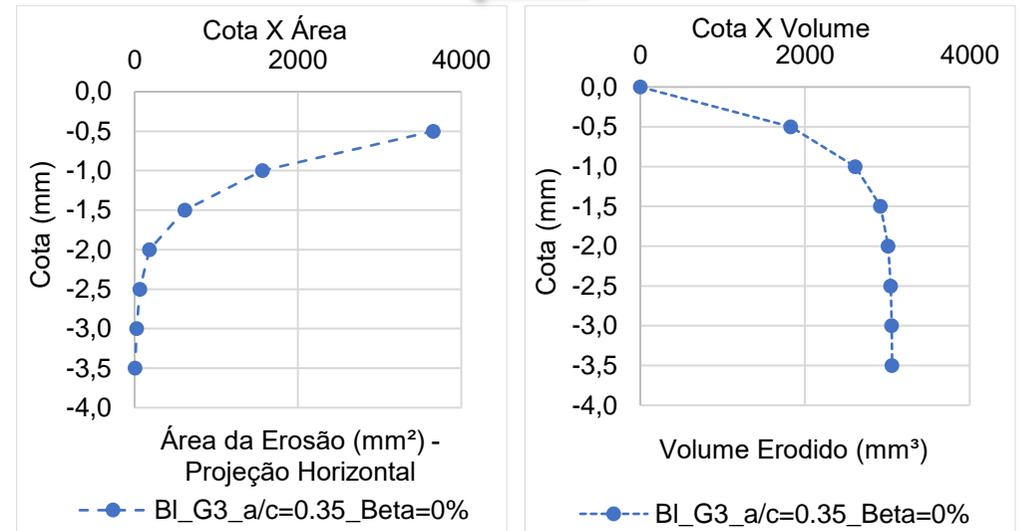
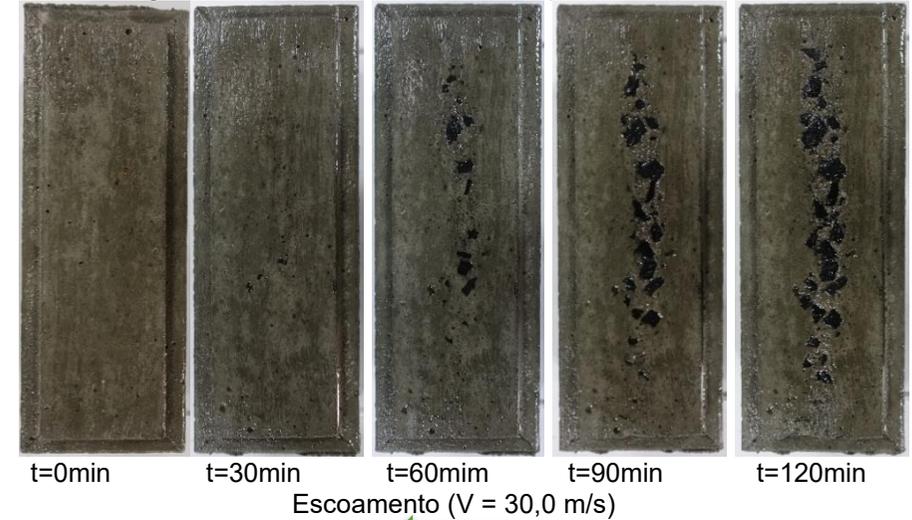


Figura F- 3: Bloco G14 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0\%$ - 120 min

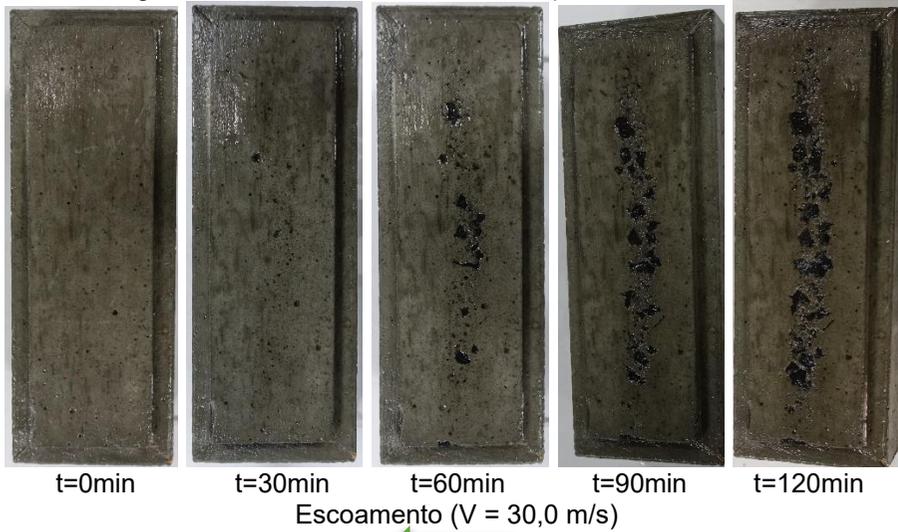


Figura F- 4: Bloco G8 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0\%$ - 60 min.

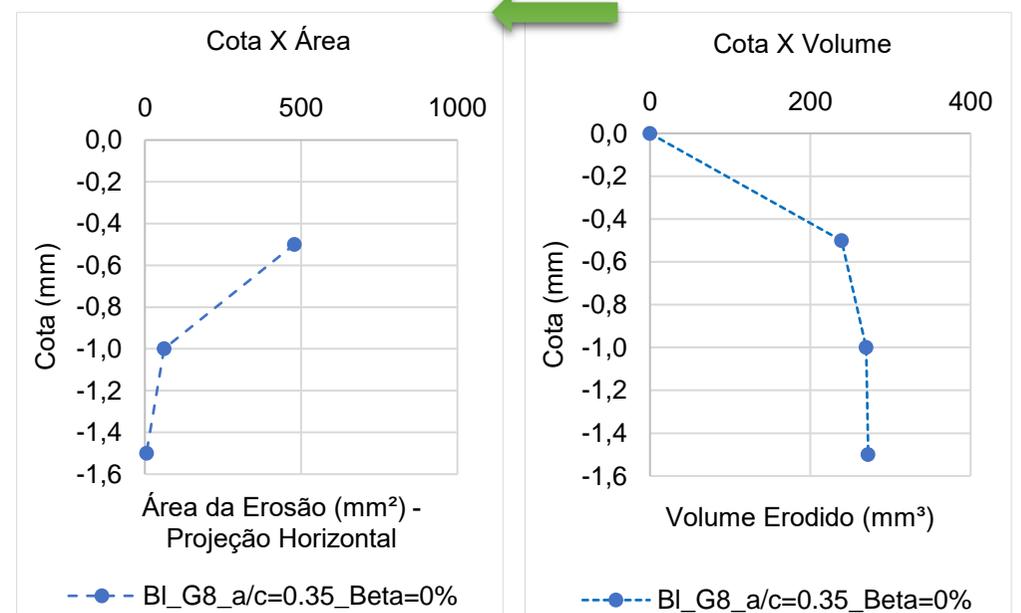
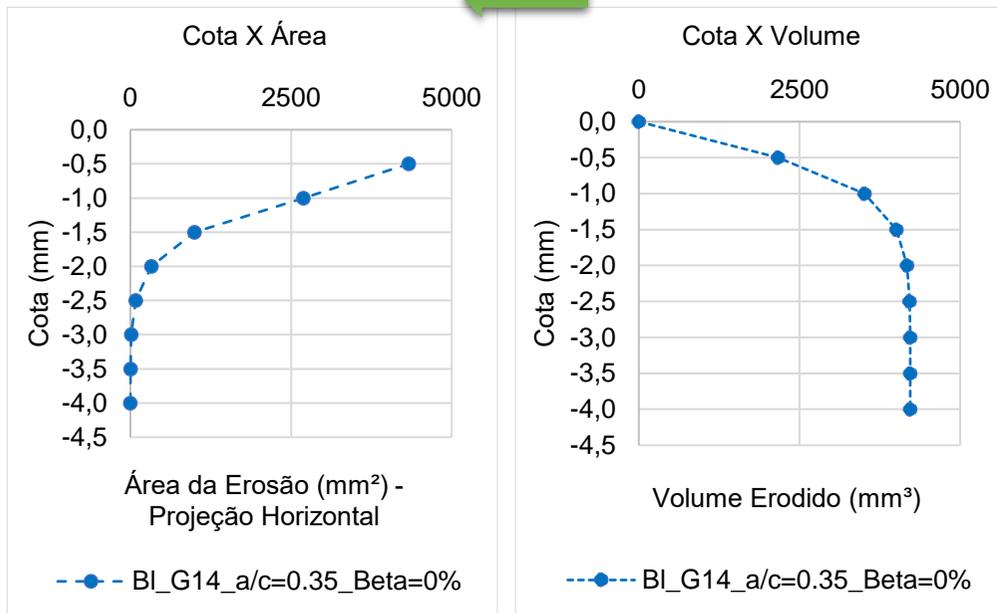
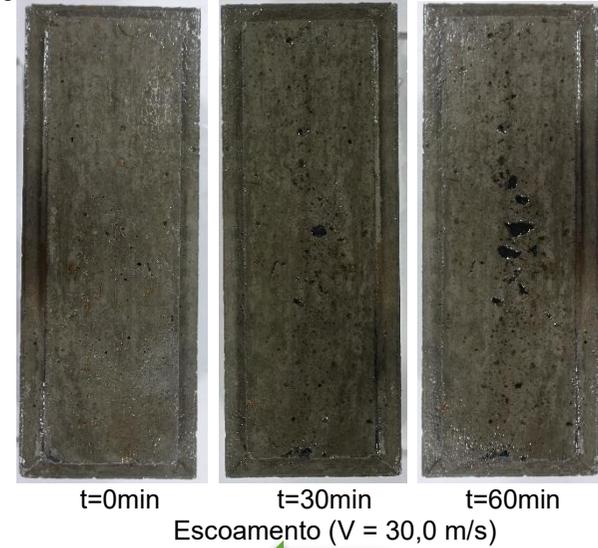


Figura F- 5: Bloco H1 – $a/c = 0,35 - \beta = 0,25\%$ - 120 min.

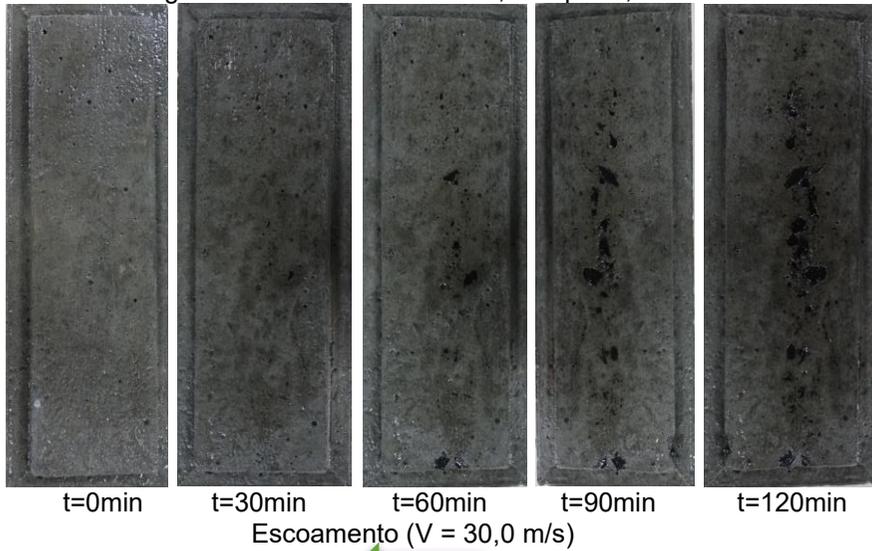


Figura F- 6: Bloco H3 – $a/c = 0,35 - \beta = 0,25\%$ - 120 min.

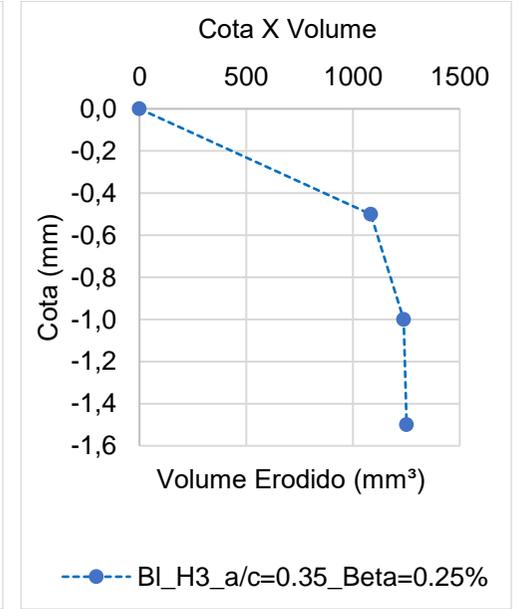
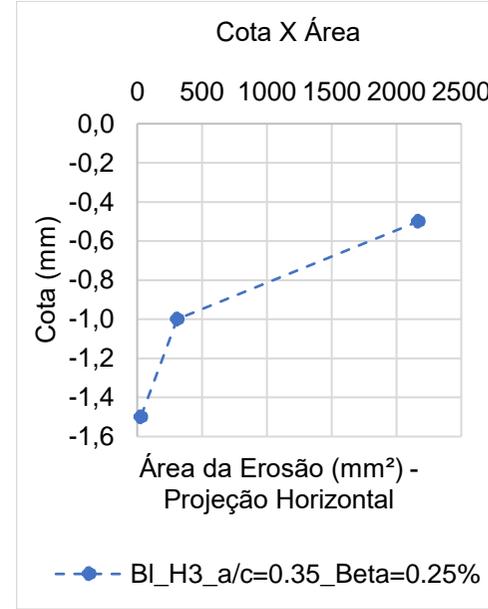
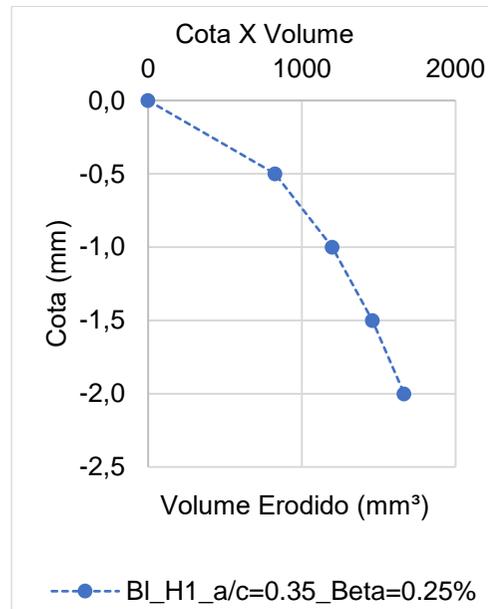
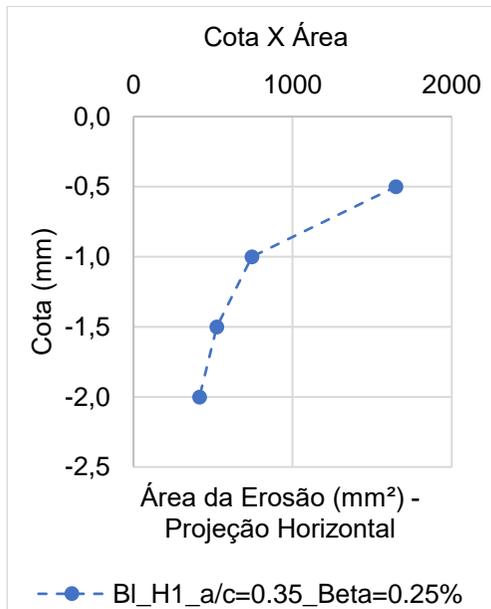
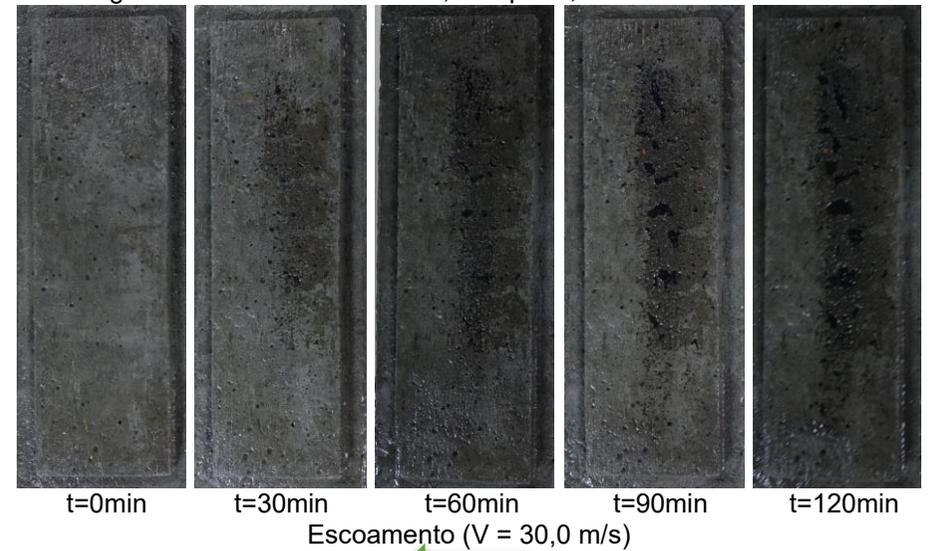


Figura F- 7: Bloco H6 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,25\%$ - 120 min.

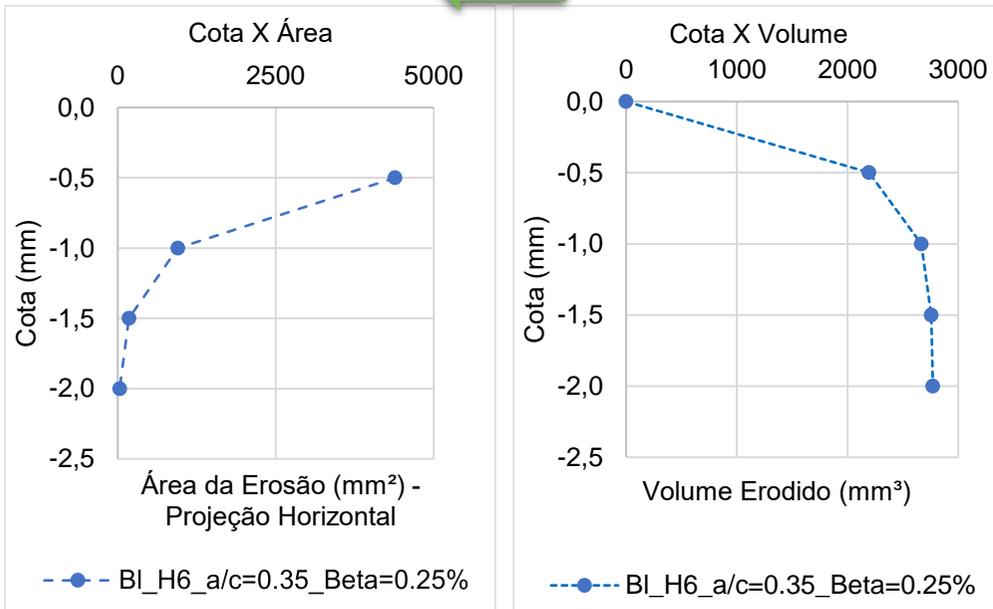
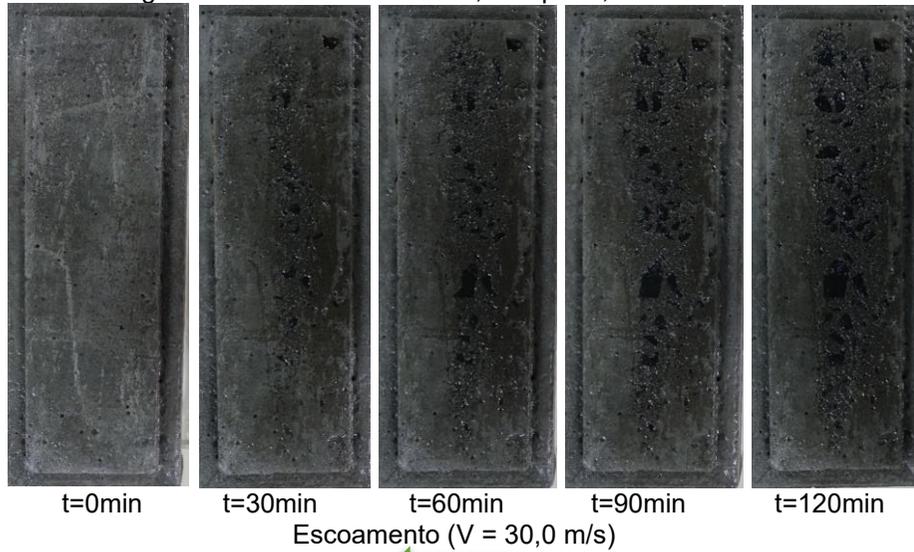


Figura F- 8: Bloco I6 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,25\%$ - 60 min

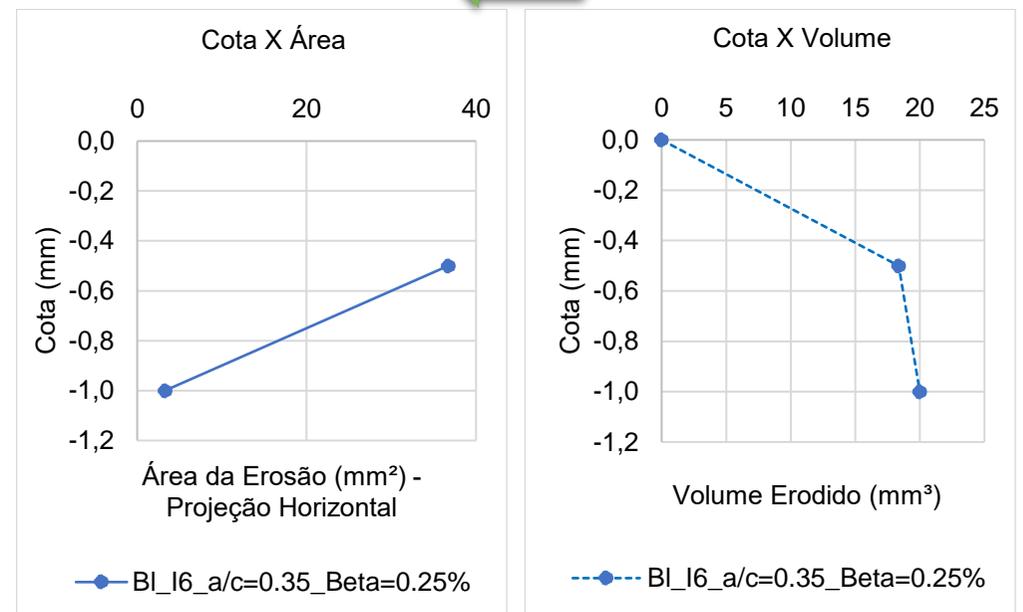
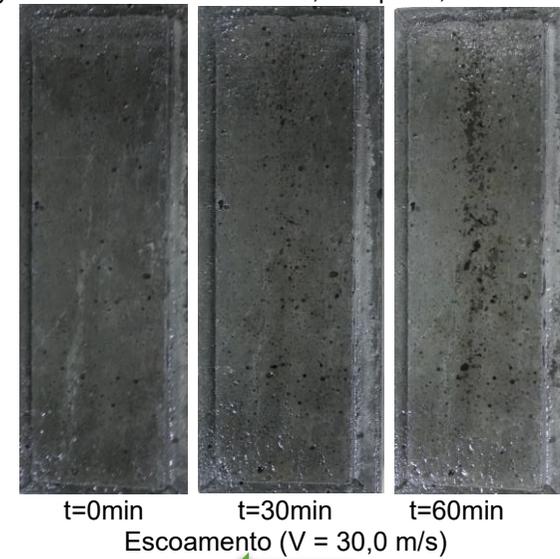


Figura F- 9: Bloco G6 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.

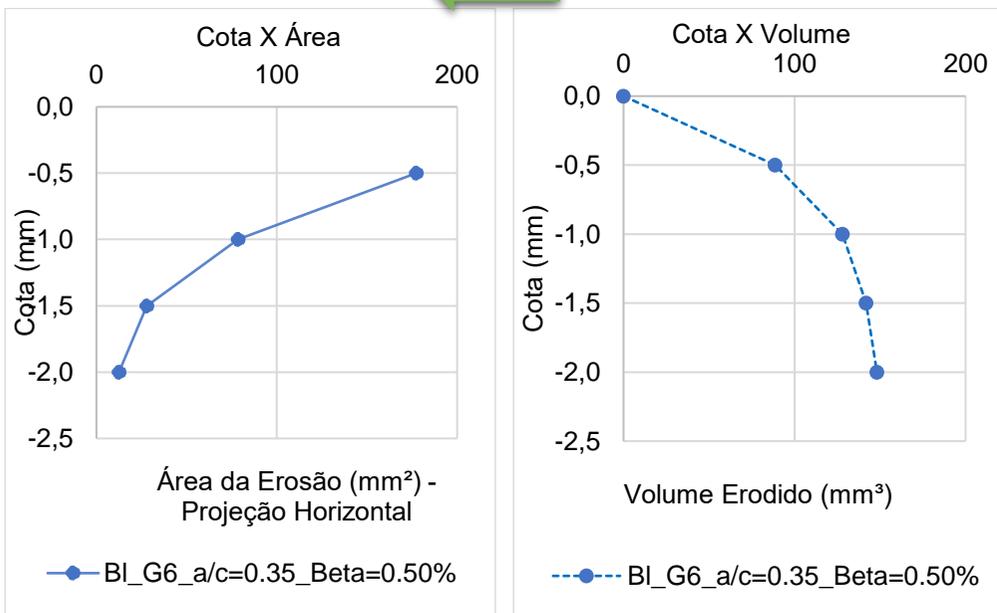
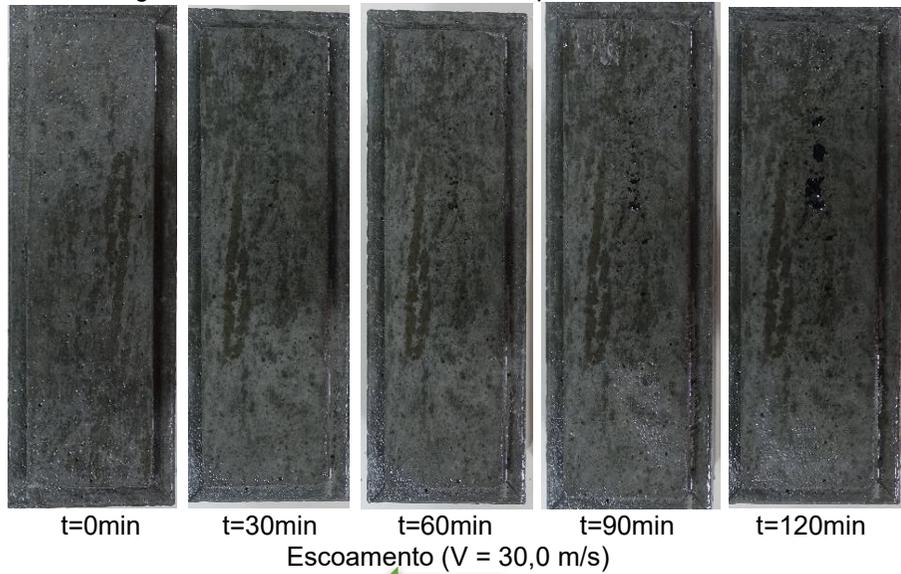


Figura F- 10: Bloco G9 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.

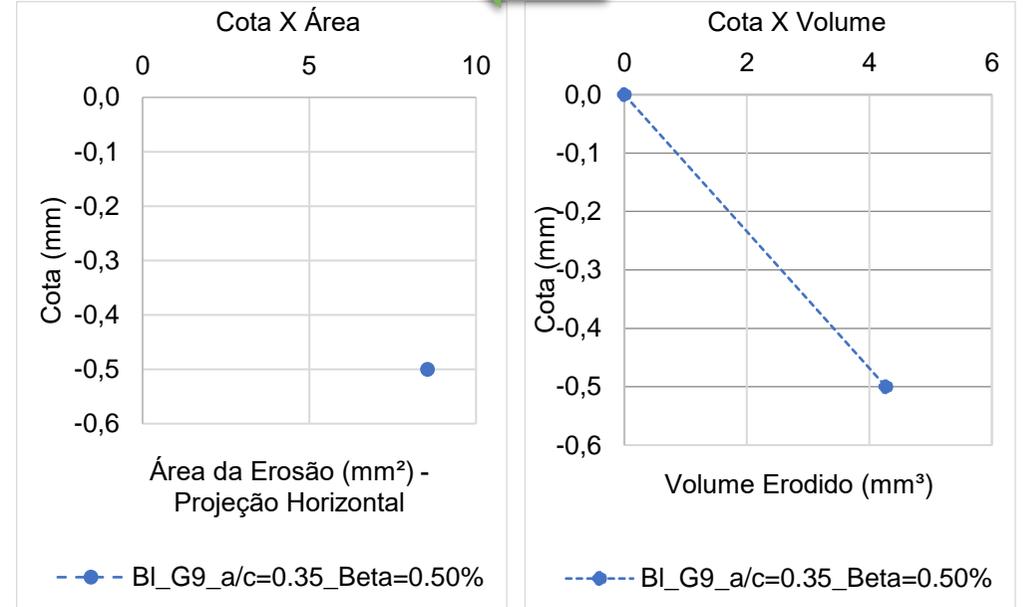
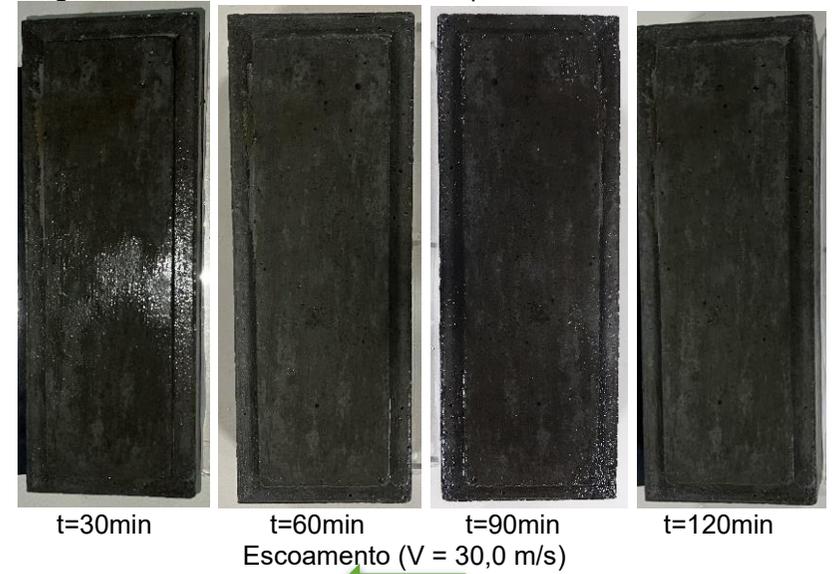


Figura F- 11: Bloco G11 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,50\%$ - 90 min.

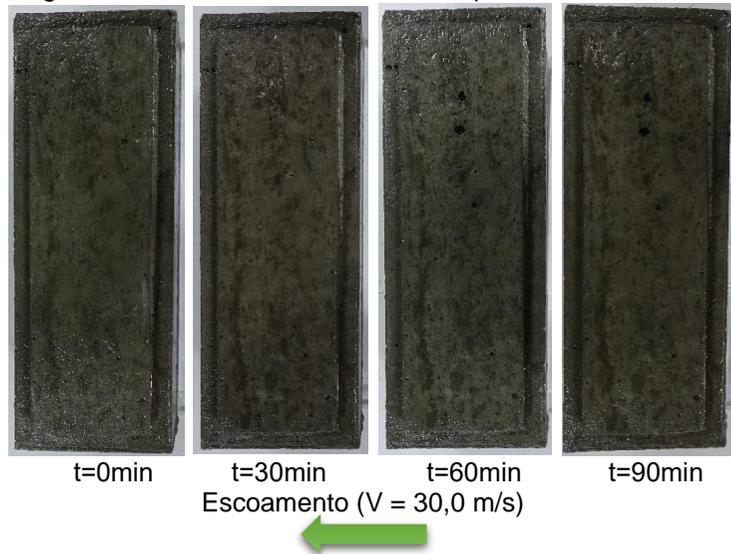


Figura F- 12: Bloco I10 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,50\%$ - 120 min.



Obs.: Não foram realizados registros fotográficos dos danos para os intervalos menores do que 2 horas.

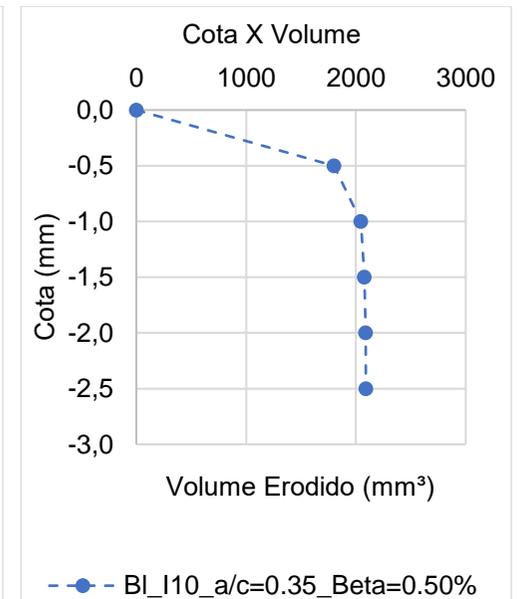
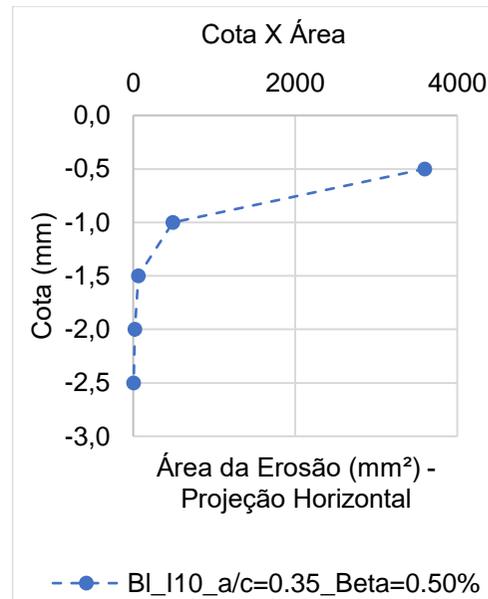
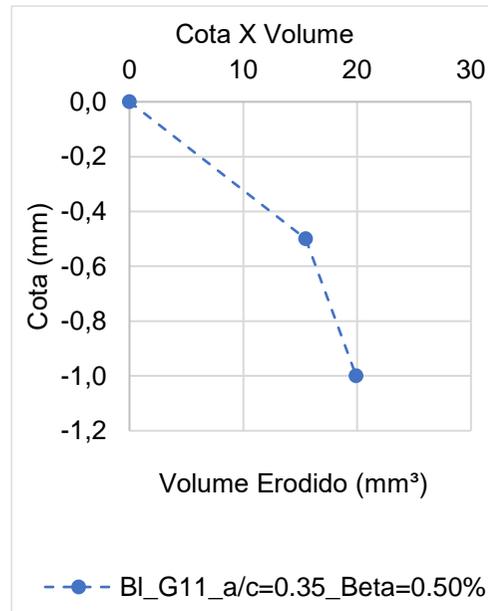
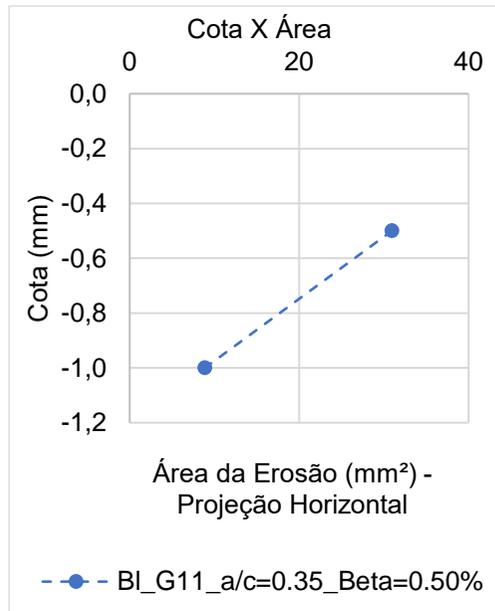


Figura F- 13: Bloco H4 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,75\%$ - 120 min.

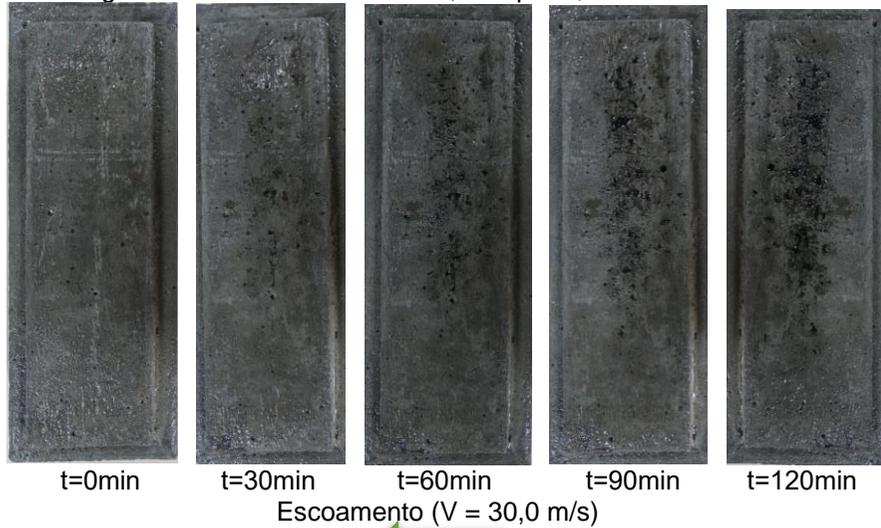


Figura F- 14: Bloco H10 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,75\%$ - 120 min.

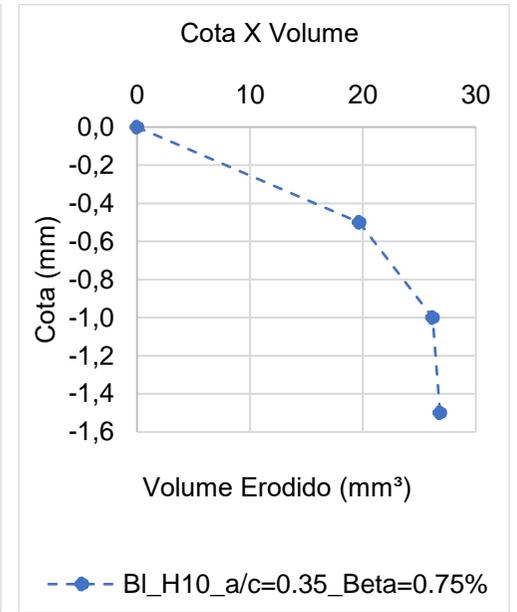
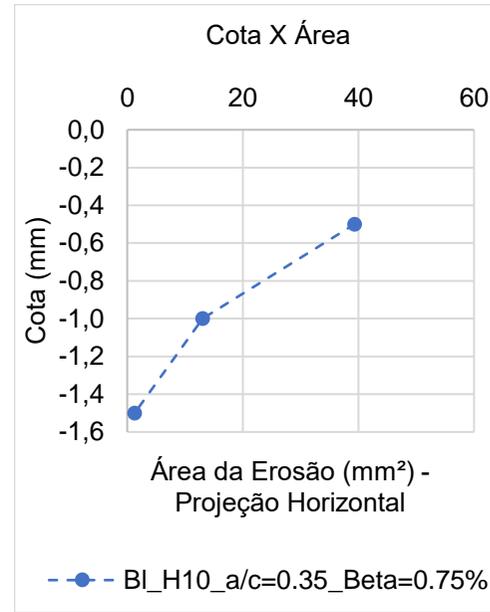
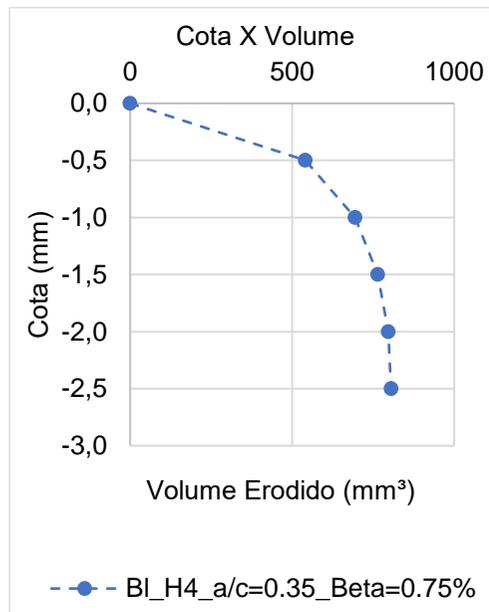
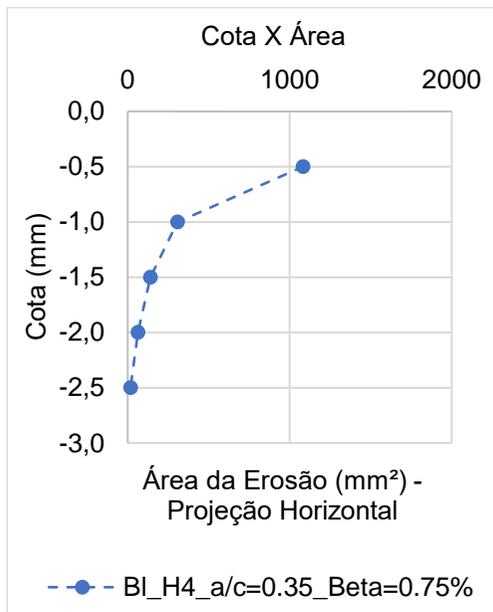
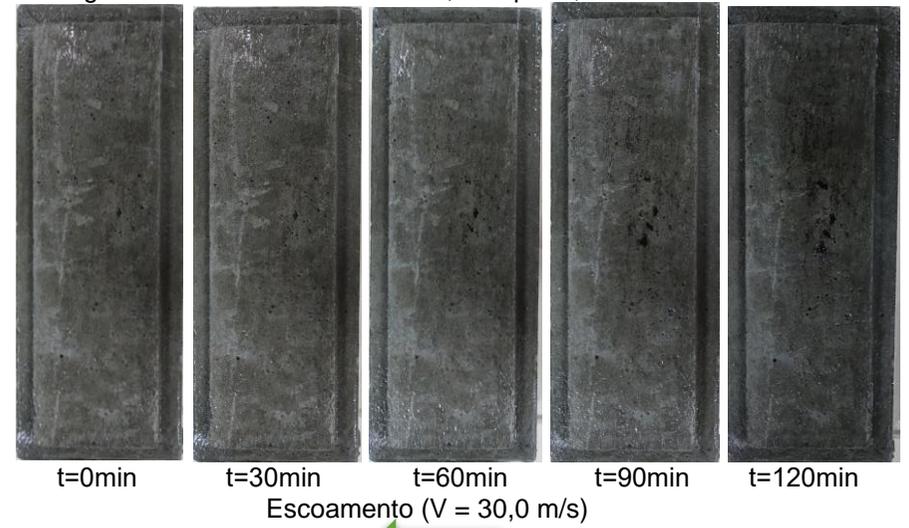


Figura F- 15: Bloco H14 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 0,75\%$ - 120 min.

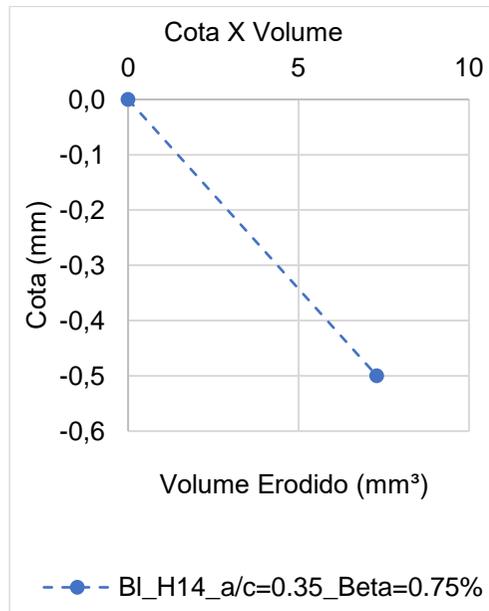
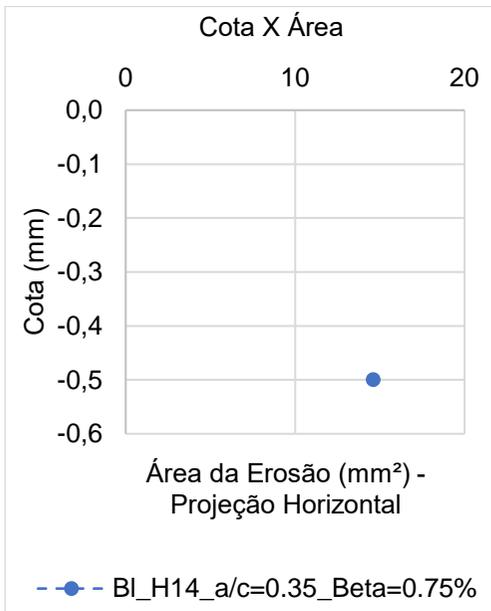
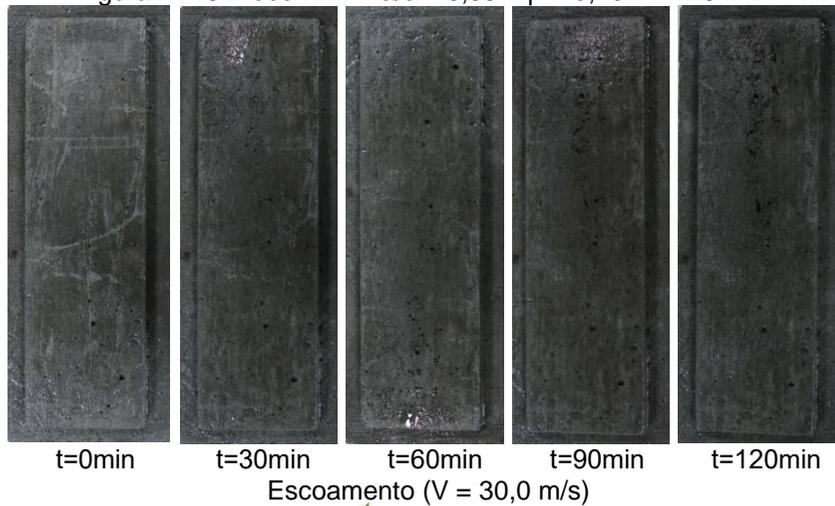
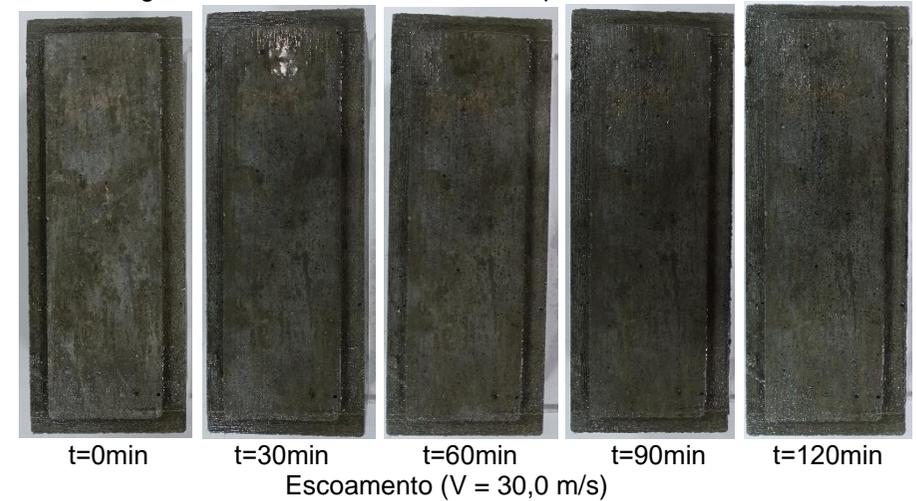
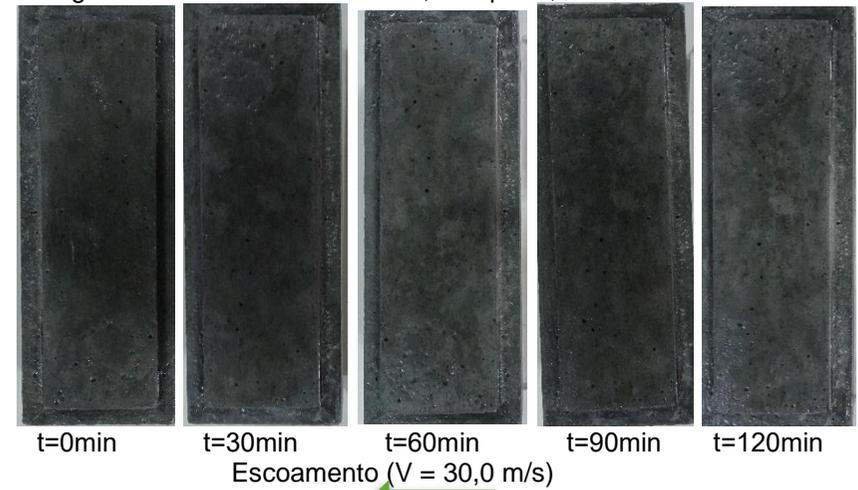


Figura F- 16: Bloco I8 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 1,0\%$ - 120 min.



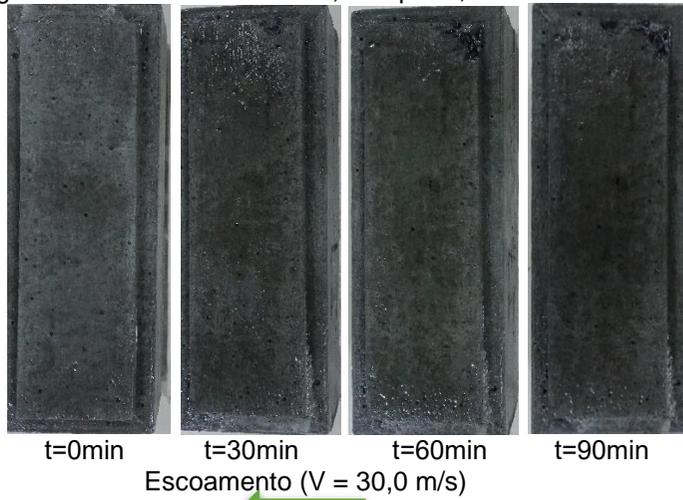
Obs.: Estes corpos de prova não apresentam informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura F- 17: Bloco I12 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 1,50\%$ - 120 min



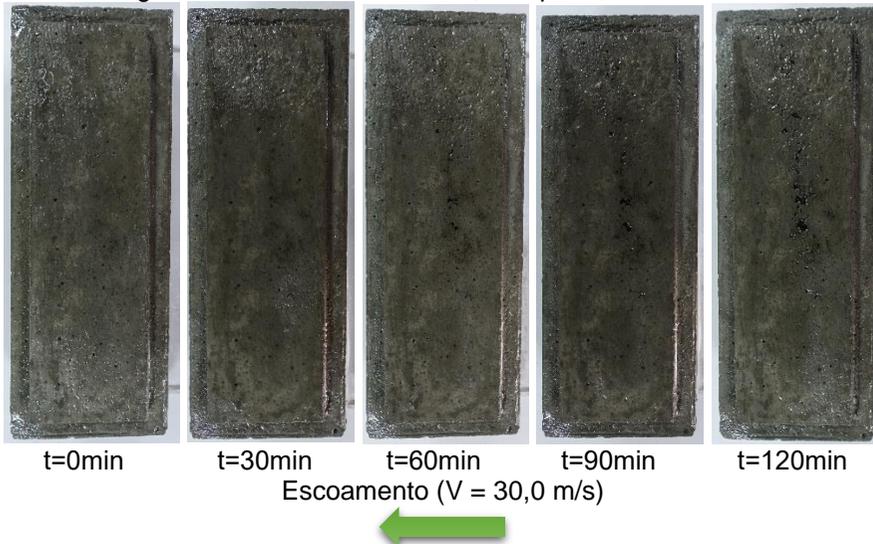
Obs.: Este corpo de prova não apresenta informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura F- 18: Bloco I7 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 1,50\%$ - 90 min.



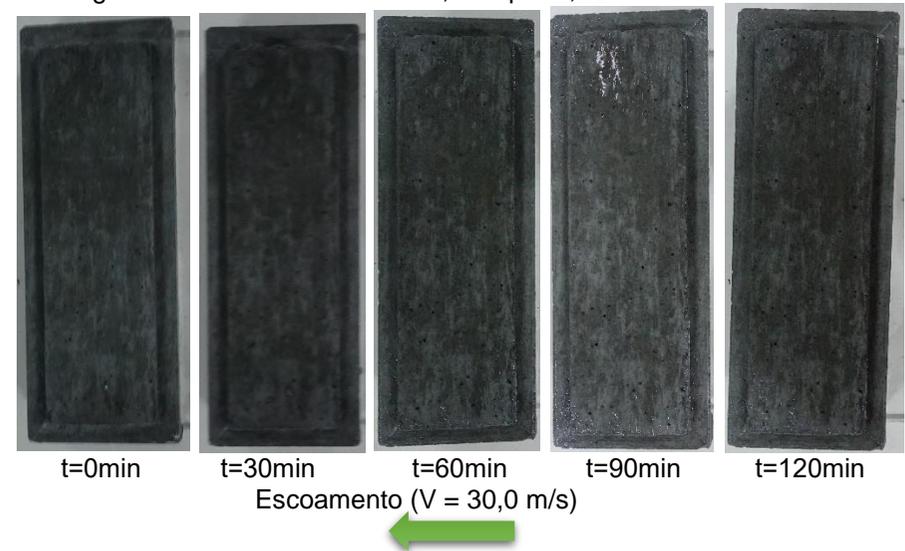
Obs.: Estes corpos de prova não apresentam informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura F- 19: Bloco I4 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 2,0\%$ - 120 min.



Obs.: Estes corpos de prova não apresentam informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura F- 20: Bloco G5 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 1,50\%$ - 120 min.



Obs.: Estes corpos de prova não apresentam informações sobre o levantamento das curvas de nível.

Figura F- 21: Bloco G4 – $a/c = 0,35 - \beta = 2,0\% - 120 \text{ min.}$

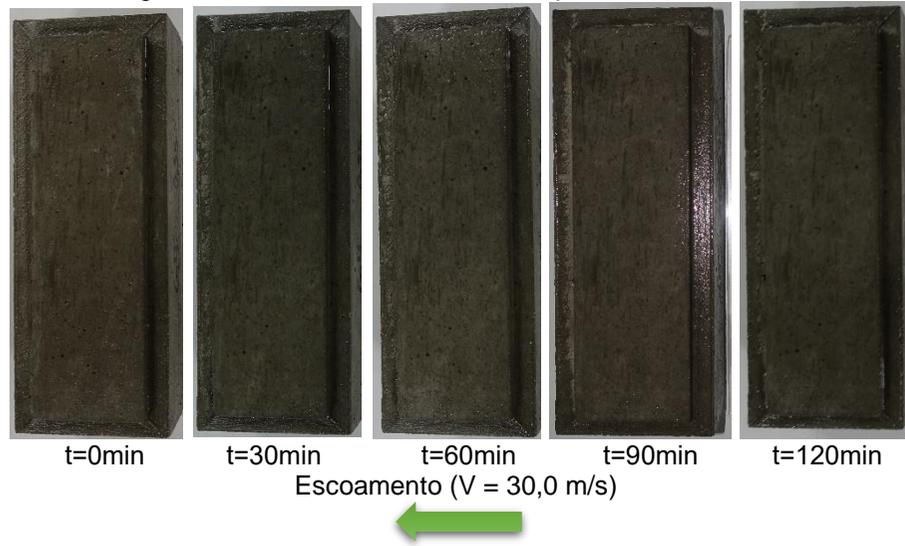


Figura F- 22: Bloco G10 – $a/c = 0,35 - \beta = 2,0\% - 120 \text{ min.}$

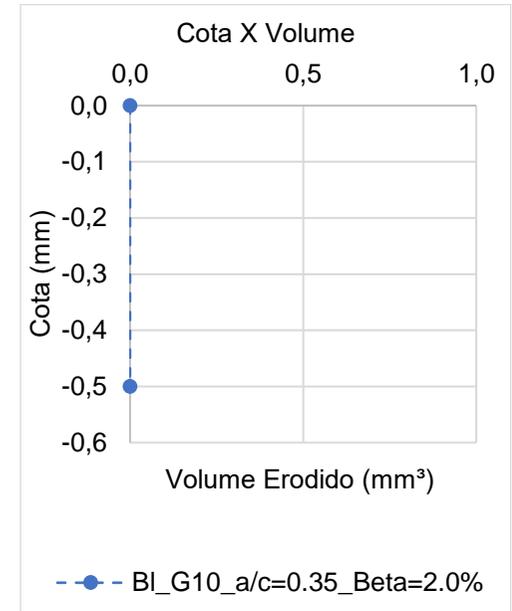
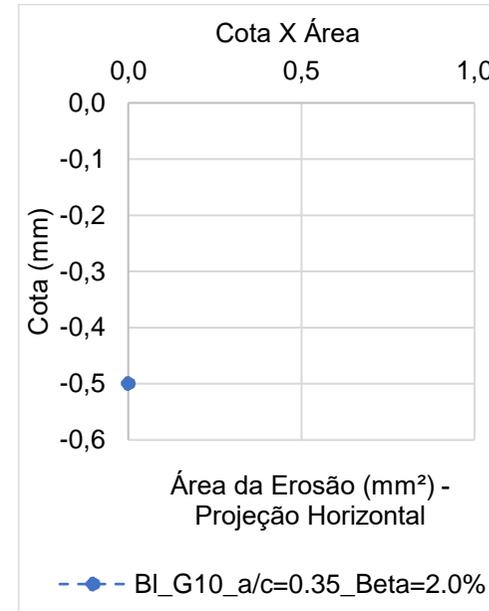
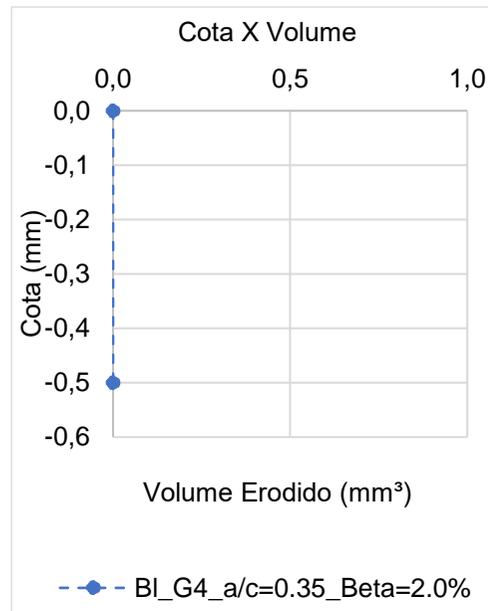
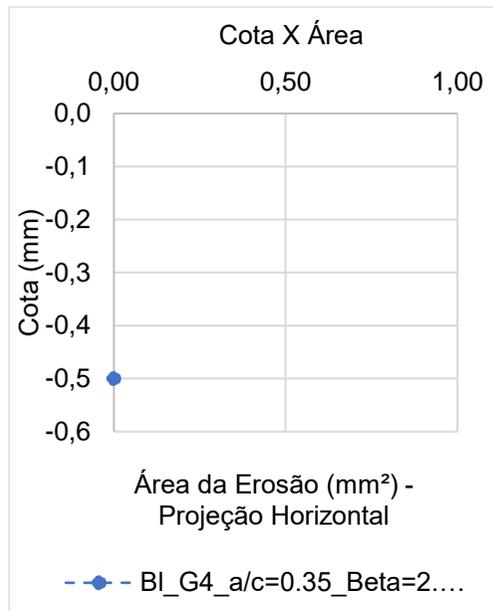
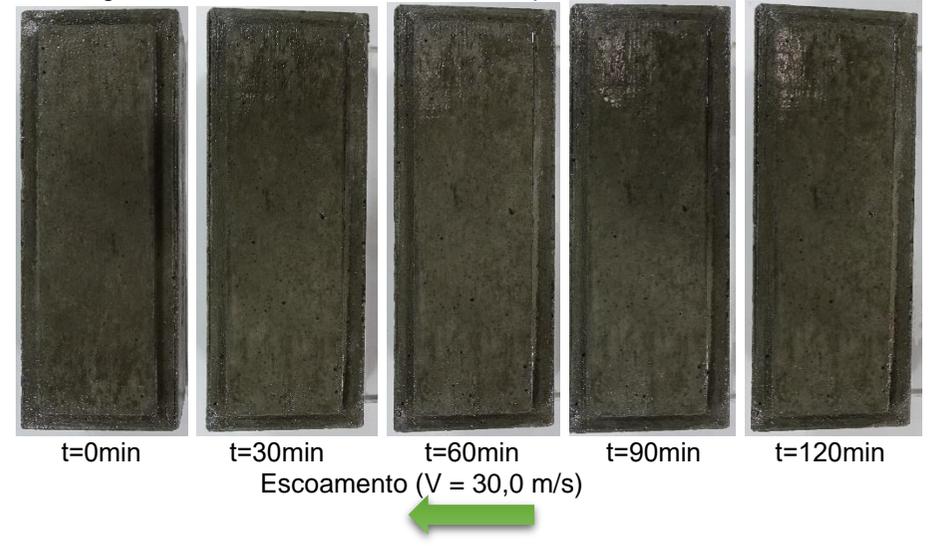
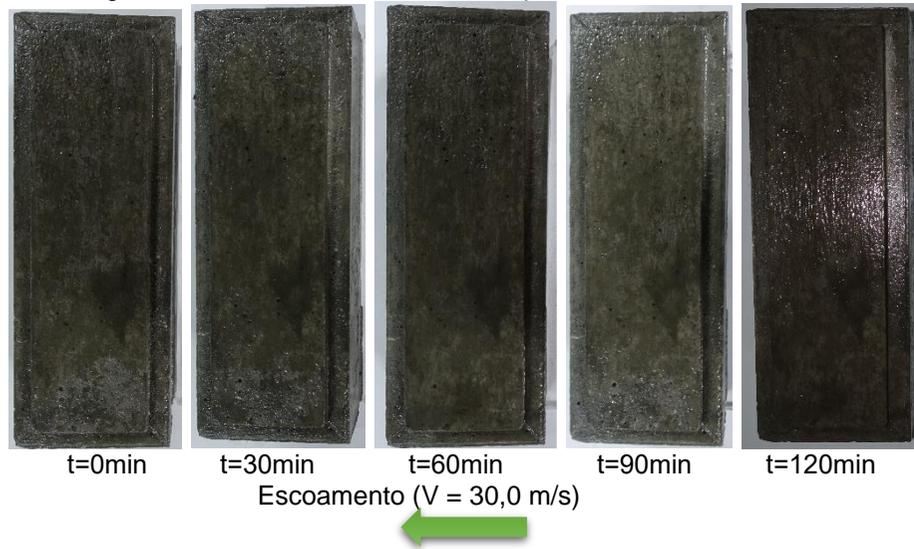


Figura F- 23: Bloco I14 – $a/c = 0,35$ – $\beta = 2,0\%$ - 120 min.



Obs.: Este corpo de prova não apresenta informações sobre o levantamento das curvas de nível nem danos em sua superfície.

APÊNDICE G - Registros fotográficos dos danos apresentados nas superfícies dos blocos de concreto de relação a/c de 0,35; 0,35+SF; 0,50; 0,65 e 0,70 do USBR, para β de 0; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0% de ar.

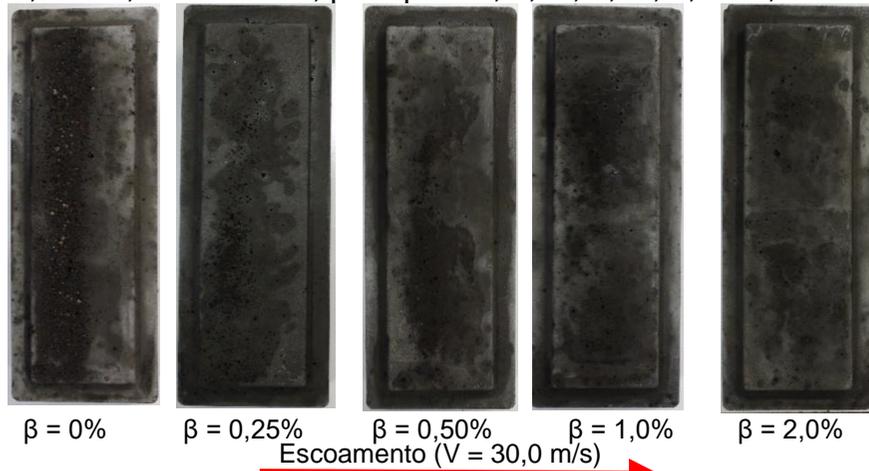


Figura G- 1: Blocos de concreto de relação a/c= 0,35, após 4 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do USBR para diferentes β

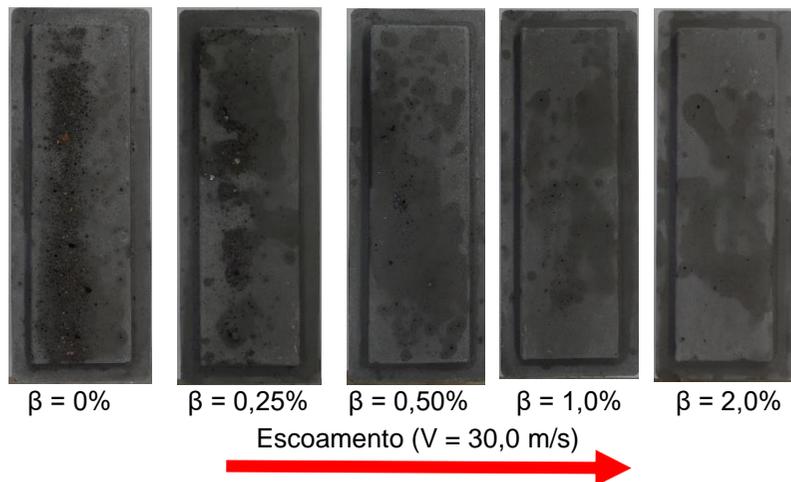


Figura G- 2: Blocos de concreto de relação a/c= 0,35+SF, após 4 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do USBR para diferentes β .

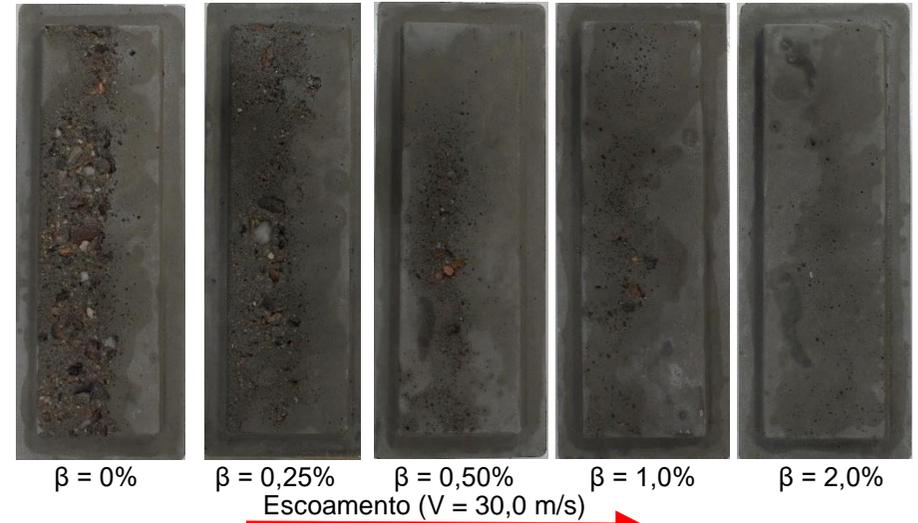


Figura G- 3: Blocos de concreto de relação a/c= 0,50, após 4 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do USBR para diferentes β

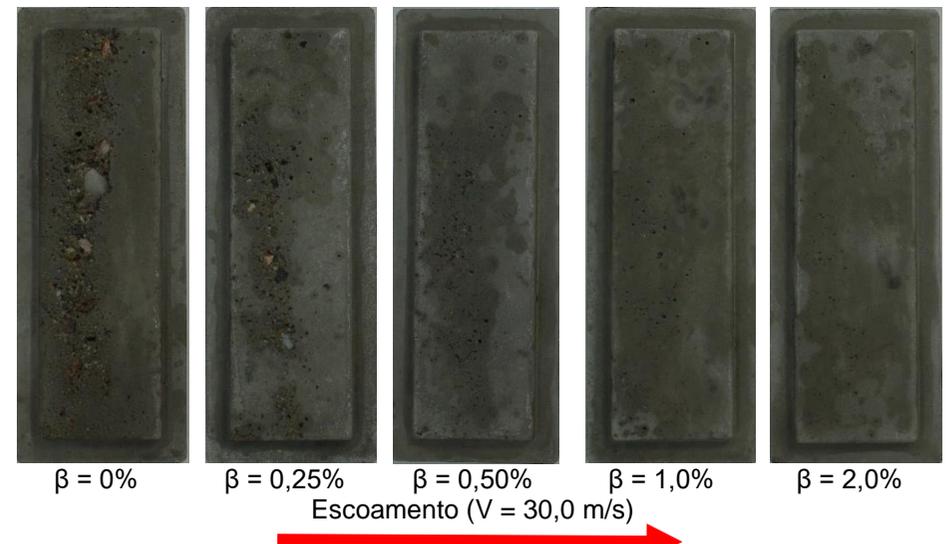


Figura G- 4: Blocos de concreto de relação a/c= 0,65, após 4 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do USBR para diferentes β .

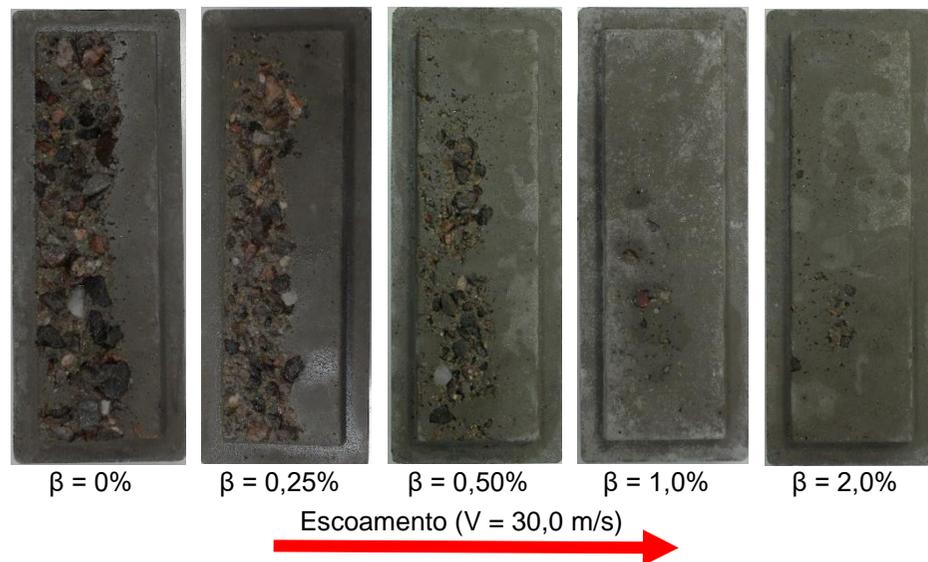


Figura G- 5: Blocos de concreto de relação $a/c= 0,70$, após 4 horas de ensaios no dispositivo de cavitação do USBR para diferentes β .

APÊNDICE H - Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min, durante os ensaios de 2h de exposição dos blocos de concreto ao dispositivo de cavitação do LOH.

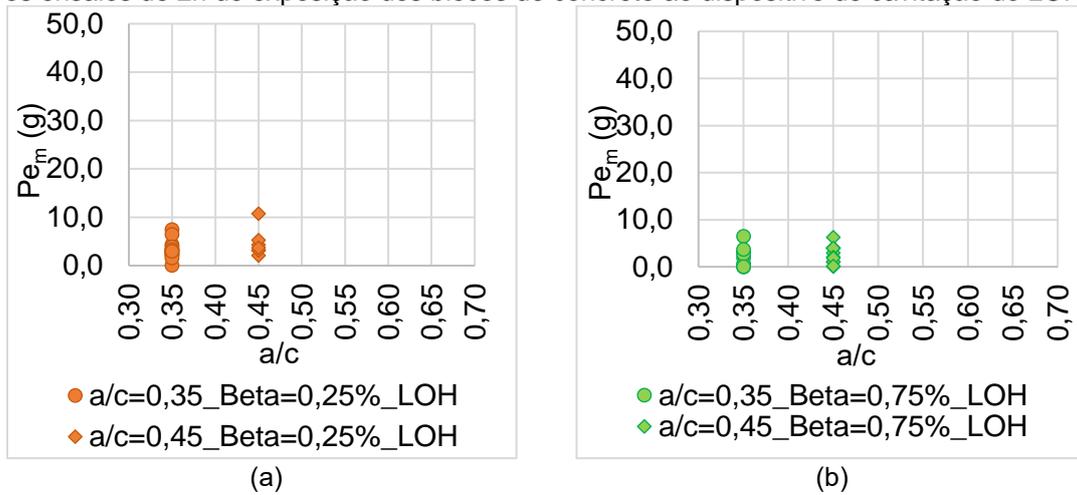


Figura H- 1: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 0,25%, e; (b) 0,75%.

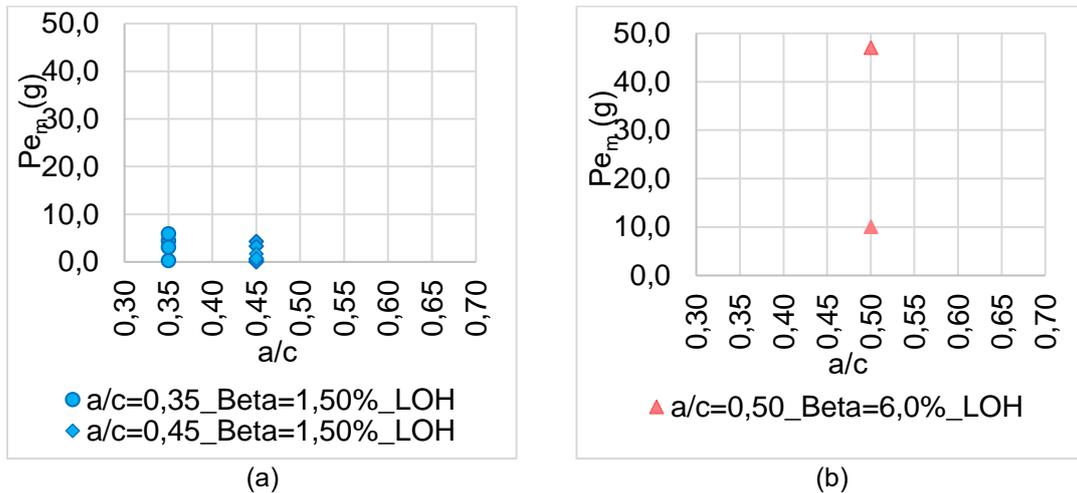


Figura H- 2: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de (a) 1,50%, e; (b) 6,0%.

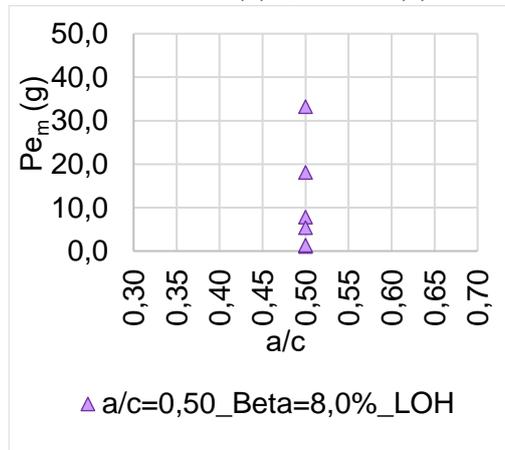


Figura H- 3: Resultados das perdas de massa registradas nos intervalos de 30 min. durante os ensaios de 2h de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de ar de 8,0%.

APÊNDICE I - Resultados das perdas de massa registradas para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, para as demandas relativas de 0,25, 0,50; 0,75; 1,0; 1,50; 6,0 e 8,0%.

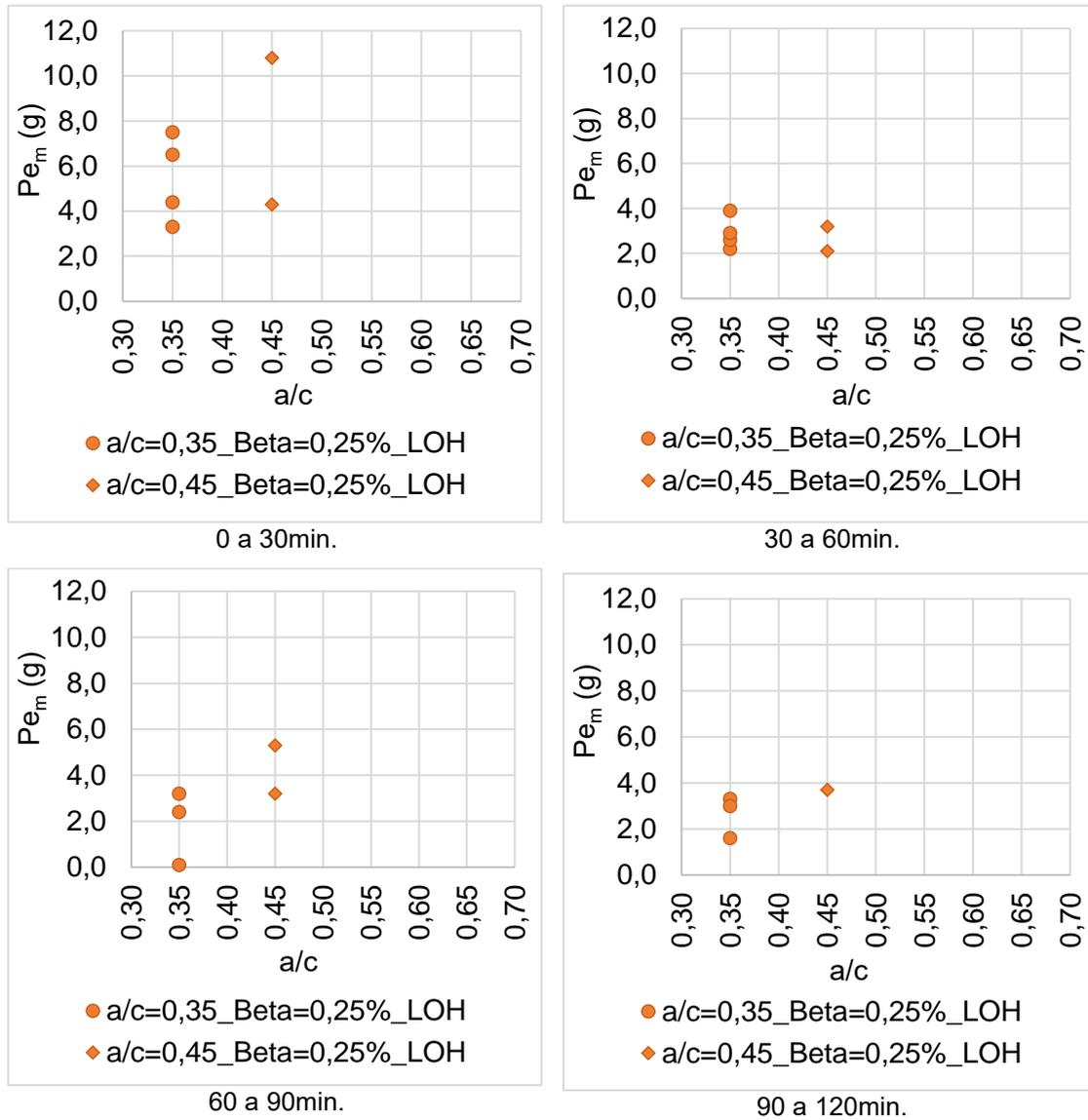


Figura I - 1: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 0,25%.

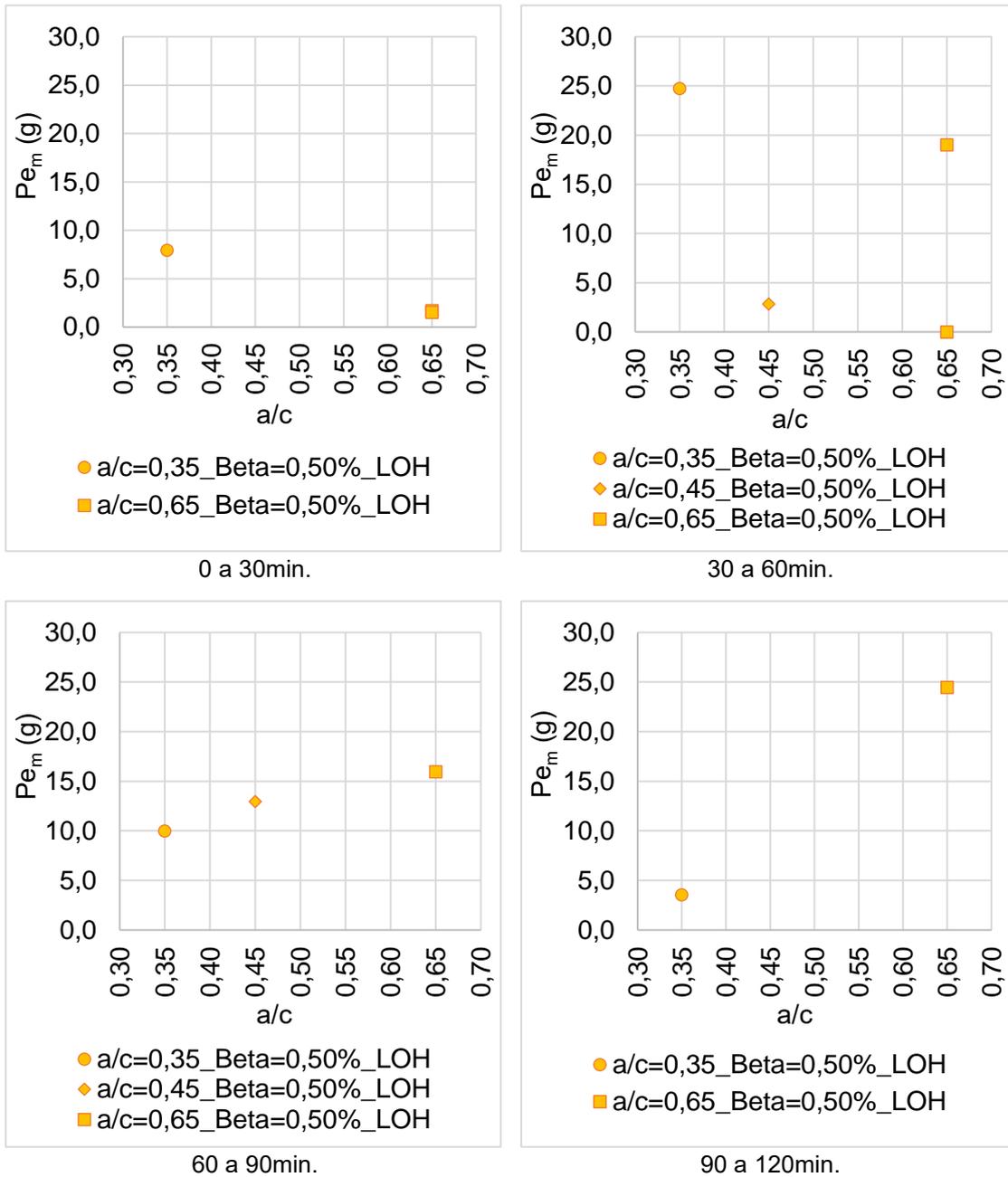


Figura I - 2: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 0,50%.

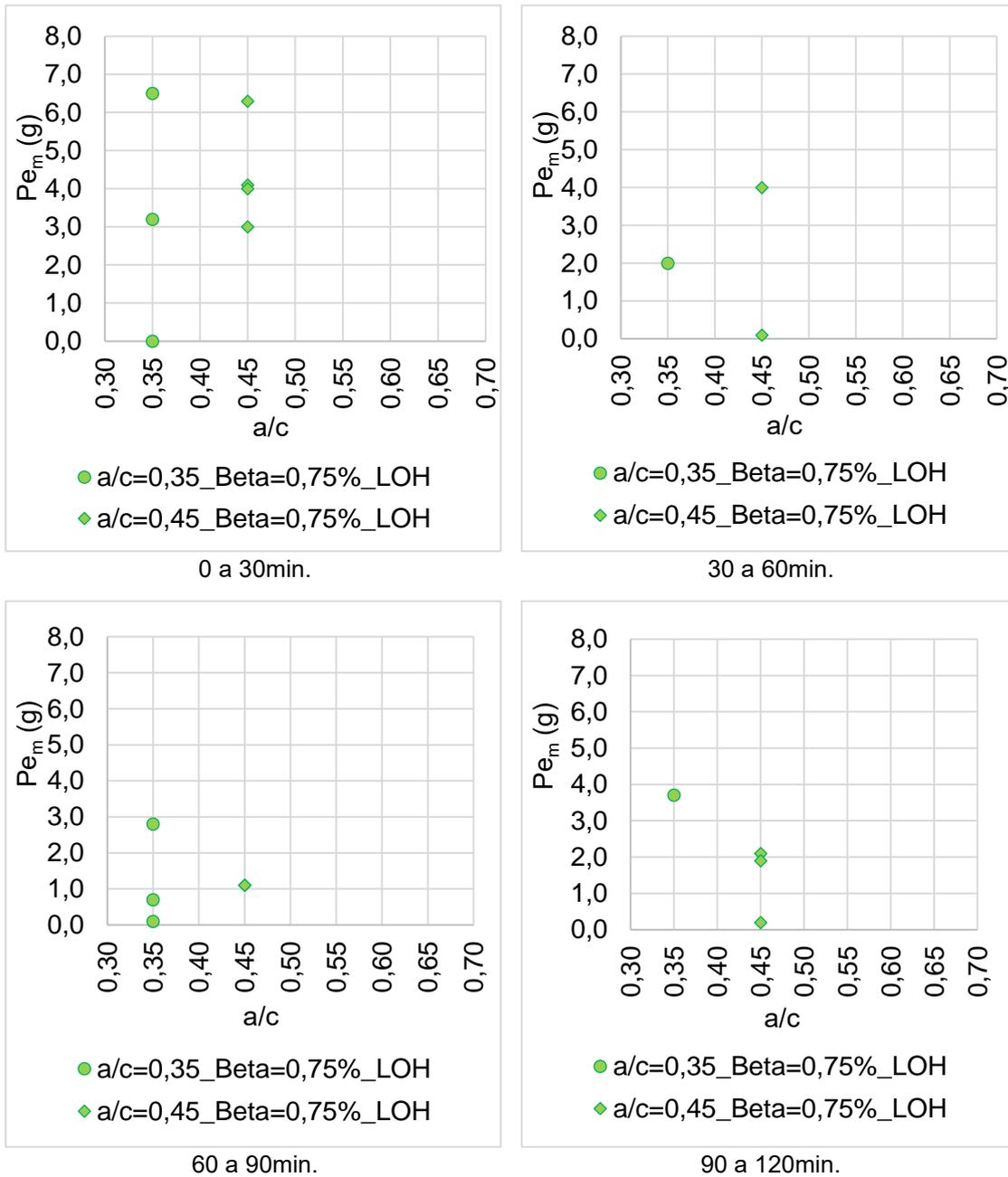


Figura I - 3: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 0,75%.

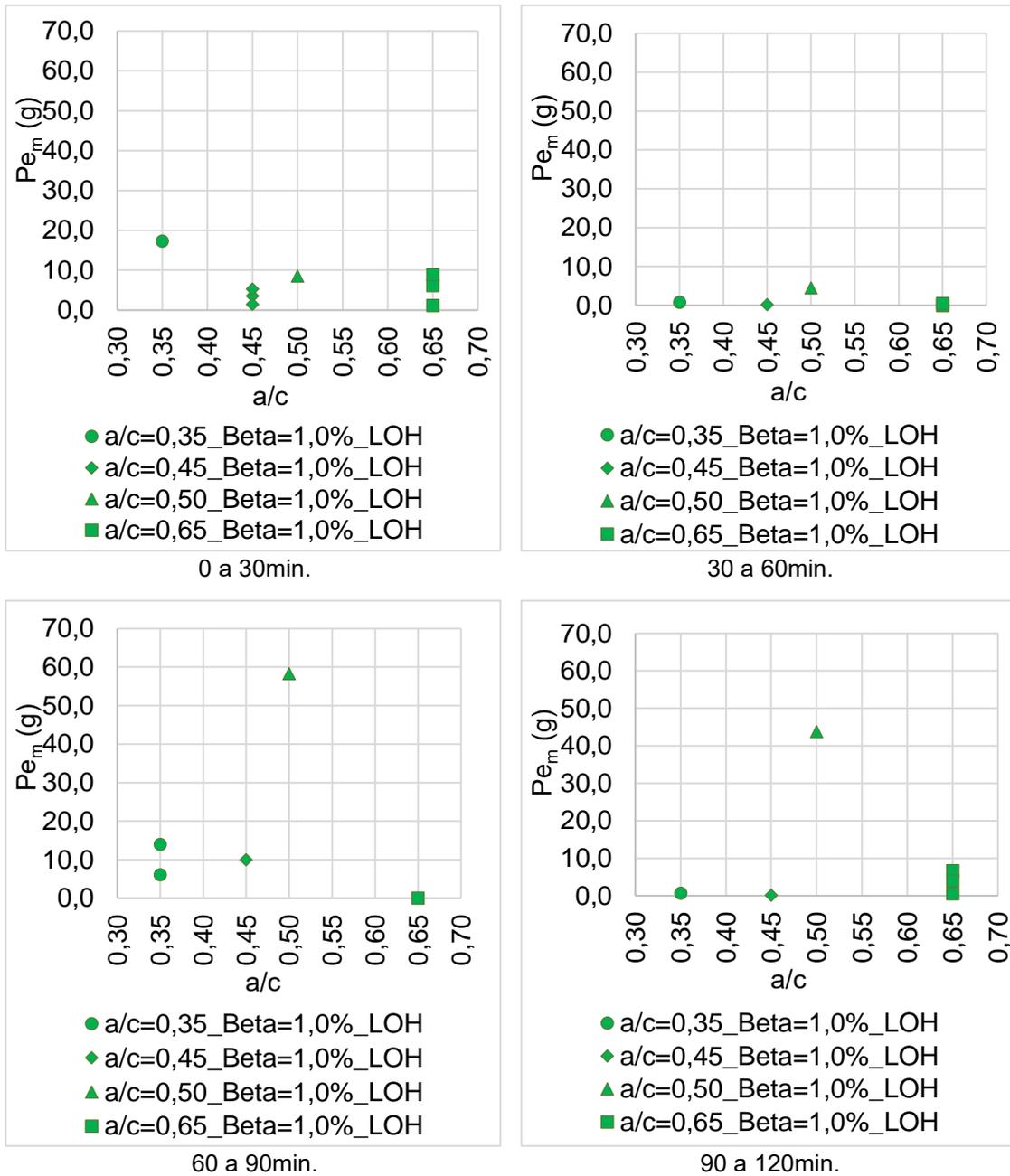


Figura I - 4: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 1,0%.

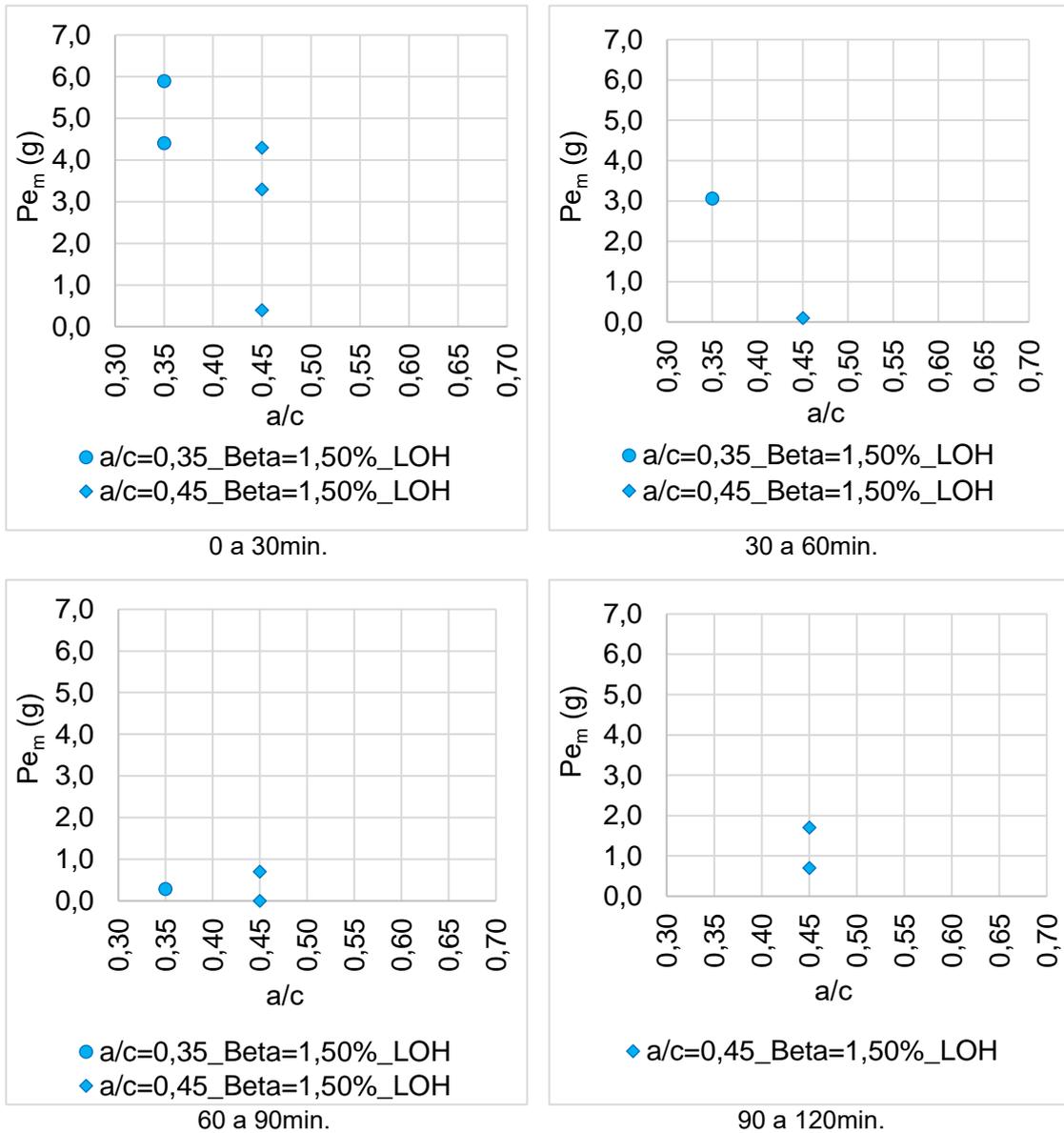
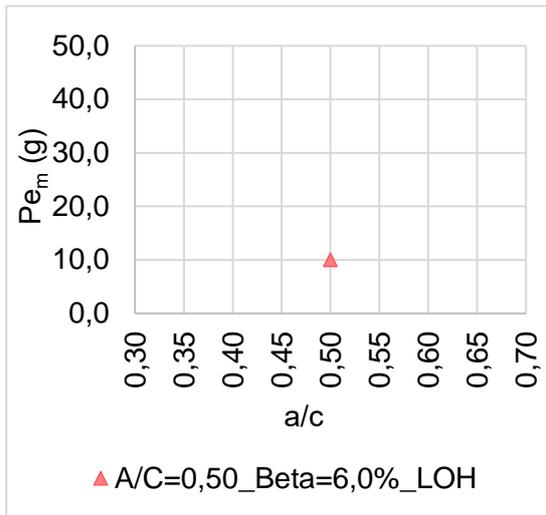
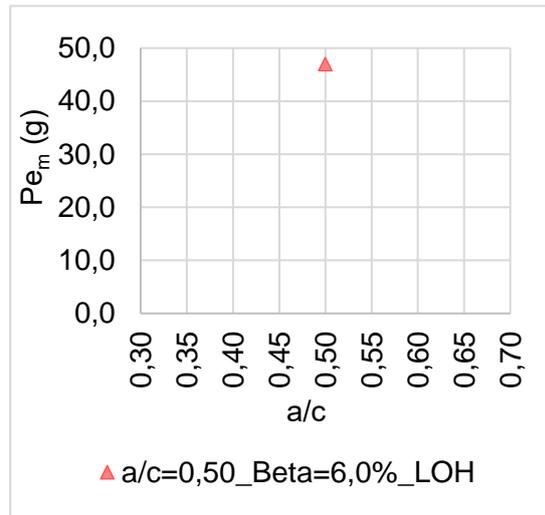


Figura I - 5: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 1,50%.

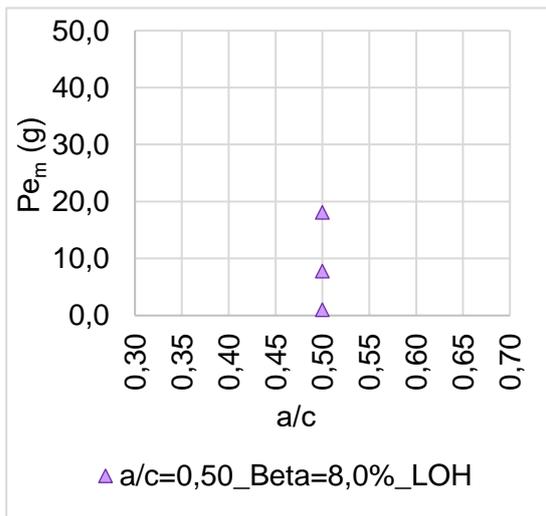


60 a 90min.

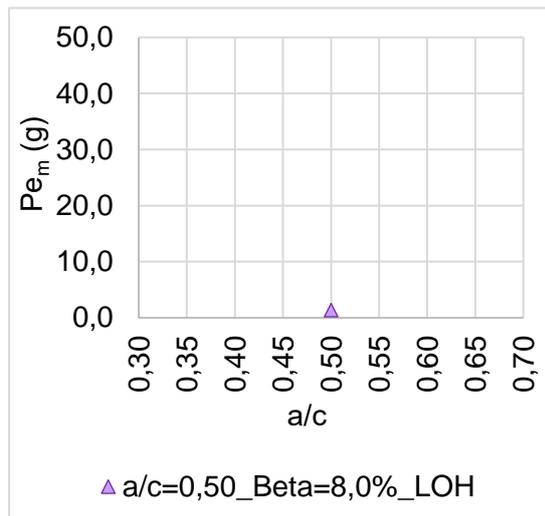


90 a 120min.

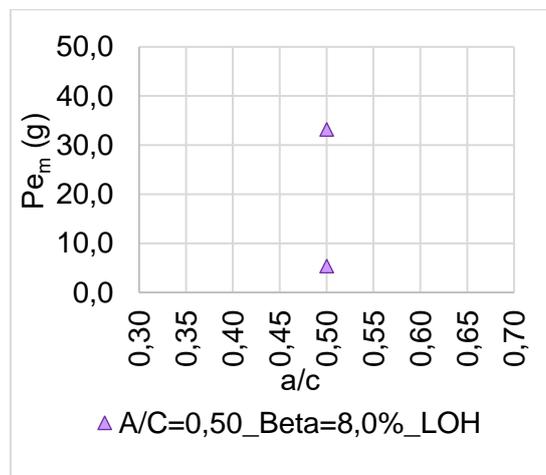
Figura I - 6: Resultados das perdas de massa analisados em ordem cronológica de ocorrência para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 6,0%.



0 a 30min.



30 a 60min.



60 a 90min.

Figura I - 7: Resultados das perdas de massa registradas para os diferentes intervalos de tempo de exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, demanda relativa de ar de 8,0%.

APÊNDICE J - Comparativo entre as perdas de massa totais por minuto de ensaio extraídas dos blocos de concreto, após exposição ao dispositivo de cavitação do LOH, β de 0,75; 1,50; 6,0 e 8,0%.³⁵

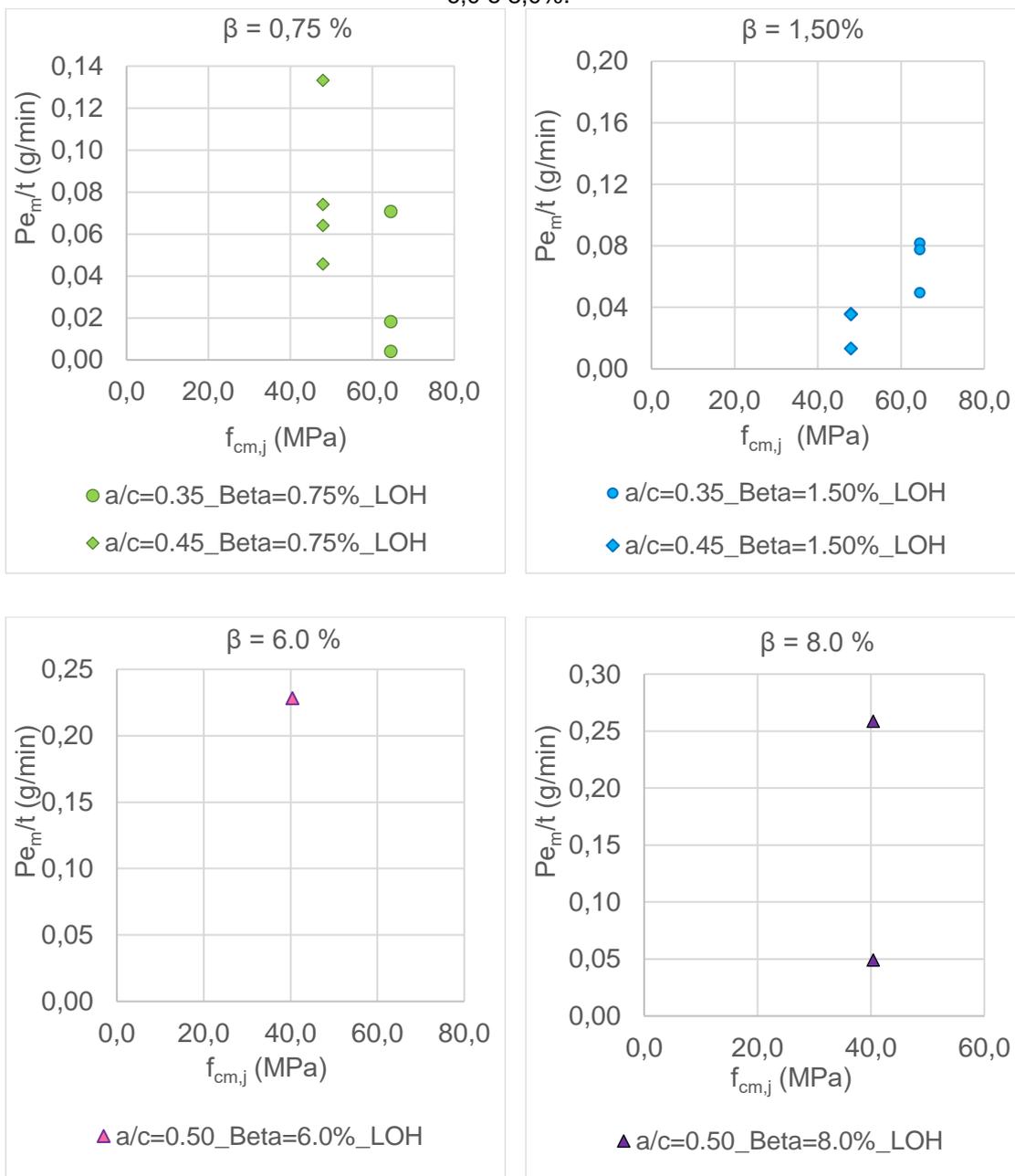


Figura J- 1 :Comparativo entre as perdas de massa totais por minuto de ensaio extraídas dos blocos de concreto, após exposição aos dispositivos de cavitação do LOH e do USBR.

³⁵ As resistências médias à compressão representativas dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS são referentes aos $f_{cm,j}$ obtidos aos 91 dias de cura.

APÊNDICE K - Resultados dos volumes máximos erodidos ($V_{e_{máx.}}$) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para os coeficientes β de 0,75 e 2,0% de ar.³⁶

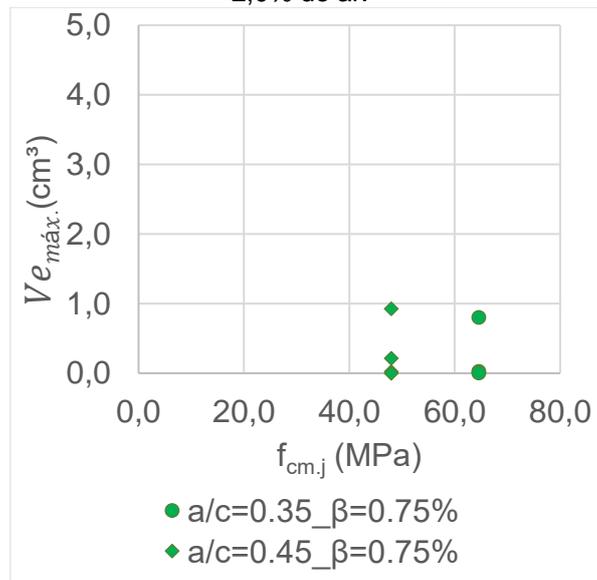


Figura K- 1: Volumes máximos erodidos ($V_{e_{máx.}}$) x resistência média a compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para $\beta = 0,75\%$ de ar.

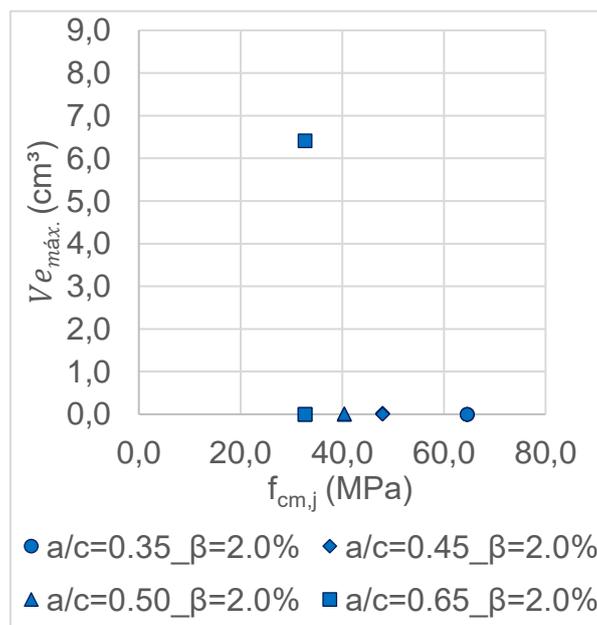


Figura K- 2: Volumes máximos erodidos ($V_{e_{máx.}}$) x resistência média a compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para $\beta = 2,0\%$ de ar.

³⁶ As resistências médias à compressão representativas dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS são referentes aos $f_{cm,j}$ obtidos aos 91 dias de cura.

APÊNDICE L - Resultados das profundidades máximas dos danos (hmáx.) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), extraídos dos blocos de concreto do LOH, para os coeficientes β de 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0 e 2,0% de ar.³⁷

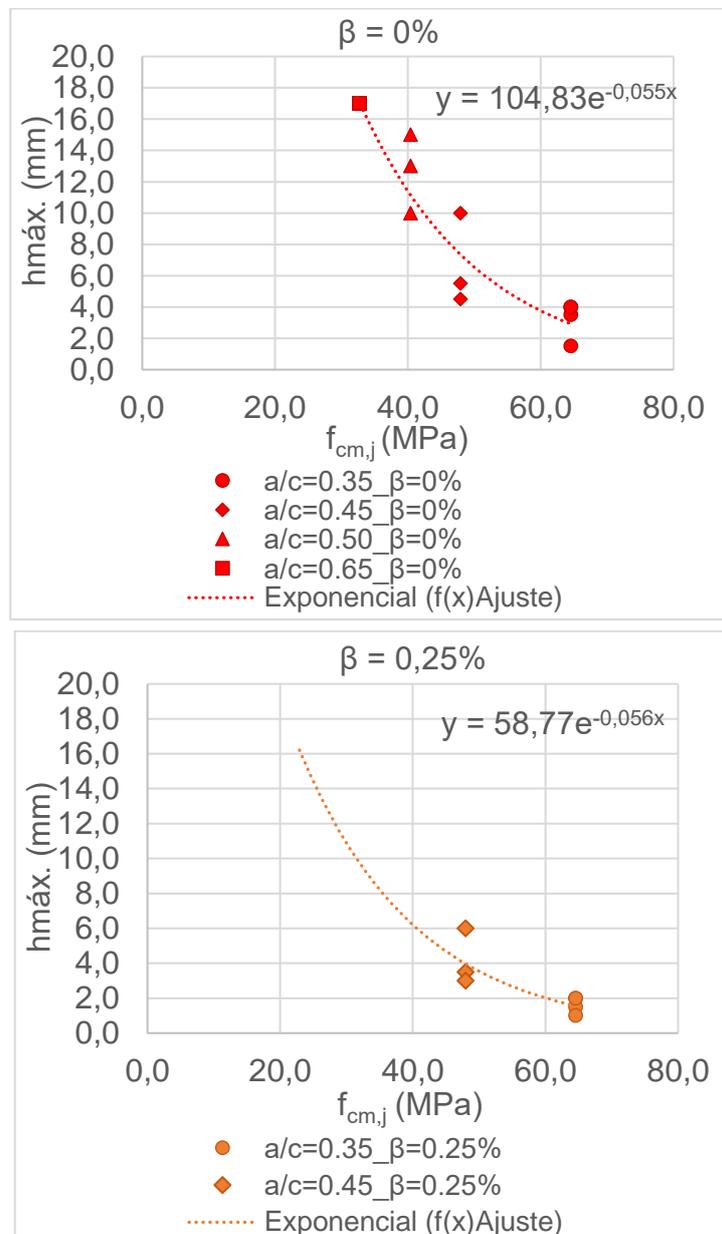


Figura L - 1: Resultados das profundidades máximas dos danos (hmáx.) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), blocos de concreto do LOH, para diferentes β .

³⁷ As resistências médias à compressão representativas dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS são referentes aos $f_{cm,j}$ obtidos aos 91 dias de cura.

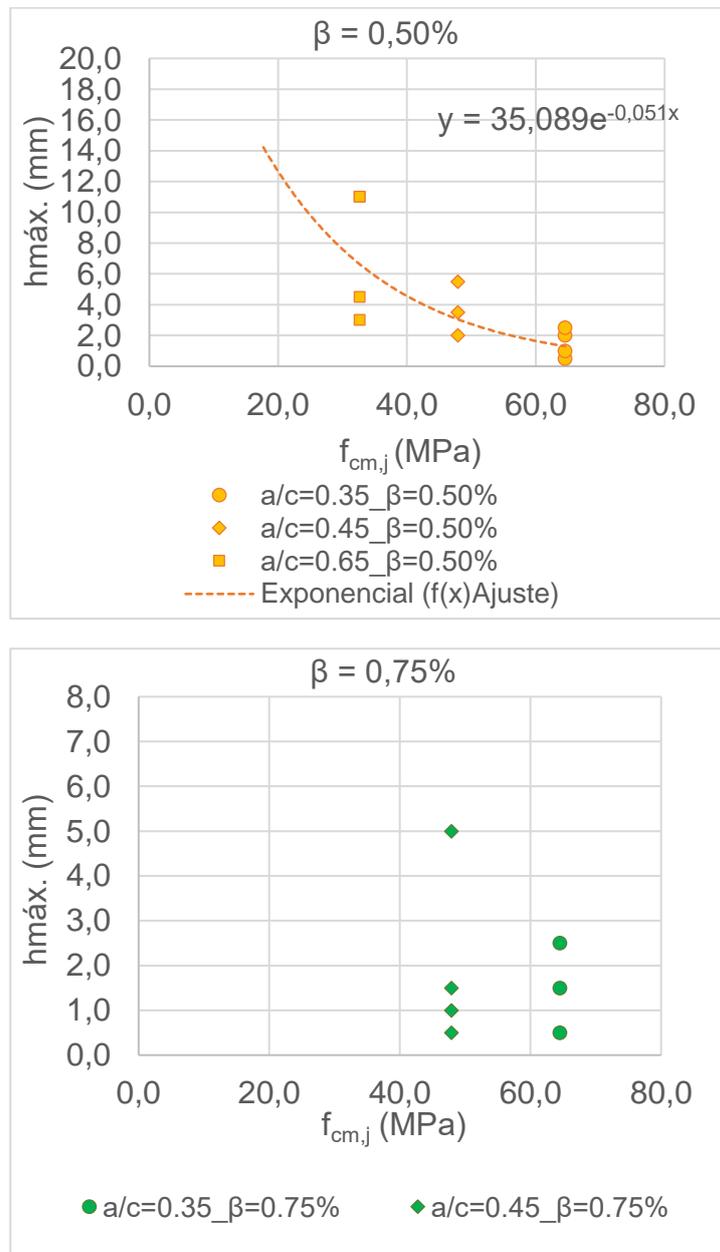


Figura L - 2: Resultados das profundidades máximas dos danos (hmáx.) x resistência média à compressão ($f_{cm,j}$), blocos de concreto do LOH, para diferentes β .³⁸

³⁸ As resistências médias à compressão representativas dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS são referentes aos $f_{cm,j}$ obtidos aos 91 dias de cura.

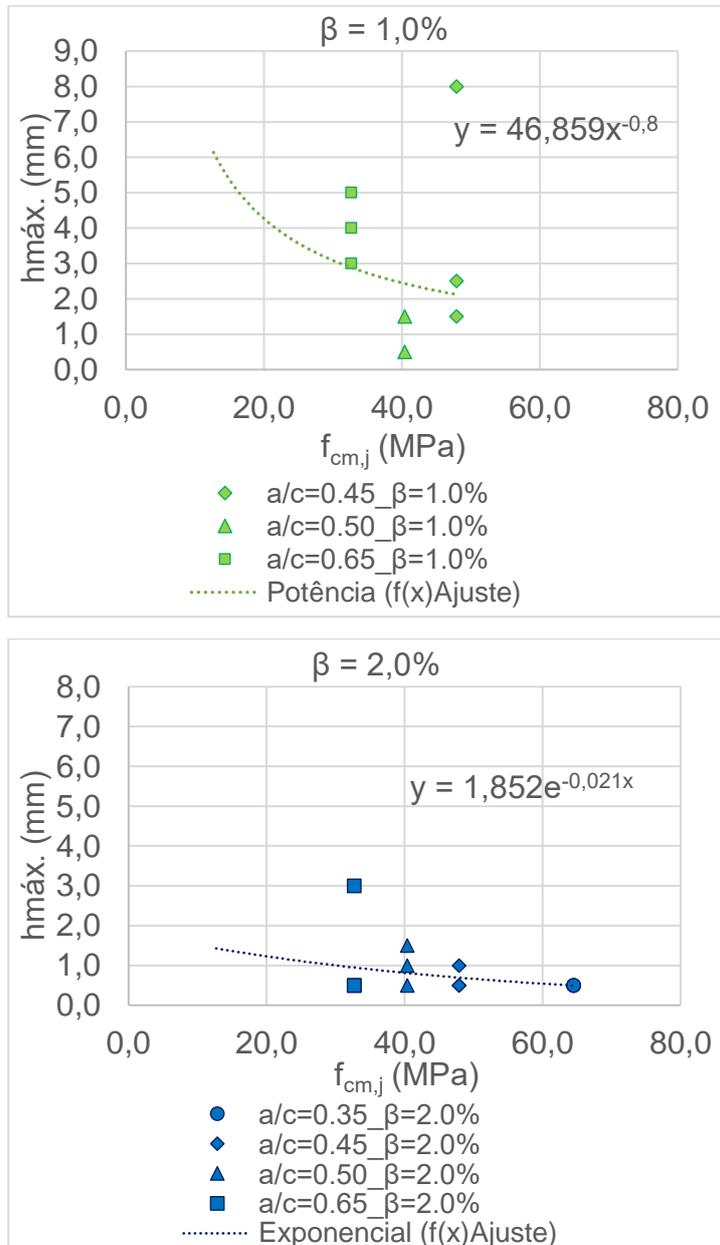


Figura L - 3: Resultados das profundidades máximas dos danos (hmáx.) x resistência média à compressão (f_{cm,j}), blocos de concreto do LOH, para diferentes β³⁹.

³⁹ As resistências médias à compressão representativas dos concretos ensaiados no LOH/UFRGS são referentes aos f_{cm,j} obtidos aos 91 dias de cura.