



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E ENERGÉTICOS



Danilo Lima Matias

**ESTUDO DA EROÇÃO EM SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS DE
CONCRETO POR SÓLIDOS DISPERSOS EM ÁGUA**

Campinas/SP

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E ENERGÉTICOS



Danilo Lima Matias

**ESTUDO DA EROÇÃO EM SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS DE
CONCRETO POR SÓLIDOS DISPERSOS EM ÁGUA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil** à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho

Campinas/SP

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

M427e Matias, Danilo Lima, 1997-
Estudo da erosão em superfícies hidráulicas de concreto por sólidos dispersos em água / Danilo Lima Matias. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: José Gilberto Dalfré Filho.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Erosão. 2. Estruturas hidráulicas. 3. Água. 4. Barragens. I. Dalfré Filho, José Gilberto, 1976-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Study of erosion on concrete hydraulical surfaces by water-solid mixture

Palavras-chave em inglês:

Erosion

Hydraulics

Water

Dams

Titulação: Bacharel em Engenharia Civil

Banca examinadora:

José Giolberto Dalfré Filho

Vassiliki Terezinha Galvão Boulomytis

André Luis Sotero Salustiano Martim

Data de entrega do trabalho definitivo: 05-12-2019

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho a meus pais, Lindon e Dalva, pelo apoio incondicional através de toda a minha vida; a minhas avós Lili e Marlene, por me inspirarem e serem exemplos de força e dedicação; e aos meus queridos amigos que estiveram ao meu lado em todos os desafios da graduação, Tássya, Lucas e Afonso.

AGRADECIMENTOS

Para a composição desse trabalho, agradeço primeiramente ao professor José Gilberto Dalfré Filho, pela orientação e pelos ensinamentos durante todo o processo, incluindo o incentivo e a inspiração para dedicar-me à área de Recursos Hídricos.

Agradeço ao técnico do Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, Marcelo Balbino, pela paciência, pelo apoio na condução dos ensaios de erosão e, principalmente, por ensinar que a falha faz parte do processo científico e que o importante é seguir tentando, experimentando e estudando até que o trabalho comece a dar frutos.

Faço menção aos demais professores que ofereceram apoio e valiosos ensinamentos durante essa etapa da graduação, mostrando os caminhos possíveis a serem conquistados: professores André Sotero, Luiz Vieira, Adriano Tonetti e Luana Mattos.

Expresso minha gratidão à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP e ao CNPq, que viabilizaram a execução dessa pesquisa, oferecendo a infraestrutura e o suporte necessários.

É importante destacar também a contribuição de Sílvia Brunherotto e Ariadni Rocha, por me apoiarem em conciliar as atividades de estágio com as do presente trabalho, ensinando sempre importantes valores para minha vida profissional e pessoal.

Por fim, deixo o agradecimento a meus pais, Lindon e Dalva, por serem companheiros de longa data, incentivando-me da conquista mais simples, como conseguir dar meus primeiros passos, a aquelas mais exigentes como alcançar o sonho da graduação em Engenharia Civil.

Muito obrigado!

RESUMO

A erosão de superfícies hidráulicas de concreto pela mistura água-sólido tem sido um dos problemas frequentes em estruturas de usinas hidrelétricas e outros barramentos. Com a alteração da ocupação das bacias hidrográficas e a intensificação das obras de regularização fluvial, esses processos podem ser agravados, visto que mais material sólido tende a ser lançado aos corpos hídricos e a sua capacidade de transporte é ampliada, o que aumenta a susceptibilidade à erosão das superfícies hidráulicas. Por exemplo, na região Norte brasileira, em especial na bacia do rio Madeira, os corpos de água apresentam um intenso carreamento de material sólido, que é característico desta bacia. Assim, é essencial determinar a composição do concreto que deve ser usado na construção de novos empreendimentos ou no reparo dos existentes, visando o melhor aproveitamento em termos de custos e de desempenho do material. Para estudar tal fenômeno, o protótipo de um tanque baseado na ASTM C1138M-12 (1989, 2012) foi construído buscando otimizar o ensaio da norma no sentido de avaliar de maneira mais realista a erosão em superfícies hidráulicas de concreto, como nos vertedores e nas bacias de dissipação. O Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido visando utilizar um equipamento comprovadamente satisfatório nos ensaios de erosão pela mistura água-sólido, para agora estudar as variáveis que influenciam a perda de massa do concreto, como a concentração de sedimentos, uma vez que estas concentrações variam sobremaneira nas bacias hidrográficas onde o empreendimento se insere.

Palavras-chave: erosão, mistura água-sólido, superfícies hidráulicas, empreendimentos.

ABSTRACT

The erosion of concrete hydraulic surfaces by water-solid mixture is a frequent issue on hydroelectrical plants and other dams. With the change on hydrographical basins occupation and the increase of fluvial regularization works, these processes may be enhanced, given the increase of sediments taken to rivers and the improvement of the transport capacity, also increasing the susceptibilities to erosion of hydraulic surfaces. For an example, on Brazilian North Region, specially the river Madeira basin, the rivers present an intense sediment flow, characteristic of those basins. This way, it is essential to determine the concrete composition to be used in the construction of new dams or in the repairs of existing ones, looking for the best cost and material performance. To study this phenomenon, a prototype of a tank based on ASTM C1138M-12 (1989, 2012) was built to optimize the standard experiment, evaluating the concrete hydraulic structures erosion on a more realistic way, as it happens in spillways and energy dissipation basins. This study was developed aiming to apply a satisfactory equipment to study the important variables of the erosion process, as the influence of different solid concentrations on water, once this concentrations variate on the river basins on which the dam is inserted.

Keywords: erosion, solid-water mixture, hydraulic surfaces, enterprises.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Participação das fontes de energia na Matriz Elétrica Brasileira em 2018. Fonte: EPE (2019) 11
- Figura 2.** Desenho esquemático do processo de erosão de superfícies hidráulicas de concreto. Fonte: LIU, YEN & HSU (2006) 13
- Figura 3.** Distribuição de velocidades e vetores sobre um plano vertical equidistante de dois defletores adjacentes para dois distintos valores de distância ao fundo do tanque. A velocidade de rotação é 600 rpm. O corte AA e a área potencialmente sujeita a erosão ($\Phi > 30^\circ$) são destacadas. Fonte: MALAVASI (2013) 17
- Figura 4.** Comparação qualitativa dos resultados numérico e experimental. Fonte: BRANCO (2018) 18
- Figura 5.** Comparação quantitativa dos resultados numérico e experimental. Fonte: BRANCO (2018) 18
- Figura 6.** Gráfico de perda de massa relativa em função do tempo para corpo de prova de concreto de alta resistência. Fonte: BRANCO (2018) 19
- Figura 7.** Demarcação visual das áreas de maior concentração da erosão nas amostras de concreto de alta resistência. Fonte: BRANCO (2018) 19
- Figura 8.** Linhas de fluxo e trajetória das partículas simuladas por CFD para metade de um jato de incidência direta. (a) Linhas de fluxo de ar, (b) Trajetória das partículas relativas ao fluxo de ar, (c) Linhas de fluxo de água, (d) Trajetória das partículas correspondentes ao fluxo de água. Fonte: MANSOURI (2013) 21
- Figura 9.** Resultados do teste de resistência à abrasão do material de reparo com sílica ativa. (a) Espécime após o teste; (b) Gráfico esquemático em 3D da erosão causada no ensaio de resistência à abrasão (método submerso). Fonte: GALVÃO *et al.* (2012) 22
- Figura 10.** Taxa de erosão das amostras (g/h) em função do ângulo de impacto, com a variação da relação água-cimento das amostras entre $w/c = 0,28$ e $w/c = 0,50$ Fonte: LIU *et al.* (2012). 23
- Figura 11.** Imagens da superfície de amostras após erosão, com $w/c = 0,36$, ângulo de impacto = 45° e diâmetro característico dos sedimentos a) 0,6 mm; b) 2,5 mm; c) 5,0 mm Fonte: LIU *et al.* (2012). 23
- Figura 12.** Decrementos relativos de massa das amostras com a variação da

relação água-cimento entre $w/c = 0,4$ e $w/c = 0,6$. Fonte: HORSZCZARUK (2004)	24
Figura 13. Equipamento utilizado nos ensaios de erosão com detalhes do tanque e rotor. Fonte: Acervo pessoal	25
Figura 14. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.	26
Figura 15. Ruptura de corpo de prova de concreto para determinação da resistência à compressão axial. Fonte: Acervo pessoal	28
Figura 16. Corpos de prova após a ruptura em prensa hidráulica. Fonte: Acervo pessoal.	28
Figura 17. Gráfico de tensão versus deformação do primeiro conjunto de amostras concretado.	30
Figura 18. Gráfico de tensão versus deformação do segundo conjunto de amostras concretado.	31
Figura 19. Equipamento de ensaio, montagem proposta por Branco (2018) (à esquerda) e montagem do experimento no presente trabalho (à direita). Fonte: Acervo pessoal	31
Figura 20. Equipamentos auxiliares para desenvolvimento do trabalho, a saber, peneiras granulométricas (à esquerda) e balança (centro), dentro Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos. Fonte: Acervo pessoal	32
Figura 21. Medição da massa para corpo de prova na situação de saturação inicial. Fonte: Acervo pessoal	32
Figura 22. Evolução da perda de massa relativa da amostra 1 de concreto 30 MPa para rotação de 600 rpm.	33
Figura 23. Evolução da perda de massa relativa da amostra 2 de concreto 30 Mpa para rotação de 600 rpm.	34
Figura 24. Comparação visual das áreas de concentração do processo erosivo em amostra de concreto 30 MPa a) após 6h; b) após 96h. Fonte: Acervo pessoal	35
Figura 25. Exemplo de modelo digitalizado da superfície do corpo de prova Fonte: Acervo pessoal	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Traço em massa empregado para amostras de concreto.....	27
Tabela 2. Resultados da resistência mecânica das amostras de concreto em kgf/cm ²	30
Tabela 3. Medições de massa (em quilogramas) para as amostras ensaiadas ..	33
Tabela 4. Medições de massa (em quilogramas) para amostras de concreto Tipo II	
Fonte: adaptada de BRANCO (2018)	34

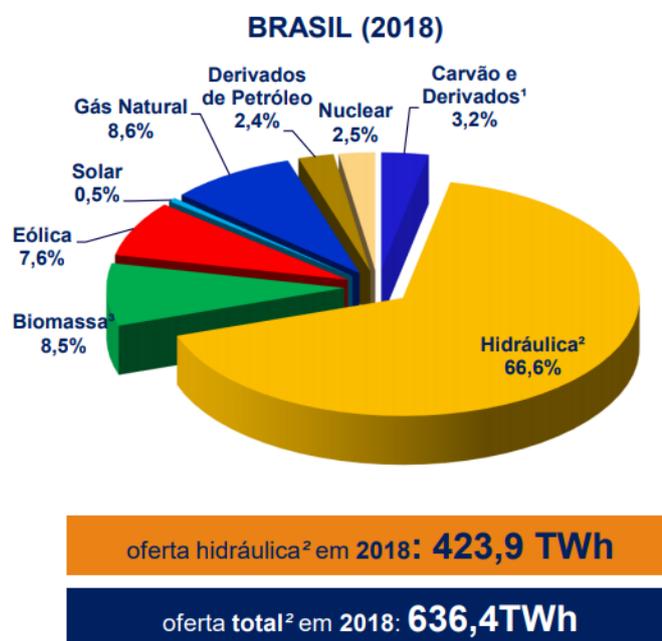
SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A energia hidrelétrica é, globalmente, a principal fonte renovável de geração de eletricidade e, de acordo com o Water Energy Council (2016), usinas hidrelétricas fornecem 71% de toda a energia renovável no mundo. Em 2016, dentre todas as fontes, a hidroeletricidade foi responsável por 16,4% da matriz mundial. O relatório do Water Energy Council (2016) ainda indica que a capacidade instalada total cresceu 39% de 2005 a 2015, concentrando-se nos mercados emergentes, onde a criação de usinas hidrelétricas viabiliza, entre outros, os serviços de fornecimento de água. No Brasil, essa modalidade de geração de energia é predominante, mesmo em cenários de escassez hídrica. Segundo o Balanço Energético Nacional (2019), em 2018 a matriz hidráulica representou 66,6% da oferta interna de energia elétrica, representando 423,9 TWh, parcela aproximadamente seis vezes maior que o gás natural, responsável pela segunda maior contribuição (Figura 1).

Figura 1. Participação das fontes de energia na Matriz Elétrica Brasileira em 2018. Fonte: EPE (2019).



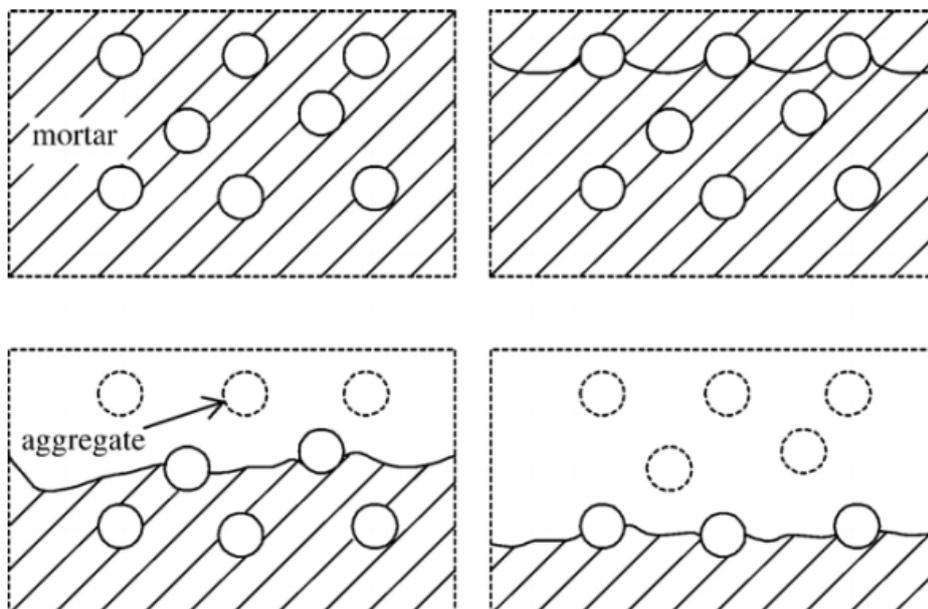
Todavia, como discutido por Branco *et al.* (2017), usinas hidrelétricas dispõem de uma série de estruturas de descarga em concreto, como vertedores e bacias de

dissipação, pelas quais a água escoava carreando uma grande quantidade de sólidos, dada a dinâmica do transporte de sedimentos, o que torna essas estruturas suscetíveis à erosão da superfície. Este é um importante problema, uma vez que os custos de reparo em uma estrutura hidráulica em funcionamento são muito altos e a operação da barragem pode estar comprometida durante os períodos de manutenção. Considera-se também que, como agravante desse cenário para obras existentes, tem-se ocorrido um processo constante de intensificação do aporte de sedimentos nos corpos d'água em função da alteração na ocupação das bacias hidrográficas, incrementando ainda mais a probabilidade de ocorrência de processos erosivos. Desta forma, é imprescindível caracterizar corretamente a composição e, ademais, a resistência dos concretos a serem adotados nas superfícies hidráulicas.

Assim, pode-se dizer que a erosão por mistura água-sólido é um dos principais problemas em sistemas hidráulicos com transporte de fluidos e de partículas sólidas. Este processo pode ser entendido como a desintegração progressiva do material causada por sólidos, areia, cascalho, gelo ou detritos transportados pela água, conforme definido por Graham (1998). Esse autor mostra que as estruturas hidráulicas apesar de suportarem o desgaste causado pela mistura água-sólido, geralmente não estão preparadas para eventos em que maiores quantidades de sólidos são carregadas, algo comum no cenário atual de modificações intensas das bacias hidrográficas. Tatro (2007) ainda apresenta uma série de estruturas hidráulicas que sofreram erosão, evidenciando que em 55,7% dos casos houve erosão pela ação da mistura água-sólido, 25,3% por uma ação combinada da mistura água-sólido e cavitação, 15,2% por cavitação e 1,3% por ataques químicos. Ou seja, o transporte de sedimentos contribui para a erosão desse tipo de estrutura em mais de 80% dos casos levantados pelo autor.

De acordo com Liu, Yen e Hsu (2006), a perda de massa causada pela erosão abrasiva em concreto hidráulico é um processo de três estágios. Inicialmente, a pressão da água provoca uma descamação da superfície do concreto. Posteriormente, os impactos dos sólidos transportados juntamente com a água resultam na remoção da argamassa e, subsequentemente, exposição dos agregados graúdos. Finalmente, a continuidade deste ciclo acarreta o aprofundamento da erosão (Figura 2).

Figura 2. Desenho esquemático do processo de erosão de superfícies hidráulicas de concreto. Fonte: LIU, YEN & HSU (2006).



Com isso, surge a necessidade de estudar detalhadamente o processo de erosão, buscando não apenas compreendê-lo, mas modelá-lo e ainda equacioná-lo, prevendo seus efeitos. Nesse contexto, diversos autores buscam construir equações para erosão, tanto por métodos empíricos, quanto analíticos e computacionais. Para tanto, reconhecem-se como variáveis relevantes a velocidade, o ângulo e a frequência de impacto das partículas sobre a superfície a ser erodida (MANSOURI, 2015).

Na ASTM, American Society for Testing and Materials, existe uma norma com recomendações para o ensaio de resistência à abrasão do concreto em condição submersa, a ASTM C1138. A partir dela foi desenvolvida, então, uma versão modificada, a ASTM C1138M (2012), para melhor aproximar o mecanismo de erosão ao real, isto é, o impacto de sedimentos usualmente carregados, ao invés de grandes esferas de aço.

A partir da norma adaptada às condições de escoamento fluvial, foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa um novo equipamento para o ensaio de erosão, projetado para aumentar o ângulo de impacto das partículas sólidas, adotando assim um rotor de lâminas inclinado a 45 graus, produzindo um fluxo axial direcionado ao fundo do tanque. Além disso, ao invés das originais 70 esferas de

ação foram adotadas partículas de areia de sílica, correspondendo a uma fração de volume estático de 1%. A distância do rotor do impulsor, ou seja, a sua distância da amostra de concreto também foi ajustada de modo a acelerar o processo de erosão. As simulações preliminares de fase única (MALAVASI et al., 2013) permitiram verificar a eficácia do novo aparelho; posteriormente, foi construído um protótipo no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, em parceria com pesquisadores do Politécnico di Milano. Seu desempenho se mostrou satisfatório, especialmente com alta aproximação dos resultados experimentais e aqueles previstos em simulação na Fluidodinâmica computacional para duas fases, ou seja, partículas sólidas em água desgastando uma amostra de concreto padrão.

Com isso, dentro do que foi discutido, a presente pesquisa se insere buscando estudar a relação entre os resultados de perda de massa do concreto por ensaios de erosão no protótipo idealizado por Malavasi *et al.* (2013) com diferentes concentrações de sólidos. Além disso, numa etapa posterior procura-se caracterizar a resistência do material para emprego em superfície hidráulica, a partir da variação da composição do concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A partir do que foi exposto, dado que a susceptibilidade do concreto à erosão por sólidos carregados pela água é um problema prático, existente em diversas estruturas presentes em barramentos, como vertedores e bacias de dissipação, o presente trabalho mostra-se importante por estudar o comportamento e a resistência do concreto sob essa solicitação. Ademais, o emprego do equipamento protótipo desenvolvido por Malavasi *et al.* (2013) e do procedimento experimental proposto por Branco (2018) contribui para a demonstração da viabilidade desse ensaio enquanto simulação do processo real de erosão, além de expandir a base de dados experimentais para futuros trabalhos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O trabalho possui como objetivo empregar o equipamento protótipo desenvolvido a partir da norma ASTM 1138M (2012) para avaliar a erosão em superfícies hidráulicas de concreto e avaliar a sua resistência em função da concentração de sólidos em água e composição do material. Com isso, é possível realizar a comparação dos resultados com os trabalhos levantados na literatura, com destaque aos de Branco (2018).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Efetuar ensaios de erosão com o equipamento protótipo;
- Avaliar os resultados obtidos em comparação com os aspectos destacados da literatura da área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada em duas frentes principais. Por se tratar de uma pesquisa inserida em um trabalho iniciado em 2013, com a colaboração entre a Unicamp e o Politecnico di Milano, a primeira frente é relativa, então, ao conteúdo desenvolvido dentro do próprio grupo, destacando-se os textos de Malavasi *et al.* (2013), Messa *et al.* (2017) e Branco (2018), além das referências por esses autores utilizadas. De forma complementar, a segunda frente foi focada em levantamento mais amplo, buscando diversos estudos na literatura técnica acerca de erosão em superfícies hidráulicas. Nesse ponto, foi possível agregar principalmente trabalhos da Engenharia Mecânica que possuem vasta aplicabilidade a equipamentos hidráulicos, como rotores de bombas e turbinas, o que amplia ainda mais a fundamentação teórica do trabalho e complementa o entendimento do escopo do problema, evidenciando o impacto do transporte de sedimentos não somente nas estruturas em concreto, como também em todos os equipamentos auxiliares empregados no transporte de água e na geração hidrelétrica.

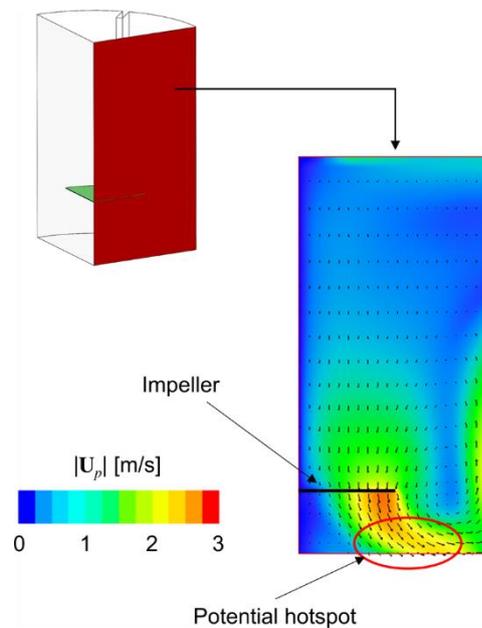
Malavasi *et al.* (2013) relataram a primeira etapa do projeto de cooperação internacional. Simulações numéricas foram feitas preliminarmente ao projeto experimental com o objetivo de maximizar a erosão no fundo do tanque de forma a torná-lo claramente detectável em um tempo menor de teste. Como, para o material cimentício, foi verificado que a erosão é devida principalmente ao ataque normal à superfície, o equipamento foi projetado para aumentar o ângulo de impacto das partículas sólidas. Por esta razão, um rotor de pás inclinadas a 45 graus é empregado, pois este dispositivo produz um fluxo axial direcionado ao fundo do tanque.

A análise combinada de Malavasi *et al.* (2013) sugeriu que a erosão é mais efetiva nas regiões caracterizadas por um ângulo de ataque da partícula sólida suficientemente grande, aliado às maiores magnitudes de velocidade de impacto. De maneira a esclarecer o efeito da variação da distância do rotor ao fundo do tanque no campo de escoamento, a Figura 3 foi construída evidenciando a distribuição do módulo de velocidade sobreposto ao vetor velocidade, num plano vertical equidistante de dois defletores adjacentes para os casos em que as distâncias das pás ao fundo (c) com relação ao diâmetro do tanque (T) variaram de

$c/T=0,16$ e $c/T=0,29$ (em ambos casos, a velocidade de rotação foi 600 rpm).

Figura 3. Distribuição de velocidades e vetores sobre um plano vertical equidistante de dois defletores adjacentes para dois distintos valores de distância ao fundo do tanque. A velocidade de rotação é 600 rpm. O corte AA e a área potencialmente sujeita a erosão ($\Phi > 30^\circ$) são destacadas.

Fonte: MALAVASI (2013)



Para a relação entre a distância das pás ao fundo e o diâmetro do tanque igual a 0,16 ($c/T=0,16$), espera-se erosão mais destacada, pois se caracterizam ângulos de impacto suficientemente grandes e maiores velocidades quando comparados a $c/T=0,29$. O resultado numérico sugeriu que a erosão provavelmente ocorrerá abaixo das extremidades do rotor, onde V e Φ são concomitantemente grandes. Ressalta-se que no procedimento experimental da presente pesquisa é empregada a relação $c/T=0,16$, justamente em função desse resultado, visando maximizar o efeito erosivo.

Os experimentos realizados por Branco (2018) confirmaram as expectativas do modelo numérico, tanto qualitativamente, prevendo a área em que seria maior a erosão, como quantitativamente, com previsões de erosão bastante próximas das encontradas. Essas confirmações estão evidenciadas nas Figuras 4 (aspecto qualitativo) e 5 (quantitativo).

Figura 4. Comparação qualitativa dos resultados numérico e experimental. Fonte: BRANCO (2018)

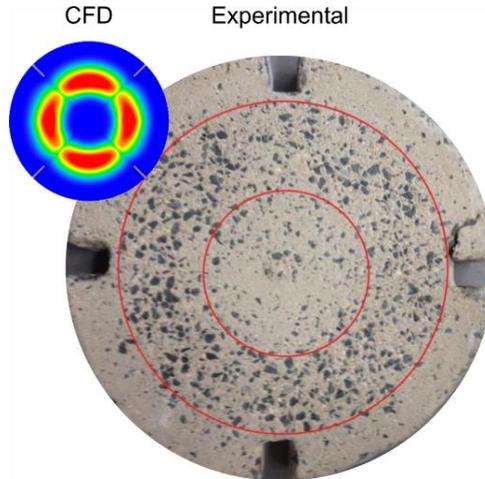


Figura 5. Comparação quantitativa dos resultados numérico e experimental. Fonte: BRANCO (2018)

Comparative

		Comparison Φ [$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$] vs E_0 [g/h]	CFD Ratio	Experimental Ratio	Compatibility
Apparatus Set up	c/T [-]	0,16	2,99	2,56	0,85
		0,29			
	Ω [rpm]	900	3,08	3,00	0,97
		600			
Sample Composition	Material	Concrete I	1,00	17,82	17,82
		Concrete II			
		Mortar	1,00	6,23	6,23
		Concrete I			
		Mortar			
	Concrete II	1,00	110,98	110,98	

A comparação numérica consiste em verificar como a erosão encontrada no modelo experimental está próxima das previsões pela análise com uso de CFD, descrito em Messa *et al.* (2017). Algumas comparações foram feitas, cada uma para diferentes configurações experimentais, considerando a distância, velocidade de rotação e material testado. A distância das pás ao fundo (folga) provavelmente tem uma influência não linear, assim como a velocidade de rotação. Para valor de c/T quase duas vezes maior, a erosão é quase três vezes mais lenta. O mesmo segue para a velocidade de rotação: um aumento de 50% (na velocidade) traz erosão três vezes maior.

De maneira complementar, a dissertação de Branco (2018) também serve

como base metodológica para os ensaios desenvolvidos no presente trabalho, estabelecendo tanto o formato do ensaio em termos dos intervalos de aferição da massa e a referência para comparações visuais e de valores da perda do material compósito por erosão. Esses aspectos são ilustrados pelas Figuras 6 e 7 que apresentam, respectivamente, o gráfico de decremento de massa relativa ($\Delta M / M_0$) para uma das amostras estudadas no tempo de ensaio, e a concentração da área erodida em faixa circular no mesmo tipo de corpo de prova.

Figura 6. Gráfico de perda de massa relativa em função do tempo para corpo de prova de concreto de alta resistência. Fonte: BRANCO (2018)

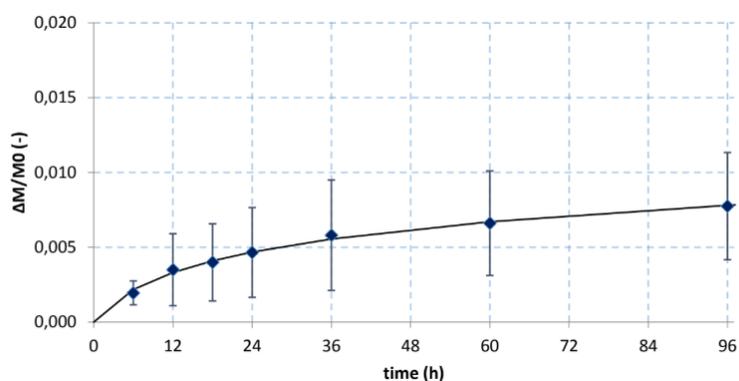
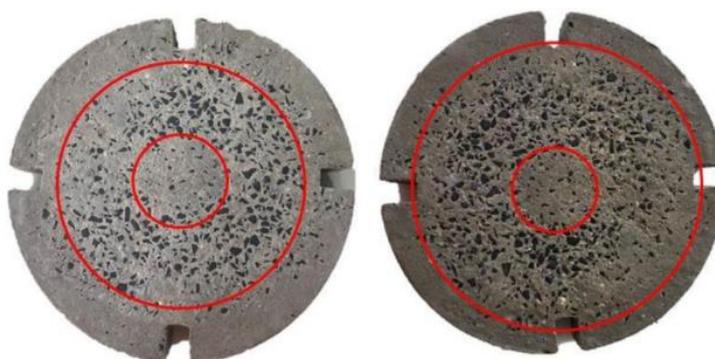


Figura 7. Demarcação visual das áreas de maior concentração da erosão nas amostras de concreto de alta resistência. Fonte: BRANCO (2018)



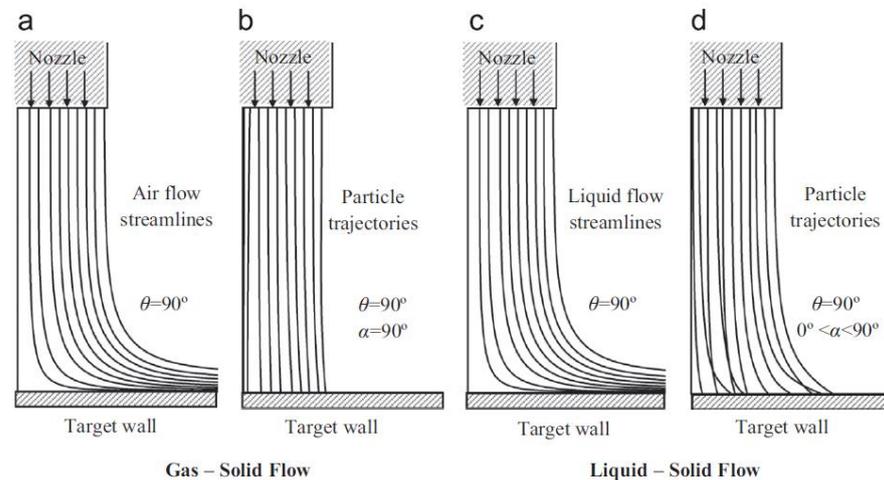
Adicionalmente, foram estudados outros dois textos de Messa & Malvasi (2016 e 2018), os quais aprofundam os temas discutidos, com maior desenvolvimento do uso de CFD na modelagem da erosão e a previsão de seus efeitos.

Dentro do que foi delineado na primeira frente da revisão bibliográfica,

buscou-se, então, ampliar as discussões do grupo de pesquisa através de outros trabalhos que vem sendo feitos na área de erosão por mistura água-sólido. Nesse sentido, destacam-se as contribuições de Mansouri *et al.* (2015), Arabnejad *et al.* (2015), Galvão *et al.* (2012) e Lyczkowski *et al.* (2002), principalmente pela diversidade de propostas metodológicas além da melhor caracterização do fenômeno em estudo, através de múltiplas aplicações. Adicionalmente, os textos de Liu *et al.* (2012) e Horszczaruk (2004) são empregados como bases para o presente estudo, visto que são focados na avaliação da perda de massa de superfícies hidráulicas de concreto, sendo que o primeiro incorpora variações no ângulo de incidência das partículas e na relação água-cimento das amostras para estudar seu efeito na resistência à erosão, e o segundo busca definir um equacionamento teórico capaz de representar o comportamento dos resultados experimentais observados.

O trabalho de Mansouri *et al.* (2015) mostra-se relevante por buscar uma equação que possa representar a profundidade da erosão provocada por impacto de partículas em uma superfície a partir do acoplamento de métodos experimentais com modelagem em CFD (“*Computational Fluid Dynamics*”). Apesar das restrições por ser uma pesquisa focada na Engenharia Mecânica, e, portanto, utilizar materiais metálicos como superfícies-alvo, visando aplicações em componentes industriais, o estudo que foi realizado quanto à influência do ângulo de incidência dos sedimentos e os mecanismos pelos quais há a solitação da superfície da amostra (cisalhamento e impacto), contribui para o entendimento do problema. Nesse estudo ressalta-se também a comparação que é feita entre a mistura água-sólidos e ar-sólidos, demonstrando que a viscosidade da água faz com que, mesmo o fluxo sendo normal à superfície em estudo, as partículas tenham ângulos de impacto inferiores a 90° (Figura 8).

Figura 8. Linhas de fluxo e trajetória das partículas simuladas por CFD para metade de um jato de incidência direta. (a) Linhas de fluxo de ar, (b) Trajetória das partículas relativas ao fluxo de ar, (c) Linhas de fluxo de água, (d) Trajetória das partículas correspondentes ao fluxo de água. Fonte: MANSOURI (2013)



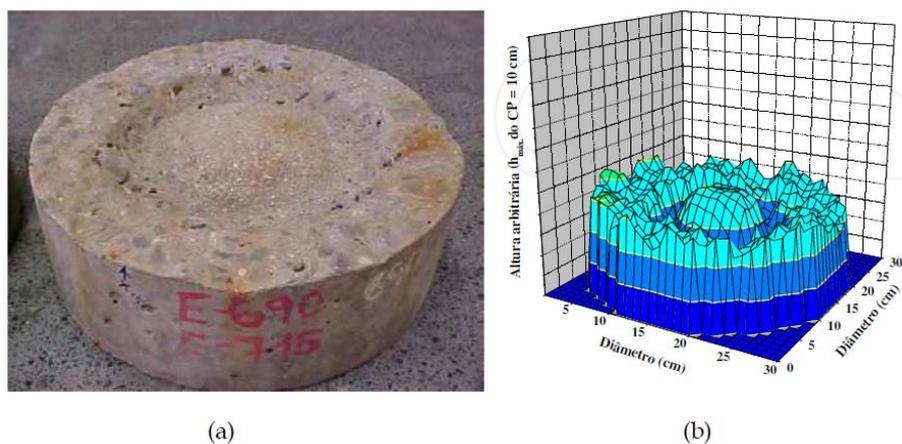
Já a visão de Arabnejad *et al.* (2015) complementa o autor anterior em termos do desenvolvimento da equação para previsão da erosão. Para tanto, a metodologia proposta nesse estudo emprega a erosão utilizando ar comprimido como meio fluido para as partículas de areia, buscando reduzir a influência do fluxo no comportamento dos sedimentos, o que, naturalmente, restringe a comparação dos resultados. Todavia, a modelagem semi-mecanística e a estruturação dos ensaios, principalmente no que tange ao equacionamento utilizado para descrever o comportamento das partículas, demonstra como os resultados experimentais podem ser relacionados com o fenômeno real da erosão.

O artigo de Lyczkowski *et al.* (2002) prossegue na mesma linha dos autores já destacados, buscando validar modelos computacionais em situações de erosão disponíveis na literatura, além de delinear análise crítica quanto às potencialidades do CFD no estudo desse problema. Seu trabalho contribui por aprofundar a conceituação de diversas abordagens para equacionar o escoamento e assim implementar um código computacional capaz de representar fielmente os modelos de erosão. Na conclusão deste estudo, o autor comprova que a degradação da superfície é governada pelo mecanismo de transferência de energia da partícula para o material e utiliza, então, o modelo baseado na teoria cinética de Finnie (1960)

para aperfeiçoar seus resultados. Este trabalho também é focado na erosão de materiais metálicos para aplicações na indústria e engenharia mecânica, porém ainda assim suas considerações apoiam o propósito do estudo.

O texto de Galvão *et al.* (2012) aborda a erosão em superfícies hidráulicas a partir de uma perspectiva prática, com foco em estudos de caso. O autor estuda o vertedor de duas barragens, uma no Estado de São Paulo (caso 1) e outra no Paraná (caso 2), testando a aplicabilidade de diversos tipos de materiais de reparo, em termos de resistência física e química às solicitações do meio. Na Figura 9 apresenta-se um dos corpos de prova ensaiados em laboratório, tendo núcleo com adição de sílica ativa, e concreto semelhante ao da barragem 1 como substrato. Essa amostra foi ensaiada segundo a norma ASTM C1138, porém na versão de 1997, ainda com o uso de esferas de aço.

Figura 9. Resultados do teste de resistência à abrasão do material de reparo com sílica ativa. (a) Espécime após o teste; (b) Gráfico esquemático em 3D da erosão causada no ensaio de resistência à abrasão (método submerso). Fonte: GALVÃO *et al.* (2012).



Prosseguindo com a revisão bibliográfica, identificaram-se ainda dois autores de grande relevância para o embasamento teórico do projeto. Primeiramente, o trabalho de Liu *et al.* (2012) reúne um conjunto de dados experimentais, buscando validar um aparato experimental de jato de água, semelhante ao utilizado por Mansouri *et al.* (2015). O autor estuda principalmente o efeito do ângulo de incidência das partículas sobre a perda de massa, já discutido por Malavasi *et al.* (2013) na concepção do aparato de erosão utilizado na presente

pesquisa, além da influência da relação água-cimento na resistência do concreto (Figura 10) e da concentração e diâmetro característico dos sólidos (Figura 11).

Figura 10. Taxa de erosão das amostras (g/h) em função do ângulo de impacto, com a variação da relação água-cimento das amostras entre $w/c = 0,28$ e $w/c = 0,50$. Fonte: LIU *et al.* (2012).

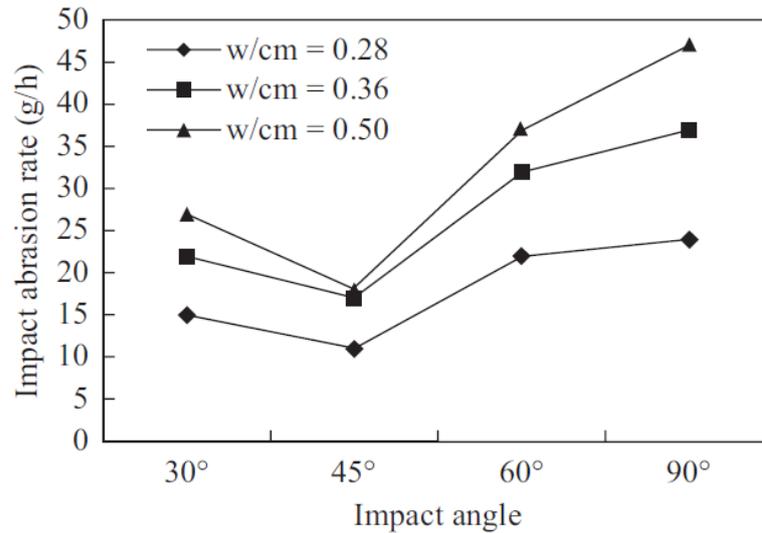


Figura 11. Imagens da superfície de amostras após erosão, com $w/c = 0,36$, ângulo de impacto = 45° e diâmetro característico dos sedimentos a) 0,6 mm; b) 2,5 mm; c) 5,0 mm. Fonte: LIU *et al.* (2012).

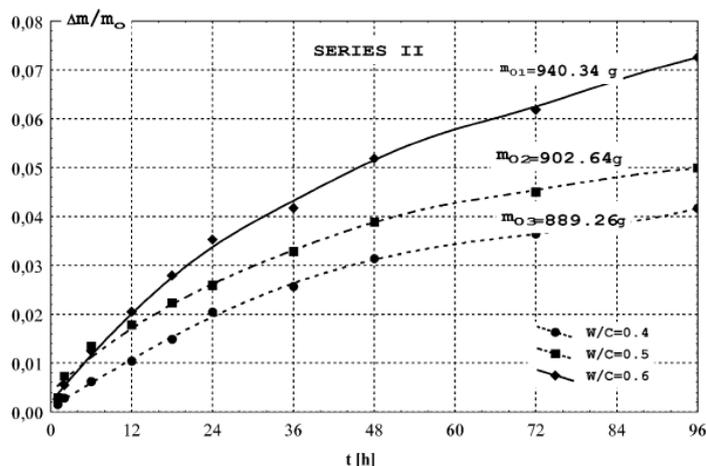


Os resultados apontados por Liu *et al.* (2012) apresentam uma limitação para sua comparação com aqueles obtidos neste trabalho, dado que o equipamento empregado utiliza um jato de água com sedimentos, projetado sobre a superfície dos corpos de prova, possibilitando elevado controle sobre o ângulo de incidência, em contraposição ao processo de agitação de água em um tanque, como adaptado da ASTM C1138M (2012). Contudo, suas conclusões de que a taxa de perda de massa do concreto está fortemente relacionada ao tamanho das partículas, ao ângulo de

impacto e a concentração de sólidos na água são pontos relevantes, alinhados à hipótese da atual pesquisa.

Por fim, Horszczaruk (2004) traz como contribuição a construção de um equacionamento teórico para a erosão do concreto a partir da transmissão da energia necessária para vencer as ligações existentes entre as partículas que compõem o material. As equações propostas são validadas através de processo experimental, com seis séries de traços distintos de concreto, incluindo versões com incorporação de adições e aditivos comuns, como cinza volante e plastificante (Figura 12). Esse autor destaca também a necessidade de simulação do processo de erosão da forma mais próxima ao fenômeno real quanto possível, permitindo não só a comparabilidade dos resultados, como também aprimorando a sua validade.

Figura 12. Decrementos relativos de massa das amostras com a variação da relação água-cimento entre $w/c = 0,4$ e $w/c = 0,6$. Fonte: HORSZCZARUK (2004).



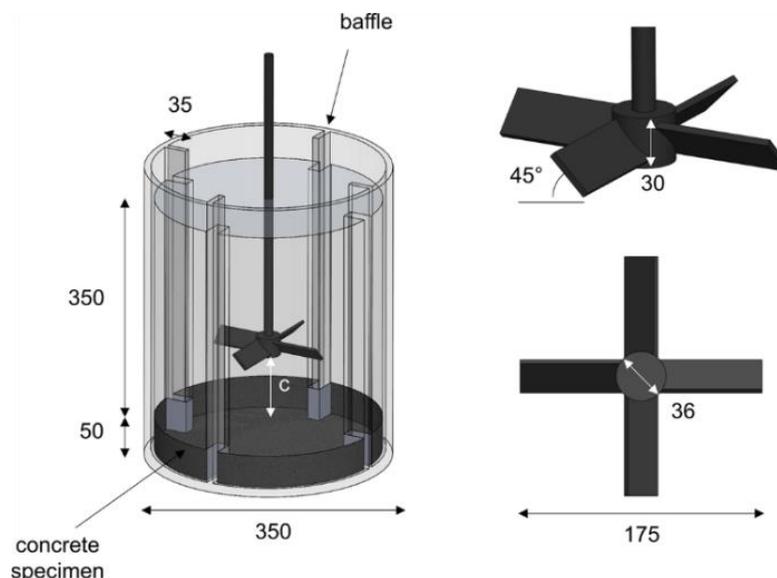
Concordando com as conclusões apresentadas por Liu, et al. (2012), Horszczaruk (2004) indica que uma relação água-cimento inferior leva a menores taxas de perda de massa, portanto, o concreto apresenta maior resistência à abrasão.

Assim, os autores destacados compõem uma base a partir da qual a presente pesquisa se desenvolve, buscando incorporar dois aspectos principais: o acoplamento de observações experimentais com resultados advindos de modelos computacionais; e as limitações das diversas metodologias de ensaio, além de suas correspondências às situações reais de erosão em superfícies hidráulicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho é construída com base na bibliografia reunida, destacando-se os processos descritos por Malavasi *et al.* (2013) e Branco (2018), sendo o primeiro relativo à predefinição dos parâmetros para o equipamento de ensaios de erosão, apresentado na Figura 13, e o segundo relativo à implementação do aparato para a caracterização da resistência do concreto ao processo erosivo. Esse tanque visa simular uma situação de erosão em superfície de concreto hidráulico através do impacto de partículas de areia provocado por um rotor de pás inclinadas. As dimensões do equipamento e as suas razões foram definidas com base na analogia com a ASTM C1138M, norma americana para ensaio de resistência a abrasão do concreto em condição submersa, e o tanque de agitação utilizado por Fokema *et al.* (1994).

Figura 13. Equipamento utilizado nos ensaios de erosão com detalhes do tanque e rotor. Fonte: Acervo pessoal.

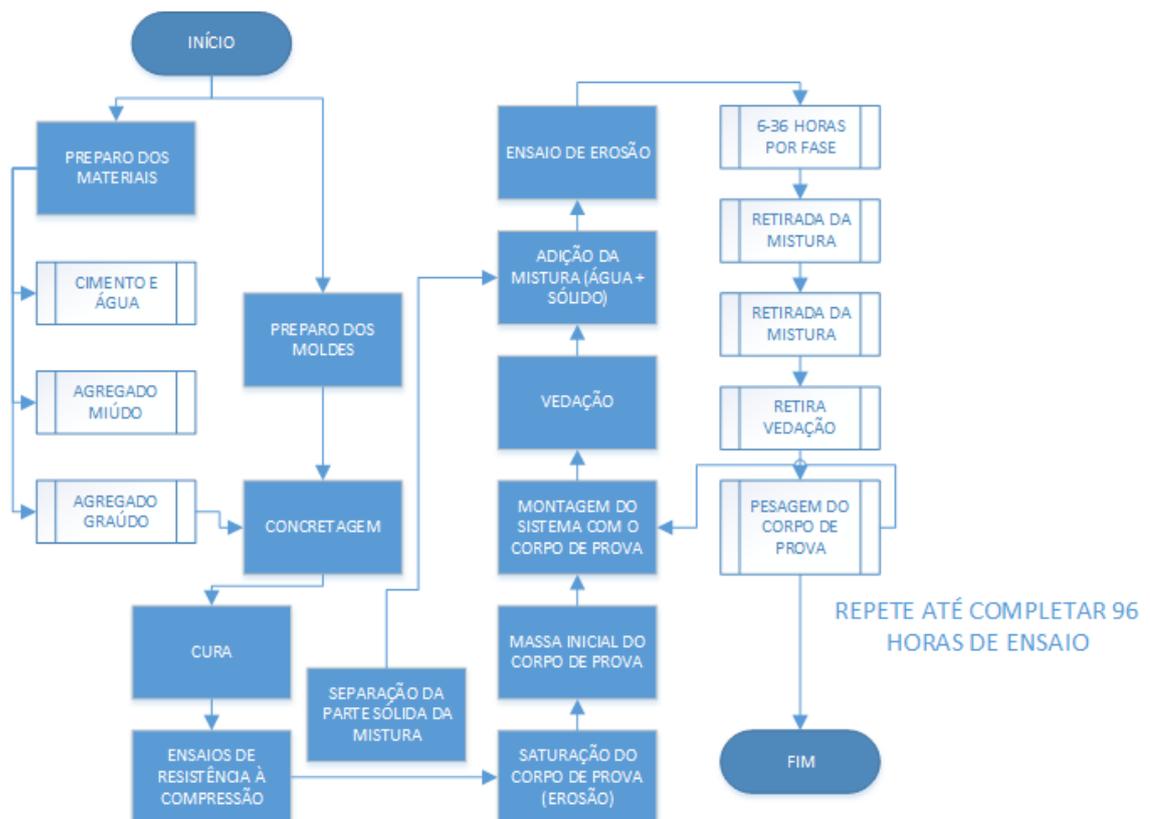


O diâmetro do tanque, T , é de 350 mm, e esse valor é igual à profundidade da água acima da amostra, a qual está posicionada na parte inferior e tem uma altura igual a 50 mm. A largura dos quatro defletores laterais igualmente espaçados é de 35 mm ($T/10$). O rotor tem pás inclinadas a 45° e diâmetro igual a 175 mm

(T/2). O rotor é mantido em rotação por um motor de 4 polos com potência nominal de 370W (WEG-Brasil, modelo W22), comandado por um inversor de frequência (WEG-Brasil, modelo CFW08) o qual pode variar a corrente fornecida de 1,0 a 2,6 A, permitindo variar a velocidade de rotação até 1800 rpm. A velocidade de rotação do rotor, Ω e sua distância até a amostra, c (ou seja, sua distância do espécime de concreto) têm influência significativa no desenvolvimento do fenômeno de erosão e, portanto, precisam ser objeto de análises específicas. A rotação do rotor é expressa em termos de número de revoluções por unidade de tempo, nestes testes sendo determinadas em 600 e 900 rpm. A Figura 13 também mostra um detalhe das pás do rotor com as medidas construídas.

A metodologia experimental, representada no fluxograma da Figura 14, envolve, então, a preparação dos corpos de prova de concreto, a secagem e peneiramento da areia a ser utilizada como parcela sólida na mistura com água e, por fim, o ensaio de erosão propriamente dito no equipamento descrito anteriormente.

Figura 14. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



Os corpos de prova de concreto são moldados segundo a geometria e dimensões adequadas para o tanque de ensaio, possuindo reentrâncias para acoplamento ao fundo. Essas amostras são caracterizadas em função da resistência à compressão axial aos 28 dias e do módulo de elasticidade, em ensaios conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp (Figuras 15 e 16). O traço em massa empregado para as análises é fixado (Tabela 1), utilizando 12,75 kg de cimento, 25,75 kg de agregado miúdo, 29,06 kg de brita e 6,50 L de água, sendo essa quantidade suficiente para compor duas amostras para o ensaio de erosão, dentro das dimensões especificadas para o fundo do tanque, e cinco para os ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

Tabela 1. Traço em massa empregado para amostras de concreto

Material	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Relação água/cimento
Concreto 30 MPa	1	2,02	2,28	0,51

O ensaio de resistência à compressão axial é realizado de acordo com o procedimento descrito nas normas ABNT NBR 5738:2016 e ABNT NBR 5739:2018 e o maior valor obtido a partir da prensa hidráulica é considerado como a carga máxima resistida pela amostra, sendo assim, com a divisão pela área circular do corpo de prova, possível obter a tensão de compressão característica da amostra. Para o módulo de elasticidade, o Laboratório de Materiais de Construção dispõe de extensômetros capazes de capturar a deformação do concreto em função da carga aplicada, permitindo então construir a curva de tensão versus deformação das amostras e assim calcular o módulo de elasticidade associado.

Figura 15. Ruptura de corpo de prova de concreto para determinação da resistência à compressão axial. Fonte: Acervo pessoal.



Figura 16. Corpos de prova após a ruptura em prensa hidráulica. Fonte: Acervo pessoal.



Quanto à parcela sólida da mistura, para esta etapa da pesquisa, foi escolhida a areia de sílica com densidade igual a 2650 kg/m^3 . Utilizam-se então 950g deste material com peneiramento para selecionar partículas com diâmetros característicos entre 1,19 e 2,00 mm. Destaca-se que a massa adotada é de material seco, de forma que uma etapa de secagem do agregado em estufa é realizada antes da seleção granulométrica.

Já o procedimento de ensaio segue a seguinte estrutura: Inicialmente, a

amostra de concreto é pesada usando uma balança (Toledo, modelo PR1X III Fit, faixa de 0,050-15,000 kg, precisão de 0,005 kg) e sua massa inicial é registrada (M_0). Em seguida, essa amostra é posicionada na parte inferior do tanque, sendo o espaço entre a amostra e a parede do tanque preenchida com material selante, no caso, utilizando-se massa plástica para vedação. Em terceiro lugar, despeja-se água limpa no tanque até um nível estático de 350 mm acima da amostra. Adiciona-se a parcela sólida, previamente seca e peneirada, para produzir uma fração de volume sólido igual a 1,0%. Então, depois de posicionar o conjunto do motor do eixo do impulsor respeitando a relação $c/T=0,16$ (relação entre a distância das aletas e a amostra de concreto pelo diâmetro do tanque), o que representa aproximadamente 56mm acima da superfície do corpo de prova, o motor é ligado e a velocidade de rotação é ajustada. Em momentos diferentes do ensaio, fotografa-se a superfície da amostra e afere-se a sua massa, calculando o decremento de massa relativa, $\Delta M / M_0$. Foi convencionado para essa etapa da pesquisa os seguintes intervalos para aferição: 6h, 6h, 6h, 6h, 12h, 24h e 36h, perfazendo um total de 96h. Em cada parada, repetem-se os passos a partir da colocação da amostra no tanque, visando evitar o acréscimo de partículas na mistura devido ao processo de erosão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia apresentada vem sendo desenvolvida no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, com a realização dos ensaios de erosão no equipamento proposto por Malavasi *et al.* (2013).

Quanto à caracterização da resistência mecânica do traço de concreto empregado, foram obtidos os resultados descritos na Tabela 2. Os gráficos de tensão versus deformação obtidos através do ensaio de módulo de elasticidade são também apresentados nas Figuras 17 e 18.

Tabela 2. Resultados da resistência mecânica das amostras de concreto em MPa

Material	Tensão de Compressão (σ_t)	Módulo de Elasticidade (E)
Concreto	29,84	30590

Figura 17. Gráfico de tensão versus deformação do primeiro conjunto de amostras concretado.

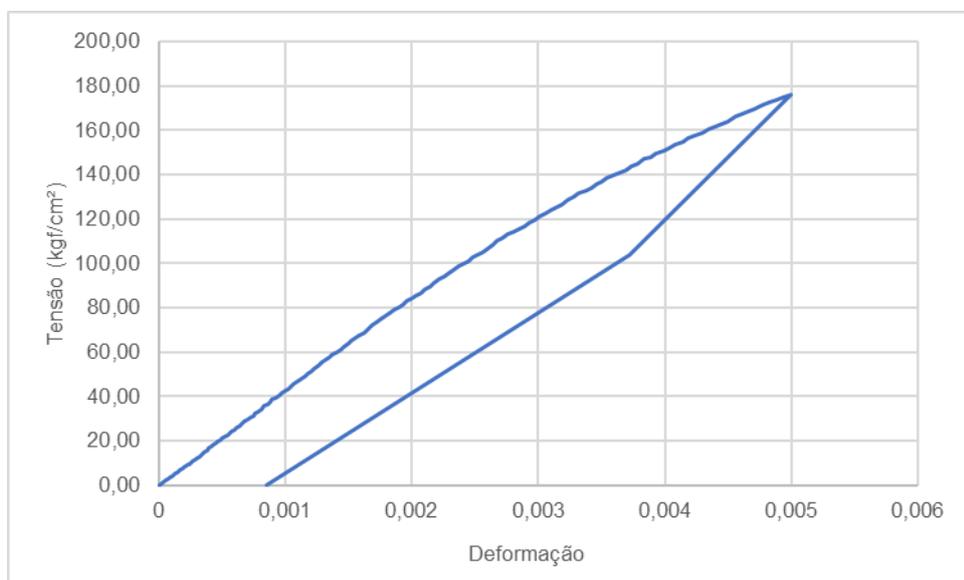
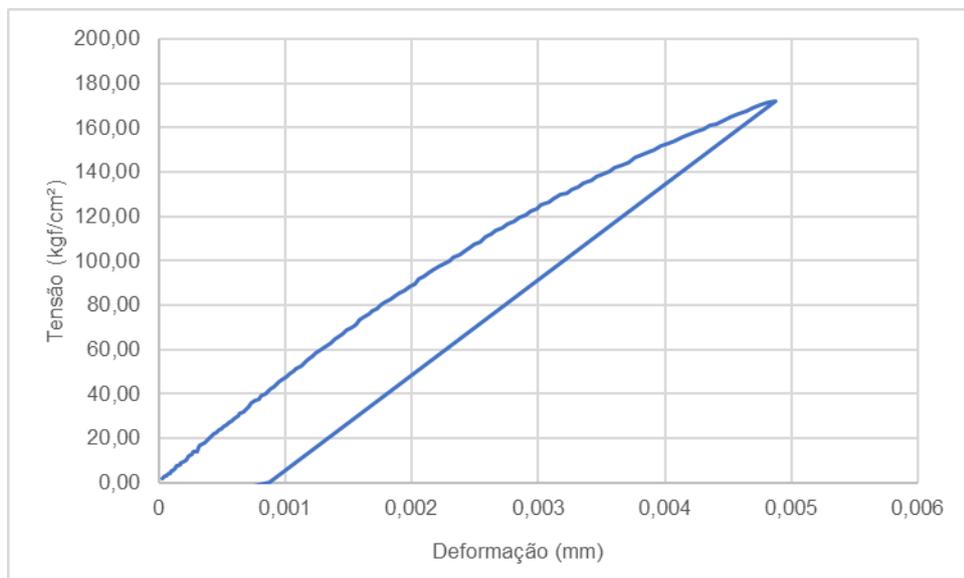


Figura 18. Gráfico de tensão versus deformação do segundo conjunto de amostras concretado.



Detalhando a rotina de ensaios, a Figura 19 apresenta a montagem do equipamento de Malavasi *et al.* (2013), conforme efetuado no trabalho de Branco (2018) e no presente trabalho. Essa montagem foi realizada no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, com apoio da equipe técnica.

Figura 19. Equipamento de ensaio, montagem proposta por Branco (2018) (à esquerda) e montagem do experimento no presente trabalho (à direita). Fonte: Acervo pessoal.



As Figuras 20 e 21 apresentam os equipamentos descritos na metodologia, especificamente as peneiras padrão para seleção dos agregados na faixa de 1,19

mm a 2,00 mm, e balança utilizada para medição da massa da amostra, sempre considerando uma situação saturada, para que a umidade do corpo de prova não afete os resultados de perda de massa.

Figura 20. Equipamentos auxiliares para desenvolvimento do trabalho, a saber, peneiras granulométricas (à esquerda) e balança (centro), dentro Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos. Fonte: Acervo pessoal.



Figura 21. Medição da massa para corpo de prova na situação de saturação inicial. Fonte: Acervo pessoal.



Em termos dos resultados obtidos, as Figuras 22 e 23 apresentam o gráfico de perda de massa relativa das amostras ensaiadas, ou seja, a relação entre a massa aferida em dado instante do ensaio e a massa original da amostra em estado saturado. Já a Tabela 3 detalha todas as aferições realizadas, em quilogramas.

Tabela 3. Medições de massa (em quilogramas) para as amostras ensaiadas.

Amostra	0h	6h	12h	18h	24h	36h	60h	96h
1	11,153	11,142	11,140	11,138	11,128	11,110	11,090	11,080
2	11,100	11,087	11,080	11,075	11,070	11,062	11,040	11,035

Figura 22. Evolução da perda de massa relativa da amostra 1 de concreto 30 MPa para rotação de 600 rpm.

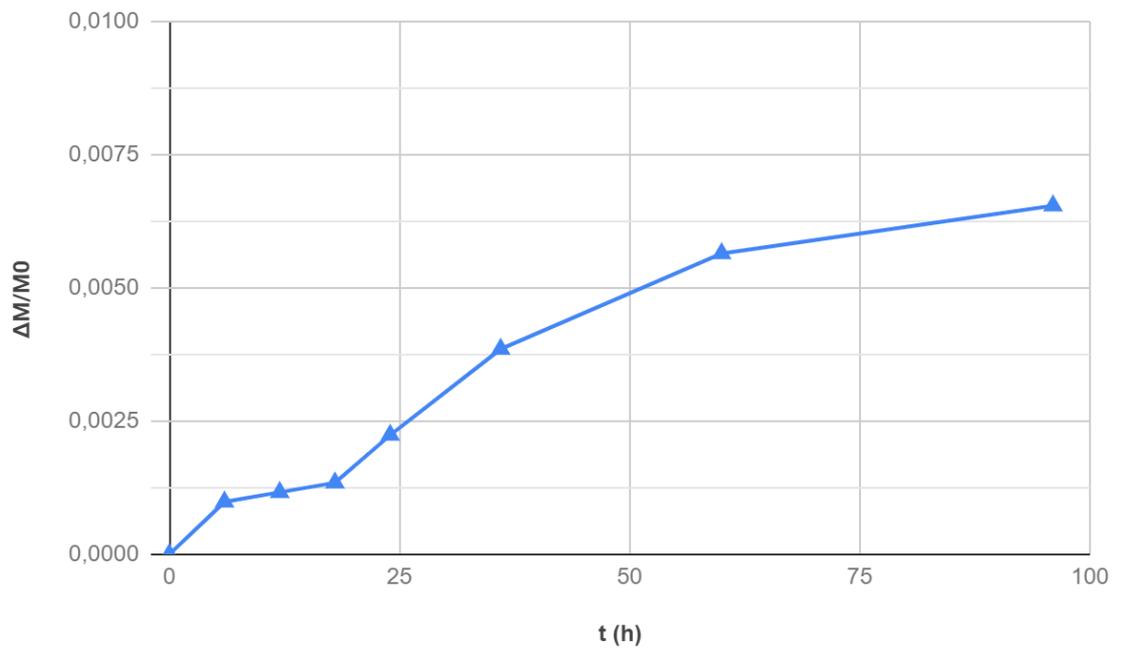
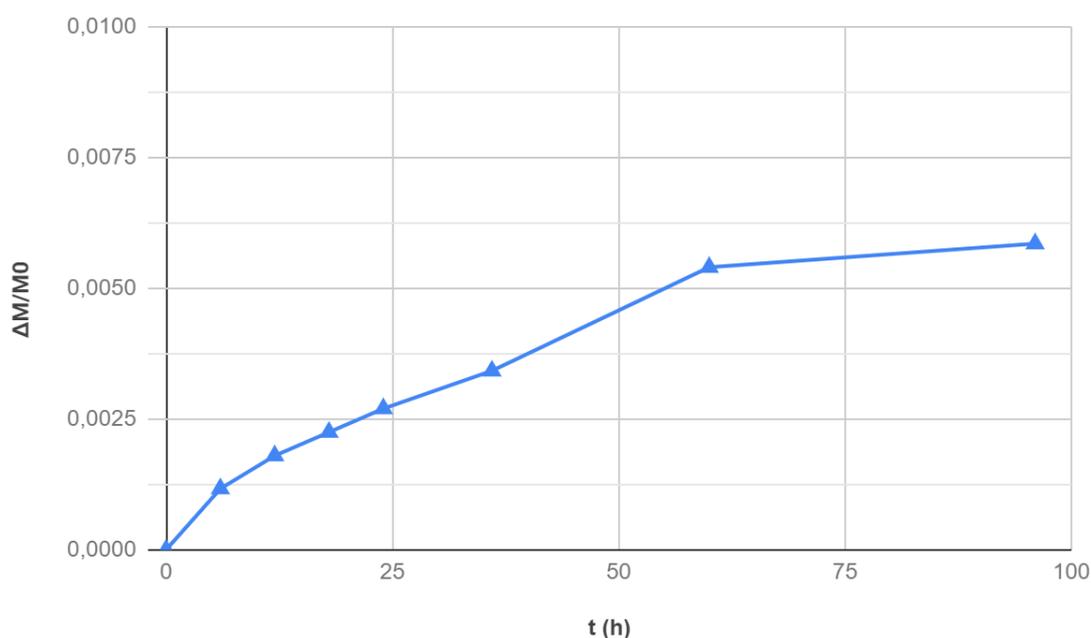


Figura 23. Evolução da perda de massa relativa da amostra 2 de concreto 30 MPa para rotação de 600 rpm.



Os resultados de perda seguem o comportamento esperado, em comparação com os dados apresentados por Branco (2018), conforme pode-se ver nas medições apresentadas para o autor, para uma condição similar (Tabela 4). Para os resultados obtidos a perda de massa relativa, ao final do ensaio, foi de 0,65% e 0,59%, para as amostras 1 e 2, respectivamente, enquanto, para Branco (2018) essa métrica foi de 0,75%, em média.

Tabela 4. Medições de massa (em quilogramas) para amostras de concreto Tipo II. Fonte: adaptada de BRANCO (2018).

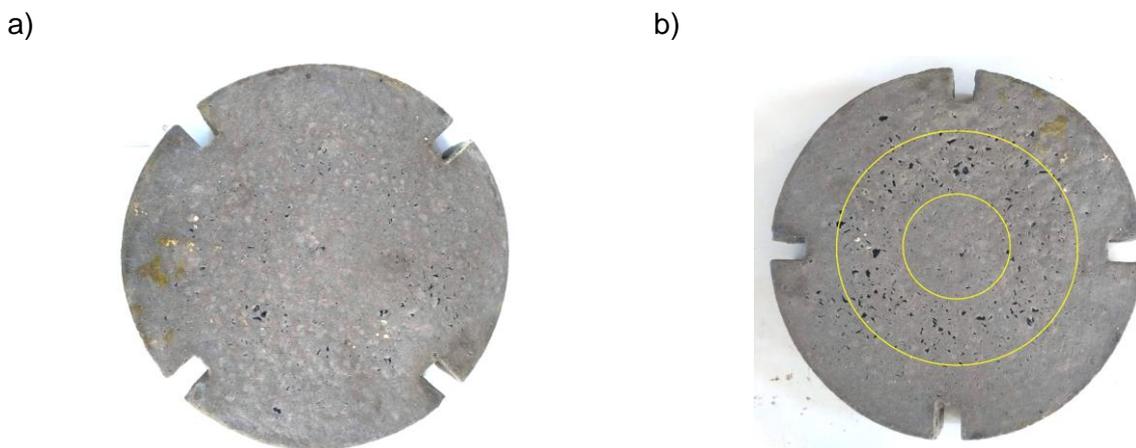
Amostra	0h	6h	12h	18h	24h	36h	60h	96h
C= 0,16T 600RPM	10,490	10,460	10,460	10,450	10,440	10,420	10,420	10,415
C= 0,16T 600RPM	10,845	10,835	10,835	10,835	10,835	10,835	10,820	10,805
C= 0,16T 600RPM	9,670	9,650	9,605	9,600	9,590	9,575	9,565	9,550

Pode-se perceber também que, assim como destacado por Branco (2018), o processo erosivo não se comporta de forma linear, com uma taxa mais elevada de desgaste da superfície no início do ensaio e inferior em estágios mais avançados. Essa propriedade justifica também os maiores intervalos de tempo entre as últimas

medições, em relação às iniciais, visando otimizar o processo de ensaio ao reduzir a necessidade de medições e troca de água e sedimentos.

A comparação visual da evolução das amostras durante as etapas de ensaios também foi feita com as amostras, a partir de fotografias da superfície erodida após a medição da massa. Como pode ser visto na Figura 24, a concentração do processo erosivo se dá na região destacada, alinhado com o que foi apresentado por Branco (2018).

Figura 24. Comparação visual das áreas de concentração do processo erosivo em amostra de concreto 30 MPa a) após 6h; b) após 96h. Fonte: Acervo pessoal.



Quanto às hipóteses propostas inicialmente, pode-se verificar que os dados estão alinhados com o comportamento identificado na literatura, especificamente em acordo com as taxas de perda de massa relativa indicadas por Branco (2018), corroborando com a tese de que a relação água-cimento na composição do concreto impacta diretamente sobre sua capacidade de resistência à erosão por abrasão.

Já em termos das limitações encontradas durante o processo experimental, identificam-se o tempo de execução do ensaio, que, por não ser realizado em 96h corridas, implica numa janela de tempo superior a 1 mês para cada amostra, e a disponibilidade de materiais, como motores e tanques para que se possa efetuar o ensaio de mais de uma amostra simultaneamente. Apesar disso, em linha com o relatado por Malavasi et al (2013) e por Branco (2018), o protótipo se aproxima do comportamento real visto que os resultados se alinham com os conceitos e discussões vistos na revisão bibliográfica, mesmo com uma metodologia sem ser

baseada em esferas de aço ou com a aspersão da mistura água-sólidos sobre a superfície em estudo, que são os modelos comumente empregados.

Por conta das limitações mencionadas, os estudos considerando a variação da concentração de sólidos não puderam ser finalizados, porém, dados os resultados obtidos e as observações efetuadas durante o processo experimental, em acordo com a revisão bibliográfica realizada, existem indícios de que a quantidade de sedimentos carregados pela água mantém relação diretamente proporcional com a perda de massa registrada, ou seja, quanto maior o aporte de sedimentos, maior a tendência da superfície hidráulica ser erodida. Novos ensaios devem ser conduzidos nesse sentido, para aprofundar a investigação acerca dessa variável na abrasão do concreto.

Para o prosseguimento da pesquisa, então, são propostos dois caminhos complementares; primeiramente, o prosseguimento dos ensaios, variando parâmetros como a concentração de sólidos na água e a composição do concreto, de forma a expandir a base de dados e as possibilidades de comparação entre cenários; além disso, conforme tendência na literatura, recomenda-se que seja acoplada a essa análise experimental a modelagem computacional, através de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Figura 25. Exemplo de modelo digitalizado da superfície do corpo de prova. Fonte: Acervo pessoal.



Para o segundo caminho, dentro da presente pesquisa, buscou-se a digitalização em 3D das superfícies das amostras (Figura 25) através de convênio com o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, porém dada a ocorrência de defeitos com os equipamentos de digitalização, essa possibilidade não pôde ser mais bem explorada. Ademais, tem-se buscado em outras faculdades e institutos de pesquisa um novo equipamento de scanner para digitalizar a superfície das amostras ensaiadas, permitindo-se que o estudo da topologia e da distribuição das áreas erodidas seja feita computacionalmente, o que também facilita a integração e comparação com os resultados do CFD.

5 CONCLUSÃO

Com a execução da pesquisa, consegue-se reiterar que a erosão em superfícies hidráulicas de concreto é um problema de grande aplicabilidade prática, sendo comum em estruturas de usinas hidrelétricas e barragens no país, situações nas quais o seu reparo envolve elevados custos, além de complexidade operacional. Na literatura estudada existe uma grande diversidade de estudos relacionados a esse fenômeno, buscando principalmente desenvolver modelos e equações que sejam capazes de reproduzi-lo e prever seus efeitos em superfícies de diversos materiais. Para tanto, os pesquisadores convergem no uso de análises CFD em conjunto com procedimentos experimentais. Pôde-se constatar que, além das superfícies hidráulicas de concreto, existem também diversos estudos de erosão por sedimentos nos demais equipamentos hidráulicos como rotores de bombas, advindos da Engenharia Mecânica, demonstrando a amplitude de escopo do problema em estudo.

Em termos dos resultados obtidos, tem-se o alinhamento dos resultados com os apontamentos de Branco (2018), Horszczaruk (2004) e Liu *et al.* (2012), indicando que amostras com menor relação água-cimento, apresentam maior resistência à erosão, enquanto a concentração de sólidos dá indícios de ser diretamente relacionada à taxa de perda de massa da superfície das amostras.

Dentre os horizontes visualizados para novas pesquisas, novos ensaios serão conduzidos, buscando avançar na variação dos parâmetros, especialmente a concentração de sólidos em água, continuando o estudo da sua influência na abrasão das superfícies e testando a modelagem do comportamento do fenômeno, tanto com modelos teóricos propostos por autores da literatura de referência quanto pelos modelos em fluidodinâmica computacional que vem sendo desenvolvidos pelo grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARABNEJAD, H.; MANSOURI, A.; SHIRAZI, S.A.; MCLAURY, B.S. (2015) Development of mechanistic erosion equation for solid particles. *Wear* 332-333, pp. 1044-1050.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738 Versão corrigida 2016: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [4] ASTM C1138M-12, 2012. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [5] BRANCO, R. L. Development of a new erosion apparatus for gravel materials (2018). Dissertação para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Unicamp. Brasil.
- [6] BRANCO, R. L.; MESSA, G. V.; AZEVEDO, T. M. T.; DALFRÉ FILHO, J. G.; MALAVASI, S. (2017) “Experimentos preliminares sobre o comportamento de diferentes concretos à erosão por mistura água-sólido”. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Florianópolis.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019. “Balanço Energético Nacional 2019: Relatório Síntese/Ano base 2018” – Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em:<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>
- [8] FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear* 3, pp. 87-103, 1960.
- [9] FOKEMA, M.D.; KRESTA, S.M.; WOOD, P.E. (1994). Importance of Using the Correct Impeller Boundary Conditions for CFD Simulations of Stirred Tanks. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 72, pp. 177-183.
- [10] GALVÃO, J.C.A; PORTELLA, K.F.; KORMANN, A.C.M. Abrasive Effects Observed in Concrete Hydraulic Surfaces of Dams and Application of Repair Materials. *Abrasion Resistance of Materials*. InTech Europe, 2012.
- [11] GRAHAM, J.R., 1998. Erosion of concrete in hydraulic structures. Reported by ACI Committee 210, ACI manual practice, Part 1.
- [12] HORSZCZARUK, E. The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures. *Wear* 256, pp. 787-796, 2004.
- [13] LIU, Y.W; CHO, S.W.; HSU, T.H. (2012). Impact abrasion of hydraulic structures concrete. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.20, n. 3, pp. 253-258.
- [14] LIU, Y.W; YEN, T.; HSU, T. H. (2006). Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. *Cement and Concrete Research* 36, pp. 1814-1820.
- [15] LYCZKOWSKI, R.W.; BOUILLARD, J.X. (2002). State-of-the-art review of erosion modeling in fluid/solids systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 28, pp. 543-602.

- [16] MALAVASI, S.; GIANANDREA, V.M.; RIGHINI, A.; DALFRÉ FILHO, J.G. (2013) Desenvolvimento de um aparato experimental para o estudo de erosão causada por mistura água-sólido. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Bento Gonçalves, nov. 2013.
- [17] MANSOURI, A.; ARABNEJAD, H.; SHIRAZI, S.A.; MCLAURY, B.S. (2015) A combined CFD/experimental methodology for erosion prediction. *Wear* 332-333, pp. 1090-1097.
- [18] MESSA, G., BRANCO, R. L., DALFRÉ FILHO, J. G., MALAVASI, S. (2017) A combined CFD-experimental method for abrasive erosion testing of concrete. Submitted to *Journal of Hydrology and Hydromechanics*.
- [19] MESSA, G.; MALAVASI, S. (2018) A CFD-based method for slurry erosion prediction. *Wear* 398-399, pp. 127-145.
- [20] MESSA, G.; MALAVASI, S. (2016) A numerical strategy to account for the effect of self-induced geometry changes in wear estimation. In: *9th International Conference on Multiphase Flow*, ICMF, Firenze, Italy, May 2016.
- [21] TATRO, S. B., 1999. Compendium of Case Histories on Repair of Erosion-Damaged Concrete in Hydraulic Structures. Reported by ACI Committee 210, ACI manual practice.
- [22] WORLD COUNCIL ENERGY, 2017. "Hydropower | 2016" <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Hydropower_2016.pdf> (Aug. 28, 2017).